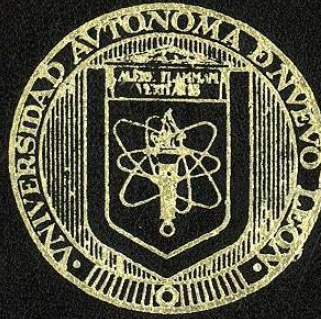


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



GEOMETRIA FRACTAL DE LAS FRONTERAS DE GRANO
DEL ACERO AISI 304 SOMETIDO A DEFORMACION

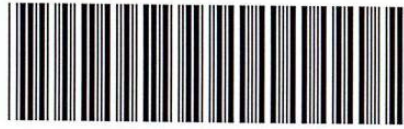
POR

VICTOR MIGUEL TREJO RAMON

TESIS EN OPCION AL GRADO
DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

CD. UNIVERSITARIA

MARZO DE 1996



1020116669

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



GEOMETRIA FRACTAL DE LAS FRONTERAS DE GRANO
DEL ACERO AISI 304 SOMETIDO A DEFORMACION

POR

VICTOR MIGUEL TREJO RAMON

TESIS EN OPCION AL GRADO
DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

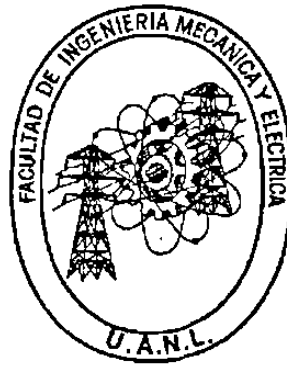
CD. UNIVERSITARIA

MARZO DE 1996

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



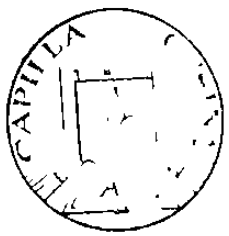
GEOMETRIA FRACTAL DE LAS FRONTERAS DE GRANO
DEL ACERO AISI 304 SOMETIDO A DEFORMACION

Por

VICTOR MIGUEL TREJO RAMON

TESIS EN OPCION AL GRADO
DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES.

San Nicolás de los Garza, N. L. Marzo de 1996



FONDO TESIS

RESUMEN

VÍCTOR MIGUEL TREJO RAMÓN

Fecha de Graduación: Marzo 1996

PROGRAMA DOCTORAL DE LA
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN.

Título del Estudio:
"GEOMETRIA FRACTAL DE LAS FRONTERAS
DE GRANO DEL ACERO AISI 304
SOMETIDO A DEFORMACION".

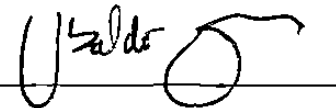
No. de páginas: 44

CANDIDATO PARA EL GRADO DE MAESTRÍA
EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

OBJETIVOS: El objetivo del trabajo consistió en determinar si la Geometría Fractal podría proporcionar elementos nuevos para caracterizar las fronteras de grano de los materiales sometidas a esfuerzos mecánicos. Se seleccionó el acero inoxidable AISI 304 porque es un material que presenta gran ductilidad y permite una considerable deformación plástica de las fronteras de grano antes de llegar a la fractura. En este trabajo, las probetas fueron sometidas a esfuerzos de tensión dentro de su zona plástica y se analizaron muestras en dos direcciones: a) En la dirección del esfuerzo aplicado o dirección longitudinal y b) en la dirección perpendicular a la dirección del esfuerzo aplicado o dirección transversal. En ambos casos se obtuvieron muestras con 0, 10, 20, 30 y 40% de deformación respecto de su longitud original. Acto seguido se determinó por el *Método de la Unidad de Medida (Yardstick)* y con auxilio de un Analizador de Imágenes, la Dimensión Fractal para cada una de las fronteras de grano.

CONCLUSIONES: Fue posible constatar la naturaleza fractal de las fronteras de grano. El estudio parece demostrar que la deformación del material sometido a la acción de esfuerzos externos no se hace exclusivamente a través de la deformación de los límites de grano, sino por otros mecanismos como la creación de nuevas maclas o incrementos de la densidad de las líneas de deslizamiento. Esta es la razón por la cual no se encontró correlación ente las variables analizadas.

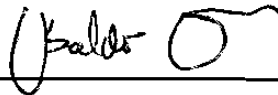
Firma del Asesor:



**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis: GEOMETRIA FRACTAL DE LAS FRONTERAS DE GRANO DEL ACERO AISI 304 SOMETIDO A DEFORMACION, realizada por el Ing. Victor Miguel Trejo Ramón sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales.

El Comité de Tesis



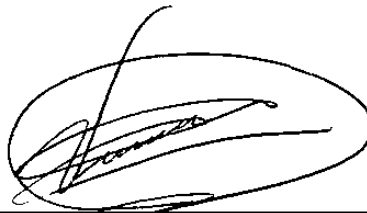
Dr. Ubaldo Ortiz Mendez
Asesor



Dra. Patricia Rodriguez L.
Coasesora



Dr. Juan A. Aguilar Garib
Coasesor



Vo. Bo.
M. En C. Roberto Villarreal Garza
División de Estudios de Postgrado

San Nicolás de los Garza, N.L. Marzo 6 de 1996

DEDICO ESTA TESIS:

A MI ESPOSA Y A MIS HIJOS

Expreso mi agradecimiento:

Al Dr. Ubaldo Ortiz Mendez Asesor de la Tesis
y al M. en C. Moisés Hinojosa.

A la Dra. Patricia Rodríguez López y al Dr. Juan A. Aguilar Garib
por la revisión de la Tesis

Al Dr. Oscar Flores R. y al Dr. Rafael Colás
por sus valiosas sugerencias

Al Ing. Antonio Gonzalez T. y al M. en C. Alberto Roffe S.
por su invaluable apoyo

INDICE

Prólogo.....	1
Cap. 1 Introducción.....	2
Cap. 2 La Geometría Fractal	
2.1 Introducción.....	3
2.2 La Dimensión de Hausdorff.....	4
2.3 Autosimilitud.....	4
2.4 Autoafinidad.....	7
Cap. 3 La Dimensión Fractal	
3.1 Introducción.....	9
3.2 Recubrimiento de Mandelbrot-Richardson.....	9
3.3 Recubrimiento de Minkowski.....	10
3.4 Celdas de Conteo.....	11
3.5 Análisis de Imágenes.....	12
Cap. 4 El Acero AISI 304	
4.1 Aceros Inoxidables.....	14
4.2 Aceros Austeníticos.....	14
4.3 El Acero AISI 304.....	14
4.4 Composición Química.....	15
4.5 Microestructura.....	16
Cap. 5 Procedimiento Experimental	
5.1 Elaboración de las Probetas.....	16
5.2 Deformación de las Probetas.....	17
5.3 Montaje de las Muestras.....	17
5.4 Ataques Químicos	17
5.5 Digitalización de Imágenes.....	18
5.6 Selección de las fronteras de grano.....	18
5.7 Determinación del Perímetro.....	19
5.8 Cálculo de la Dimensión Fractal.....	19

Cap. 6 Resultados	
6.1 Tablas de Perímetros.....	21
6.2 Tabla de valores de Dimensión Fractal.....	33
6.3 Diagramas de Dispersión.....	34
Cap. 7 Análisis de Resultados	
7.1 El Coeficiente de Correlación r	35
7.2 Valor de r para una Tendencia Lineal.....	36
7.3 Valores de r para una tendencia lineal con cambio de Pendiente.....	38
7.4 Otro tipo de tendencia.....	39
Cap. 8 Conclusiones	40
REFERENCIAS	41
BIBLIOGRAFIA	42
Indice de Figuras	45
Indice de Tablas	46

PROLOGO

El interés de trabajar en este campo fue el de conocer y profundizar los conceptos relacionados con esta nueva geometría: la Geometría Fractal. Esta geometría proporciona un modelo teórico que ha resultado muy eficaz para estudiar la naturaleza compleja de muchas estructuras naturales que aparentemente tienen una complejidad extraordinaria, pero que poseen una misma regularidad geométrica: la invarianza bajo escala. Esto significa que si se analizan estas estructuras a distintas escalas, se encuentran una y otra vez los mismos elementos básicos. En cambio la geometría euclidiana se suscribe a objetos de forma idealizada, tales como: puntos, curvas, superficies, cubos, etc., con dimensiones de 0, 1, 2 y 3, respectivamente. Asociado con cada dimensión está la medida del objeto, como la longitud de una línea, el área de una superficie y el volumen de un cubo. Estas medidas son invariantes y permanecen independientes de la escala de medición implementada.

La aplicación de la Geometría Fractal al estudio de estructuras naturales de alta complejidad abre nuevos espacios de investigación en todos los campos de la ciencia y ya ha probado ser una herramienta de caracterización muy eficaz en varios campos de la ciencia de los materiales. El deseo de descubrir nuevos parámetros de caracterización de los materiales, me llevó a estudiar las fronteras de grano del acero inoxidable AISI 304 sometido a diferentes grados de deformación.

Agradezco a las autoridades universitarias y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología la oportunidad que me brindaron para realizar este estudio.

Capítulo 1

INTRODUCCION

En 1949 H. Kostron al tratar de medir el área y la densidad de las fronteras de grano de una microestructura de aleación de aluminio para varias ampliaciones, encontró ciertas irregularidades en las medidas y consignó estas experiencias en una publicación¹. La Geometría Fractal no se presentaría hasta 1967² y este hecho aparece como la primera observación de un fenómeno fractal en el campo de los materiales. A la fecha ha demostrado ser una herramienta de caracterización muy útil en los campos de superficies de fractura³, microestructuras dendríticas⁴ y precipitados⁵. Observaciones recientes han demostrado que límites de grano de perfil aserrado de alta irregularidad, mejoran la resistencia mecánica a alta temperatura de ciertos materiales, encontrándose correlación numérica entre la dimensión fractal y la resistencia a la termofluencia⁶

El objetivo de este trabajo es determinar si las fronteras de grano de un material que permita grandes deformaciones plásticas por la aplicación de esfuerzos mecánicos de tensión, tiene la tendencia a cambiar los valores de dimensión fractal para diferentes grados de deformación. Es decir, determinar si existe alguna correlación numérica entre la dimensión fractal y la deformación por tensión. Se seleccionó el acero inoxidable AISI 304 porque es un material que presenta una gran ductilidad y permite una considerable deformación plástica de las fronteras de grano antes de llegar a la fractura. En este trabajo, las probetas fueron sometidas a esfuerzos de tensión dentro de su zona plástica y se analizaron muestras en dos direcciones: a) En la dirección del esfuerzo aplicado o dirección longitudinal y b) en la dirección perpendicular a la dirección del esfuerzo aplicado o dirección transversal. En ambos casos se obtuvieron muestras con 0, 10, 20, 30 y 40% de deformación respecto de su longitud original. Acto seguido se determinó por el *Método de la Unidad de Medida (Yardstick)* y con auxilio de un Analizador de Imágenes, la Dimensión Fractal para cada una de las fronteras de grano.

Capítulo 2

LA GEOMETRIA FRACTAL

2.1 INTRODUCCIÓN.

La Geometría Fractal fue presentada por Benoit Mandelbrot en 1967², cuando demostró que para unidades decrecientes de medición, la longitud de una línea costera no converge sino por el contrario, se incrementa monotónicamente. Al graficar la longitud L como una función de la unidad de medida ϵ en una gráfica log-log, encontró una relación simple de la forma $L \approx \epsilon^{1-D}$. Finalmente llegó a la conclusión de que el número real D asociado con cada línea costera representaba su *dimensión*. Este estudio marcó el origen de la geometría fractal la cual ha encontrado numerosas aplicaciones en la caracterización y descripción de los fenómenos desordenados e irregulares que se presentan en la ciencia y la ingeniería.

La Geometría Fractal se expresa por medio de reglas e instrucciones que requieren la ayuda de un computador para convertirse en formas y estructuras. Esta nueva geometría establece, como se dijo antes, que muchas estructuras naturales por ejemplo, las nubes, las montañas, las líneas costeras, las superficies de fractura de los materiales, entre otros, que en apariencia manifiestan una enorme complejidad, poseen en realidad una misma regularidad geométrica: la invarianza bajo escala. Si estas estructuras se analizan a distintas escalas, se encuentran una y otra vez los mismos elementos básicos. Su interrelación a distintas escalas encuentra una descripción matemática apropiada mediante el concepto de *dimensión fractal*. A diferencia de la dimensión ordinaria, la dimensión fractal no es generalmente un número entero, sino una fracción. De ahí que Mandelbrot impusiera el nombre de *fractal*, que es derivado del verbo latino *frangere*, que significa romper.

Existen varias definiciones de dimensión fractal, pero todas parten de la definición de Hausdorff⁷ descrita a continuación en su forma más simple.

2.2 LA DIMENSION DE HAUSDORFF

La longitud L de una línea podemos medirla cortándola en pequeñas porciones de longitud ε y luego sumar el número de unidades, en la forma

$$L = \sum \varepsilon^1$$

De manera similar la superficie de una área A se puede medir dividiendo la superficie en pequeños cuadros de tamaño $\varepsilon \times \varepsilon$ y sumando el número de unidades como

$$A = \sum \varepsilon^2$$

Donde podemos notar que los exponentes 1 y 2 corresponden a la dimensión de los objetos. La propiedad única de estas medidas, longitud y área, es que son independientes de la unidad de medida ε y en el límite de $\varepsilon \rightarrow 0$ estas medidas se mantienen finitas y diferentes de cero. Este concepto de medida euclidiana y dimensión se puede generalizar a la forma

$$M = \sum \varepsilon^D$$

Donde M es la medida y D es un número real. El exponente D es la dimensión de un objeto y se consigue que la medida M sea independiente de la unidad de medida ε .

2.3 AUTOSIMILITUD

Si consideramos una línea unidimensional de longitud unitaria como se muestra en la figura 2.1. Cada segmento de la línea, de tamaño $1/m$, es similar a la línea total y requiere de una magnificación de m para ser una réplica exacta de la línea total. Como la longitud de la línea permanece independiente de $1/m$, se sigue que el número de unidades es $N \sim m$.

Ahora, consideremos un cuadrado que tenga sus lados de longitud unitaria. Cada pequeño cuadrado de longitud $1/m$ es similar al cuadrado total y requiere de una magnificación de m para ser una réplica exacta del cuadrado total. Sin embargo el número de pequeños cuadrados del total es $N \approx m^2$. En general, para un objeto de dimensión D , en donde

$$N \sim m^D$$

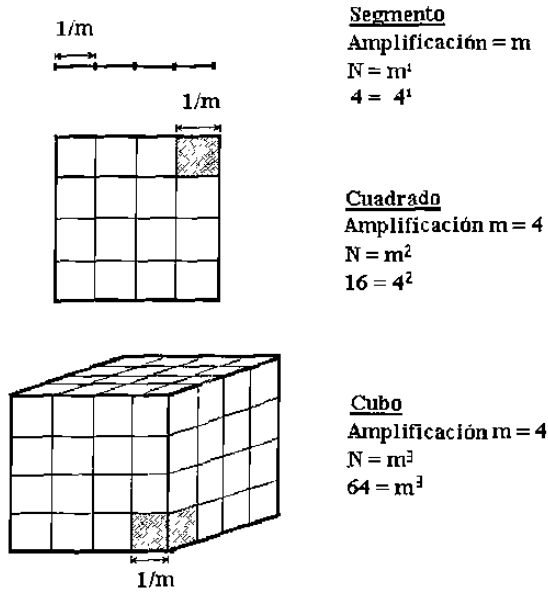


FIG. 2.1
El concepto intuitivo de dimensión de un objeto puede expresarse en una forma muy sencilla bajo la ley de escala $N = m^D$

la dimensión del objeto viene a ser

$$D = \frac{\log N}{\log m}$$

que es la definición de dimensión fractal, la cual está basada en la autosimilitud de un objeto y se denomina la dimensión de similitud⁸.

CURVAS MATEMATICAS AUTOSIMILARES. Existen Curvas Matemáticas cuya principal característica es la autosimilitud. Empezaron a ser desarrolladas a fines del siglo pasado. Estas curvas actualmente denominadas *objetos fractales matemáticos* poseen propiedades únicas muy importantes:

- Son continuas pero no son diferenciables. Esta indiferenciabilidad se debe al hecho de que si la curva es repetidamente amplificada, más y más detalles de la curva aparecen. Esto implica que una línea tangente no puede ser dibujada en ningún punto, y de esta manera la curva no puede ser diferenciable.
- Son exactamente autosimilares. Esto es porque si una pequeña porción de la curva es apropiadamente amplificada, será una réplica exacta de la curva total.

- Si la curva mantiene su *irregularidad* en un gran número de escalas, la dimensión de la curva se mantiene constante en todas las escalas. El valor de la dimensión es generalmente fraccionaria.

El Conjunto de Cantor. Esta curva fue desarrollada por George Cantor en 1883. Para construirla trazamos primero un segmento de línea recta, al cual le removemos en el siguiente paso sobre la parte media una tercera parte de la longitud del segmento original. (Fig. 2.2) Luego para cada segmento restante procedemos a repetir el proceso reiteradamente, dándonos como resultado final el conjunto de Cantor.

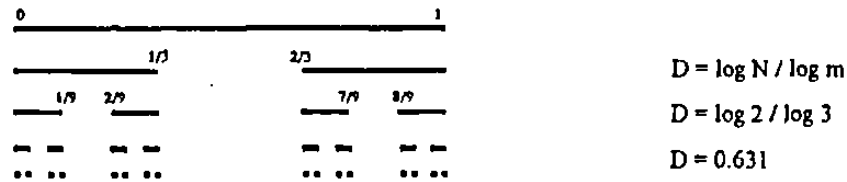


Fig. 2.2 Construcción del Conjunto de Cantor

La curva de Koch. Desarrollada por H. Von Koch en 1904. El primer paso en su construcción consiste en cortar una línea recta en tres partes y reemplazar la porción media por dos segmentos de igual longitud. En los subsecuentes pasos, cada línea recta es partida en tres partes y su porción media de cada segmento es reemplazada por dos partes. (Fig. 2.3) Si esta recursión se hace de manera infinita, obtenemos lo que se llama la curva de Koch.

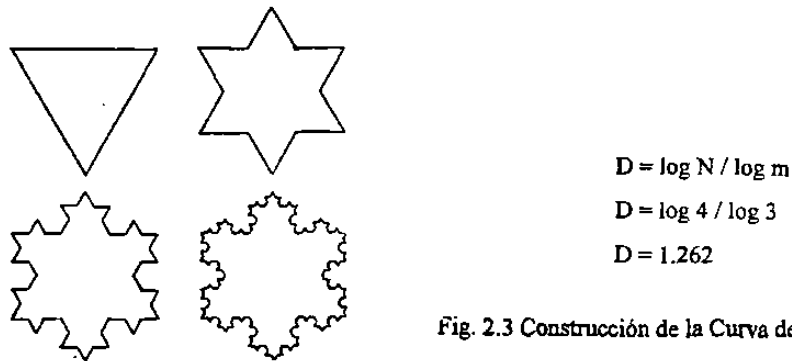


Fig. 2.3 Construcción de la Curva de Koch

El Triangulo de Sierpinski. Fue desarrollado por el matemático polaco W. Sierpinski en 1916. Empezamos con un triángulo Equilátero. Cuando removemos el triángulo interior central como se ilustra en la figura 2.4, permanecen tres

triángulos equiláteros sin cambio. Si volvemos a repetir el proceso para cada triángulo resultante, obtenemos lo que se denomina el triángulo de Sierpinski.

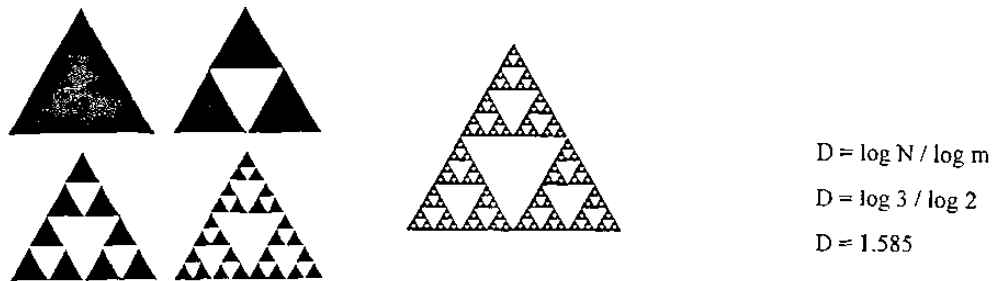


Fig. 2.4 Construcción del Triángulo de Sierpinski

AUTOSIMILITUD ESTADÍSTICA A diferencia de los objetos matemáticos, los objetos y fenómenos naturales con característica fractal poseen autosimilitud estadística. Como ejemplo tenemos las líneas costeras, que fueron los primeros de los objetos naturales analizados. La autosimilitud estadística implica que la distribución probabilística de una pequeña parte de un objeto será congruente con la distribución probabilística del objeto total, siempre que la parte pequeña sea amplificada apropiadamente.

El Movimiento Browniano. El ejemplo clásico de un fenómeno natural fractal con autosimilitud estadística es el movimiento Browniano. Es un movimiento molecular que se observa cuando un grano de polen o de polvo en suspensión en un fluido se ve sometido al bombardeo continuo de las moléculas de éste. Este movimiento fue primeramente observado por Robert Brown a principios de 1800. Cuando muchas moléculas chocan simultáneamente con la partícula en una misma dirección, se produce una deflexión observable de su trayectoria. Observaciones de este movimiento a diferentes magnificaciones revelan que la complejidad de la trayectoria, quebrada e irregular, se repite indefinidamente (Fig. 2.5). Fue éste uno de los primeros fenómenos naturales que Mandelbrot identificó con propiedad autosimilar.

2.4 AUTOAFINIDAD

No todos los objetos fractales son autosimilares, pues esto implica igual magnificación en todas direcciones. Hay objetos en la naturaleza que tienen un escalamiento desigual en diferentes direcciones. Por ejemplo, considérese la

función $B(t)$ que representa la localización x de una partícula en movimiento browniano, como una función del tiempo t , como se muestra en la figura 2.5.

Si esta curva se amplifica repetidamente, más y más detalles continúan apareciendo. Sin embargo como el tiempo t y la posición B son entidades físicamente distintas, usualmente se escalan en forma diferente. De esta manera la función $B(t)$ no es autosimilar, sino *autoafín*¹¹. Este concepto puede ser mostrado estadísticamente por la función Browniana la cual sigue la relación:

$$\bar{B}(\gamma t) = \gamma^{1/2} \bar{B}(t) \quad \text{Suponiendo } B(0) = 0$$



Fig. 2.5 Gráfico de la posición x contra tiempo de una partícula en movimiento Browniano.

donde $\bar{B}(\gamma t)$ es la distribución probabilística de B . Esta ecuación muestra que si el tiempo t se escala por γ , entonces la posición de la partícula B se escala por $\gamma^{1/2}$. Como el tiempo y la posición se escalan de forma diferente, la función Browniana $B(t)$ es estadísticamente *autoafín*.

Otro ejemplo importante de *autoafinidad fractal* es la generalización del movimiento browniano a partir de las ecuaciones denominadas *funciones Brownianas fraccionales* o fBm¹², estas ecuaciones son de la forma:

$$\langle (B(t_1) - B(t_2))^2 \rangle \sim |t_1 - t_2|^{2H}$$

en donde los símbolos $\langle \rangle$ indican valores promedio. Esta ecuación es muy importante pues se aplica al estudio de las superficies ásperas o de fractura, cuya naturaleza es *autoafín*¹³.

Capítulo 3

DIMENSION FRACTAL

3.1 INTRODUCCION

La dimensión fractal es la medida que sirve para cuantificar qué tan densamente los objetos fractales llenan el espacio métrico que ocupan. Cuanto mayor es la dimensión de un objeto fractal, tanto mayor es la probabilidad de que una región dada del espacio contenga una porción del objeto fractal. Existen varias definiciones del concepto de dimensión fractal, sin embargo todas derivan en mayor o menor medida de un trabajo publicado por Felix Hausdorff en 1919⁷.

Entre los métodos más importantes para determinar la dimensión fractal se encuentran los denominados *métodos de recubrimiento*. Tienen como principio reemplazar un conjunto irregular objeto de análisis, por otro conjunto más operable y que lo recubra completamente. De los varios métodos de recubrimiento existentes, dos son de particular interés: a) El método de Mandelbrot-Richardson, y el b) Método de Minkowski.

3.2 RECUBRIMIENTO DE MANDELBROT- RICHARDSON.

Cuando el análisis se realiza en el espacio de dos dimensiones, el método de Mandelbrot-Richardson¹⁰ consiste en recubrir el objeto analizado por círculos de radio ρ con sus centros en los puntos de la línea analizada. Esta línea es reemplazada entonces por un conjunto de círculos de manera que cada punto sobre la línea es recubierto por al menos uno de los círculos.

L. Richardson observó que la longitud de las línea costeras varían de acuerdo con la ley:

$$\text{Log } L_p = h \text{ Log } R$$

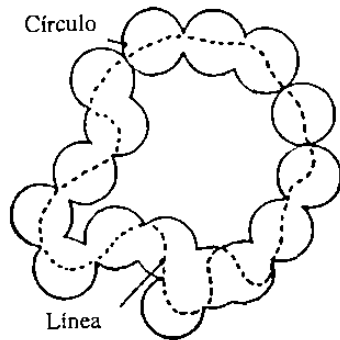


Fig. 3.1 Recubrimiento de Mandelbrot-Richardson

donde R es la unidad o compás de medición para medir la línea costera, y L_p es la longitud total medida con unidades de longitud R . El valor más pequeño de R , proporciona un valor mayor de L_p , y mientras más irregular es la línea costera, más inclinación tendrá la pendiente de la curva. La ley empírica de Richardson puede ser puesta de la forma:

$$\text{Log } L_p = (1-D)\text{Log } R$$

donde D representa la *Dimensión fractal* de la línea.

3.3 RECUBRIMIENTO DE MINKOWSKI

El método de *recubrimiento* de Minkowski⁶ consiste en reemplazar cada punto de la línea por un círculo de radio R y considerar la banda resultante de todos los círculos.

Se obtiene de esta manera una cinta de espesor $2R$. La longitud aproximada de la línea analizada puede ser obtenida dividiendo el área de la banda resultante por el diámetro del círculo $2R$:

$$L_p = \frac{A \cup (\text{círculos } R_i)}{2R}$$

La dimensión se puede calcular como en el método Mandelbrot-Richardson. Independientemente de la forma de recubrimiento seleccionado, la dimensión fractal se define satisfactoriamente sólo si $\text{Log } L_p = f(\text{Log } R)$ es una línea recta.

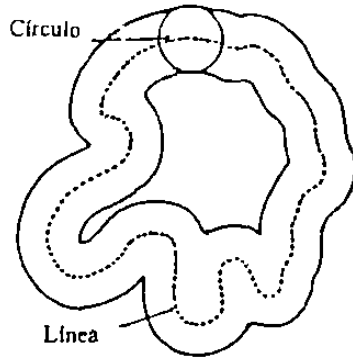


Fig. 3.2 Recubrimiento de Minkowski

3.4 CELDAS DE CONTEO

Este método, que es equivalente al método de Minkowski está basado en la cuantización del espacio en el que está inmerso el objeto fractal. Está definido por una secuencia decreciente ε_k tendiendo a cero gradualmente. Una condición suficiente es que $\ln \varepsilon_k / \ln \varepsilon_{k+1}$ tienda a 1. El conjunto E puede ser cubierto por una malla cuadrada, donde la longitud de la subdivisión sería ε_k y el número de retículos $\Omega(E, \varepsilon_k)$ que interceptan a la curva pueden ser calculados. Matemáticamente la dimensión está dada por la ecuación

$$\Delta_B(E) = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\ln \Omega(E, \varepsilon_k)}{\ln(1/\varepsilon_k)}$$

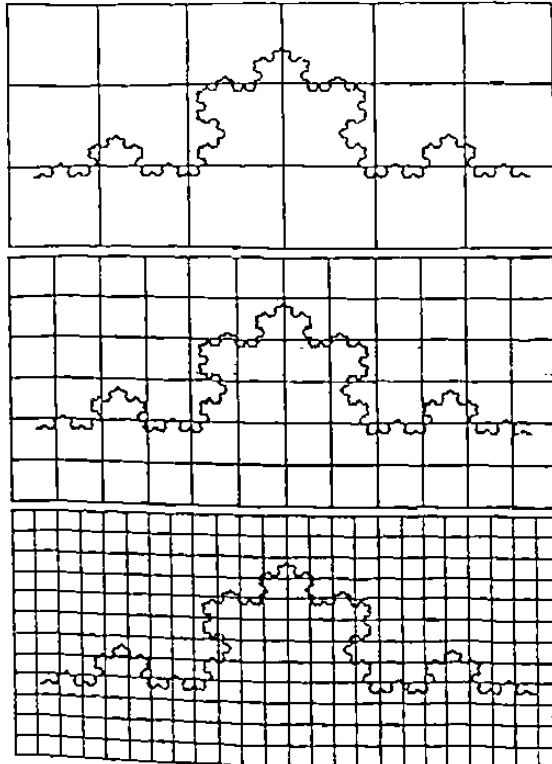


Fig. 3.3

La Dimensión Fractal puede caracterizarse por medio del número de cuadros que recubren el objeto fractal en cada una de las mallas. La relación entre N y el valor del lado ε que corresponde al tamaño del cuadro de cada malla se representan en una gráfica doblemente logarítmica. Los puntos correspondientes se sitúan aproximadamente sobre una recta cuya pendiente expresada por la relación $\log N / \log(1/\varepsilon)$ nos proporciona el valor de la Dimensión Fractal.

donde el valor se estima a partir de la pendiente de la línea que se obtiene al graficar los puntos $(\ln(1/\varepsilon_k), \ln \Omega(E, \varepsilon_k))$. (Fig. 3.3)

3.5 ANALISIS DE IMAGENES

Las dimensiones por recubrimiento descritas anteriormente, pueden ser determinadas mediante Análisis de Imágenes cuando el objeto estudiado está en el espacio bidimensional. Este fue el método que se utilizó en este trabajo. El principio consiste en transformar una imagen proveniente del microscopio en una señal eléctrica susceptible de ser procesada. Una cámara de televisión conectada al microscopio barre con un haz electrónico la imagen línea por línea detectando los niveles de gris en un rango de 0 a 63, en donde el 0 corresponde al negro y el 63 al blanco. Cada línea se divide en segmentos denominados píxeles y se detecta el nivel de gris sobre cada uno de ellos asociando una señal eléctrica con una intensidad acorde al nivel de gris detectado. Esta señal analógica se convierte en una señal digital a través de un computador, ya que los tonos intermedios para los 64 niveles también son tomados en cuenta. Se tiene entonces una imagen que línea por línea estará compuesta por segmentos en 256 niveles de gris. El proceso de calibración convierte los píxeles en unidades de longitud.

Es posible distinguir dos tipos de análisis: a) de lazo cerrado dentro del campo visual, por ejemplo fronteras de grano, y b) de líneas abiertas donde únicamente la intersección dentro del marco se toma en cuenta, por ejemplo en trayectorias de fractura. En el primer caso, toda la curva es objeto de medición y el parámetro utilizado es el *perímetro*.

Capítulo 4

EL ACERO AISI 304

4.1 LOS ACEROS INOXIDABLES.

La principal característica de los aceros inoxidable es su resistencia a la corrosión. Esto se debe a la presencia de al menos un 12% de cromo y frecuentemente un bajo contenido de carbono. El cromo por sí mismo no cambia la estructura ferrítica del acero, pero cuando el contenido de níquel es mayor del 7% la estructura cristalina del acero se convierte en austenítica. Los cuatro principales grupos de aceros inoxidable son: a) Los aceros austeníticos, b) los ferríticos, c) los martensíticos, y d) los austenítico-ferríticos.

4.2 LOS ACEROS AUSTENÍTICOS.

Un acero austenítico comúnmente contiene de 18 a 30 % de Cr., de 8 a 20% de Ni y entre 0.03 a 1% de Carbono. Se llama austenítico porque su estructura se parece a la del hierro tipo γ en todas las temperaturas normales de tratamiento térmico. La presencia del Ni que posee una estructura FCC, permite al acero obtener una estructura FCC a temperatura ambiente. Son esencialmente no magnéticos y se pueden trabajar fácilmente en caliente o en frío. El trabajo en frío les desarrolla una amplia variedad de propiedades mecánicas. El azufre está presente en los aceros austeníticos como impureza o como un agregado para mejorar sus condiciones de maquinabilidad, usualmente a un nivel de 0.3%. Como la solubilidad del azufre en los aceros inoxidable es de menos de 0.01% a temperatura ambiente, éste se presenta como sulfuros. Son predominantemente sulfuros de Mn, pero también pueden ser de Cromo u otros elementos.

4.3 EL ACERO AISI 304

El Acero Inoxidable AISI 304 es un acero austenítico y pasa por un proceso de templado para asegurar una máxima resistencia a la corrosión y restablecer su máxima suavidad y ductilidad que se pierde con el trabajado en frío. Durante el

templado los carburos que disminuyen marcadamente la resistencia a la corrosión intergranular, se disuelven. La temperatura del templado debe estar entre los 1010 y 1120 grados Celsius y el enfriamiento debe ser rápido, preferentemente con agua si las condiciones de distorsión lo permiten. Este acero tiene un coeficiente de distorsión térmica alrededor de un 50% mas alto que el carbón y otros aceros aleados.

4.4 COMPOSICION QUIMICA

El Acero AISI 304 que fué objeto de nuestro estudio tiene la Composición Química siguiente:

Composición Química Por ciento en Peso

Cromo	Niquel	Manganeso	Carbono
19.94	8.55	1.3	0.06

Las probetas de Acero AISI 304 fueron sometidas a esfuerzos de tensión y se consiguió una deformación máxima del 55% respecto de la longitud original,

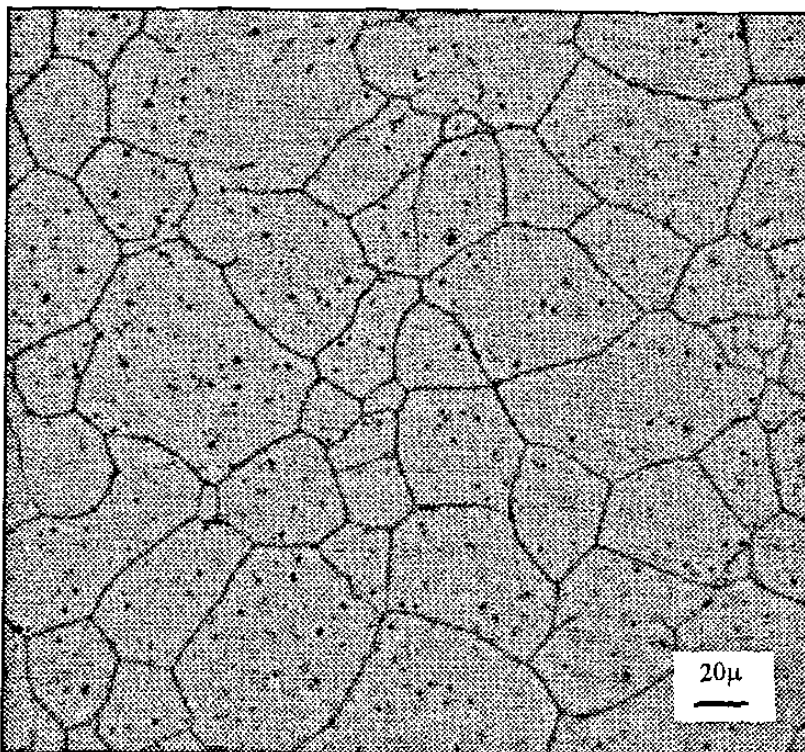


Fig. 4.1 Microestructura a 100x sin deformar en la dirección transversal al rolado en frío. Fué atacado electroquímicamente con ácido nítrico para realzar preferentemente las fronteras de grano. Los sulfuros están presentes como pequeños puntos en toda la microestructura.

antes de experimentar una fractura dúctil. Las muestras fueron atacadas electroquímicamente en una solución de ácido nítrico y agua en una proporción de 60 y 40 % respectivamente, con el objeto de que no apareciesen maclas de recocido y líneas de deslizamiento y solamente se revelaran los límites de grano. Los detalles se describen en la Sección 5.4 de Procedimiento Experimental.

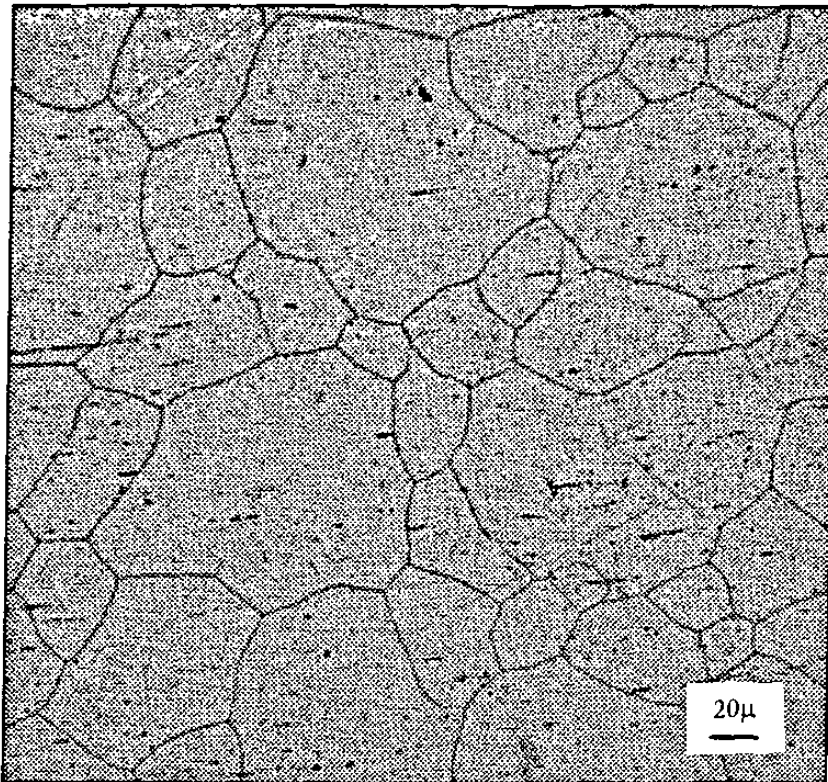


Fig. 4.2 Microestructura a 100x sin deformar en dirección paralela al rolado en frío. Los sulfuros aparecen como pequeñas agujas horizontales. Nótese que los granos están sin deformación debido al tratamiento térmico final.

4.5 MICROESTRUCTURAS

En la Fig. 4.1 y 4.2 se presentan las microestructuras a 100x de las muestras sin deformar en las direcciones longitudinal y transversal. Se muestran las fronteras de grano austeníticas y los sulfuros presentes en forma de pequeños puntos negros para la muestra en dirección transversal con respecto a la dirección del rolado en frío y como pequeñas agujas alargadas en la dirección longitudinal, que corresponde a la dirección paralela a la dirección del rolado en frío. También se puede apreciar en las microestructuras, que los granos están sin deformar debido al proceso de recristalización provocado por el tratamiento térmico.

Capítulo 5

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

A continuación se describe paso a paso cada una de las actividades que se realizaron para este trabajo: desde la elaboración de las probetas hasta la determinación de la Dimensión Fractal.

5.1 ELABORACION DE LAS PROBETAS. Se utilizó una varilla de acero inoxidable AISI 304, rolada en frío y recristalizada, de 12.5 mm de diámetro. Se prepararon las probetas de acuerdo a la norma ASTM 370.

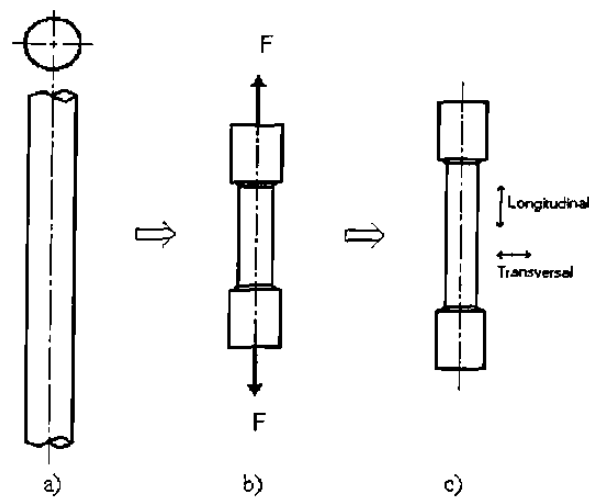


FIG. 5.1

a) Varilla de Acero AISI 304 de 12.5 mm de Diámetro,
b) Probeta de 152.4 mm de longitud y sometida a esfuerzos de Tensión, y c) Probeta deformada, indicando las direcciones de las muestras obtenidas para el estudio.

5.2 DEFORMACION DE LAS PROBETAS. Las probetas fueron sometidas a esfuerzos de Tensión usando una Máquina Universal. Para conocer su límite máximo de deformación, una de las probetas se sometió a la tensión máxima de ruptura alcanzando una deformación del 55% con respecto a su longitud original en el momento de fallar por fractura dúctil. De ahí que se eligiera para efectos de la prueba, aplicar esfuerzos de tensión en cuatro probetas para lograr en cada una, condiciones de deformación de 10%, 20%, 30%, y 40% respectivamente, con respecto a su longitud original.

5.3 MONTAJE DE LAS MUESTRAS. Se extrajeron dos muestras de cada probeta: una en, a) la dirección de la deformación, llamada también longitudinal, y otra en b) la dirección transversal a la deformación. Estas muestras fueron encapsuladas como se muestra en la Fig. 5.2. Como el ataque electroquímico jugaría un papel dominante en el estudio, éste tendría que ser realizada en forma exhaustiva hasta lograr resultados satisfactorios. Se preparó cada probeta poniendo en cada muestra un tornillo conector a tierra.

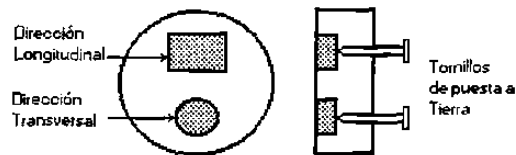


FIG. 5.2 Dibujo que muestra la forma en que se montaron las muestras, junto a los tornillos de puesta a tierra para el ataque electroquímico.

5.4 ATAQUES QUIMICOS EMPLEADOS. Uno de los aspectos más importantes del trabajo, fue determinar el tipo de *ataque químico* que nos pudiese proporcionar con la mayor precisión posible y en todas las condiciones de deformación, las fronteras de grano. De preferencia con ausencia de otras características de la microestructura, como serían por ejemplo, la presencia de otras fases, maclas de recocido y/o deformación, o líneas de deslizamiento. Para el efecto se hicieron las siguientes pruebas:

a) AGUA REGIA METANOLICA

Este ataque se hizo por inmersión durante 6 a 8 segundos con agua regia metanólica en una proporción de 45 ml de ácido clorhídrico, 20 ml de metanol y 15 ml de ácido nítrico.

RESULTADOS. Las metalografías revelaron en todos los casos la presencia de abundantes líneas de deslizamiento y fronteras de grano incompletas.

b) ACIDO OXALICO

También se atacó electrolíticamente con ácido oxálico en una proporción de 10 gr de ácido oxálico por 100 ml de agua, de 45 a 60 segundos, aplicando un voltaje de 6 voltios de corriente directa.

RESULTADOS. Los resultados obtenidos fueron muy similares al anterior.

c) ACIDO NITRICO

El ataque que proporcionó los resultados óptimos se realizó electroquímicamente con ácido nítrico y agua, al 60% y 40% respectivamente, aplicando un voltaje de 1.1 volts cd durante 90 segundos con un cátodo de acero inoxidable: el recipiente metálico del líquido.

RESULTADOS. Estas metalografías fueron las que se usaron para la prueba. Se obtuvieron las fronteras de grano austeníticas perfectamente delineadas con escasa presencia de maclas y líneas de deslizamiento.

(Ver Imágenes en Tablas de Perímetros, Cap. 6, Resultados)

5.5 DIGITALIZACION DE IMAGENES. Bajo el principio de transformar una imagen proveniente de un microscopio en un barrido por haz electrónico en el interior de una cámara de TV; se detectan por un proceso de conversión 256 niveles de gris. Para este proceso se utilizó un Analizador de Imágenes conectado a un microscopio óptico. Se digitalizaron alrededor de 500 imágenes a 50, 100, 200, 400 y 1000 ampliaciones. Estas digitalizaciones se hicieron tanto en dirección longitudinal como transversal y con deformaciones de 0, 10%, 20%, 30% y 40%.

5.6 SELECCION DE LAS FRONTERAS DE GRANO. Acto seguido, se realizó la selección de 5 granos para cada dirección. Este número se consideró suficiente para la obtención de resultados confiables tomando en cuenta la cantidad de imágenes por digitalizar. La selección se hizo aleatoriamente en la región central de la muestra, y buscando que estuvieran lo mas perfectamente delineadas sus fronteras.

5.7 DETERMINACION DEL PERIMETRO. Se procedió con el Analizador de Imágenes a determinar el *Perímetro* de cada una de las fronteras de grano para cada etapa de amplificación de 50x, 100x, 200x, 400x y 1000x. Estas lecturas fueron proporcionadas por el Analizador de Imágenes en unidades denominadas *micrómetros* (1×10^{-6} metros) con una precisión de $\pm 0.5 \mu\text{m}$. (Tablas de Perímetros, Cap.6 Resultados).

5.8 CALCULO DE LA DIMENSION FRACTAL. Para el cálculo de la Dimensión Fractal de cada uno de las fronteras de grano seleccionadas, se realizó el siguiente procedimiento:

a) DATOS A LA COMPUTADORA. Con el propósito de determinar los gráficos de Richardson para cada una de las fronteras de grano, se procedió a alimentar los datos en la computadora. Los datos proporcionados fueron: a) El Perímetro de la frontera de grano para cada grado de amplificación, y b) la Unidad de Medición (yardstick). Esta última lectura fue proporcionada por el Analizador de Imágenes y corresponde al factor de calibración que emplea el aparato para cada etapa de amplificación. Este factor está dado en Micrómetros por Pixel y fueron los siguientes:

Amplificación	Unidad de Medición (micrómetros por pixel)
50X	1.904
100X	0.952
200X	0.479
400X	0.239
1000X	0.095

Tabla 5.1 Tabla que muestra los valores de la unidad de medición o Yardstick en micrómetros por pixel para cada etapa de amplificación.

b) GRAFICOS DE RICHARDSON. A continuación se construyeron los gráficos de Richardson trazando los puntos en una gráfica: logaritmo del *perímetro* vs. logaritmo de *la unidad de medida* o *yardstick*. (Fig. 5.3)

c) ESTIMACION LINEAL. Por el Método de Mínimos Cuadrados se realizó la Estimación Lineal, que es el cálculo de la ecuación de la línea recta que se aproxima más a los puntos trazados en la gráfica. El resultado más relevante de la Estimación Lineal es la pendiente *m* de la línea recta .

Gráfico de Richardson

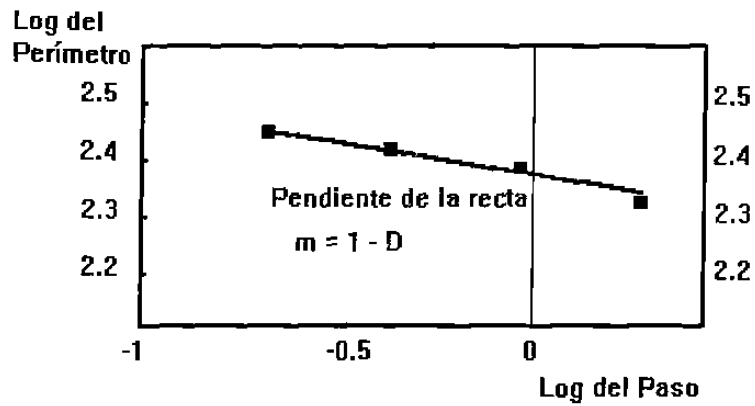


FIG. 5.3

Gráfico de Richardson que muestra como se obtiene la Dimensión Fractal: $D = 1 + m$. En este caso la pendiente m es 0.07, de donde $D = 1.07$. Corresponde al Grano 4 con 30% de deformación en la dirección transversal. (Tabla 6.1.6)

d) LA DIMENSION FRACTAL. Finalmente se calculó la Dimensión Fractal D usando la relación: $m = 1 - D$

Capítulo 6

RESULTADOS

A continuación, en las Tablas de Perímetros se presentan las lecturas de los perímetros medidos con el Analizador de Imágenes y los valores de Dimensión Fractal calculados con los Gráficos de Richardson. En la sección 6.2 se presenta una Tabla en la que se dan los valores de la Dimensión Fractal para cada una de las fronteras de grano, así como el valor promedio de valores de Dimensión fractal para cada grado de deformación. En la Sección. 6.3 se presentan los Diagramas de Dispersión de los valores de Dimensión fractal contra Grado de Deformación para cada una de las fronteras de grano en cada dirección.

6.1 TABLAS DE PERIMETROS

En las Tablas de Perímetros se presenta la siguiente información:

- Las micrografías a 100X en donde se muestran las fronteras de grano que se analizaron para cada grado de deformación y cada dirección.
- También se consignan los perímetros de las fronteras de grano en cada etapa de amplificación. Estas lecturas están dadas en micrómetros (1×10^{-6} metros). Con una precisión de ± 0.5 micrómetros. Estas lecturas fueron proporcionadas por el Analizador de Imágenes.
- Además se dan los valores calculados de Dimensión Fractal para cada una de las fronteras de grano.

No todas las fronteras de grano se midieron a todas las magnificaciones. Se omitieron lecturas cuando no se pudo lograr la precisión suficiente. La nitidez de las fronteras de grano o el tamaño de éstas fueron algunos de los factores que limitaron su medición. Por ejemplo, la medición a 50 amplificaciones resultaba muy imprecisa para algunos granos pequeños, y a 1000 amplificaciones algunas fronteras de grano rebasaban las dimensiones de la pantalla del monitor.

0 % de DEFORMACION LONGITUDINAL



Fig 6.1.1 Imagen de la Microestructura a 100 ampliificaciones en la que se enumeran los granos seleccionados. La dirección del rolado en frío se manifiesta por los sulfuros alargados en dirección horizontal.

TABLA DE PERIMETROS

AMPLIFICACION	50X	100X	200X	400X	1000X	
Frntera de grano	PERIMETRO Micrómetros ± 0.5					Dimension Fractal
1	204	205	214	219		1.037
2	123	130	135	136	139	1.039
3	204	207	213	215		1.027
4	199	201	212	214		1.039
5	219	226	232	234		1.031

Tabla 6.1.1 En ésta tabla se presentan los perímetros proporcionadas por el analizador de imágenes de las fronteras de grano para cada etapa de ampliificación. Las lecturas están dadas en micrómetros con una precisión de ± 0.5 ; Además se incluyen los valores de dimensión fractal calculados con los gráficos de Richardson.

0 % DE DEFORMACION TRANSVERSAL

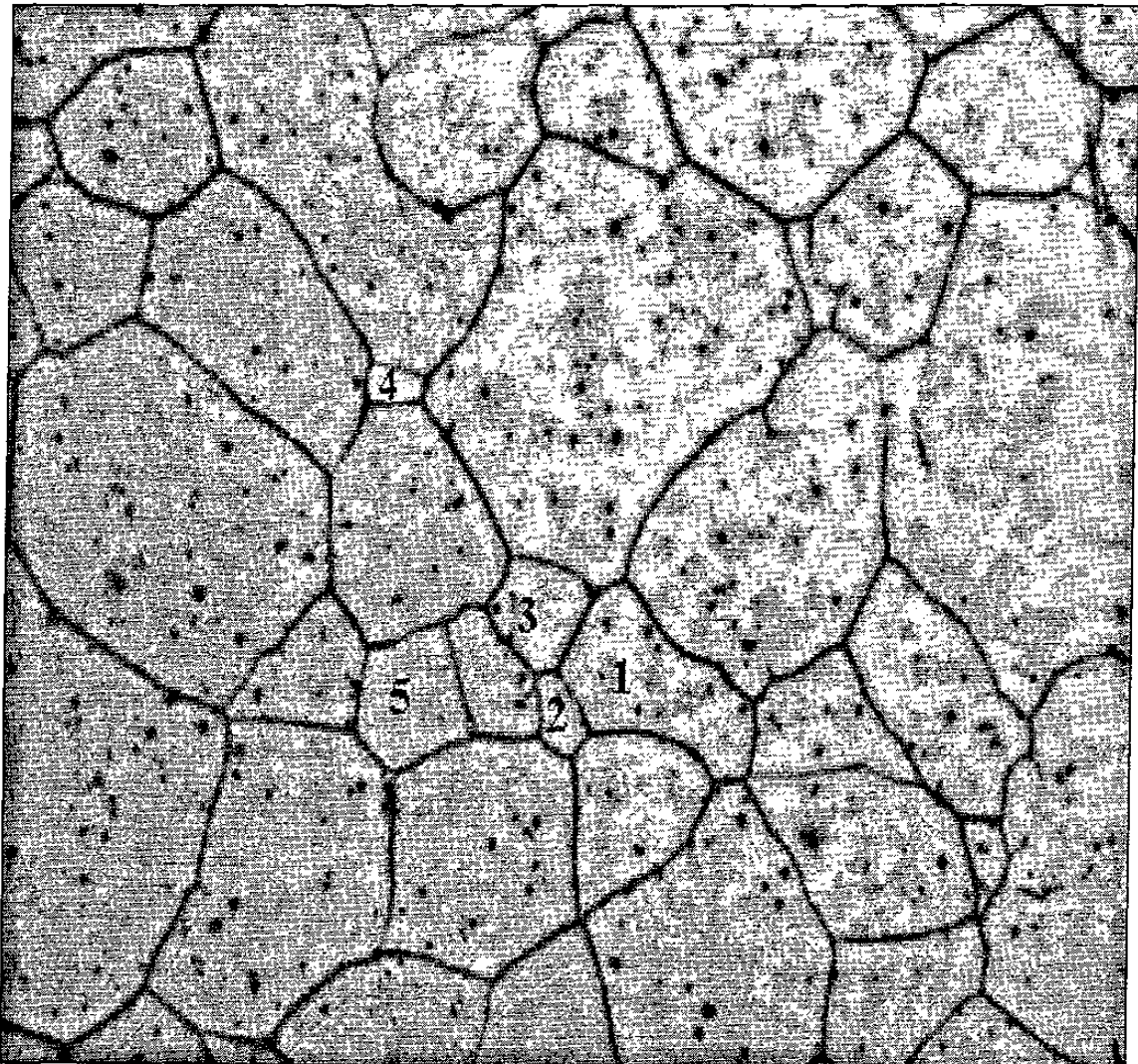


Fig 6.1.2 Imagen de la Microestructura a 100 ampliificaciones en la que se enumeran los granos seleccionados. Los sulfuros estan presentes en forma de puntos.

TABLA DE PERIMETROS

AMPLIFICACION	50X	100X	200X	400X	1000X	Dimension Fractal
Frontera de grano	PERIMETRO Micrómetros ± 0.5					
1	223	224	232	237		1.031
2	72	76	80	83	84	1.051
3	103	114	127	131	133	1.85
4	53	56	63	67	69	1.093
5	203	214	217	227		1.045

Tabla 6.1.2. En esta tabla se presentan los perímetros calculados con el analizador de imágenes para cada frontera de grano en cada etapa de ampliación, expresado en micrómetros ± 0.5 . Además se incluyen los valores de Dimensión fractal calculado con los gráficos de Richardson.

10 % DE DEFORMACION LONGITUDINAL



Fig 6.1.3 Imagen de la Microestructura a 100 ampliificaciones en la que se enumeran los granos seleccionados. Los sulfuros estan presentes en forma de agujas en dirección vertical que es la dirección del rolado en frío.

TABLA DE PERIMETROS

AMPLIFICACION	50X	100X	200X	400X	1000X	
Frontera de grano	PERIMETRO Micrómetros ± 0.5					Dimension Fractal
1	110	112	114	121	122	1.044
2	104	123	128	131	140	1.093
3	103	103	105	112		1.056
4	214	215	221	234		1.056
5	123	168	175	182		1.043

Tabla 6.,1.3 En esta tabla se presentan los perímetros calculados con el analizador de imágenes de las fronteras de grano en cada etapa de ampliificación, expresado en micrómetros ± 0.5 . Además se incluyen los valores de Dimensión fractal calculado con los gráficos de Richardson

10 % DE DEFORMACION TRANSVERSAL

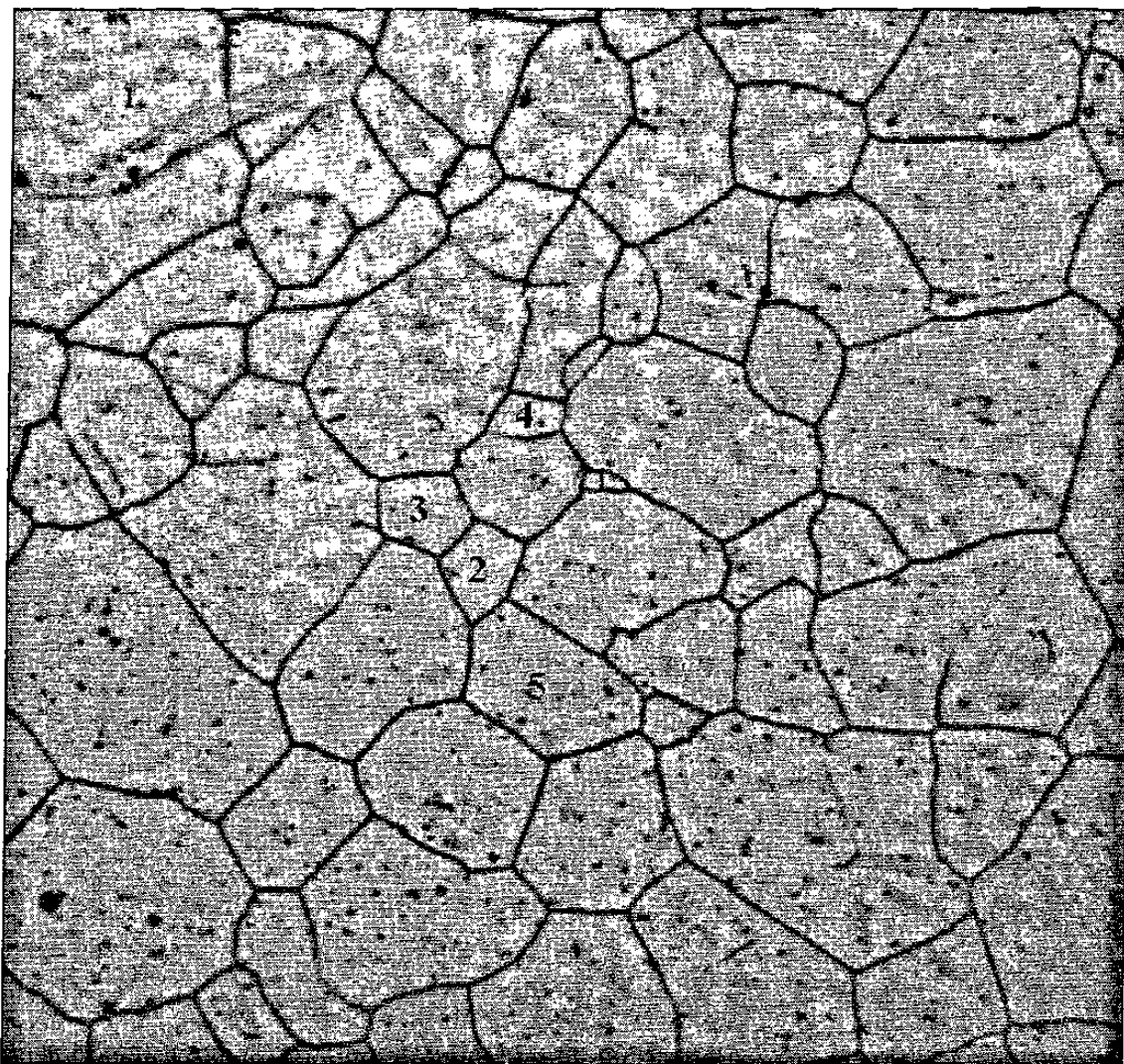


Fig 6.1.4 Imagen de la Microestructura a 100 ampliificaciones en la que se enumeran los granos seleccionados. Los sulfuros estan presentes en forma de puntos.

TABLA DE PERIMETROS

AMPLIFICACION	50X	100X	200X	400X	1000X	Dimension Fractal
Frntera de grano	PERIMETRO Micrómetros ± 0.5					
1		49	50	52	53	1.042
2	118	127	131	134	139	0.956
3	122	127	129	133	135	1.038
4		89	93	97	99	1.043
5	234	230	241	254		1.059

Tabla 6.1.4. En esta tabla se presentan los perímetros calculados con el analizador de imágenes para cada frontera de grano en cada etapa de ampliación, expresado en micrómetros ± 0.5 . Además se incluyen los valores de Dimensión fractal calculado con los gráficos de Richardson

20 % de DEFORMACION LONGITUDINAL

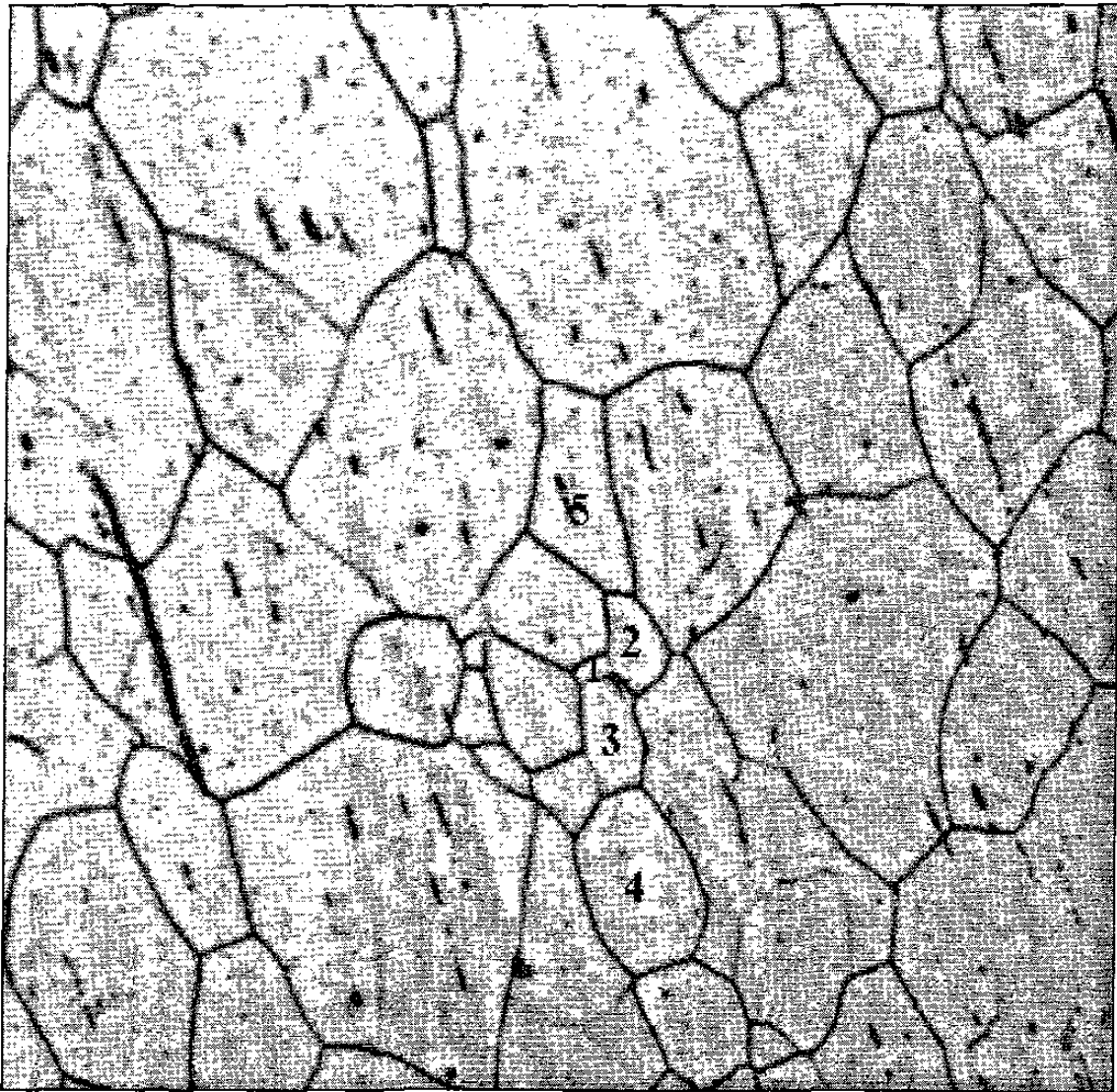


Fig 6.1.5 Imagen de la Microestructura a 100 ampliificaciones en la que se enumeran los granos seleccionados. La dirección del rolado en frío se manifiesta por la dirección de los sulfuros alargados. Se puede empezar a observar el alargamiento de los granos por efecto del esfuerzo de tensión.

TABLA DE PERIMETROS

AMPLIFICACION	50X	100X	200X	400X	1000X	Dimension Fractal
Frontera de grano	PERIMETRO Micrómetros ± 0.5					
1		39	42	46	49	1.01
2		101	105	107	110	1.037
3		109	121	127	132	1.079
4		188	197	198	204	1.035
5		148	208	213	219	1.173

Tabla 6.1.5 En esta tabla se presentan los perímetros calculados con el analizador de imágenes para cada frontera de grano en cada etapa de ampliación, expresado en micrómetros ± 0.5 . Además se incluyen los valores de Dimensión fractal calculado con los gráficos de Richardson

20% DE DEFORMACION TRANSVERSAL

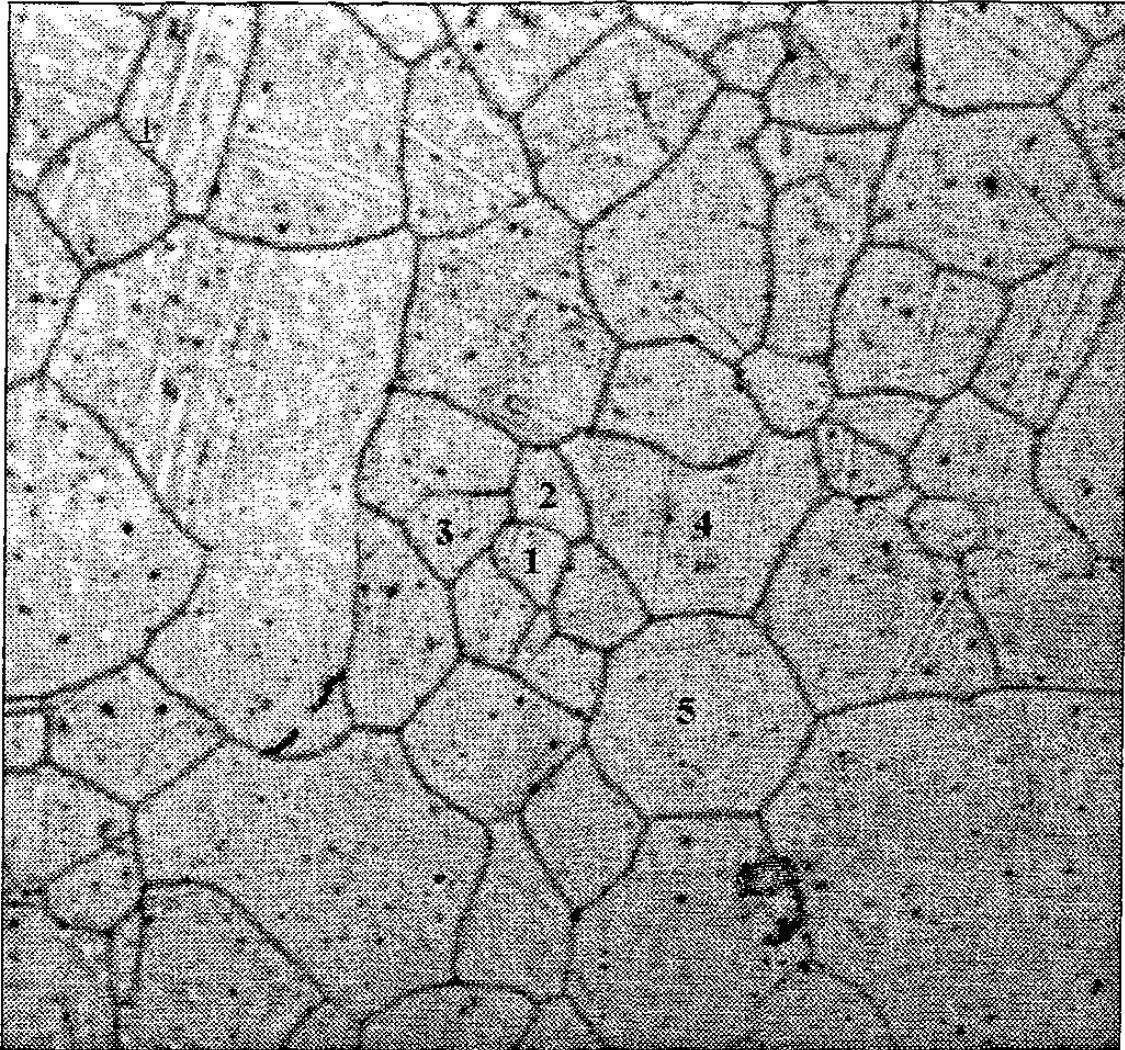


Fig 6.1.6 Imagen de la Microestructura a 100 ampliificaciones en la que se enumeran los granos seleccionados. Los sulfuros estan presentes en forma de puntos.

TABLA DE PERIMETROS

AMPLIFICACION	50X	100X	200X	400X	1000X	
Frontera de grano	PERIMETRO Micrómetros \pm 0,5					Dimensión Fractal
1		108	111	121	122	1.057
2		803	920	967	1010	1.057
3		133	144	147	174	1.108
4		360	373	375	388	1.066
5		308	315	326		1.041

Tabla 6.1.6 En esta tabla se presentan los perímetros calculados con el analizador de imágenes para cada frontera de grano en cada etapa de ampliación, expresado en micrómetros \pm 0.5. Además se incluyen los valores de Dimensión fractal calculado con los gráficos de Richardson

30 % de DEFORMACION LONGITUDINAL

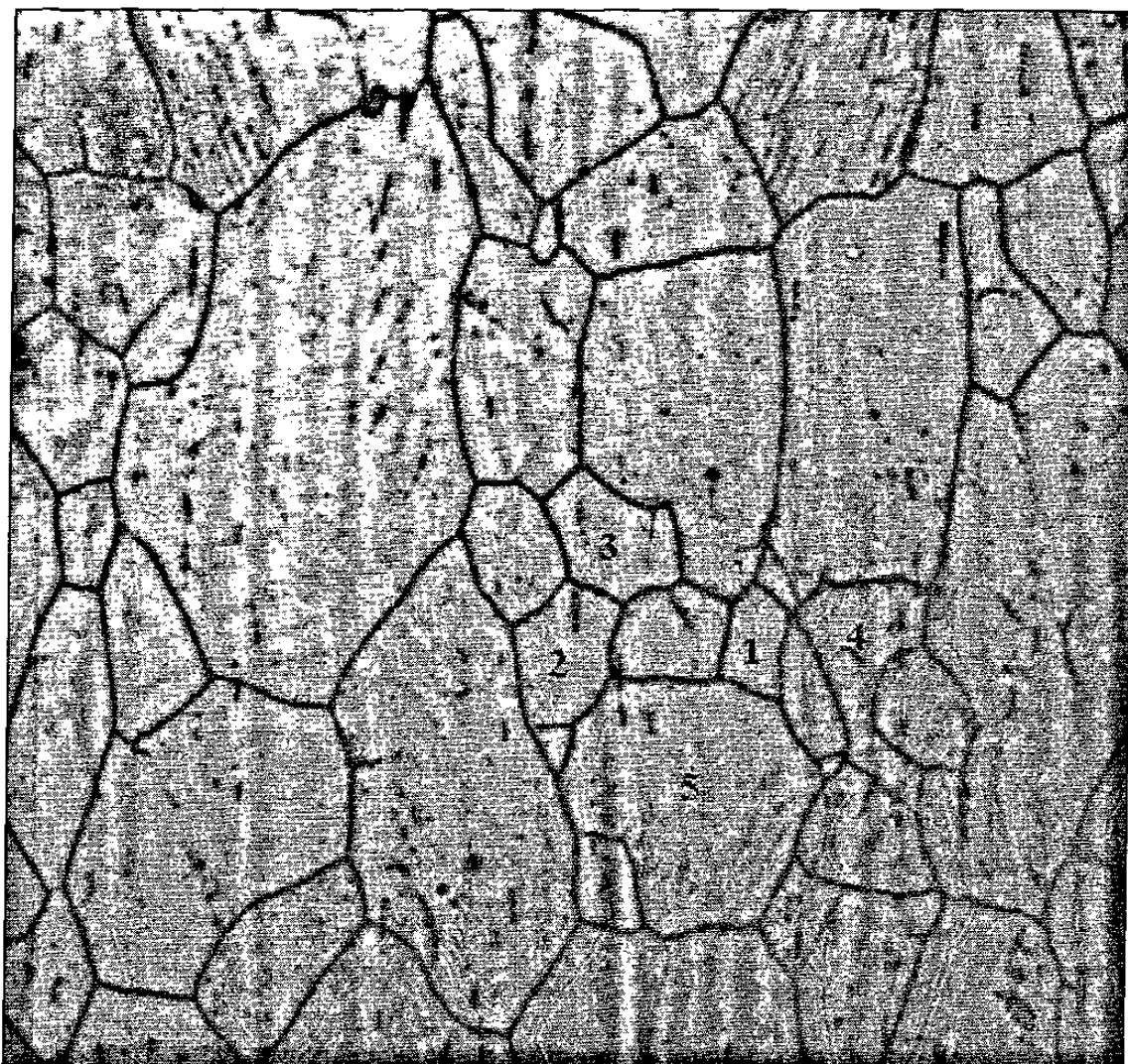


Fig 6.1.7 Imagen de la Microestructura a 100 ampliificaciones en la que se enumeran los granos seleccionados. La dirección del rolado en frío se manifiesta por la dirección de los sulfuros alargados. Se puede observar el alargamiento de los granos por efecto del esfuerzo de tensión.

TABLA DE PERIMETROS

AMPLIFICACION	50X	100X	200X	400X	1000X	Dimensión Fractal
Frontera de grano	PERIMETRO Micrómetros ± 0.5					
1	128	133	138	141	147	1.047
2	200	211	217	223		1.049
3	177	143	197	202		1.060
4	289	300	305	317		1.041
5	389	395	402			1.023

Tabla 6.1.7 En esta tabla se presentan los perímetros calculados con el analizador de imágenes para cada frontera de grano en cada etapa de ampliación, expresado en micrómetros ± 0.5 . Además se incluyen los valores de Dimensión Fractal calculado con los gráficos de Richardson

30 % DE DEFORMACION TRANSVERSAL



Fig 6.1.8 Imagen de la Microestructura a 100 ampliificaciones en la que se enumeran los granos seleccionados. Los sulfuros estan presentes en forma de puntos.

TABLA DE PERIMETROS

AMPLIFICACION	50X	100X	200X	400X	1000X	Dimensión Fractal
Frontera de grano	PERIMETRO Micrómetros ± 0.5					
1	99	109	114	120	120	1.109
2		72	77	80	83	1.058
3		125	125	128	138	1.043
4	156	169	175	185		1.071
5	255	259	263	268		1.024

Tabla 6.1.8 En esta tabla se presentan los perímetros calculados con el analizador de imágenes para cada frontera de grano en cada etapa de ampliación, expresado en micrómetros ± 0.5 . Además se incluyen los valores de Dimensión fractal calculado con los gráficos de Richardson

40 % DE DEFORMACION LONGITUDINAL



Fig 6.1.9 Imagen de la Microestructura a 100 ampliificaciones en la que se enumeran los granos seleccionados. Se puede observar el alargamiento de los granos por efecto del esfuerzo de tensión en la dirección vertical.

TABLA DE PERIMETROS

AMPLIFICACION	50X	100X	200X	400X	1000X	
Frontera de GRANO	PERIMETRO Micrómetros ± 0.5					Dimensión Fractal
1	45	58	70	82	84	1.211
2	180	191	202	209		1.044
3	213	220	220	229		1.030
4	109	123	127	133		1.084
5	70	69	75	79		1.066

Tabla 6.1.9 En esta tabla se presentan los perímetros calculados con el analizador de imágenes para cada frontera de grano a cada etapa de ampliificación, expresado en micrómetros ± 0.5 . Además se incluyen los valores de Dimensión fractal calculado con los gráficos de Richardson.

40 % DE DEFORMACION TRANSVERSAL

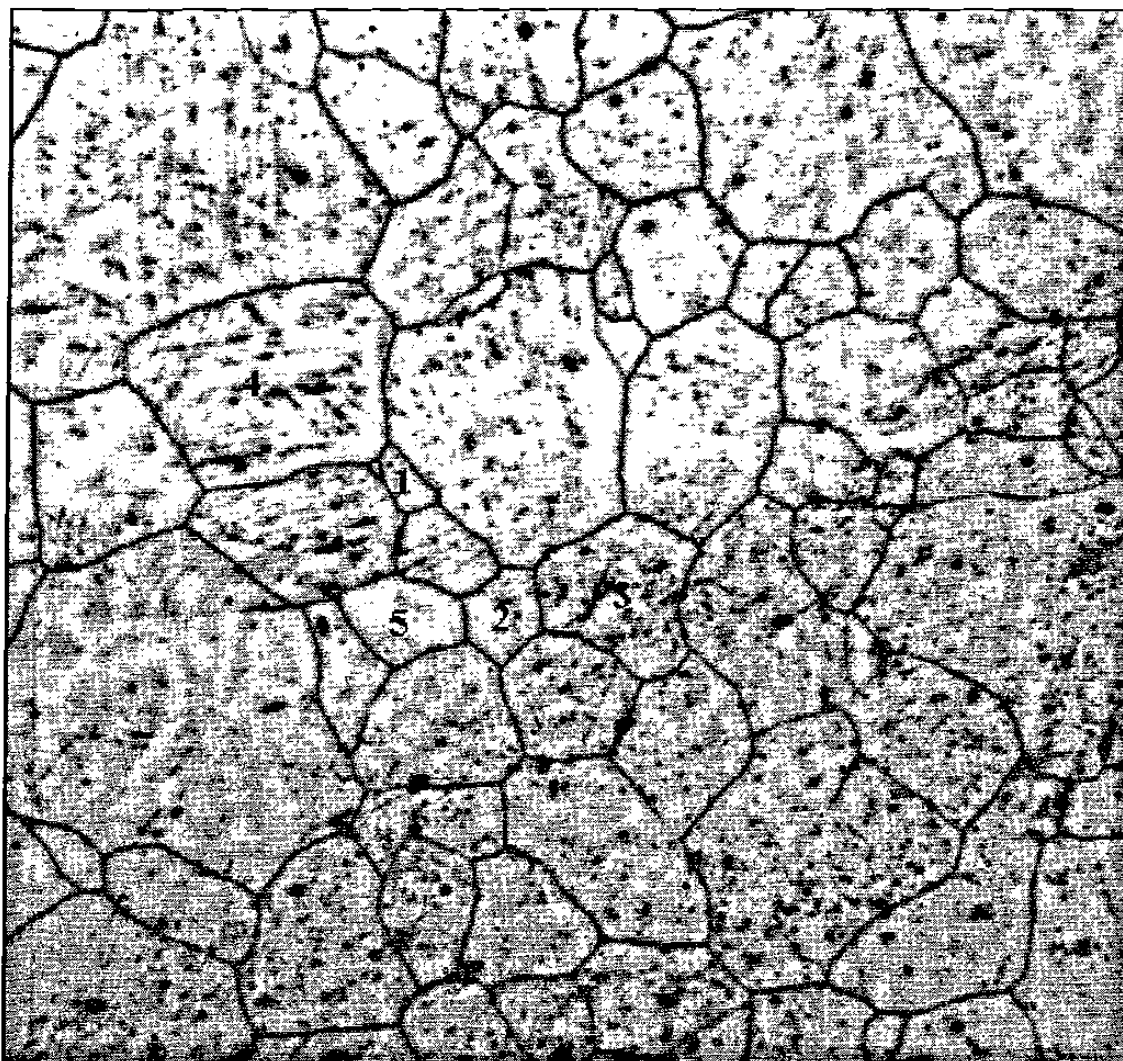


Fig 6.1.10 Imagen de la Microestructura a 100 ampliificaciones en la que se enumeran los granos seleccionados. Los sulfuros estan presentes en forma de puntos. Los granos han experimentado una fuerte contracción.

TABLA DE PERIMETROS

AMPLIFICACION	50X	100X	200X	400X	1000X	Dimension Fractal
Frontera de grano	PERIMETRO Micrómetros ± 0.5					
1		71	87	90	92	1.056
2		114	128	135	136	1.062
3	234	245	248	250		1.033
4	244	250	259	264		1.029
5	145	147	152	157	163	1.058

Tabla 6.1.10 En esta tabla se presentan los perímetros calculados con el analizador de imágenes de cada frontera de grano en cada etapa de ampliación, expresado en micrómetros ± 0.5 . Además se incluyen los valores de Dimensión fractal calculado con los Gráficos de Richardson.

6.2 VALORES DE DIMENSION FRACTAL.

En la Tabla 6.2 se exponen los valores de la Dimensión Fractal de acuerdo con los porcentajes de deformación de cada muestra. Asimismo se consignan los valores promedio de los granos para cada grado de deformación.

DIMENSION FRACTAL

Deformación	0%	10%	20%	30%	40%
GRANO	<i>Dirección Transversal</i>				
1	1,031	1,042	1,057	1,109	1,056
2	1,051	1,056	1,057	1,058	1,062
3	1,085	1,038	1,108	1,043	1,033
4	1,093	1,043	1,066	1,071	1,029
5	1,045	1,059	1,041	1,024	1,058
MEDIA	1,061	1,048	1,066	1,061	1,048
GRANO	<i>Dirección Longitudinal</i>				
1	1,037	1,044	1,101	1,047	1,211
2	1,083	1,093	1,037	1,049	1,044
3	1,027	1,036	1,079	1,060	1,030
4	1,039	1,056	1,035	1,041	1,084
5	1,031	1,043	1,173	1,023	1,066
MEDIA	1,043	1,054	1,084	1,044	1,085

Tabla 6.2. Muestra los resultados del cálculo de la Dimensión Fractal para cada uno de los granos seleccionados. También se expone el valor promedio de la dimensión fractal de las fronteras de grano para cada muestra deformada.

6.3 DIAGRAMAS DE DISPERSION DE VALORES DE DIMENSION FRACTAL.

A continuación se presentan los diagramas que en forma gráfica nos dan los valores de dimensión fractal de cada uno de los granos analizados para cada grado de deformación.

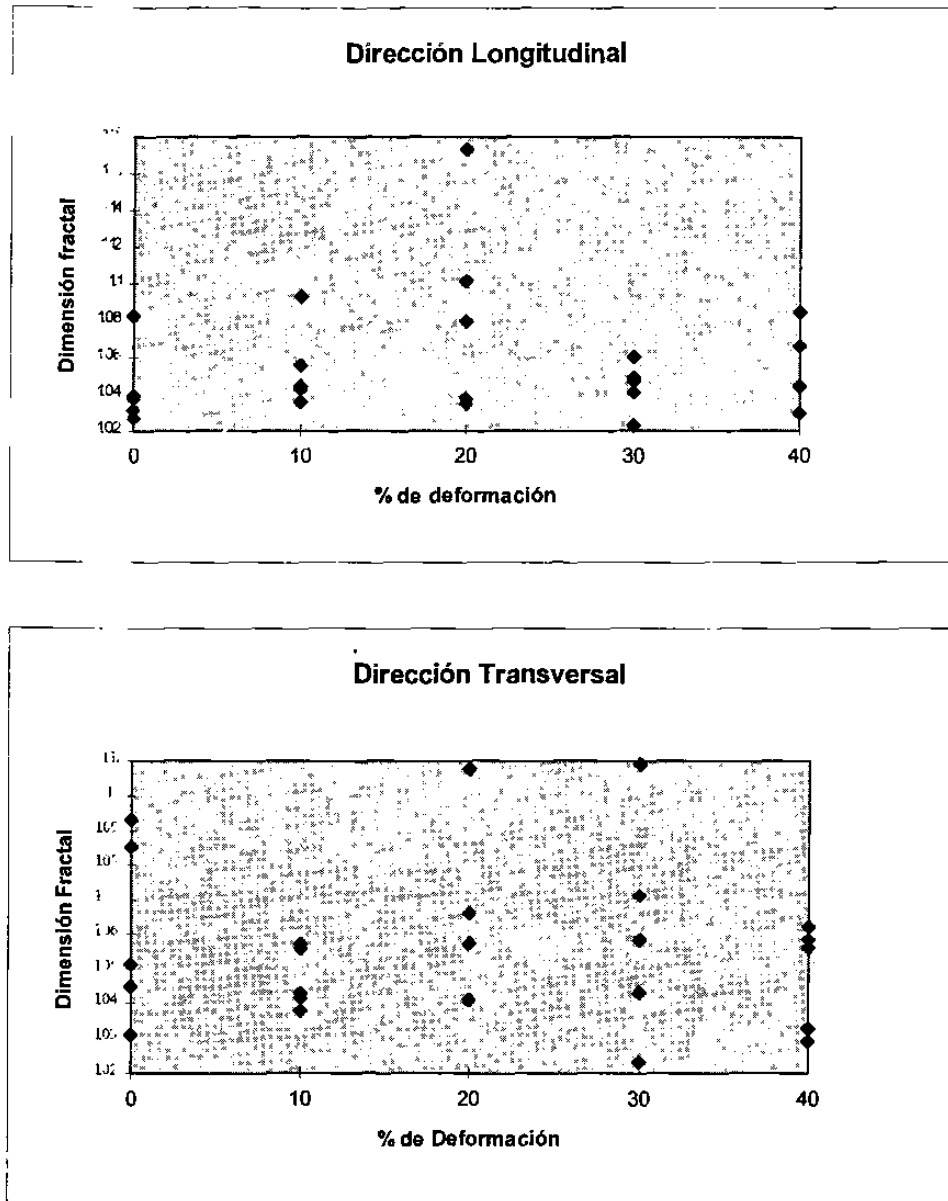


Fig. 6.3 Diagramas de Dispersión que muestran el valor de la Dimensión Fractal de las fronteras de grano en ambas direcciones para cada uno de los grados de deformación.

Capítulo 7

ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se describe el método estadístico utilizado en este trabajo para determinar si existe algún grado de correlación entre un par de variables. La existencia de alguna correlación lineal significativa se puede expresar mediante un parámetro denominado *coeficiente de correlación* r , que se define a continuación:

7.1 EL COEFICIENTE DE CORRELACION r .

El coeficiente de correlación r se define como la relación del coeficiente de la covarianza de x y y , entre el producto de la desviación estándar de x y de y .

$$\text{Cov}(X, Y) = \frac{1}{n-1} \sum (x - \bar{x})(y - \bar{y}) \quad \text{donde } \bar{x} = \sum \frac{x}{n} \quad \text{y} \quad \bar{y} = \sum \frac{y}{n}$$

$$r = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad n = \text{No. de muestras}$$

ENSAYO DE HIPOTESIS

Consiste en una prueba para determinar cuando el coeficiente de correlación tiene un valor lo suficientemente grande para ser significativa la *correlación* entre las variables. Esta prueba está en función de la pendiente ρ de la recta. Si $\rho = 0$, esto determina que no existe relación lineal entre las variables. Con base en los valores de la distribución F de Fisher, la prueba de hipótesis es:

$$\begin{aligned} H_0 : \rho &= 0 && \text{(No existe correlación)} \\ H_1 : \rho &\neq 0 && \text{(Puede existir correlación significativa)} \end{aligned}$$

Las etapas para la prueba de hipótesis acerca del coeficiente de correlación se realiza de la siguiente manera: 1.- Se busca el valor en tablas¹⁶ un F_{α} que divida las zonas de aceptación y de rechazo de la hipótesis, 2.- Se compara el valor obtenido en tablas con el valor F de Fisher calculado para cada uno de los casos, 3.- Se acepta la hipótesis nula (H_0) o la hipótesis alternativa (H_1).

El valor F de Fisher se obtiene con la fórmula:

$$F = \frac{r^2 / (k - 1)}{(1 - r^2) / (N - k)}$$

donde r = coeficiente de correlación
 k = No. Total de variables
 N = No. Total de valores
 $k - 1$ = grados de libertad del numerador
 $N - k$ = grados de libertad del denominador

Para analizar los resultados obtenidos primeramente analizaremos para una tendencia lineal.

7.2 VALOR DE r PARA UNA TENDENCIA LINEAL

El Coeficiente de Correlación r tomando todos los grados de deformación:

Para la Dirección Longitudinal: $r = 0.095$

Para la Dirección Transversal: $r = 0.085$

Prueba de Hipótesis

Aunque los valores son muy bajos para suponer algún grado de correlación significativa, ésto será demostrado realizando la siguiente prueba de hipótesis:

Para hipótesis nula $H_0 : \rho = 0$ (No existe correlación)

Para Hipótesis alternativa $H_1 : \rho \neq 0$ (Puede haber correlación significativa)

Los Valores F de Fisher:

Se selecciona la distribución F de Fisher por tratarse de un número de muestras menor de 30.

tenemos que de la ecuación anterior:

Para la Dirección Longitudinal: $F = 0.227$

Para la Dirección Transversal: $F = 0.181$

Los Valores en Tablas para F:

El valor en tablas(16) para F con 1 grado de libertad en el numerador, 25 grados de libertad en denominador y un 99% de confiabilidad ($\alpha = 0.01$).

$$F_{\alpha} = 7.77$$

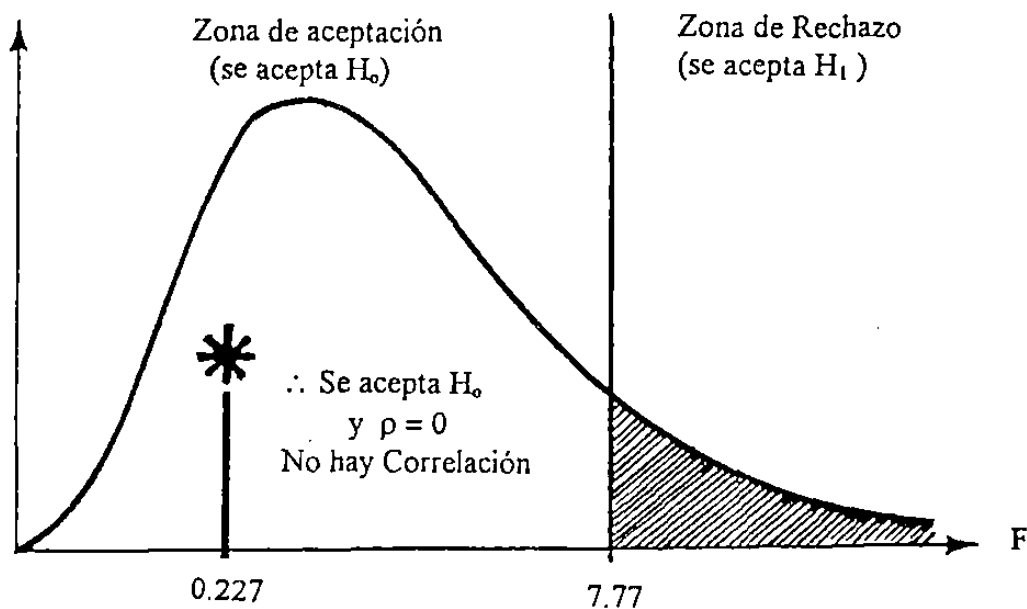


Fig. 7.1 Prueba de Hipótesis para el coeficiente de correlación

De la Prueba de Hipótesis ilustrado en la Fig. 7.1 podemos concluir que tanto el valor de F para la dirección transversal, como el valor de F para la dirección longitudinal, caen en la zona de Hipótesis nula, es decir: $H_0 : \rho = 0$. Lo que significa que *no existe correlación* entre las variables analizadas.

Resultados

1.- En los dos casos analizados observamos que el valor calculado de F cae en la zona de la hipótesis nula $H_0 : \rho = 0$. Es decir, se demuestra que *no existe correlación* entre las variables.

7.3 VALOR DE r PARA UNA TENDENCIA LINEAL CON CAMBIO DE PENDIENTE

Para determinar si existe una tendencia lineal con cambio de pendiente, primeramente establecemos los rangos de cada tendencia lineal para cada dirección. Calculamos el coeficiente r de correlación y para ejecutar la Prueba de Hipótesis, se determinan los coeficientes F de Fisher para cada rango y los valores F_α por tablas. El calculo de F_α se realizó en cada rango para un 99% de confiabilidad. Es decir $\alpha = 0.01$.

Para la Dirección Transversal los valores son:

<i>RANGO</i>	<i>Coef. corr. r</i>	<i>Valor F de Fisher</i>	<i>Valor F_α Tablas</i>
0-20%	0.09	0.10	8.7
20-40%	-0.31	1.38	8.7
0-10%	-0.35	1.11	10.0
10-40%	-0.02	0.01	8.1
0-30%	0.08	0.08	8.1
30-40%	-0.28	0.68	10.0

Para la Dirección Longitudinal los valores encontrados son:

<i>RANGO</i>	<i>Coef. corr. r</i>	<i>Valor F de Fisher</i>	<i>Valor F_α Tablas</i>
0-20%	0.46	3.48	8.68
20-40%	0.01	0.01	8.68
0-10%	0.28	0.68	10.00
10-40%	0.13	0.01	8.10
0-30%	0.13	0.22	8.10
30-40%	0.41	1.60	10.00

Resultados

Al realizar la Prueba de Hipótesis para cada uno de los rangos indicados, encontramos que en todos los casos, los valores F de Fisher fueron menores que los valores F_α calculados en tablas. Es decir, todos los valores F cayeron dentro del rango de Hipótesis

nula $H_0 : \rho = 0$, por lo que se concluye que en *ninguno de los rangos seleccionados existe correlación lineal*.

7.4 OTRO TIPO DE TENDENCIA

Habiendo desechado la hipótesis de que exista algún tipo de correlación lineal entre las variables, el siguiente paso es la de examinar si existe algún otro tipo de tendencia. Para esto se utilizan los Diagramas de Dispersión. (Sección 6.3 página 33)

Resultados

De ambos Diagramas de Dispersión podemos observar que los valores de Dimensión Fractal con respecto a los Grados de Deformación, se distribuyen aleatoriamente sin ninguna clase de tendencia. Por lo que podemos concluir que *no existe ningún tipo de tendencia* entre estas variables.

Capítulo 8

CONCLUSIONES

1.- NATURALEZA FRACTAL DE LAS FRONTERAS DE GRANO

Las fronteras de grano del Acero AISI 304 manifiestan naturaleza fractal dentro del rango de magnificación utilizado (50, 100, 200, 400 y 1000x) pues al incrementarse la magnificación, también se incrementa su perímetro.

2.- RANGO DE VALORES DE DIMENSION FRACTAL

La mayor parte de los valores de dimensión fractal de las fronteras de grano analizadas, se encuentran dentro del rango de 1.01 a 1.04. Estos valores se aproximan a los valores que reconocidos especialistas con diversos métodos han calculado para otras curvas naturales.

3.- ANALISIS DE CORRELACION

Del análisis de correlación entre las variables: *Grado de deformación* contra *Dimensión Fractal*, podemos extraer las siguientes conclusiones:

- No existe correlación entre las variables *Grado de Deformación vs Dimensión fractal* cuando analizamos para una sola tendencia lineal.
- Tampoco existe correlación cuando analizamos para una tendencia lineal con cambio de pendiente. Es decir, para una doble tendencia lineal.
- De los Diagramas de Dispersión podemos inferir que no existe otro tipo de correlación entre las variables.

4.- MECANICA DE LA DEFORMACION

Una de las razones de que los valores de dimensión fractal de las fronteras de grano no sigan una evolución simple de crecimiento o disminución a medida que el material se deforma, se debe a que la deformación del material no se hace exclusivamente a través de la deformación de los límites de grano, sino probablemente por otros mecanismos: como la creación de nuevas maclas o incrementos de la densidad de las líneas de deslizamiento.

LINEA DE INVESTIGACION

1.- Una de las posibles líneas de investigación referentes a los límites de grano para este tipo de aceros, está en aplicar los conceptos de la Geometría Fractal desarrollados para la denominada Ciencia de las Micropartículas. Los granos pueden ser considerados individualmente como micropartículas y aplicando los principios matemáticos de Fourier, desarrollar los conceptos *de dimensión de textura* y *dimensión de estructura* para cada uno de los granos. Esto podría permitir desarrollar otras formas de correlación y probablemente encontrar elementos para vislumbrar, desde una nueva perspectiva, los mecanismos de las fuerzas presentes en la formación original de los granos.

REFERENCIAS

- 1 H. KOSTRON, Arch. Metallkd,(1949) 193-203
- 2 MANDELBROT, B.B.; *How long is the coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension*; Science. Mayo 1967
- 3 B.B. MANDELBROT, D.E. PASSOJA, A.J. PAULLAY; Nature 308, 721(1984).
- 4 E. HORNBOGEN; Intern. Mat. Rev. 34, 277 (1989).
- 5 G. LAIRD II, J.C. RAWERS, A. ADAMS.; Metall. Trans. A. 23A, 2941 (1992).
- 6 M. TANAKA, Z. Arch Metallkd. (1993) 84, 697
- 7 F. HAUSDORFF, Mathematische Ann., 1919, 79, 157
- 8 MANDELBROT, B.B.; *The fractal Geometry of Nature*; W.H. Freeman and Company, New York (1982)
- 9 MANDELBROT, B.B., Science, 1967, 155, 636
- 10 E.S. PEARSON y H.O. HARTLEY, Biometrika Tables for Statisticians, Vol 2 (1972), Tabla 5, Página 178.
- 11 MANDELBROT, B.B.; *Self-Affine Fractals and Fractal Dimension*. Physica Scripta, Vol. 32, pp. 257-260, (1985)
- 12 MANDELBROT, B.B., and VAN NESS, J.W.; *Fractional Brownian Motions. Fractional Noises and Applicatios.*; SIAM Reviews; Vol. 10; 1968; pp. 422-437.
- 13 MAJUMDAR, A. y BHUSHAN, B.; *Role of Fractal Geometry in Roughness Characterization and Contact Mechanics of Surfaces*; Journal of Tribology, Vol 112; Num. 2; Abril 1990.
- 14 MINKOWSKI, H.(1901) *Über die Begriffe Länge. Oberfläche und Volumen*. Jahresbericht der Deutschen Mathematikerv-vereinigung 9:115-121

BIBLIOGRAFIA

- MANDELBROT, B.B., *The Fractal Geometry of Nature*; W.H. Freeman and Company New York (1982)
- PEITGEN, H.O.; RITCHER, P.H.; *The Beauty of Fractals*; Springer-Verlag,(1986).
- FALCONER, K.; *Fractal Geometry*, John Wiley and Sons, (1990)H.
- PEITGEN, H.JÜRGENS, D.SAUPE; *Chaos and Fractals*; Springer Verlag,(1992).
- PEITGEN, H.JÜRGENS, D.SAUPE;*The Science of Fractal Images*; Springer Verlag,(1992).
- BARNLEY, M.; *Fractal Everywhere*; Academic Press, Inc. (1988)
- DEVANEY, M.F.; *Chaos, Fractals and Dynamics*; Addison-Wesley, (1990).
- BARNLEY, M.F.;DEVANEY,R.L.; MANDELBROT,B.B.; PEITGEN,H-O.; SAUPE,D.; VOSS,R.F.; *The Science of Fractals Images*; Spring-Verlag,(1988).
- THOMPSON, J.M.T.; STEWARD, H.B.; *Nonlinear Dynamics and Chaos*; John Wiley and Sons, (1986).
- BRIGGS, J.; *Fractals, The Patterns of chaos*; Addison-Wesley (1992).
- PEITGEN, H. JURGENS, II. SAUPE, D. *Fractal for the Classroom*; Springer-Verlag; 1989
- HASTINGS, H. SUGIHARA, G.; *Fractals: A user's Guide for the Natural Science*; Addison-Wesley, 1993
- BARNLEY, M. HURD, L.; *Fractal Image Compression*; Spring-Verlag, 1993
- PEITGEN, H. ENRIQUEZ, P. PENEDO; *Fractals in the fundamental and Applied Sciences*; Spring-Verlag, 1991

VISCEK, T.; *Fractal Growth Phenomena*; Freeman and Company New York; 1992.

PEINTGEN, H. ENCARNACAO Y ENGLER; *Fractal Geometry and Computer Graphics*; Spring-Verlag, 1992.

CRILLY, H. EARNSHAW, P; *Applications of Fractals and Chaos*; John Wiley and Sons; 1993.

ABRAHAM, R. SHAW, CH.; *Dynamics: The Geometry of Behavior*; John Wiley and Sons; 1992.

ARTICULOS DE INVESTIGACION

DUBUC B.; *Evaluating the fractal dimension of profiles*. Physical Review, Vol 39, 3; 1989.

UNDERWOOD E, BANERJI K; *Fractals in Fractography*; Materials Science and Engineering, 80, 1986.

MAJUMDAR A, BHUSHAN B.; *Role of Fractal Geometry in Roughness Characterization and Contac Mechanics of Surfaces*. Journal of Tribology; Vol. 112-205, 1990.

RUSS, J. C.; *Surface caracterizacion: Fractal Dimension, Hurst Coeficient and Fracuency Transforms*; Journal of Computer-Assisted Microscopy, Vol. 2, Num 3, 1990

PFEIFER P.; *Fractal Dimension as working tool for surface-roughness problems*; Aplication of Surface Science 18; 1984

MANDELBROT, B.; PASSOJA, D. PAULLAY, A.; *Fractal Character of fracture Surfaces of Metals.*; Nature, Vol. 308, 1984

SRINIVASAN, S., RUSS, J., SCATTERGOOD, R.; *Fractal Analysis of erosion surfaces*; Journal of Materials Researchs, Vol. 5, Num 11, 1990

GLEITER, H. CHALMERS, B.; *High Angle Grain Boundaries*, Pergamon Press, Oxford, 1972.

WRIGHT, K.; KARLSON, B.; *Fractal Analysis and Stereological Evaluation of Microestructure.*; J. Microscopy 129, 1983

- KLEISER, T.; BOCEK, M.; *The Fractal Nature of Slip in Crystals.*; Z. Metallkde. 77; 1986.
- KAYE, B. H.; *A Random Walk Through Fractal Dimension*; VCH Verlagsgesellschaft mbH, Germany. 1989
- SCHWARZ, H. Y EXNER, H.; *Implementation of the concept of fractal dimension on a semiautomatic image analyser.* Powder Technol. 27, 1980.
- STREITBERGER, P.; FORSTER, G.; KOLVE, P.; *The Fractal Geometry of Grain Boundaries in Deformed and Recovered Zinc.*; Scripta Metallurgica et Materialia, Vol. 33 No. 4; 1995
- MANDELBROT, B.B.; *How long is the coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension*; Science. Mayo 1967
- MANDELBROT, B.B.; *Self-Affine Fractals and Fractal Dimension.* Physica Scripta, Vol. 32, pp. 257-260, (1985)
- WEST, B; GOLDBERGER, A.; *Physiology in Fractal Dimensions.*; American Scientist, Vol 75, No. 4, 1987
- LAVENDA, B.; *El movimiento Browniano*; Investigación y Ciencia, Abril 1985.
- RAÑADA, A.F.; *Movimiento Caotico*; Investigación y Ciencia, Mayo 1986.
- VIVALDI, F. *An experiment with Mathematics*; New Scientist; Octubre 1989
- DEWDNEY, A. K. *Juegos de Ordenador. Belleza y Profundidad: El conjunto de Mandelbrot y una hueste de primos suyos de apellido Julia*; Investigación y Ciencia; Enero 1988.
- DEWDNEY, A. K. *Juegos de Ordenador: Un microscopio computarizado escudriña el objeto mas complejo de la matemática*; Investigación y Ciencia; Octubre 1989.
- JURGENS, H. PEINTGEN, H. SAUPE, D.; *El lenguaje de los Fractales*; Investigación y Ciencia; Agosto 1990.
- SANDER, L.; *Crecimiento Fractal*; Investigación y Ciencia; Abril 1991.

INDICE DE FIGURAS

Num	Descripción	Pag.
2.1	Concepto Intuitivo de Dimensión.....	5
2.2	Construcción del Conjunto de Cantor.....	6
2.3	Construcción del Conjunto de Koch.....	6
2.4	Construcción del Triángulo de Sierpinski.....	7
2.5	Gráfico de Posición-Tiempo. Movimiento Browniano.....	8
3.1	Recubrimiento de Mandelbrot-Richardson.....	10
3.2	Recubrimiento de Minkowski.....	11
3.3	Redes de Celdas de Conteo.....	12
4.1	Microestructura 100x Transversal.....	14
4.2	Microestructura 100x Longitudinal.....	15
5.1	Probetas.....	17
5.2	Montaje de Muestras.....	18
5.3	Gráfico de Richardson.....	21
6.1.1	Imagen de Microestructura 0 % de Deformación Longitudinal....	23
6.1.2	Imagen de Microestructura 0 % de Deformación Transversal.....	24
6.1.3	Imagen de Microestructura 10 % de Deformación Longitudinal...	25
6.1.4	Imagen de Microestructura 10 % de Deformación Transversal....	26
6.1.5	Imagen de Microestructura 20 % de Deformación Longitudinal...	27
6.1.6	Imagen de Microestructura 20 % de Deformación Transversal....	28
6.1.7	Imagen de Microestructura 30 % de Deformación Longitudinal...	29
6.1.8	Imagen de Microestructura 30 % de Deformación Transversal....	30
6.1.9	Imagen de Microestructura 40 % de Deformación Longitudinal...	31
6.1.10	Imagen de Microestructura 40 % de Deformación Transversal....	32
6.2	Diagramas de Dispersión.....	34
7.1	Gráfico de Prueba de Hipótesis.....	37

INDICE DE TABLAS

Num	Descripción	Pág.
5.1	Tabla de Unidad de Medición(yardstick).....	20
6.1.1	Tabla de Perímetros. 0 % Deformación Longitudinal.....	23
6.1.2	Tabla de Perímetros. 0 % Deformación Transversal.....	24
6.1.3	Tabla de Perímetros. 10 % Deformación Longitudinal.....	25
6.1.4	Tabla de Perímetros. 10 % Deformación Transversal.....	26
6.1.5	Tabla de Perímetros. 20 % Deformación Longitudinal.....	27
6.1.6	Tabla de Perímetros. 20 % Deformación Transversal.....	28
6.1.7	Tabla de Perímetros. 30 % Deformación Longitudinal.....	29
6.1.8	Tabla de Perímetros. 30 % Deformación Transversal.....	30
6.1.9	Tabla de Perímetros. 40 % Deformación Longitudinal.....	31
6.1.10	Tabla de Perímetros. 40 % Deformación Transversal.....	32
6.2	Tabla de Valores de Dimensión Fractal.....	33

RESUMEN AUTOBIOGRAFICO

VICTOR MIGUEL TREJO RAMÓN

CANDIDATO A LA MAESTRIA
EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA
CON ESPECIALIDAD EN INGENIERIA DE MATERIALES

TESIS
"GEOMETRIA FRACTAL DE LAS FRONTERAS DE GRANO DEL
ACERO AISI 304 SOMETIDO A DEFORMACION"

DATOS PERSONALES

LUGAR Y FECHA DE NACIMIENTO: Tierra Blanca, Veracruz; 29 de Febrero de 1948
ESPOSA: Mireya Dávalos Lozano HIJOS: Víctor E.; Ada Olivia; Mario A.; Mónica A.

EDUCACION: Ingeniero Mecánico Electricista, FIME-UANL, 1971

EXPERIENCIA DOCENTE: Maestro Adjunto 1970, Maestro Titular desde 1971,
impartiendo Cursos y Laboratorios de Mecánica Aplicada, FIME-UANL.

CARGOS ADMINISTRATIVOS EN FIME-UANL: Jefe del Departamento de Acústica
Ambiental, CIE, 1973-1976; Jefe del Departamento de Mecanismos, 1973-1981;
Secretario Adjunto de la Escuela de Graduados, 1981-1983; Jefe del Departamento
de Vibraciones, 1983-1984; Jefe del Departamento de Dinámica, 1984-1990.

EXPERIENCIA PROFESIONAL: Desde 1975 es Consultor Industrial en el campo de
Control de Vibraciones y Acústica.

