

CAPÍTULO 4

EXPERIMENTACIÓN

4.1 INTRODUCCIÓN.

Como punto de partida para el presente trabajo se plantean las siguientes hipótesis:

Las dendritas son objetos fractales naturales. Por su morfología y mecanismo de crecimiento deben ser fractales anisotrópicos (autoafines). El análisis fractal debe reflejar dicha anisotropía.

Existen relaciones entre el espaciamiento interdendrítico, la dureza y la dimensión fractal en materiales con microestructura dendrítica.

Para poner a prueba las anteriores hipótesis, el material a utilizar en la experimentación debería cumplir con los siguientes requisitos:

Poseer una microestructura dendrítica.

Poseer un contraste marcado entre sus fases.

Las fronteras de las dendritas no deberán sufrir daños por ataque químico.

El material seleccionado fue la aleación de aluminio A319, debido a que este material cumplía los requisitos, además de tener aplicación práctica en la industria.

La metodología experimental consistió en la preparación de las muestras de aluminio silicio A319 (ver 4.2.2). Una vez preparadas las muestras se llevaron al microscopio óptico para posteriormente obtener y digitalizar imágenes de acuerdo al criterio de selección de campos de observación. Las imágenes digitalizadas son procesadas en el analizador de imágenes para medir las áreas y perímetros de las dendritas contenidas. Los datos del análisis de imágenes son utilizados en el análisis fractal para la obtención de la dimensión fractal.

Sobre las imágenes digitalizadas se realizan mediciones de los espaciamientos interdendríticos para su posterior análisis.

En forma complementaria se realizan mediciones de microdureza Vickers a lo largo del eje principal de las dendritas y del eutéctico.

El análisis fractal realizado en el presente estudio consiste en la obtención de la dimensión fractal haciendo uso de la relación área-perímetro de Mandelbrot [10] sobre las dendritas, en forma similar al célebre "slit island analysis" de Mandelbrot y Passoja [13].

4.2 MATERIAL.

4.2.1 Composición química.

La tabla 4.1 muestra la composición química de las muestras utilizadas en comparación con la composición nominal del A319. Donde se puede observar que las muestras utilizadas son más ricas en silicio que un A319, sin embargo se conservan las mismas características de un A319.

Tabla 4.1. Composición química de las muestras utilizadas comparada con la composición nominal del aluminio A319.

	A319 (nominal)	Muestra
Elemento	% en peso	% en peso
Si	5.50 - 6.50	8.030
Cu	3.00 - 4.00	3.360
Fe	0.00 - 1.00	0.678
Mn	0.00 - 0.50	0.481
Mg	0.00 - 3.00	0.357
Zn	0.00 - 0.25	0.528
Ti	0.00 - 0.35	0.076
Otros	0.00 - 0.50	0.157
Al	Balance	Balance

4.2.2 Obtención de muestras.

Las muestras utilizadas para la experimentación fueron extraídas de piezas de aluminio vaciado A319, con la composición química mostrada en la tabla 4.1. Las muestras fueron cortadas, montadas y pulidas hasta un acabado espejo. Se realizaron pruebas con diferentes ataques químicos, donde el mejor resultado se obtuvo al no realizar ataque alguno, ya que las fronteras entre las dendritas y el eutéctico presentaban daños con el ataque, además de que al no realizarse ataque químico resultaba buen contraste para el análisis de imágenes.

4.3 MICROSCOPIA ÓPTICA Y DIGITALIZACIÓN DE IMÁGENES.

Las observaciones realizadas sobre la microestructura se efectuaron con un microscopio óptico metalográfico marca Nikon Epiphot-TME con platina invertida motorizada, equipado con cuatro objetivos para observaciones a 50,

100, 200, y 400X. El microscopio se encuentra conectado a un equipo de análisis de imágenes marca Leica modelo Quantimet Q520+.

La imagen obtenida en el microscopio es captada por una cámara de vídeo tipo CCD (Charged coupled device) y es transferida al analizador de imágenes, la imagen es digitalizada (512x480 pixeles) a 256 niveles de gris. El equipo permite realizar mediciones que, de acuerdo a especificaciones del mismo[14], son reproducibles a ± 1 pixel (picture element). El equipo fue calibrado para las magnificaciones de 50x, 100x, 200x y 400x, resultando los factores de calibración de: 1.904, 0.952, 0.479 y 0.239 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ respectivamente. Las imágenes son grabadas y a partir de ellas se realizan las mediciones.

Puesto que el error de la imagen reproducida es del orden de ± 1 pixel [14], el error de la medición efectuada durante el análisis de imágenes depende del tamaño del objeto en la imagen y de su magnificación.

$$\text{Error} = \text{factor de calibración} / \text{longitud}$$

Considerando que los perímetros medidos en este trabajo fueron mayores a los $940\mu\text{m}$, donde los errores respectivos a las magnificaciones de 50x, 100x, 200x y 400x para esta medida son del orden de 0.20%, 0.10%, 0.05%, 0.03%. considerándose éstos muy pequeños.

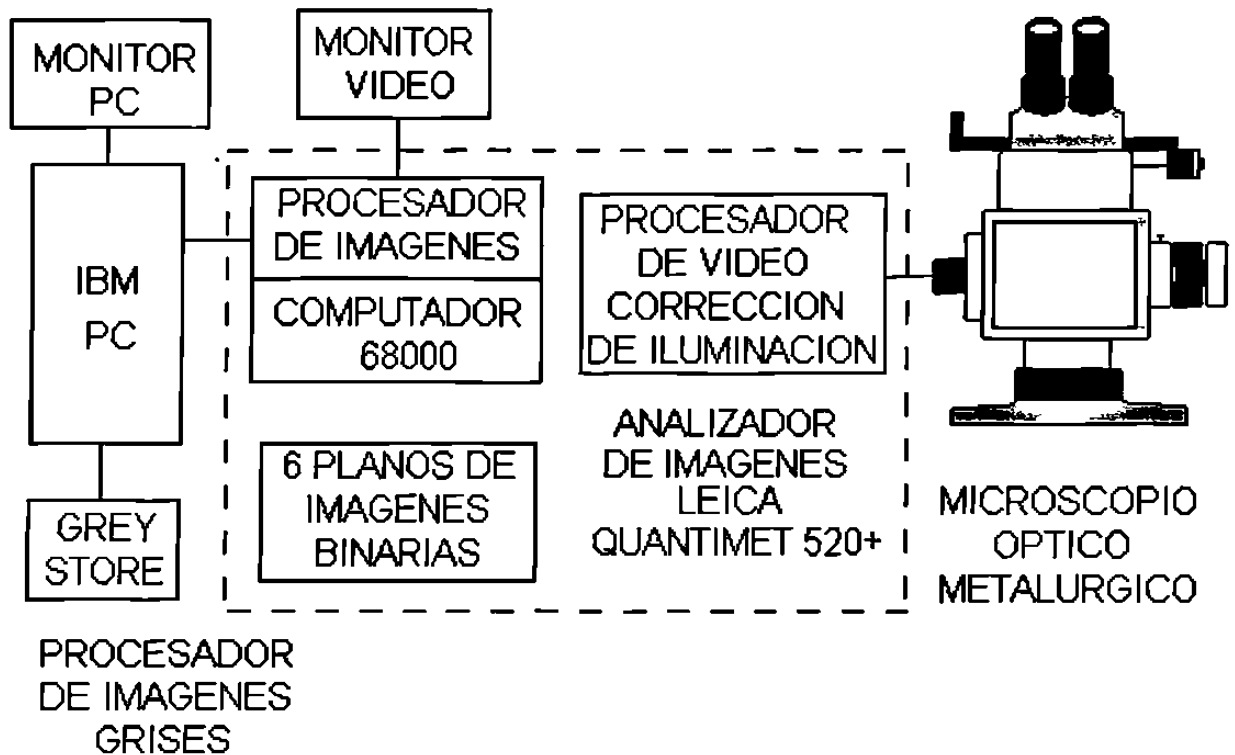


Fig. 4.1. Disposición del equipo de análisis de imágenes.

4.4 ANÁLISIS DE IMÁGENES.

4.4.1 Selección de campos de observación empleados.

Cuando se observa por medio de un microscopio un objeto a mayor magnificación se tendrá un menor campo de observación. En el presente estudio se hace uso de 4 diferentes magnificaciones (50x, 100x, 200x y 400x), Lo cual sugiere 3 métodos para la obtención de imágenes.

Una dendrita se asemeja a un árbol, de forma tal que el corte longitudinal mostrará el tronco y sus ramas, mientras que el corte transversal mostrará "islas" [12]. Debido a estas diferencias, las propiedades macroscópicas del material muestran anisotropía. Por lo tanto, se requiere de análisis fractal tanto para el corte transversal como longitudinal.

4.4.1.1 Método de imagen global.

El mayor campo de observación es el de 50x. Para observar la totalidad de la imagen a 50x se requiere de 4 imágenes a 100x, 16 imágenes a 200x y 64 imágenes a 400x. (Véase fig. 4.2).

Para las observaciones globales, se digitaliza la imagen de un conjunto de dendritas a diferentes magnificaciones, se obtuvo 1 imagen a 50x, 4 imágenes a 100x, 16 imágenes a 200x y 64 imágenes a 400x. Donde el área del campo de observación es la misma para cada magnificación.

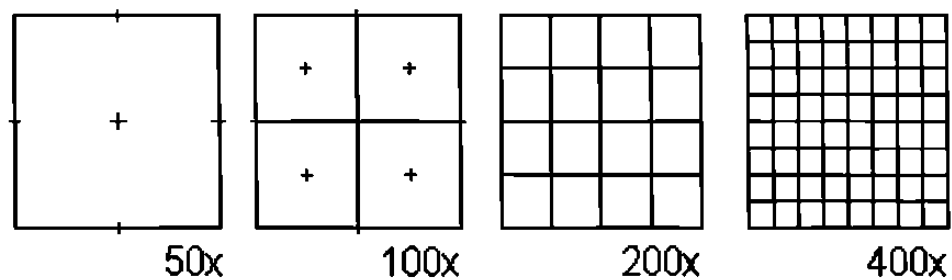


Fig. 4.2. Imágenes requeridas a 50x, 100x, 200x y 400x para cubrir la misma área de observación, por el método global.

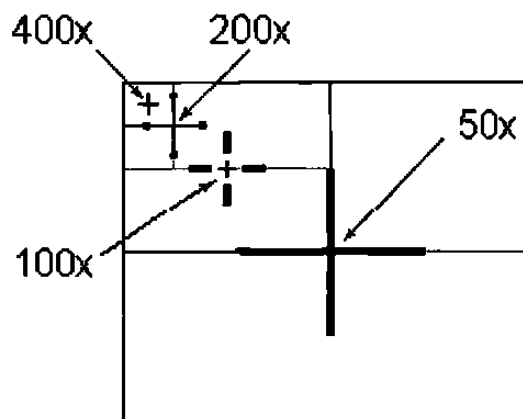


Fig. 4.3. Primer campo de observación a 50x, 100x, 200x y 400x.

4.4.1.2 Método de dendrita individual.

Para dendritas pequeñas el campo de observación a cualquier magnificación se cubrirá con una sola imagen. Por lo que no se requerirá hacer lo que para imágenes globales.

Sin embargo, para el caso de dendritas grandes puede requerirse de varias imágenes a magnificaciones superiores.

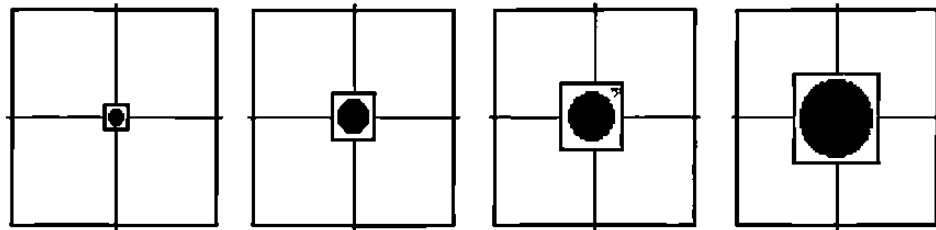


Fig. 4.4. Campo de observación a 50x, 100x, 200x y 400x por el método de dendrita individual.

4.4.2 Medición de áreas y perímetros.

Una vez digitalizadas las imágenes grises, sobre estas imágenes se realizaron mediciones sobre las dendritas. Los parámetros seleccionados para la medición fueron área (A) y perímetro (P) [14]. Los valores registrados son la sumatoria de todos los valores de área y perímetro observados en las diferentes imágenes.

4.5 MEDICION DEL ESPACIAMIENTO DENDRÍTICO.

Para complementar la caracterización del material se realizan mediciones de los espaciamentos interdendríticos, es decir, las distancias entre los ejes de los brazos de las dendritas. Posteriormente, se colectan los datos y se grafica

la distribución. Véase el apéndice F, de las mediciones de los espaciamientos interdendríticos.

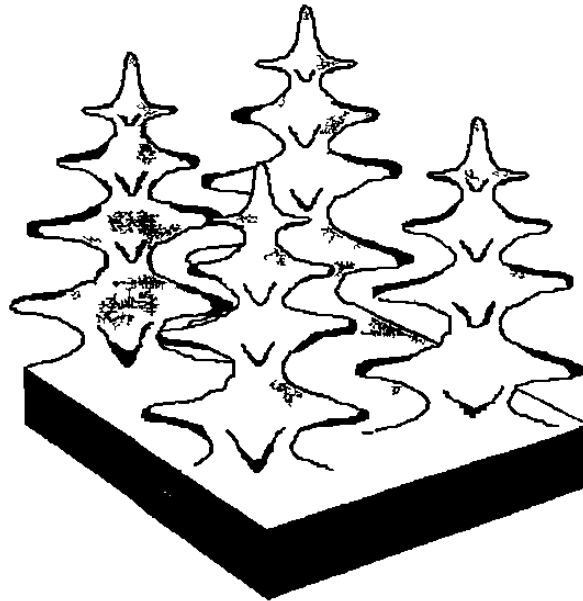


Fig. 4.5. Vista tridimensional, del crecimiento dendrítico.

4.6 MEDICIÓN DE LA MICRODUREZA VICKERS.

El ensayo de dureza se practica por medio de un microdurómetro Vickers, que cuenta con un indentador con punta de diamante, en forma de pirámide de base cuadrada. Se coloca un peso específico (50, 100, 200g) y se programa para un tiempo determinado (10s, 20s). Una vez realizado el ensayo, se mide la huella dejada por el indentador sobre la muestra. La huella tiene una forma cuadrada con las diagonales bien definidas. De acuerdo a relaciones entre la carga y tamaño de huella con la dureza, se obtiene la lectura de cada medición.

Se realizan mediciones en puntos sobre el eje principal de las dendritas del eutéctico.

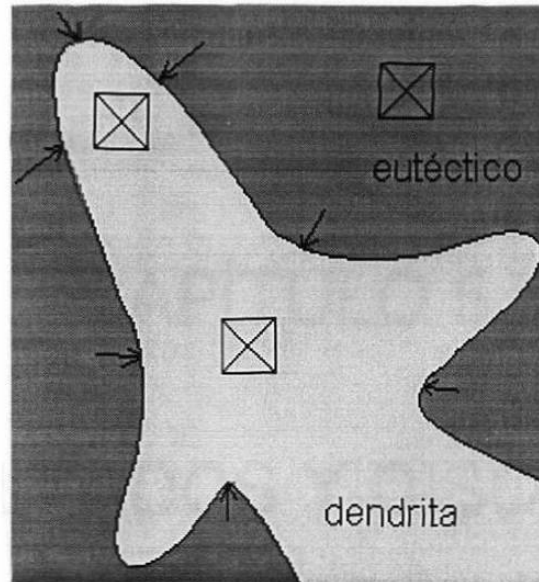


Fig. 4.6. Medición de la dureza sobre la dendrita.

4.7 FACTOR DE FORMA.

El factor de forma es un parámetro euclidiano, que se utiliza para poder comparar diferentes objetos. Para objetos euclidianos, el factor de forma se presenta como una constante a cualquier magnificación, lo cual no aplica para objetos fractales.

Para objetos fractales, la razón de cambio del factor de forma $\rho = P/A^{1/2}$ se puede utilizar para encontrar el valor de la dimensión fractal.

En el presente estudio se realizan gráficos $A^{1/2}$ versus P , normalizados respecto al factor de calibración δ (unidad de medición), para encontrar el valor de la dimensión fractal. También se realiza una regresión para conocer el valor del factor de forma a cualquier magnificación.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 ANÁLISIS DE IMÁGENES Y DIMENSIÓN FRACTAL.

5.1.1 Corte longitudinal.

La fig. 5.1 muestra una imagen obtenida del corte longitudinal en donde se puede observar un conjunto de dendritas. En este conjunto se puede observar una orientación preferencial, empero no todo el conjunto posee la misma orientación.

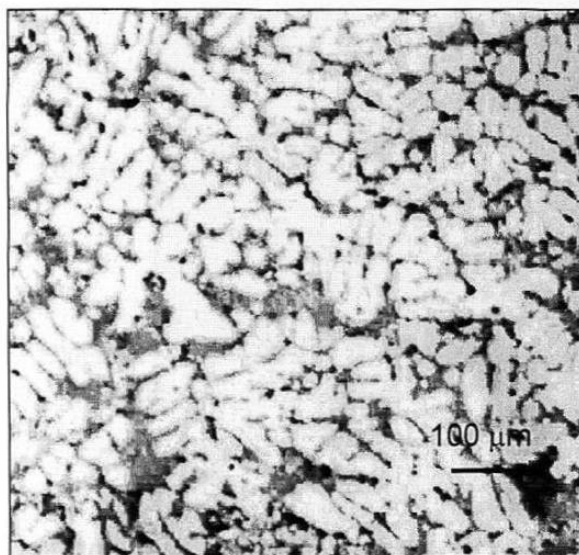


Fig. 5.1. Muestra "Longitudinal", a 50x

La tabla 5.1 comprende la sumatoria de áreas y perímetros del conjunto de dendritas. También reporta los valores $A^{1/2}/\delta$, P/δ , y ρ , parámetros de mayor interés.

Tabla 5.1. Valores obtenidos del análisis de la muestra "Longitudinal".

δ (μm)	A (μm^2)	P (μm)	$A^{1/2}/\delta$	P/δ	ρ
1.904	5.25×10^5	7.14×10^4	380	3.75×10^4	98.7
0.952	5.28×10^5	8.23×10^4	763	8.64×10^4	113.2
0.479	5.49×10^5	1.14×10^5	1550	2.38×10^5	153.5
0.239	5.82×10^5	1.81×10^5	3190	7.58×10^5	237.6

En la tabla 5.1 se puede observar un incremento en el perímetro a mayor nivel de magnificación (efecto Richardson). Lo cual también se puede apreciar en la gráfica de la fig. 5.2 al presentarse una recta con pendiente mayor a 1.

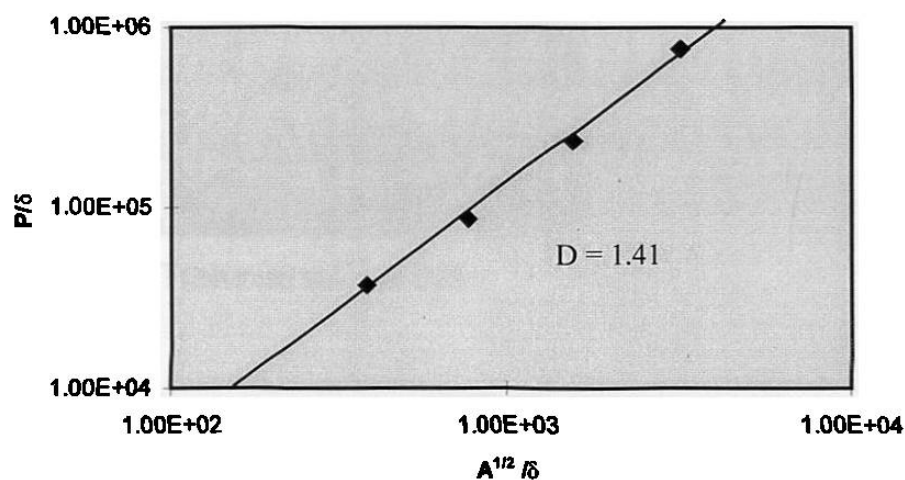


Fig. 5.2. Gráfico de la muestra "Longitudinal"

Como puede observarse en la fig. 5.2, los puntos obtenidos al graficar $A^{1/2}/\delta$ versus P/δ se ajustan a una línea recta de donde se confirma que el

objeto tiene un comportamiento fractal, cuya autosimilitud solo puede ser de tipo estadístico, ya que se trata de un objeto natural. La dimensión fractal del cúmulo de dendritas fue de 1.41.

5.1.2 Corte transversal.

La fig. 5.3 muestra una imagen obtenida del corte transversal en donde se puede observar un conjunto de dendritas. A diferencia de la imagen de la fig. 5.1, en la fig. 5.3 no se observa una orientación preferencial, se observa mayor complejidad con curvas más intrincadas, así mismo el espacio queda mejor cubierto por las dendritas.

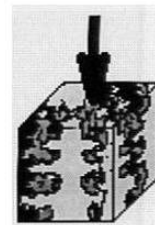
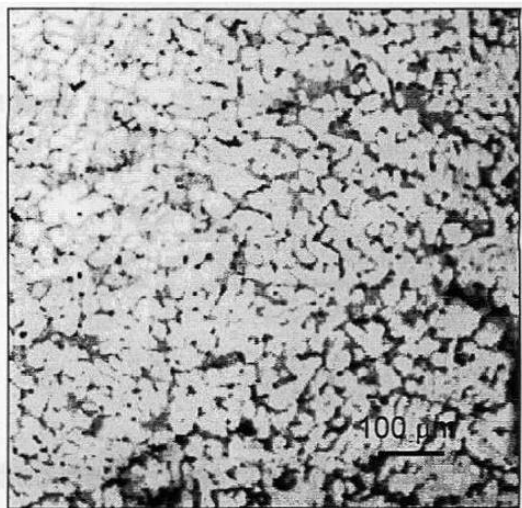


Fig. 5.3. Muestra "Transversal", a 50x.

En la tabla 5.2 se puede observar un incremento en el perímetro a mayor nivel de magnificación (efecto Richardson). Lo cual también se puede apreciar en la gráfica de la fig. 5.4 al presentarse una recta con pendiente mayor a 1.

Tabla 5.2. Valores obtenidos de la muestra "Transversal".

δ (μm)	A (μm^2)	P (μm)	$A^{1/2} / \delta$	P / δ	ρ
1.904	6.61×10^5	5.50×10^4	427	2.89×10^4	67.7
0.952	6.31×10^5	9.22×10^4	835	9.69×10^4	116.0
0.479	6.95×10^5	1.36×10^5	1740	2.83×10^5	162.6
0.239	7.49×10^5	2.01×10^5	3620	8.39×10^5	231.8

La gráfica de la fig. 5.4 muestra nuevamente puntos que se ajustan a una línea recta que confirma el comportamiento fractal y la autosimilitud estadística.

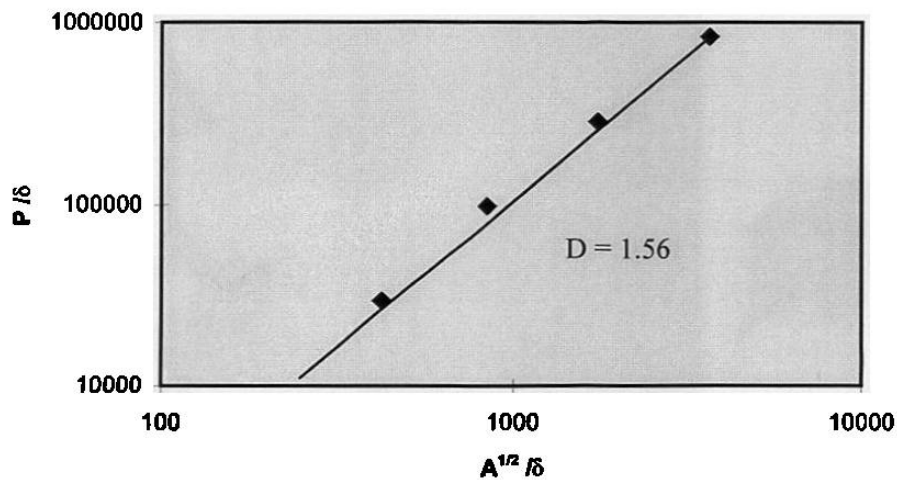


Fig. 5.4. Gráfico de la observación "Transversal".

La dimensión fractal obtenida para el conjunto de dendritas de la fig. 5.3 perteneciente al corte transversal tiene un valor de 1.56, superior al de la fig. 5.1 del corte longitudinal. Esto confirma el mayor grado de complejidad de la periferia de las dendritas para el corte transversal. Así mismo, se confirma que en este material se tiene anisotropía en cuanto a dimensión fractal. Probable indicador de anisotropía de propiedades.

La dimensión fractal de la dendrita de la fig. 5.5 perteneciente al corte longitudinal tiene un valor de 1.01, lo cual indica que la curva que describe su periferia tiene un comportamiento euclidiano. Esta dendrita fue seleccionada por poseer un tamaño pequeño con respecto al resto del conjunto al que pertenece.

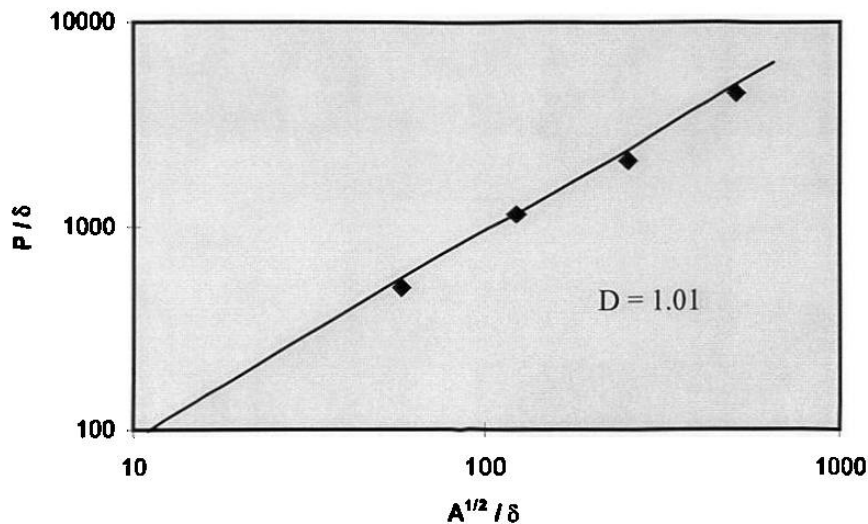


Fig. 5.6. Gráfico de la dendrita "A"

En la tabla 5.3 se puede observar que no hubo incremento significativo en el perímetro a mayor nivel de magnificación (no se presenta apreciablemente el efecto Richardson), las medidas obtenidas mostraron ligera variación, propia del error de la medición. La dimensión fractal obtenida para esta dendrita fue de un orden muy bajo, 1.01. Un valor tan bajo seguramente se debe a que la dendrita bajo análisis era de un tamaño considerablemente pequeño con respecto al resto de las dendritas del conjunto.

5.1.4 Dendrita B.

Las fig. 5.7 y 5.8 muestran imágenes de una dendrita individual del corte longitudinal. En esta imagen se puede observar que la línea que conforma el contorno es intrincada, la cual muestra nuevos detalles intrincados al ser magnificada (comparar fig. 5.7 y fig. 5.8).

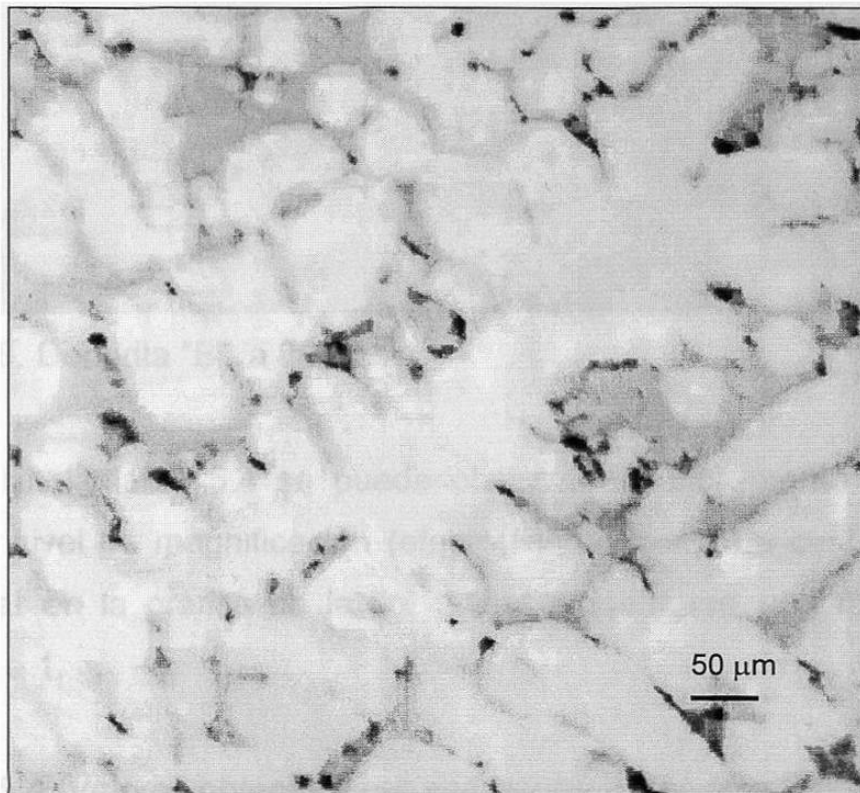


Fig. 5.7. Dendrita "B", a 100x

La dimensión fractal de la dendrita de la fig. 5.7 y 5.8 pertenece al corte longitudinal tiene un valor de 1.21, lo cual indica que la curva que describe su periferia tiene un comportamiento fractal. Esta dendrita fue seleccionada por mostrar un tamaño medio, y ser ramificada.

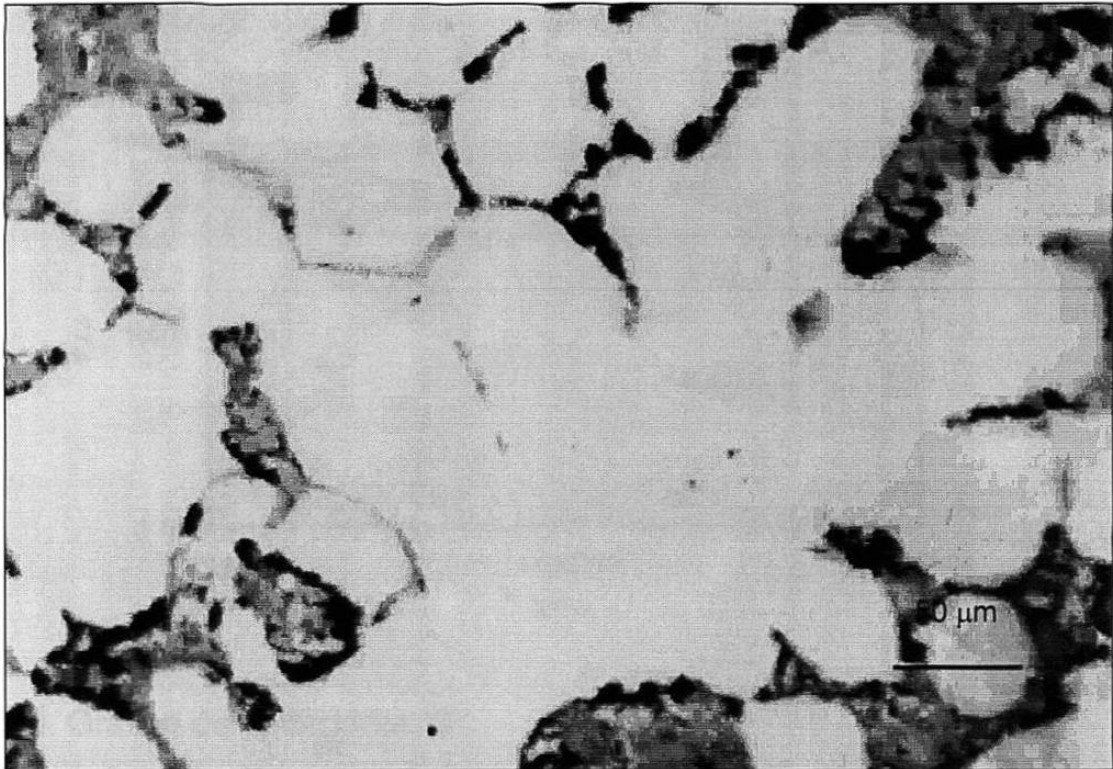


Fig. 5.8. Dendrita "B", a 200x.

En la tabla 5.4 se puede observar un incremento en el perímetro a mayor nivel de magnificación (efecto Richardson). Lo cual también se puede apreciar en la gráfica de la fig. 5.9 al presentarse una recta con pendiente mayor a 1.

Tabla 5.4. Valores obtenidos del análisis de la dendrita "B".

δ (μm)	A (μm^2)	P (μm)	$A^{1/2} / \delta$	P / δ	ρ
1.904	157000	13400	208	7050	33.9
0.952	157000	15800	416	16600	39.9
0.479	157000	18000	827	37600	45.5
0.239	157000	21000	1660	88000	53.0

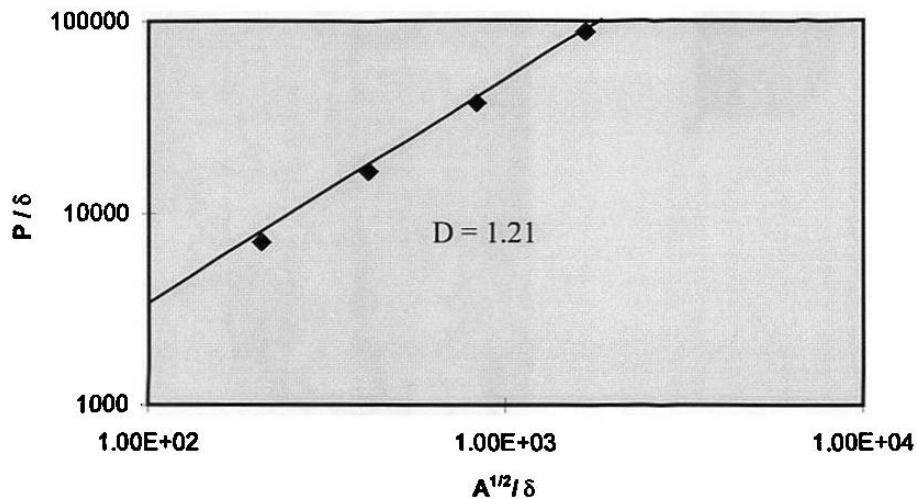


Fig. 5.9. Gráfico de la dendrita "B".

En la tabla 5.4 se puede observar un considerable incremento en el perímetro a mayor nivel de magnificación (efecto Richardson). La dimensión fractal obtenida para ésta dendrita fue de 1.21. Una dimensión de éste orden resulta ser un valor bajo comparado con la muestra longitudinal (de la que proviene).

5.1.5 Dendrita C.

Las fig. 5.10 y 5.11 muestran imágenes de una dendrita individual del corte longitudinal. En esta imagen se puede observar que la línea que conforma el contorno es intrincada, la cual muestra nuevos detalles intrincados al ser magnificada.

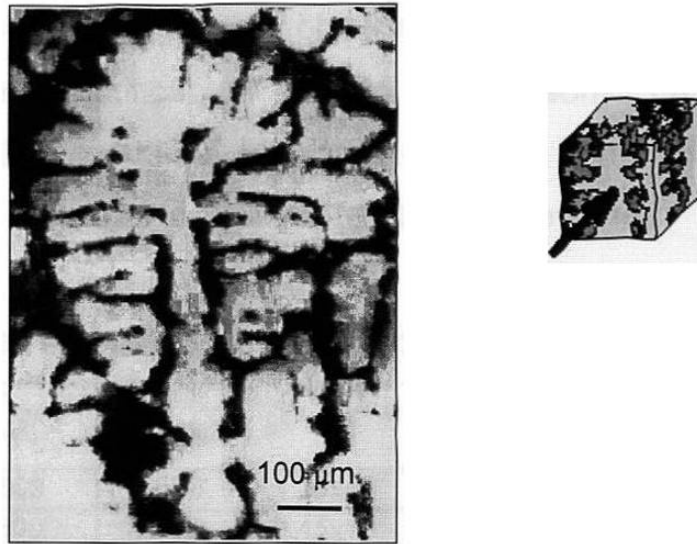


Fig. 5.10. Dendrita "C" a 50x.

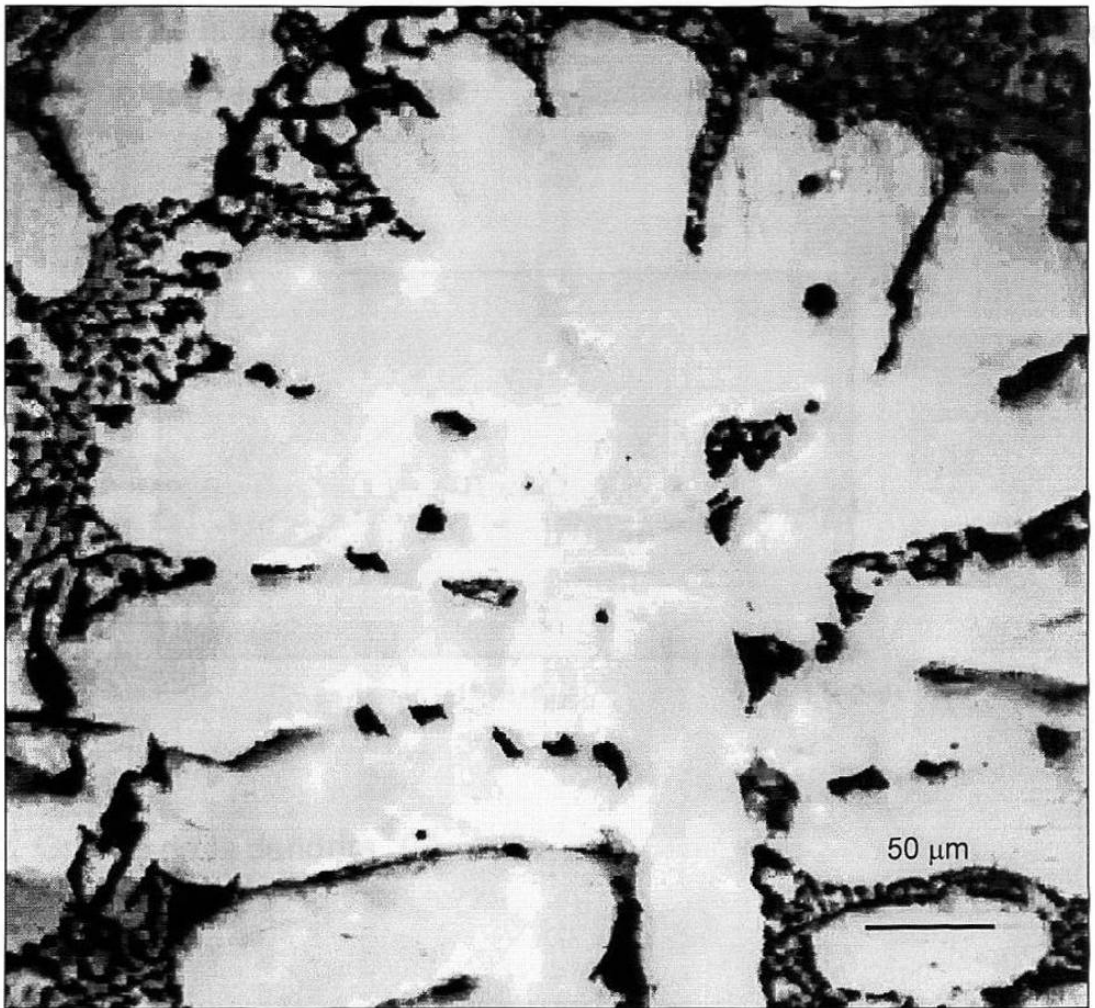


Fig. 5.11. Dendrita "C", a 200x.

En la tabla 5.5 se puede observar un incremento en el perímetro a mayor nivel de magnificación (efecto Richardson). La dimensión fractal obtenida para ésta dendrita fue de 1.47. Esta dimensión es ligeramente superior al de la muestra longitudinal (de la que proviene).

Tabla 5.5. Valores obtenidos del análisis de la dendrita "C".

δ (μm)	A (μm^2)	P (μm)	$A^{1/2} / \delta$	P / δ	ρ
1.904	54600	4880	1.23×10^2	2560	20.8
0.952	54600	5950	2.45×10^2	6250	25.5
0.479	54600	8520	4.88×10^2	17787	36.6
0.239	54600	12886	9.78×10^2	53916	55.1

La gráfica de la fig. 5.12 muestra que sus puntos se ajustan a una recta, verificando el comportamiento fractal.

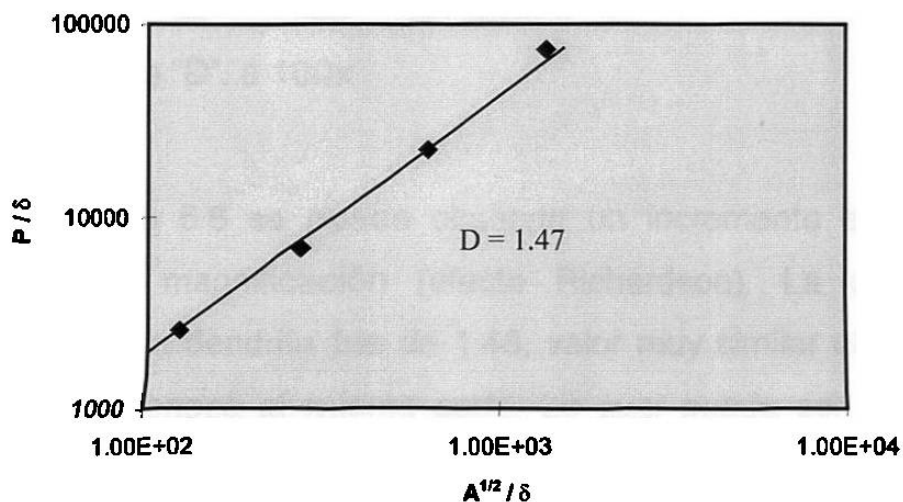


Fig. 5.12. Gráfico de la dendrita "C".

5.1.6 Dendrita D.

La fig. 5.13 muestra la imagen de una dendrita individual del corte longitudinal. En esta imagen se puede observar que la línea que conforma el contorno es intrincada, la cual muestra nuevos detalles intrincados al ser magnificada.

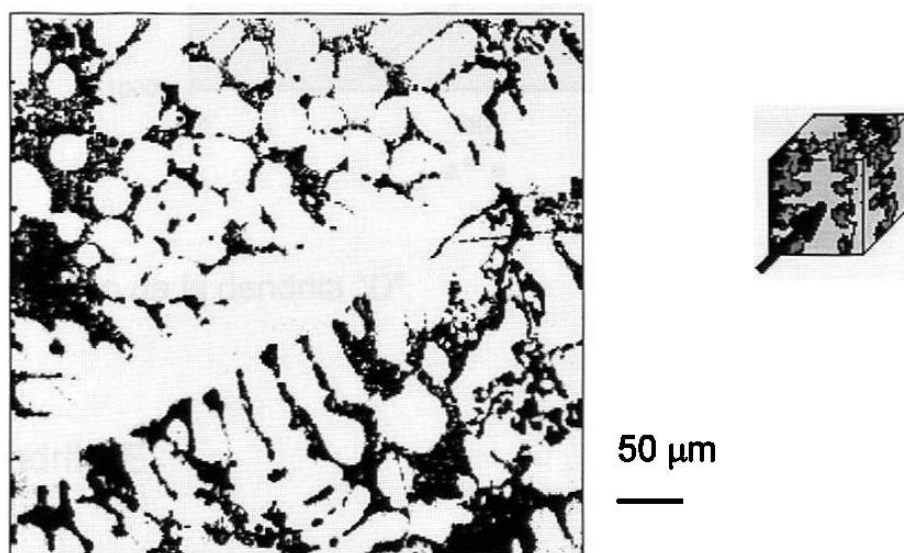


Fig. 5.13. Dendrita "D", a 100x

En la tabla 5.6 se puede observar un incremento en el perímetro a mayor nivel de magnificación (efecto Richardson). La dimensión fractal obtenida para ésta dendrita fue de 1.48, valor muy similar al de la dendrita C que también pertenece al mismo corte. Lo cual puede ser indicador de que existe una misma dimensión fractal para las dendritas dentro de cierto intervalo de tamaño.

Tabla 5.6. Valores obtenidos del análisis de la dendrita "D".

δ (μm)	A (μm^2)	P (μm)	$A^{1/2} / \delta$	P / δ	ρ
0.952	166000	13700	428	14400	33.6
0.479	166000	15600	851	32600	38.3
0.239	166000	26600	1710	111000	64.9

La gráfica de la fig. 5.14 muestra que sus puntos se ajustan a una recta, verificando el comportamiento fractal.

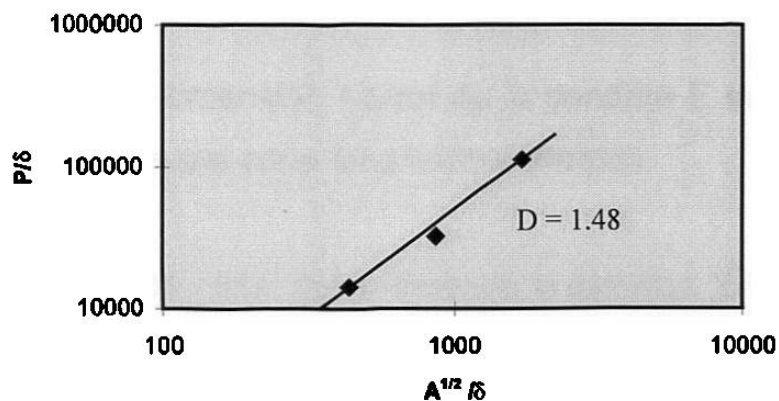


Fig. 5.14. Gráfico de la dendrita "D".

5.1.7 Dendrita E.

La fig. 5.15 muestra la imagen de una dendrita individual del corte longitudinal (lateral). En esta imagen se puede observar que la línea que conforma el contorno es intrincada, la cual muestra nuevos detalles intrincados al ser magnificada.

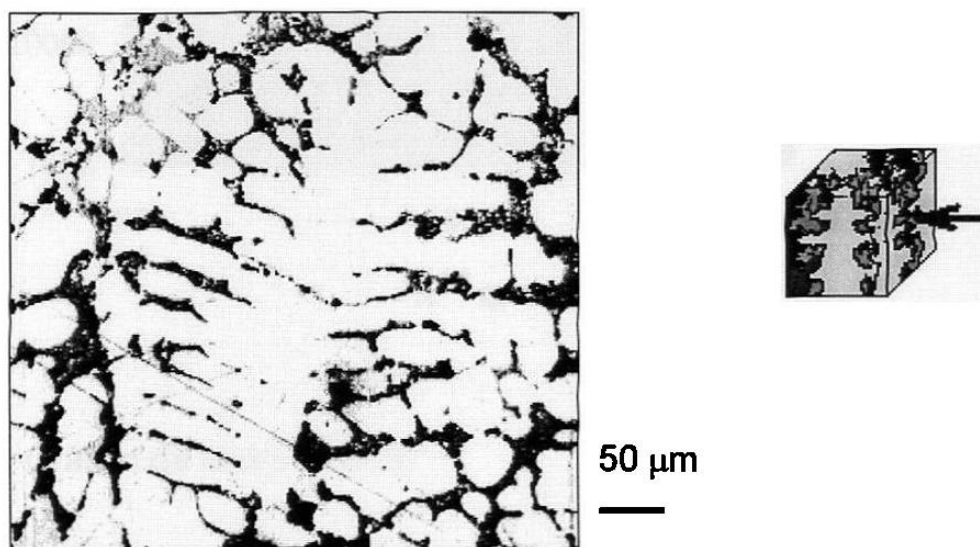


Fig. 5.15. Dendrita "E", a 100x.

En la tabla 5.7 se puede observar un incremento en el perímetro a mayor nivel de magnificación (efecto Richardson). La dimensión fractal fue de 1.45. Esta dimensión es ligeramente menor al de la muestra longitudinal (corte frontal)

El valor de la dimensión fractal de la dendrita E es muy similar al valor típico de las dendritas del corte longitudinal (frontal).

Tabla 5.7. Valores obtenidos del análisis de la dendrita "E".

δ (μm)	A (μm^2)	P (μm)	$A^{1/2} / \delta$	P / δ	ρ
1.904	1.90×10^5	13100	228.9	6870	30.0
0.952	1.90×10^5	19000	457.9	19900	43.4
0.479	1.90×10^5	22200	910.0	46300	50.9
0.239	1.90×10^5	35600	1823.8	149000	81.7

La gráfica de la fig. 5.16 muestra que sus puntos se ajustan a una recta, verificando el comportamiento fractal.

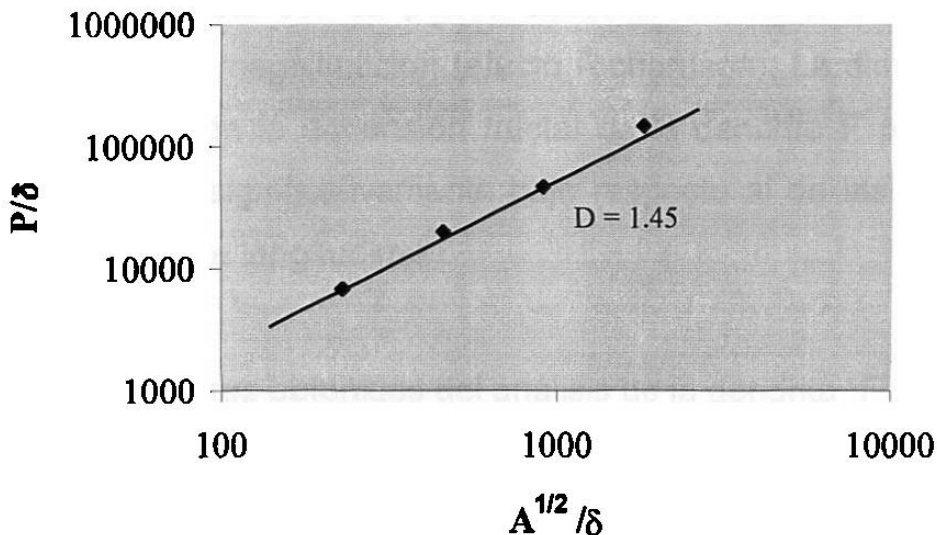


Fig. 5.16. Gráfico de la dendrita "E".

5.1.8 Dendrita F.

La fig. 5.15 muestra la imagen de una dendrita individual del corte transversal. En esta imagen se puede observar que la línea que conforma el contorno es intrincada, la cual muestra nuevos detalles intrincados al ser magnificada.

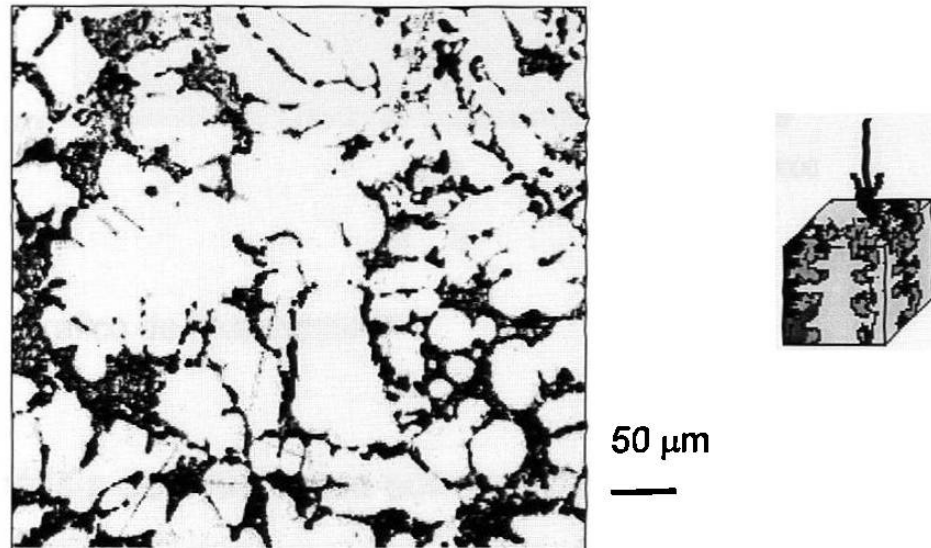


Fig. 5.17. Dendrita "F", a 100x.

En la tabla 5.8 se puede observar un incremento en el perímetro a mayor nivel de magnificación (efecto Richardson). La dimensión fractal fue de 1.13. El valor de la dimensión fractal de la dendrita F perteneciente al corte transversal es significativamente bajo respecto al de las dendritas del mismo corte, y del corte longitudinal.

Tabla 5.8. Valores obtenidos del análisis de la dendrita "F".

δ (μm)	A (μm^2)	P (μm)	$A^{1/2} / \delta$	P / δ	ρ
1.904	75700	6930	144	3640	25.3
0.952	75700	8030	289	8430	29.2
0.479	75700	8510	574	17800	31.0
0.239	75700	9170	1150	38400	33.4

La gráfica de la fig. 5.18 muestra que sus puntos se ajustan a una recta, verificando el comportamiento fractal.

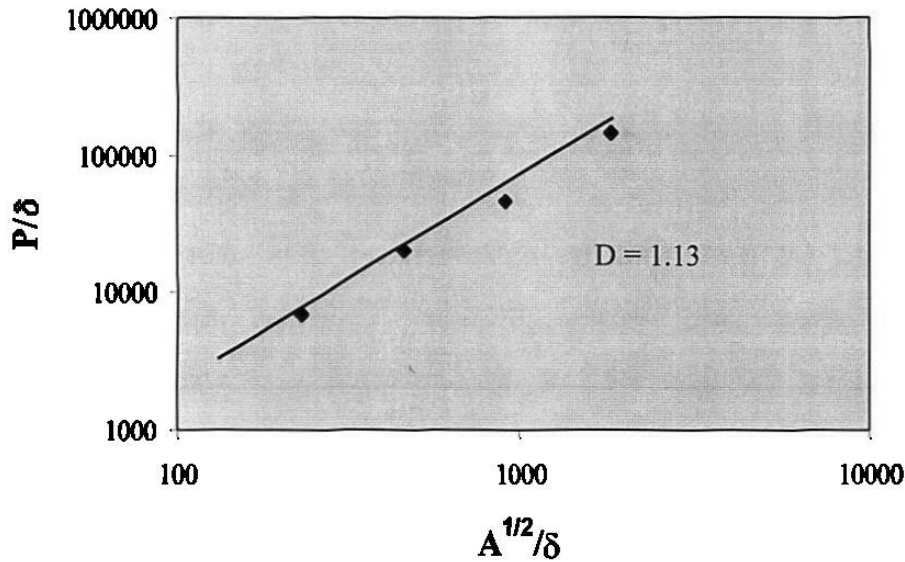


Fig. 5.18. Gráfico de la dendrita "F".

5.2 Análisis de resultados sobre la dimensión fractal.

Los resultados obtenidos muestran la dimensión fractal de la línea que conforma el contorno de las dendritas, la dimensión fractal de la superficie de las dendritas es de $D_s = D + 1$.

Se pueden observar valores mayores tanto en áreas como perímetros de la imagen transversal sobre la longitudinal. Además de esto los factores de forma son a su vez mayores para el caso de la transversal. Esto lo podemos atribuir a que para el corte transversal existe un mayor nivel de ramificación y por ende una mayor dimensión fractal.

La dendrita A muestra poca variación en su área, perímetro y factor de forma. Tal variación es propia del error en el equipo de medición, y podemos considerar que tal línea no mostrará detalles nuevos a magnificaciones superiores. Por lo que la dimensión de la línea de contorno sea igual a 1.

Las dendritas B y F muestran una periferia poco intrincada, una ligera variación en el factor de forma, y por lo tanto poseen una dimensión fractal pequeña.

Las dendritas C, D y E muestran una periferia muy intrincada, una variación grande en el factor de forma, y por lo tanto una dimensión fractal grande.

Se puede observar que existe una similitud física entre las dendritas cuyas dimensiones son aproximadamente iguales (D y E).

Existe una variación entre las dimensiones de las diferentes dendritas analizadas, sin embargo las imágenes del corte transversal poseen dimensiones significativamente mayores que las del corte longitudinal, a lo cual se atribuye anisotropía de dimensiones y anisotropía de propiedades. Concluyendo que las dendritas analizadas son objetos fractales naturales anisotrópicos.

5.3 MEDICIÓN DE LOS ESPACIAMIENTOS INTERDENDRÍTICOS.

Tabla 5.10. Distribución de frecuencias de los espaciamientos interdendríticos, para las dendritas longitudinales. Medidos a 100x.

<i>Espaciamiento medio (μm)</i>	<i>%</i>
13	6.5
16	10.1
19	28.3
22	22.5
25	14.5
28	5.8
31	6.5
34	2.2
37	2.2
40	0.7
43	0.7

Graficando la distribución de frecuencias de los espaciamientos de los brazos de las dendritas, se obtiene la siguiente curva de frecuencias,

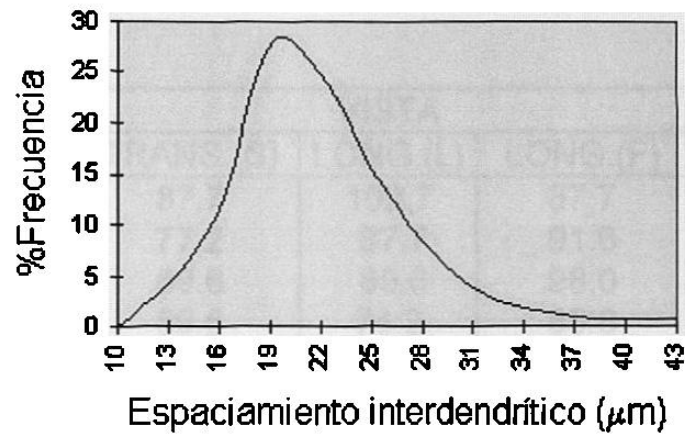


Fig. 5.19. Curva de frecuencias de los espaciamentos interdendríticos.

Los espaciamentos interdendríticos a nivel tridimensional presentan una distribución aproximadamente normal [21], ligeramente sesgada a la derecha con media de 22 μm , moda de 19 μm y desviación estándar de 5.8 μm .

Se realizaron mediciones de los espaciamentos interdendríticos a las magnificaciones de 50x, 100x, 200x, y 400x (apéndice E). Se observa ligera variación atribuida a la resolución del equipo a la magnificación dada. No se presentó efecto Richardson ya que las mediciones realizadas son sobre un parámetro euclidiano, la longitud o espaciamento.

5.4 MEDICIÓN DE LA MICRODUREZA VICKERS.

La siguiente tabla muestra los datos obtenidos al realizar pruebas de microdureza sobre los brazos de las dendritas y sobre el eutéctico.

Tabla 5.11. Microdureza Vickers en muestra de Al-Si, prueba realizada con 50grf, medida a 100x.

PRUEBA	VISTA			EUTÉCTICO
	TRANS.(S)	LONG.(L)	LONG.(F)	
1	87.7	102.7	87.7	115.9
2	77.2	87.7	91.6	115.9
3	89.6	89.6	98.0	115.9
4	89.6	74.2	85.8	115.9
5	84.0	87.7	80.5	115.9
MEDIA	85.6	88.4	88.7	115.9

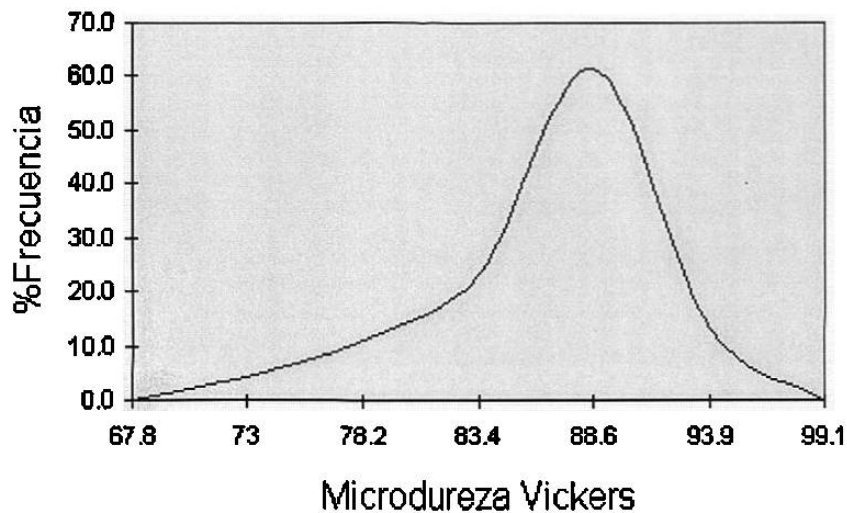


Fig. 5.20. Curva de frecuencias de la microdureza.

El eutéctico reporta la dureza más alta y constante en cualquier corte, lo cual era esperado, ya que posee una composición constante (11.7% de Si) orientada aleatoriamente. La distribución de microdureza de las dendritas longitudinales tiene una moda de 88.6 HV, una media de 88.6 HV, y una desviación estándar de 2.0 HV. Resultando ser una distribución aproximadamente normal, ligeramente sesgada a la izquierda.

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos a partir de la distribución de diámetros de huella para las dendritas D, E y F.

Tabla 5.12. Media y desviación estándar de la diagonal de la huella, para pruebas realizadas con 25grf.

	μ (HV)	μ d, μm	σ d, μm	dimensión fractal, D
Dendrita "D" (Vista Lateral)	60.9	27.6	2.12	1.45
Dendrita "E" (Vista Frontal)	67.0	26.3	2.05	1.48
Dendrita "F" (Vista Superior)	47.9	31.1	4.43	1.15

De la tabla 5.12 se puede observar que una dendrita con dimensión fractal menor a otra del mismo tamaño tiene una dureza también menor.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES.

Las dendritas de Al-Si presentan autosimilitud estadística, son objetos fractales anisotrópicos.

Se calculó la dimensión fractal para dendritas sobre un mismo plano muestral, encontrando diferentes dimensiones fractales, por lo que una dendrita particular no necesariamente tiene la misma dimensión fractal que la de la imagen global en la que se encuentra.

Las dendritas de aluminio presentan un factor de forma aproximadamente constante a una misma magnificación.

Se encontró que el factor de forma cambia con la magnificación, a partir de la cual se encontró una relación lineal entre factor de forma y magnificación. Las mediciones de los espaciamentos dendríticos presentan una distribución normal a una magnificación específica.

La microdureza del Aluminio-Silicio presenta una distribución Normal y está en función de los espaciamentos interdendríticos. A mayor espaciamento existe menor dureza.

Las dendritas con igual distribución de microdureza tienen prácticamente la misma dimensión fractal.

A medida que se reduce la dimensión fractal de una dendrita, se obtiene una distribución con una media de microdureza mayor.

La dimensión fractal no tiene un efecto significativo sobre la distribución de microdureza en imágenes globales; es decir, la dimensión fractal no tiene un efecto significativo sobre la propiedad macroscópica dureza.

6.2 RECOMENDACIONES A TRABAJOS FUTUROS.

La aplicación de la geometría fractal se desarrolla en todas las áreas imaginables, es necesario conocer más de ésta técnica, mejorar las técnicas ya existentes, y desarrollar, dentro de la misma, tópicos que falta por estudiar. La aplicación del análisis de imágenes por medio de geometría fractal es una técnica relativamente nueva y en expansión, por lo que queda mucho camino por recorrer. Por citar algunos están:

El estudio de relaciones en la velocidad de enfriamiento de un material fundido, y la dimensión fractal.

La obtención del algoritmo que caracteriza a un material, en función de sus propiedades mecánicas: resistencia a la tensión, grado de deformación plástica, y dureza.

La predicción de las propiedades mecánicas de un material, a partir de la composición química de las fases y la dimensión fractal.

Aplicación de la geometría de fractales a magnificaciones superiores.

Aplicación de geometría fractal a polímeros.

Creación de hardware y software para facilitar el análisis fractal.