

167
2e1.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA



EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA

"Diseño de un Sistema Digital para la
Caracterización de Porosidad en Alúmina"

T E S I S
Que para obtener el título de
INGENIERO QUIMICO
p r e s e n t a
ANTONIO VILLAGOMEZ AMEZCUA



México, D. F.

1997

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado asignado

Presidente: Prof. Mercedes Mejuiero Morosini
Vocal: Prof. Manuel Vázquez Islas
Secretario: Dr. Víctor Manuel Castaño Meneses
1er. Suplente: Prof. María Asunción Castellanos Román
2do. Suplente: Prof. Eric Mauricio Rivera Muñoz

Sitio donde se desarrolló el tema: Instituto Tecnológico Danés / Instituto de Física

Asesor del Tema:  Dr. Víctor M. Castaño Meneses

Sustentante:  Antonio Villagómez Amezcua

INDICE

Objetivo	6
Introducción	7
Trascendencia del estudio de la alúmina	12
Microscopía Electrónica de Barrido y su aplicación a materiales.....	20
Obtención de imágenes y digitalización	28
Procesamiento de imágenes digitalizadas	35
Análisis de las imágenes digitalizadas	50
Discusión de Resultados	61
Conclusiones	75
Bibliografía	77
APENDICE I. Características del programa	78

DEDICATORIAS

Con todo mi respeto y afecto a mi Padre, que con su ejemplo de profesionalismo y honradez dirigió mis primeros pasos en este camino.

Con todo mi cariño y admiración a mi Madre, que con su ejemplo de perseverancia y dedicación me mostró que los retos son alcanzables, por lejanos que parezcan.

Para Mally, por su fortaleza; para Alex, por su rectitud; para Eugenio, por su sensibilidad; para Mary, por su dedicación. A mis hermanos, por su ejemplo, cariño y comprensión.

Con todo mi amor, a Chelito, por su apoyo tierno pero firme a lo largo de la carrera, en momentos difíciles y decisivos. Gracias por confiar absolutamente en mí y por continuar ayudándome a obtener mi máximo potencial como persona.

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento al Dr. Víctor Castaño, por confiar en mí y apoyarme con su dirección en este trabajo.

A mis profesores de la Facultad de Química, que desinteresadamente cimentaron las bases para mi camino en la vida profesional, y mostraron los ángulos que puede tener esta completa y versátil carrera que es la Ingeniería Química.

Quiero reconocer especialmente a mis maestros Dr. Andoni Garritz, Dr. Alejandro Pisanti, M.C. Eduardo Marambio, Dr. Enrique Bazua, M.C. Mario Luis Chin, Dr. Francisco Barnés, Ing. Alex Íñiguez, Ing. Carlos Galdeano, M.A. Ramón Arnaud, M.C. Ramón Anaya y al Dr. Ernesto Ríos, por su dedicación y por dar ese valor agregado a sus clases que hace por demás valiosa la formación en nuestra querida Alma Mater Universitaria.

A mis compañeros y amigos.

" UNA IMAGEN VALE MAS QUE MIL PALABRAS "

Proverbio Chino

0.- OBJETIVO

El objetivo de la presente tesis es presentar una opción para el estudio de la porosidad en alúmina, por medio de la utilización de técnicas automatizadas como es el análisis de imágenes digitalizadas de esta cerámica por medio del microscopio electrónico de barrido y una computadora personal con procesador 386. Los alcances del presente trabajo se circunscriben al diseño del programa de análisis en lenguaje Turbo Pascal, así como la definición de los parámetros típicos de medición en la porosidad de muestras de α -alúmina preparadas por sinterización en el laboratorio.

I-. INTRODUCCION

Las alúminas representan hoy un papel importante dentro de la Ciencia de Materiales. A partir de sus usos y aplicaciones, surgen necesidades para perfeccionar y adaptar las características de estos materiales. El requerimiento de materiales más resistentes y durables conduce a desarrollar técnicas así como metodologías de análisis sobre bases científicas para llegar a resultados de utilidad práctica. Un ejemplo de las primeras técnicas de análisis estructuradas científicamente, son las que se realizan a nivel macroscópico, como las pruebas de esfuerzo en barras de materiales de diversa composición. La aparición del microscopio óptico primero y del microscopio electrónico posteriormente, trajo consigo nuevas posibilidades de estudio de los materiales desde otra perspectiva. La observación de los efectos del esfuerzo aplicado al material o de las variaciones en la estructura microscópica en función de su proceso de síntesis, amplía la interpretación y facilita la comprensión de los diversos fenómenos que lo afectan. Es en este sentido que el Análisis de Imágenes constituye una herramienta muy útil para la valoración y cuantificación de las imágenes obtenidas por estos medios. Por otro lado, el desarrollo acelerado que ha venido presentándose en el campo de los procesadores computacionales ha revolucionado de gran manera la aplicación de estas técnicas de análisis.

- El sistema de visión humana

Una de las principales formas de interacción del hombre con su medio ambiente es por medio del sentido de la vista. Aproximadamente, el sesenta por ciento de los estímulos al cerebro provienen por este medio. El ser humano tiene capacidad de abstracción y uno de los mejores métodos para el aprendizaje es el visual. En diversos campos de la ciencia, por ejemplo, es común utilizar dibujos, esquemas y gráficas para facilitar la representación y comprensión de fenómenos de

estudio en particular. De hecho, el sistema integral de la visión humana es uno de los más desarrollados en el reino animal debido a su gran capacidad de procesamiento mental de las imágenes que percibe. El cerebro es capaz de alterar completamente una imagen ya sea girarla, cambiar su tamaño, color, forma, etc., pero básicamente es un sistema comparativo más que de medición. No existe una respuesta simple al hecho de poder reconocer figuras o aún la habilidad de identificar objetos con solo visualizar una parte de ellos, como se ve en el grupo de ochos de la figura 1:



Fig. 1

Por otro lado, es difícil para el sistema visual efectuar mediciones de objetos con relativa exactitud. Para este proceso, el cerebro realiza comparaciones entre objetos para llegar a determinar el tamaño relativo de ellos. Pero aún así, es altamente probable cometer errores debido a la forma de los objetos o a ilusiones ópticas como el ejemplo de las líneas de Müller-Lyer (1):

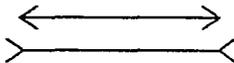


Fig. 2

en donde las dos líneas horizontales tienen la misma longitud pero el sentido de las flechas distorsiona nuestra percepción de sus respectivas magnitudes.

La utilización de sistemas confiables nos permite realizar mediciones más precisas enfocadas al estudio de imágenes tomadas de objetos para una mejor descripción y definición de los mismos. En los últimos años, el avance tecnológico de los equipos de cómputo ha contribuido enormemente al desarrollo de nuevas técnicas de estudio, especialmente en campos donde anteriormente había poco o ningún desarrollo.

- Historia del Análisis de Imágenes

Los orígenes del Análisis de Imágenes en Ciencia de Materiales se remontan a principios de los años sesenta (2) por una necesidad específica en el campo de la metalurgia. Esta se resumía en la medición de las fracciones de las diferentes fases en secciones pulidas de aleaciones y la estimación de el tamaño promedio de los diferentes granos que componían la microestructura del material.

Uno de los métodos más rápidos en ese entonces consistía en cortar y pesar todas las áreas oscuras de una microfotografía de la sección pulida, comparando este peso con el de toda la microfotografía para obtener así la fracción área y la fracción volumen. Este método tedioso hacía difícil el manejo de grandes cantidades de imágenes con el fin de obtener resultados estadísticamente confiables, además de resultar poco preciso.

Los primeros analizadores de imágenes fueron muy básicos, y sólo podían traducir una imagen blanco y negro en señales analógicas dependiendo de la extensión del área negra en el fondo blanco, sin tener la capacidad real de distinguir entre los objetos de estudio y las imperfecciones de la imagen, como manchas o sombras marcadas. El hecho de ser analógico dificultaba la reproducibilidad de los

resultados al realizarse nuevamente las mismas mediciones, además de no poseer la velocidad requerida para la obtención de grandes cantidades de resultados.

Con la llegada de sistemas digitales con capacidades de memoria suficientes para el manejo de mayor información, aumentaron considerablemente las posibilidades de estudio de las imágenes y paralelamente se obtuvo una reducción en el tiempo y costo de éstos. En los últimos años se ha dado un avance significativo en las capacidades y posibilidades para la obtención y manejo de imágenes digitalizadas.

- Relevancia del análisis de imágenes en la Ciencia de Materiales

En la Ciencia de Materiales, la medición de las estructuras microscópicas es esencial para la determinación de parámetros característicos de los materiales en estudio. Las cerámicas avanzadas poseen diversas propiedades que son adaptadas, modificadas o perfeccionadas dependiendo del área de aplicación. Estas propiedades son frecuentemente sensibles a las fallas estructurales, como la porosidad, así como el tamaño final de los granos que compongan su estructura. La determinación del tamaño de grano, de sus fronteras, de la porosidad o defectos que se encuentren en la estructura son determinantes para la definición de parámetros macroscópicos como la dureza del material, la elasticidad y la resistencia a esfuerzos que contribuyen al perfeccionamiento de estas características para aplicaciones específicas en diversos campos. Es por eso que gran parte del desarrollo de técnicas se ha encaminado al mejoramiento de los procesos de determinación y medición de las microestructuras. La gran ayuda que representa la visualización directa de los cambios efectuados en un proceso de síntesis facilita al investigador la determinación de los efectos a nivel microscópico que conllevan estos cambios. Adicionalmente, la cuantificación de estos cambios por medios digitales, permite obtener resultados reproducibles con los que se desarrollen modelos que correlacionen de una forma estructurada la afectación de las

propiedades de los materiales en función de la variaciones en el proceso de manufactura.

En la presente tesis, se expone un método de aplicación de el análisis de imágenes en la identificación de la porosidad (parámetros geométricos) de muestras de alúmina ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$). Esta alúmina base se preparó bajo el proceso de "slip casting" y posteriormente fue sinterizada a 1,500 °C, manteniéndose a esta temperatura durante 4 horas. Las muestras fueron cortadas en barras, pulidas y posteriormente tratadas con el proceso de erosión térmica. Este procedimiento fue llevado a cabo con el propósito de preparar la superficie de las muestras para su observación en el microscopio electrónico de barrido. Para este efecto se recubrieron con una capa de oro .

Las muestras ya listas se colocaron para su observación en un microscopio electrónico modelo Cambridge S360. Las imágenes producidas por los electrones retrodispersados se digitalizaron por medio de un convertidor A/D comercial, en una computadora personal Compaq 386 con 2 megabytes de memoria RAM. Ya en el formato digital, las imágenes se procesaron y analizaron por medio del software específicamente desarrollado. El programa produce una tabulación con los principales parámetros geométricos de la porosidad (área, diámetro, perímetro, largo y factor de forma). En los capítulos siguientes se desarrollarán los principales aspectos contemplados así como la metodología empleada en el algoritmo general de este programa.

II -. TRASCENDENCIA EN EL ESTUDIO DE LA ALUMINA

- Ingeniería de las cerámicas avanzadas

De manera general, los materiales de estudio dentro de la Ciencia de Materiales se pueden dividir en tres grandes grupos:

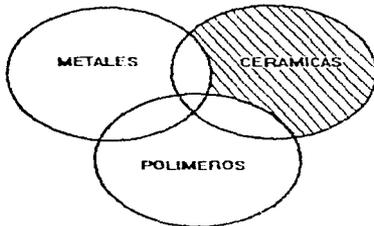


Fig. 3

Metales : Los metales son materiales inorgánicos de origen natural, maleables, dúctiles, con una gran conductividad eléctrica y térmica a bajas temperaturas. Formando aleaciones con otros metales o materiales inorgánicos, es posible alterar sus propiedades originales para aplicaciones estructurales, de conducción, etc.

Polímeros : Los polímeros son materiales de procedencia orgánica, de altos pesos moleculares y relativas bajas densidades. En la naturaleza se encuentran formando parte de todas las estructuras vivientes. Con los avances en el terreno de la

petroquímica, los polímeros han tenido un fuerte impulso debido a la posibilidad del diseño de materiales que cumplan con necesidades específicas a un bajo costo.

Cerámicas : La palabra Cerámica proviene de la raíz griega *Keramos*, que se refiere al barro o arcilla. Dentro de la Ciencia de Materiales el término de Cerámica comprende todos los materiales sólidos no metálicos e inorgánicos. A pesar de que las cerámicas comunes han sido utilizadas por el hombre desde hace más de 3000 años, las cerámicas avanzadas para aplicaciones en ingeniería tuvieron sus inicios por los años cuarentas. Estas han sido desarrolladas utilizando principios básicos relacionando diversos niveles estructurales, desde el atómico al macroscópico.

La aplicación exitosa de las cerámicas depende en gran medida de la habilidad del ingeniero diseñador para desarrollar su estructura y composición, de forma que utilice ventajosamente sus propiedades y minimice el impacto de las características limitantes. De igual forma, las propiedades del material dependen casi en su totalidad de la síntesis efectuada y de las materias primas utilizadas en su elaboración.

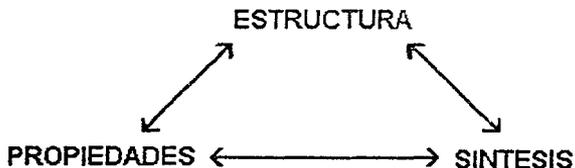


Fig. 4

El desarrollo de las cerámicas avanzadas bajo este enfoque contribuye al entendimiento de las relaciones existentes entre la síntesis, las propiedades y la estructura de los materiales para una óptima utilización en las necesidades particulares de aplicación.

Principalmente existen tres técnicas en el diseño de materiales avanzados: Empírica, determinística y probabilística (5).

La empírica es la más sencilla de las tres, teniendo sus bases en un contexto de prueba y error de un material específico y su desempeño en un ambiente determinado. Si el material prototipo falla, se prueba otro nuevo y así sucesivamente hasta encontrar el mejor para la aplicación.

El diseño determinístico se basa en propiedades promedio medidas de los materiales, combinadas con un factor de riesgo en la producción de materiales para una exitosa aplicación. Materiales como el acero, por ejemplo, con rangos estrechos de falla al esfuerzo, encuentran en este método la forma más efectiva para su obtención.

En el caso de materiales frágiles, que es el caso de las cerámicas, el mejor procedimiento para su diseño es el del método probabilístico. En éste, se integran los requerimientos mecánicos de la aplicación y el perfil estadístico de falla del material. El método plantea la división de la estructura en pequeños volúmenes discretos de tamaño finito y evalúa los esfuerzos realizados en cada uno de ellos. Esta matriz de elementos se integra posteriormente con el conocimiento completo de su comportamiento estructural. El diseño probabilístico es capaz de producir excelentes resultados siempre y cuando se defina el tamaño de los elementos finitos por un lado, y de analizar una muestra estadísticamente representativa de estos elementos por el otro. Es en este sentido, que la utilización de técnicas de análisis microestructural automatizadas como en el presente trabajo, permiten al diseñador obtener un gran

número de determinaciones reproducibles en un periodo de tiempo relativamente corto.

- La alúmina en el diseño de cerámicas avanzadas

Aunque el proceso de manufactura es determinante en las propiedades de las cerámicas, es importante efectuar una correcta selección de las materias primas que la compongan para satisfacer los niveles deseados de aplicación y permitir su producción a un costo relativamente bajo.

El primer paso en este proceso de diseño es el seleccionar el material que tenga las propiedades requeridas para su aplicación. El material más utilizado para la obtención de cerámicas avanzadas es la alúmina. La alúmina ofrece un comportamiento muy bueno debido a su dureza, estabilidad térmica, resistencia al impacto en situaciones de alta temperatura y otras propiedades mecánicas que la hacen ser una excelente opción. Adicionalmente, su naturaleza hace factible un costo relativamente bajo de producción.

La α - alúmina ($\alpha - Al_2O_3$) se encuentra con impurezas libre en la naturaleza en forma de rubí y zafiro (4). De forma económica la alúmina se puede obtener de los aluminosilicatos minerales como la bauxita, con grandes yacimientos ubicados en el cinturón ecuatorial de la Tierra. Químicamente existen diversos estados de transición en la alúmina y su denominación varía dependiendo de su estructura cristalina y de su estado de hidratación.

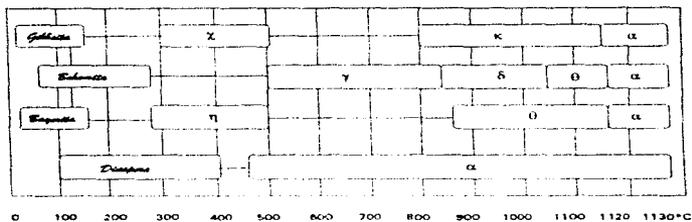


Fig. 5 - Secuencias de transformación de las fases de la alúmina

Este diagrama nos muestra las secuencias de transición de las fases de alúminas metaestables como polvos ultrafinos hasta la fase más estable α . Estas secuencias de transformación son función de las condiciones de temperatura, humedad y presión en las condiciones en las que la fase de transición se encuentre.

Respecto al tamaño de las partículas, es posible producirlos desde 0.03 micrones a los 30,000 micrones, dependiendo del proceso de fabricación (4). El tamaño de las partículas a utilizar es importante para las características del material a obtener, así como su efecto en las variables del proceso de producción que más adelante se detallarán.

En la siguiente tabla, se presentan las principales propiedades mecánicas y térmicas de la alúmina:

Propiedades de la Alúmina									
Material	Estructura Cristalina	Densidad Teórica, g/cm ³	Dureza (Vickers)	Resistencia a la ruptura, MPa	Resistencia a la fractura, MPa* \sqrt{m} 1/2	Módulo de Young, GPa	Relación de Poisson	Expansión Térmica, 10 ⁻⁶ /K	Conductividad Térmica, W/m*K
Al ₂ O ₃	Hexagonal	3.97	18 - 23	276 - 1,034	2.7 - 4.2	380	0.26	7.2 - 8.6	27.2

Fig. 6

- Producción de las cerámicas de alúmina

Un aspecto definitivo en el diseño de cerámicas avanzadas es el desarrollo de metodologías de producción tales que hagan factible su aplicación comercial con la ayuda de la Ingeniería de Producción (6). Una vez que se obtienen resultados necesarios para la determinación de la materia prima a escoger, es preponderante elegir y desarrollar métodos de producción tales que optimicen al máximo las propiedades de los componentes utilizados.

Existe una amplia variedad de métodos de producción que van desde procesos en seco como el prensado de polvos, plastificación de la materia prima en la extrusión, hasta los procesos de "slip casting" de suspensiones (5).

La manufactura de la alúmina utilizada en esta tesis se realizó a partir del proceso de "slip casting", debido a que es un proceso extensivamente utilizado por ser económico y facilitar la producción de formas complejas necesarias para cualquier tipo de aplicación. Para su fabricación, se dispersa el polvo de la alúmina en agua con un porcentaje del 75% del sólido y se agrega a esta mezcla 0.5% de acrilato que funciona como dispersante. La suspensión resultante se vacía en un molde de yeso que, debido al fenómeno de capilaridad, funciona como drenante del agua hasta quedar una capa de la cerámica depositada en la pared del molde. Posteriormente se remueve esta capa para su secado y posterior tratamiento de sinterizado.

El sinterizado proporciona la unión interparticular de la alúmina en la estructura compactada obtenida por el proceso anterior. Durante este proceso se da lugar a la densificación del material en sí, o dicho de otra manera, la unión de las partículas y la eliminación de los espacios libres o poros. El sinterizado es el resultado del movimiento atómico estimulado por la alta temperatura en hornos especiales a la que se ve sometido el material. La principal razón para sinterizar es la de mejorar las propiedades de compactación como dureza, resistencia, conductividad, expansión

térmica y resistencia a la corrosión. De manera especial, las propiedades dinámicas como la resistencia al impacto son muy sensibles al sinterizado del material.

Los mecanismos de transporte que se llevan a cabo durante este proceso son de dos clases: Transporte en la superficie y transporte en el seno de la partícula(5). El principal mecanismo que contribuye a la densificación es el proceso de difusión en la superficie, que se ve afectado por la difusión volumétrica, el flujo plástico y viscoso y la difusión entre las fronteras de grano como el principal de ellos. De forma esquemática, podemos observar las cuatro fases de sinterización en la siguiente figura:

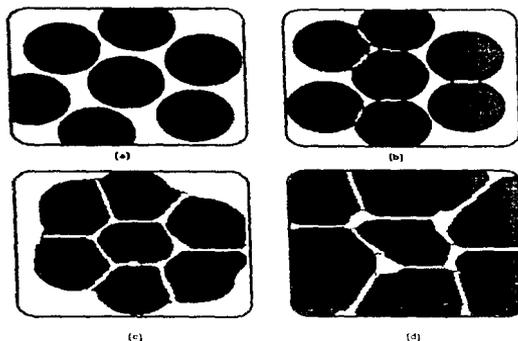


Fig. 7 - Etapas de formación de la alúmina sinterizada

En la gráfica (a) se observan las partículas de polvo colindantes; (b) es la etapa inicial donde se inicia la fusión de las partículas. La etapa (c) es intermedia, donde se

forman las fronteras de grano en los contactos interparticulares y (d) es la etapa final donde la porosidad se disminuye por el crecimiento de los granos. Esta interacción entre los poros y las fronteras de grano puede manifestarse de tres formas: 1.- Que los poros retarden el crecimiento de los granos; 2.- Los poros sean arrastrados por las fronteras en movimiento durante el crecimiento de los granos; 3.- Las fronteras se colapsen, aislando los poros dentro de los granos.

Las principales variables a manejar en el proceso de sinterizado son: La temperatura, el tiempo, la atmósfera en la que se lleve a cabo el proceso y el tamaño de las partículas. Temperaturas altas contribuyen a tener un sinterizado rápido, pero deficiente debido a la pobre eliminación de los poros en la estructura por el colapso de las fronteras y su aislamiento dentro de los granos. Tiempos largos ayudan a una densificación correcta, pero representarían altos costos de operación y bajos índices de producción. La atmósfera del proceso es importante debido a que si en los poros se encuentra atrapado gas, la posible eliminación de éste durante el proceso dependerá de su solubilidad en el material. Es debido a esto que la atmósfera en donde se lleve al cabo este proceso se controle, siendo recomendable utilizar hornos al alto vacío para evitar estos problemas.

El tamaño de partícula afecta a la velocidad de sinterizado, mejorándose ésta a menores tamaños de partículas. Las muestras de alúmina utilizadas en esta tesis para la obtención de las imágenes fueron sinterizadas a 1500 °C y mantenidas a esta temperatura durante 4 horas en un horno de vacío.

III -. MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO Y SU APLICACION A MATERIALES

- Fundamentos y funcionamiento del SEM

El Microscopio Electrónico de Barrido, SEM por sus siglas en inglés (Scanning Electron Microscope) reconocidas internacionalmente, es uno de los instrumentos más versátiles para el estudio de microestructuras de objetos sólidos. La principal razón de su utilidad es la alta resolución de las imágenes que de éste se obtienen. El microscopio electrónico desde su creación a finales de los años treinta (8) revolucionó el concepto del límite de resolución teórico de los microscopios ópticos al asociar a partículas (electrones) una longitud de onda, en lugar de luz utilizada hasta entonces. Mientras que, por medio de la luz ultravioleta en el mejor de los casos, se obtienen ampliaciones de hasta 4,000 X, en un microscopio electrónico comercial es posible obtener magnificaciones de hasta 100,000 X con resolución en la imagen de hasta 1nm (10 Å) (7).

Existen diversos tipos de diseño de un microscopio electrónico dependiendo de la información que se quiera obtener de la muestra en análisis. El microscopio electrónico de barrido SEM típico consta de: Una fuente de emisión de electrones (cátodo), un ánodo, un sistema de lentes magnéticas de condensación y objetivo, un controlador de apertura del haz, un generador de el barrido del haz, soporte para el espécimen en estudio, sistema de vacío, detectores de electrones, fotodetectores y detectores de rayos X y tubo de rayos catódicos para visualizar la imagen en sistema de video.

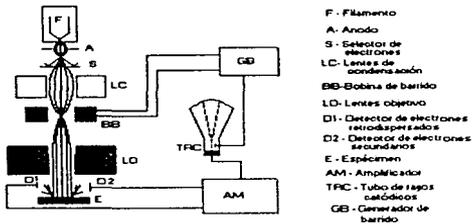


Fig. 8 - Diagrama de los principales componentes del SEM

(1) Fuente de emisión de electrones -. Para la obtención de la corriente de electrones, se emplea un cátodo de tungsteno en la mayoría de los casos. Esta emisión electrónica se basa en el principio de emisión termoiónica, que dice que todos los materiales emitirán electrones al suministrar la energía necesaria para abandonar este material. Esta energía puede ser calculada por la función de trabajo, que es la diferencia entre el potencial para abandonar la superficie del material y la energía de Fermi. Los electrones emitidos termoiónicamente poseen velocidades muy semejantes, lo que contribuye a obtener una imagen libre de aberración cromática.

(2) Anodo -. La energía necesaria para la emisión de los electrones es reducida al colocar un campo eléctrico o potencial positivo para aumentar, en este caso, la energía de Fermi. De esta manera se facilita la salida de los electrones del filamento de tungsteno, requiriendo para este propósito temperaturas de alrededor de 2,600 °C. El haz de electrones así obtenido posee una densidad de carga de aproximadamente 10^4 amp/m², intensidad necesaria para tener una buena visibilidad de la imagen.

(3) Lentes magnéticas condensadoras y objetivo -. Al ser emitidos por el cátodo, los electrones viajan en diferentes direcciones, por lo que es necesario condensarlos para obtener un haz de menor diámetro transversal con el consiguiente aumento en la resolución de la imagen. Las lentes electromagnéticas basan su funcionamiento en el hecho de que un electrón viajando a través de un campo magnético experimenta una fuerza perpendicular a su velocidad y a la dirección del campo.

(4) Controlador de apertura -. Este dispositivo actúa como un diafragma en los microscopios ópticos, seleccionando los electrones que tengan la misma dirección impidiendo el exceso de electrones en la columna. La combinación de los controladores de apertura y los lentes magnéticos produce un haz direccionado de el menor diámetro transversal posible (5nm a 1 μ m).

(5) Generador de barrido del haz -. Este dispositivo caracteriza el SEM como su nombre lo indica. El objetivo es obtener un "barrido" de la superficie de la muestra en direcciones cartesianas X , Y a fin de cubrir con el haz un área representativa.

(6) Soporte para el espécimen -. Este dispositivo mantiene fija la muestra en estudio. Por medio de mecanismos electromecánicos, el observador puede rotar, inclinar o mover la muestra de tal forma que la vista de la superficie desde diversas perspectivas sea posible. Adicionalmente, este soporte debe estar aterrizado para que la muestra que está recibiendo la corriente de electrones no se cargue y pueda dañarse.

(7) Sistema de vacío -. El espacio que los electrones necesitan para moverse debe de estar libre de partículas extrañas que los dispersen, por lo que el vacío debe de ser casi perfecto. Para asegurar su buen funcionamiento, los microscopios electrónicos trabajan a presiones menores de 10⁻² Pa.

(8) Detectores de electrones, de rayos X y fotodetectores -. Los detectores reciben las señales emitidas por la muestra, obteniéndose de estas señales

información valiosa del espécimen dependiendo del tipo de señal que se trate. Posteriormente se describirán los procesos en los cuales son producidas las señales electrónicas .

(9) Tubo de rayos catódicos (TRC) -. Semejante a una pantalla de TV, el TRC nos permite visualizar en un esquema bidimensional la imagen producida por el SEM. Al igual que en la superficie de la muestra, el mismo generador de barrido del SEM efectúa un barrido sincrónico en la pantalla con la señal eléctrica amplificada correspondiendo a cada punto de la pantalla un punto de la superficie de la muestra.

- Formación de imágenes en el SEM

Al interactuar el haz fino de electrones con la muestra analizada, se producen diversas señales que proveen de diferente tipo de información relativa a sus características. En cada punto, los electrones penetran dentro de la muestra perdiendo energía al interactuar con los átomos que la constituyen. La interacciones individuales pueden ser de dos tipos: Elásticas, en donde los electrones cambian de dirección pero no pierden energía y las inelásticas donde existe una pérdida de ésta.

La interacción del haz de electrones sobre el espécimen produce electrones secundarios, electrones retroproyectados, electrones transmitidos, rayos X característicos, electrones de Auger y fotones de diversa energía.

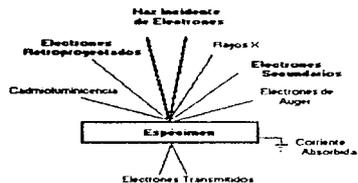


Fig. 9

Los electrones secundarios se derivan de la excitación de los electrones de los orbitales externos de los átomos del espécimen. Estos tienen energías relativamente bajas, del rango de 1 a 50 eV, por lo que su interacción en el sólido se limita a 5 nm aproximadamente (11). Adicionalmente, existen electrones de baja energía originados por colisiones inelásticas, pero no existe manera de distinguir éstos de los secundarios, por lo que también son considerados de este tipo. Los electrones secundarios pueden ser recolectados colocando una placa con potencial positivo al lado de la muestra de manera que los electrones retrodispersados no se desvíen mucho por este efecto. Los electrones secundarios son muy sensibles a la topografía de la superficie de la muestra, dando como resultado una imagen que varía ligeramente entre las regiones de la muestra cercanas o alejadas del detector. Esto equivaldría a iluminar la muestra simultáneamente desde todos los ángulos. La apariencia de estas imágenes es similar a la observación de la superficie con una luz difusa, excepto en los bordes de las protuberancias o discontinuidades, donde son fuertemente contrastados.

Los electrones retrodispersados son producidos por la excitación elástica de los electrones incidentes al interactuar con los electrones primarios en el núcleo de los átomos de la muestra. Las trayectorias que siguen estos electrones dependen del número atómico de los elementos que el electrón encuentra a su paso. La intensidad de este tipo de imágenes es directamente proporcional al número atómico del espécimen en análisis. A mayores números atómicos la intensidad de esa zona aumenta, contrastando de esta manera superficies de composición heterogénea. Esto se explica debido a que los átomos tienen mayor número de electrones y protones a mayor número atómico, resultando en mayores campos electrostáticos elevados que provocan la deflexión de los electrones incidentes. Estos tienen energías altas que van desde 50 eV hasta rangos cercanos a la energía de los electrones del haz incidente. La profundidad de interacción es mucho mayor que la de los electrones secundarios y puede llegar a ser de hasta varios micrómetros dependiendo de las condiciones del material y la energía del haz incidente de electrones (9).

- Utilización de imágenes de electrones retrodispersados

El microscopio electrónico de barrido permite la obtención de diversos tipos de imágenes, dependiendo del tipo de detector que se utilice. Las imágenes obtenidas de los electrones secundarios facilita al observador la distinción de imágenes tridimensionales debido principalmente al realce de la intensidad de la imagen en los puntos donde la superficie cambia de dirección por la concentración de electrones en estas áreas. En el caso de las imágenes obtenidas por los electrones retrodispersados es factible contrastar una superficie compuesta por diferentes elementos, dando como resultado imágenes que destacan las fronteras de objetos de diferente composición. En el caso específico de las imágenes de alumina pura se determinó que era recomendable utilizar este tipo de imágenes, por lo siguiente:

- Para determinar la medición de las porosidades en la estructura es necesario efectuar el análisis en cortes transversales de la muestra con un tratamiento de pulido para facilitar la diferenciación entre los objetos de estudio (porosidades) y el fondo (granos de alúmina). De esta manera, las imágenes obtenidas son resaltadas en estas dos fases de la estructura.

- La utilización de las imágenes de los electrones secundarios provocaría que pequeñas protuberancias que el pulido de la superficie no corrige, generara un mayor número de intensidades en la imagen (niveles de gris), con la consecuente complicación en su procesamiento digital.

- Adicionalmente, la naturaleza del material de estudio facilita la diferenciación de dos superficies de diferente composición química; la alúmina pura por un lado y el espacio libre de las porosidades por el otro. Esto facilita el contraste entre las dos fases facilitando la segmentación de los elementos en forma efectiva.

Es debido a estas razones que las imágenes que se procesaron en esta tesis provienen del detector de electrones retrodispersados.

- Aplicación a cerámicas

El microscopio electrónico de barrido como se dijo anteriormente, es de gran utilidad por las posibilidades de observación y análisis de imágenes que por otros medios es imposible obtener. En este sentido, es factible la observación detallada de partículas, granos o fallas que ningún aparato de microscopía óptica nos puede dar. La importancia de esta cualidad en el caso específico de las cerámicas, radica en su utilidad para el estudio de las microestructuras granulares de estos materiales. Por medio de la observación y medición del tamaño del grano, de sus fronteras, su forma, arreglo estructural, aglomeración, cantidad y tamaño de fallas y porosidades es posible realizar correlaciones para cuantificar las macropropiedades de los materiales. Se ha visto que el análisis óptico de las propiedades microestructurales nos lleva a

resultados más precisos de las características como dureza, resistencia y elasticidad de las cerámicas. Adicionalmente, el análisis de las microestructuras por medio del microscopio electrónico cubre en cierto modo el puente existente entre la teoría que explica las propiedades del material y las determinaciones de éstas que a nivel macroscópico se realizan.

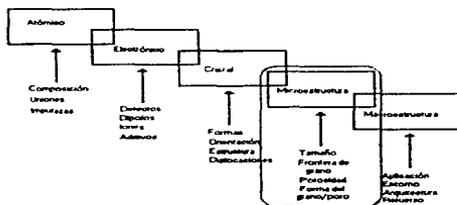


Fig. 10. Niveles estructurales e interacciones de los materiales cerámicos

IV - OBTENCIÓN DE IMÁGENES Y DIGITALIZACIÓN

- Equipo requerido para la obtención de imágenes digitalizadas

El sistema para la obtención, digitalización, procesamiento y análisis de las imágenes se compone esencialmente de:

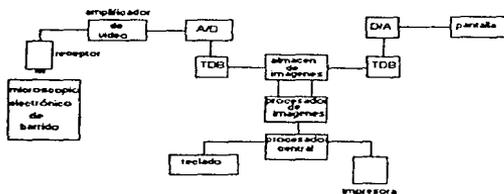


Fig. 11 -. Diagrama del sistema para la obtención y digitalización de imágenes

- Microscopio electrónico de barrido

Es el instrumento con el cual se obtienen las imágenes microscópicas de los materiales de este estudio. En este caso se utilizarán las imágenes de los electrones retrodispersados por poseer las características necesarias para la obtención de los resultados deseados.

- Receptor

Puede ser desde una cámara de video convencional hasta los detectores que utiliza el propio microscopio para la recepción de las diferentes radiaciones de la muestra. Se utiliza una cámara en los casos que se requiera el almacenamiento previo de las imágenes obtenidas en un formato diferente al digital. En los casos de no

requerir este tratamiento es posible conectar los detectores del microscopio directamente al convertidor Analógico/Digital (A/D).

- Amplificador de Imagen

Este es utilizado para minimizar la introducción de ruido en las imágenes obtenidas para almacenamiento.

- Convertidor Analógico/Digital (A/D)

El Convertidor Analógico a Digital adquiere la imagen analógica del amplificador y la convierte en señales digitales. La señal analógica es muestreada espacialmente a intervalos iguales de tiempo y el nivel de la señal a cada intervalo es representada por un número binario. Una vez que la señal ha sido representada de esta forma, se convierte completamente insensible a ruido u otros factores que la afecten, con las limitantes de cada sistema digitalizador en particular.

- Tabla de búsqueda (TDB)

Es el área del procesador que convierte las señales obtenidas por el convertidor A/D en otro valor de referencia preestablecido. El número de estos valores esta limitado por la estructura del sistema, por lo que facilita el cálculo de los valores resultantes. De aquí se deriva el término de " tablas de búsqueda ". Esto facilita el manejo posterior de la imagen sin la necesidad de alterarla permanentemente.

- Almacenador de Imágenes

El sistema almacenador de las imágenes ya digitalizadas puede variar desde la memoria RAM o temporal del equipo de cómputo, el almacenamiento en discos flexibles o duros, hasta en discos compactos láser con capacidades de almacenamiento desde 100 Megabytes a 1 ó 2 Gigabytes. Estos últimos son

recomendables para el almacenamiento de las imágenes en estudios en donde se requiera de resultados estadísticos que involucren el manejo de grandes cantidades de imágenes, ya que una imagen ocupa memorias que van desde cientos de Kilobytes en imágenes monocromáticas hasta 1 ó 2 Megabytes en imágenes a color.

- Procesador de imágenes / Procesador Central

El procesador de las imágenes se encuentra propiamente en la Unidad Central de Proceso del equipo. Es aquí donde se llevan al cabo las operaciones matemáticas de transformación y análisis de los números obtenidos por la digitalización de la imagen. Los procesadores comerciales que han salido al mercado en los últimos años tienen capacidades y velocidades suficientes para el procesamiento complejo de imágenes. lo que ha desarrollado en gran medida este campo del análisis de materiales.

- Teclado

Es por medio de éste, que el usuario puede interactuar con los programas diseñados para ello. Además, el uso de ratones digitales agilizan la edición de la imagen por medio de la visualización directa del cambio en el momento de efectuarlo.

- Impresora

Estos equipos han sido desarrollados hasta el nivel de proveer la calidad de impresión de imágenes semejante a la de una fotografía, con un costo y velocidad de proceso significativamente menores.

- Convertidores D/A

Los convertidores Digitales/Analógicos realizan el proceso inverso de los A/D, transformando los valores numéricos digitales en señales analógicas que puedan ser interpretadas por el usuario.

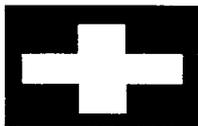
- Monitores

En este componente del sistema es desplegada la imagen del espécimen en estudio, para facilitar la comprensión de los cambios realizados en la imagen. En la actualidad los monitores de alta resolución permiten la visión más real de las imágenes contribuyendo de esta manera a una mejor interacción entre el procesamiento de la imagen y los cambios que sean necesarios para la obtención de mejores resultados.

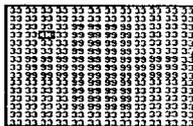
- Conversión de imágenes analógicas a imágenes digitales

Una imagen como nosotros la percibimos es una representación visual de un objeto o escena. Las imágenes digitalizadas tienen otro significado: Es un arreglo bidimensional de números. En la figura 12, el cuadro (a) es una imagen de una figura geométrica y el cuadro (b) es la representación de su imagen digital correspondiente.

Cada número en (b) corresponde a un área pequeña de la imagen visual, y el número representa el nivel de oscuridad o luminosidad de el área.



(a)



(b)

Fig. 12

Para propósitos del presente trabajo, asumiremos la convención de que a mayor claridad en el punto le corresponderá un valor numérico más alto; el área más oscura recibirá el valor numérico menor y los valores intermedios corresponderán a las diferentes tonalidades de gris. A este procedimiento se le denomina Digitalización de los Niveles de Gris o Digitalización de Niveles de Energía. Al ser almacenada la imagen en la memoria en cada posición de ésta (usualmente un byte, 8 bits) almacena la información de la brillantez de un punto de la imagen. En forma de byte, los valores pueden ser únicamente enteros y no otro tipo de valores. Cuando se realizan cálculos que requieran de precisión fraccional será necesario un paso posterior de redondeo del número para obtener únicamente el entero. Por otro lado, un bit sólo puede tener dos valores, 0 ó 1, de aquí el término digital. Al estructurar la memoria en bytes se obtienen 2^8 ó 256 valores discretos de gris posibles. Por la convención adoptada aquí, el negro recibirá el valor de cero y el blanco el valor de 255. Este rango de tonalidades supera por mucho lo que el ojo humano puede distinguir de una imagen monocromática (20 a 30 tonos en el mejor de los casos) y mucho más de los valores manejados en impresiones fotográficas.

Si observamos la figura 12 (b) nuevamente, podremos ver que la imagen digital tiene quince líneas y once muestras por línea. Cada área como la encerrada en el

rectángulo recibe el nombre de " *Pixel* ". El tamaño del área representada por cada uno de estos pixels se definirá como la resolución espacial de éstos. Cada pixel, adicional a su valor numérico descrito anteriormente, tiene un valor de coordenada de línea y un valor de coordenada de muestra. A este proceso se le denominará Digitalización Espacial. De esta manera, se esquematizan en arreglos n líneas en la imagen por m muestras en cada una de ellas. Comúnmente las imágenes son cuadradas y el valor que se empleará será el de 512 X 512 pixels, que es el común en sistemas basados en monitores de televisión.

- Magnificación. Relación de aspecto

La magnificación se refiere a la ampliación que se efectúa de una zona específica de la imagen en estudio. La magnificación más indicada para el análisis de la imagen se determina en función del objeto de estudio, es decir, se escogerá una magnificación tal que los objetos sean fácilmente identificables. Por otro lado, no será recomendable llegar a una magnificación tal que el objeto en estudio domine por completo la escena de la imagen, pues se perderá información valiosa del arreglo de las estructuras vecinas. Es importante tener en cuenta al efectuar la digitalización la limitante del número de pixels en la pantalla, pues como se dijo anteriormente, éstos determinan la resolución de la imagen. Adicionalmente tenemos la limitante física de la magnificación obtenible del microscopio electrónico.

En estudios en los que se requiera imágenes de la misma magnificación no es necesario tener cuidados especiales al agrupar los datos obtenidos de ellas. Pero en los casos donde se requieran manejar imágenes de diferente magnificación, es necesario mantener una relación matemática entre ellas para poder asociar los resultados que de ellas se deriven.

El área física real que represente cada uno de los pixels de la imagen está determinada por la magnificación y el tipo de imagen de que se trate. Esto puede

variar grandemente, como un ejemplo, desde decenas de kilómetros en imágenes tomadas por satélites hasta pocos nanómetros en imágenes del microscopio electrónico de barrido. Para definir el área real de la imagen es necesario realizar una calibración de los pixels. La calibración se refiere a asignar valores reales al ancho y alto de éstos. Si los pixels son cuadrados, esto es relativamente fácil de realizar. Pero en la mayoría de los casos en el análisis de imágenes, los pixels son entidades rectangulares. Adicionalmente, la calibración de la imagen está íntimamente relacionada con la estructura física del objeto receptor (e.g. cámara, detector) y del convertidor A/D. Si el fin del análisis es obtener mediciones físicas reales es recomendable realizar calibraciones a cada sistema con el que se trabaje.

Un método sencillo para calibrar la imagen es comparar el ancho y alto de los pixels con una escala preestablecida como la barra de medición que aparece en las imágenes del SEM. A la relación entre el alto y el ancho de los pixels se le denomina Relación de Aspecto. Es importante mantener una relación de aspecto real en las imágenes que se manejen, pues errores en este parámetro conlleva a la obtención imágenes deformadas con resultados consecuentemente erróneos. De esta forma, se mantiene una correlación de tamaños reales de los objetos aún utilizando diferentes magnificaciones en la imagen.

V -. PROCESAMIENTO DE LAS IMAGENES DIGITALIZADAS

- Procesamiento digital de imágenes

El procesamiento digital de imágenes se refiere al tratamiento computarizado de imágenes o de manera más específica, de imágenes que han sido traducidas a una forma numérica. El propósito general del procesamiento digital de imágenes es el de mejorar la calidad de la imagen obtenida o destacar áreas de interés, preparándola de esta forma para su análisis posterior. Además del procesamiento *digital* de las imágenes existen otros tipos como el óptico y el analógico eléctrico. El primero involucra el uso de lentes y de técnicas fotográficas para cambiar colores, realizar ampliaciones, etc. El segundo caso es el ejemplo de la televisión, en el cual las imágenes reales son convertidas a señales eléctricas, transmitidas, ampliadas, recibidas y reconstruidas en una pantalla. Los dos procesos son complejos y tienen sus aplicaciones específicas.

El procesamiento digital de imágenes tiene dos características esenciales. La primera es la precisión. En cada generación del proceso fotográfico existe una pérdida de la calidad de la imagen y las señales eléctricas son degradadas por las limitaciones físicas de los componentes electrónicos. Con la conversión de la imagen a números en la digitalización es posible mantener la precisión de la imagen. La segunda ventaja es la flexibilidad extrema del proceso. Utilizando lentes de aumento en fotografía, la imagen puede ser ampliada; en la imagen televisiva la brillantez o el contraste puede ser variada. Con el procesamiento de una imagen digitalizada se pueden realizar multitud de cambios como rotaciones, ampliaciones del todo o partes, afectaciones en las formas de las figuras, etc.

Las dos desventajas relativas de la digitalización de imágenes y su procesamiento son la velocidad del proceso y su costo. Algunas de las operaciones computarizadas son más lentas que sus contrapartes ya mencionadas. Esto se ha

venido reduciendo significativamente con el desarrollo de unidades centrales de proceso más rápidas y capacidades de almacenamiento de memoria mayores. En el otro sentido, el costo de los equipos computacionales ha venido decreciendo en los últimos años. De hecho, se ha buscado la manera de como crear programas capaces de ser operados en computadoras personales comerciales, siendo uno de los objetivos principales de la presente tesis. El programa descrito en el apéndice I utiliza lenguaje Turbo Pascal y es posible efectuarlo en una computadora comercial con procesador 386 con 4 Mb de memoria en RAM.

El procesamiento digital de imágenes abarca una amplia gama de operaciones independientes cuyo fin es el de facilitar el posterior análisis y medición de las imágenes tratadas. El proceso siempre comienza con una imagen y termina con otra imagen procesada. Las cualidades de la imagen como brillantez, color, posición, bordes, imperfecciones son afectadas para incrementar la nitidez de la imagen o para realzar los objetos a estudiar dentro de ella. La obtención de resultados útiles y coherentes en el análisis de la imagen depende en gran medida del procesamiento correcto de la misma para su estudio. Muchas de estas operaciones tienen su fundamento teórico establecido y otras están basadas en técnicas empíricas. Las técnicas empleadas en esta tesis se describirán a continuación.

- Mejoramiento de las imágenes digitalizadas

Una de las mayores aplicaciones del procesamiento de imágenes digitalizadas es la de corregir y minimizar los defectos en una determinada muestra. En el análisis de imágenes es perfectamente aplicable el principio computacional de "GIGO" (Garbage In - Garbage Out), "basura que entra, basura que sale". Si los defectos al adquirir la imagen no son corregidos, existe una alta probabilidad de que durante su análisis éstos sean confundidos con los elementos de estudio, provocando que sean

almacenados y procesados estadísticamente, conduciendo a resultados incorrectos. Por supuesto, existen límites para la corrección de estas fallas, determinados principalmente por la capacidad computacional que se tenga, por la aplicabilidad del método seleccionado o por ser desde un inicio una imagen extremadamente deficiente de la cual solo sea posible la obtención de resultados pobres.

Existen diversas causas por la que estos defectos pueden aparecer en la imagen. La primera de éstas va desde la preparación de las muestras a analizar. Es determinante realizar la óptima preparación del espécimen de alúmina a observar al microscopio, teniendo especial cuidado en el tratamiento de pulido que se le da. Un pulido con excesiva fuerza ocasionará el ocultamiento artificial de las porosidades

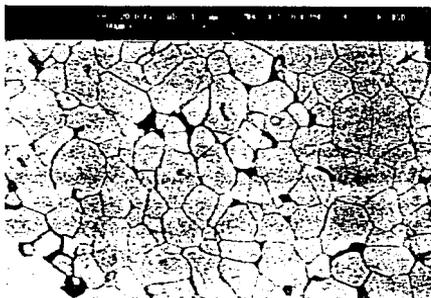


Fig. 13 Imagen de la muestra tratada

de la muestra por arrastre de material adyacente. Por otro lado, un pulido extremadamente prolongado removerá material adyacente del poro, aumentando de manera artificial su magnitud.

Es recomendable, por otro lado, la aplicación de métodos de mejoramiento de la superficie pulida para revelar la microestructura del material. Uno de ellos, empleado en este caso, es la llamada erosión térmica. Durante este proceso sólo son removidos iones, átomos y moléculas indeseables de la superficie, debido a que las uniones son más débiles en las posiciones expuestas como las fronteras de grano o imperfecciones. De esta manera la microestructura se delinea por el crecimiento moderado de las fronteras de grano. La erosión térmica se lleva a cabo 100 °C abajo de la temperatura de sinterizado y es un proceso gobernado por la tensión superficial entre las fases que están en contacto y en equilibrio con la atmósfera circundante (6). Es por eso que este proceso debe llevarse a cabo en hornos especiales para prevenir contaminación indeseada.

Otro factor que puede afectar la calidad es la incorrecta obtención de la imagen desde el microscopio electrónico. Un deficiente enfoque, aberraciones cromáticas, astigmatismo o curvaturas provocarán la obtención de imágenes de calidad pobre que dificultan su posterior procesamiento. Por otro lado, la selección de la imagen electrónica incorrecta (de electrones secundarios o retroproyectados) como ya se discutió en el capítulo III, introducirán a la imagen una mayor cantidad de tonalidades que complican su posterior análisis.

Uno de los defectos más comunes en las imágenes digitalizadas es el ruido del sistema. Este se presenta en forma de "nieve" o "neblina" en la imagen, dificultando su correcta visualización. El ruido se encuentra presente en casi todos los sistemas electrónicos, de manera que es necesario minimizarlo ya sea aterrizando todos los instrumentos o amplificando la señal original de video.

Una vez obtenida la imagen, el ruido remanente se puede minimizar, y en algunos casos hasta eliminar, por medio de filtros numéricos durante el procesamiento de la imagen. En esta operación es decisiva la selección del tipo de filtrado que se requiera para mejorar la imagen. Como una analogía a una magnitud macroscópica, el aplicar filtros (tamices) incorrectos a un conjunto de partículas o polvos que intentemos separar (ruido - imagen) nos puede llevar a que dejemos pasar partículas indeseables (ruido) o no permitamos el paso de las deseables (imagen). Por otro lado, la técnica de separación (manipulación digital) puede provocar alteraciones en las partículas de interés.

En el capítulo anterior, se explicó que para digitalizar una imagen analógica es necesario transformarla en un arreglo matricial (n,m) de valores numéricos para poder ser manipulados en un sistema computarizado. Matemáticamente, el filtrado se define como una operación S que recibe una función $f(x)$ (imagen original) y la transforma en otra $g(x)$ generalmente resaltada en los objetos de interés:

$$f(x) \rightarrow S \rightarrow g(x)$$

si el filtro S satisface las condiciones de ser invariante y lineal, podemos expresarlo de la siguiente manera:

$$g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) h(x-t) dt$$

donde $h(t)$ es la denominada respuesta al impulso (3), que caracteriza completamente al filtro. En el caso digital, la integral se convierte en una sumatoria, además de que

los límites de la sumatoria son finitos al tener la función h valores de cero fuera de un cierto rango:

$$g(i) = \sum f(k) h(i-k)$$

Esto nos dice que la función $g(i)$ al punto i está dado por la suma ponderada de los pixels que rodeen a i donde la ponderación estará determinada por la función $h(k)$. Dicho de otra manera, es factible obtener información de un punto determinado de la imagen por medio de los puntos circundantes que lo rodean. Esta suposición es válida siempre y cuando el ruido sea proporcionalmente menor a la imagen real. Para al siguiente pixel $i+1$, la función $h(k)$ es desplazada en uno y la suma ponderada es recalculada. El resultado total es una serie de operaciones de desplazamiento-multiplicación-suma. En dos dimensiones, $h(k)$ se convierte en $h(k,l)$ y la ecuación anterior se transforma en una doble sumatoria:

$$g(i,j) = \sum \sum f(k,l) h(i-k, j-l)$$

donde $g(i,j)$ es creada por medio de una serie de operaciones de desplazamiento-multiplicación-suma. Los valores de h son referidos como los valores de la matriz o "máscara" del filtro. Para simplicidad y razones de simetría, el tamaño de ésta es $m \times n$ donde ambas m y n son impares y usualmente $m = n$.

En la figura 13 se esquematiza el procedimiento para aplicar esta matriz sobre una "ventana" de la imagen. El resultado de un punto está dado por los valores de los puntos alrededor de éste, cada uno multiplicado por su correspondiente punto del arreglo h . Para el siguiente punto, la ventana se desplaza un lugar y se vuelve a aplicar la matriz.

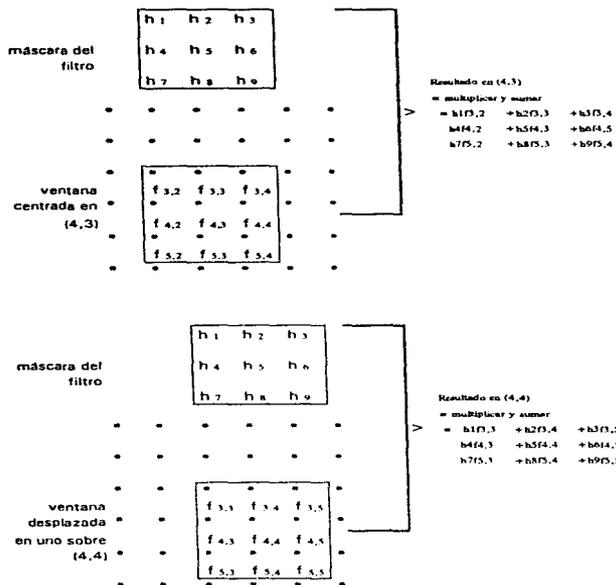


Fig. 14

En este trabajo, debido a las características de las imágenes de alúmina obtenida, como son claridad, pocas tonalidades (granos claros y poros oscuros) y principalmente por que los objetos de estudio (porosidad) no ocupan la mayor parte de

la imagen y son áreas de altas tonalidades de gris (casi negras), se decidió aplicar un filtro para resaltar adicionalmente los bordes de la imagen. Esto contribuye a facilitar las operaciones subsecuentes de identificación de los elementos.

-1 2 -1	-1 -1 -1	2 -1 -1	-1 -1 2
-1 2 -1	2 2 2	-1 2 -1	-1 2 -1
-1 2 -1	-1 -1 -1	-1 -1 2	2 -1 -1
(a)	(b)	(c)	(d)

Fig. 15 Máscaras aplicadas a las imágenes de alúmina

La figura 15 esquematiza las máscaras que se aplicaron para filtrar las imágenes de alúmina. Estas máscaras se encuentran recomendadas en la bibliografía(1) para este tipo de imágenes. El aplicar el peso de la ponderación en las líneas verticales (a), horizontales (b) y diagonales (c), (d) y neutralizar el efecto de los demás elementos de la máscara (-1), resalta las áreas de cambio acelerado de valores de gris (bordes) mientras que las áreas de cambio nulo o moderado permanecen intactas.

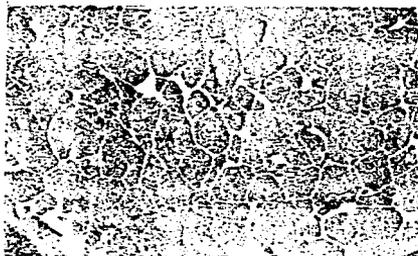


Fig. 16 Imagen resaltada por los filtros

-Definición de los Umbrales.

Ya efectuado el mejoramiento de la imagen habiendo sido resaltados las fronteras entre los objetos que la componen, se procede a la diferenciación de ellos. De manera visual, esta operación resultaría evidente y hasta trivial; como se mencionó en la introducción, el sistema visual humano está diseñado para distinguir objetos por el proceso de comparación entre ellos. De esta manera, distinguir un grupo de manchas negras sobre fondo blanco es sencillo. Pero para una computadora, el que existan valores de niveles de gris "aproximadamente iguales" agrupados no significa que sea un objeto diferente a los que le rodean. Es aquí que el concepto de conectividad (dos objetos colindantes están separados por límites definidos) es de gran utilidad. Un conjunto X de pixels se encuentra conectado al conjunto Y respecto al elemento estructural B si y solo si la dilatación de X respecto a B toca a Y . Esta definición es aplicable en pequeños elementos discretos como es el caso de los pixels.

Para pixels en arreglos cuadriculares, existen dos soluciones posibles a este problema. Por un lado, los pixels que estén arriba (norte), abajo (sur) y a los lados (este, oeste) del pixel en cuestión, se encontrarán equidistantes todos ellos del pixel central. Pero los pixels que se encuentren en diagonal (noreste, noroeste, suroeste, sureste) estarán a una distancia mayor que aquellos.

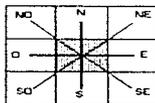


Fig. 17

Esto crea graves problemas al momento de efectuar los cálculos y las decisiones de discriminación. Este obstáculo se puede salvar efectuando un artificio: desplazando las líneas impares del arreglo por $1/2$ pixel y creando una red hexagonal.

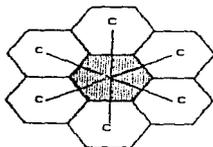


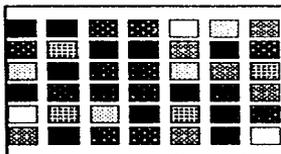
Fig. 18



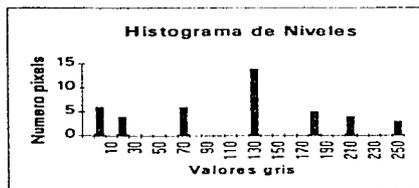
Fig. 19 Negativo de la muestra

En una red hexagonal, todos los pixels vecinos se encontrarán equidistantes del pixel central. Esta geometría permite que una línea de pixels hexagonales de un objeto determinado siempre delimite con el fondo, caso imposible en un arreglo cuadrado. Cabe mencionar en este punto, que la imagen no es afectada significativamente en su estructura total al efectuar este desplazamiento de líneas en el arreglo. Para efectuar la discriminación entre los objetos se crea el negativo de la imagen analizada, es decir, lo que era blanco se convierte en negro y viceversa. Si dos pixels vecinos se ven afectados al mismo tiempo intercambiando sus valores de ON por OFF, significa que existe un borde en este punto, creando así delimitaciones entre las agrupaciones de pixels de semejante valor (objetos).

Como se explicó en el capítulo anterior, la imagen analógica al ser digitalizada es convertida en un arreglo matricial de valores diferentes de nivel de gris. Cada uno de estos números representa el nivel de obscuridad o luminosidad de los pixels componentes o brillantez que los caracteriza. El rango de estos valores va desde el 0 para el más oscuro (negro) y 255 para el más claro (blanco). Esta serie de valores esquematizados de manera gráfica por cantidad y valor componen un histograma de valores de niveles de gris. En la figura 20 (a), se representa un conjunto de pixels con diversos valores de gris y en la figura 20 (b) su representación gráfica en un histograma:



(a)



(b)

Fig. 20

Esta forma de esquematizar los niveles facilita la visualización de la cantidad de pixels que componen una imagen y su brillantez dentro de ella. Si los elementos de interes son los de valores intermedios (e.g. 70 a 180), se les designaría a todos los que se encuentren arriba del 70 y abajo del 180 un mismo valor (0, negro) convirtiéndose en el grupo de los elementos de interés. A los demás (0 a 69 y 181 a 255) se les asigna un valor que contraste fuertemente, en este caso el blanco, como elementos de fondo. De esta manera la imagen se convierte en binaria, (sea 0/1, ON/OFF o blanco/negro) con solo dos valores en el arreglo. Este procedimiento de segmentación de las imágenes define un valor limite (umbral) establecido por el analista que demarca el grupo de elementos de interés de los del fondo. A este método se le conoce como "definición simple de los umbrales de brillantez" (1.3), es decir, se delimita un rango de estudio por medio de dos umbrales de niveles de gris. Para métodos automatizados de análisis se emplea una variación de éste denominado "doble definición de los umbrales de brillantez" (10). Este algoritmo fue desarrollado originalmente para la detección de fronteras entre los elementos de la imagen. Se requiere definir dos umbrales, U_{alto} y U_{bajo} . U_{alto} es seleccionado de tal manera que

exista la certeza que cualquier pixel $p_i \geq U_{\text{alto}}$ pertenece a los elementos de interés y U_{bajo} es seleccionado asegurando que cualquier pixel $p_i \leq U_{\text{bajo}}$ pertenece al fondo. Si un pixel i tiene un valor entre U_{bajo} y U_{alto} pertenecerá a los elementos de interés si y solo si existe un conjunto de pixels de conexión $C_{i,j}$, del pixel i al pixel j , donde todos los pixels pertenecientes a $C_{i,j}$ tienen valores arriba de U_{bajo} y $p_i \geq U_{\text{alto}}$.

Finalmente, es necesaria la aplicación de un algoritmo iterativo para la correcta aplicación de estos conceptos. Sean X_0 el conjunto de pixels que satisfagan la condición $p_i \geq U_{\text{alto}}$ y sea X_{bajo} el conjunto de pixels que satisfagan la condición $p_i > U_{\text{bajo}}$. En la primera iteración se encuentran todos los pixels que se conectan a X_0 y tienen un valor abajo de U_{bajo} . Este conjunto se denomina X_1 y será aquel que en la dilatación de X_0 con respecto a B toca X_{bajo} . Todos los pixels pertenecientes a X_1 que están conectados a X_0 tendrán un valor arriba de U_{bajo} por lo que deberán estar dentro de un conjunto de conexión $C_{i,j}$. El siguiente paso es hacer X_2 igual al conjunto que en la dilatación de X_1 con respecto a B toca X_{bajo} y este proceso se repite hasta que la condicionante $X_{n-1} = X_n$ se cumpla.

La definición automática de una imagen es probablemente una de las tareas más difíciles en el procesamiento de imágenes. La idea parece ser muy simple, pero la idea común de "umbral perfecto" depende de varios factores que no pueden ser puestos en una expresión matemática simple.

Después de aplicar sobre el banco de imágenes anteriormente obtenidos varias pruebas de criterios empíricos existentes en la literatura (3), se encontró que para el tipo de imágenes para las cuales se diseñó el algoritmo, U_{alto} y U_{bajo} pueden ser definidos usando el siguiente criterio:

U_{bajo} : La imagen se erosiona y el histograma es estimado. Pasando desde valores bajos, se encuentra el primer máximo local del histograma. $U_{\text{b,li}}$ es fijado entonces al valor donde el histograma varía 0.8 veces el máximo local.

U_{alto} : La imagen se dilata y el histograma es definido. Empezando desde valores altos, se encuentra el primer máximo local dentro del histograma. U_{alto} es fijado al valor donde el histograma varía 0.8 veces el máximo local.

Este criterio funcionó de manera consistente en todas las imágenes probadas, fallando solo en 3 imágenes con demasiado ruido.

- Segmentación de los elementos de las imágenes

La segmentación en el análisis de imágenes se refiere al proceso de separación o discriminación entre los elementos visuales que componen a una imagen en particular. Es en este proceso que los objetos de interés son diferenciados de los elementos de fondo, así como elementos de interés que se encuentren unidos. Para esto se aplicó la técnica de "Segmentación por Parteaguas" o "Techo de Dos Aguas" (1). Para esto se debe de crear un mapa de distancias de los pixels componentes. Inicialmente los valores de brillantez de cada pixel que se encuentre en ON en la imagen binaria se considera como un valor máximo y cero en cualquier otra parte. Así, realizando un barrido empezando por la parte superior izquierda de la imagen, a través de todas las líneas componentes de la imagen de izquierda hacia derecha y de arriba a abajo, se aplica la regla arbitraria de que ningún punto puede ser mayor en mas de una unidad que su vecino menor.

De esta forma, con solo cuatro barridos de la imagen y un tiempo fijo de procesamiento se logra obtener una distribución homogénea entre los valores de los pixels sin alterar la imagen binaria. Para determinar las distancias entre los pixels, es útil entender el concepto de "techo de dos aguas". Si uno se colocara en la parte superior o "pico" (máximo local) y se dejara caer una gota de agua, descenderá por la trayectoria con mayor inclinación hasta que alcance un mínimo. El área de captación de las gotas (como una canaleta) se asocia con un mínimo local, y el "parteaguas" es el conjunto de líneas que son separadas por las áreas individuales de captación. La

distancia hacia el borde se representa por medio de la brillantez de cada píxel, lo que conduce a obtener una segmentación a lo largo de las áreas. Esto se entiende mejor si se imaginara como el valor de brillantez de los píxeles como una altura física, convirtiéndose los máximos locales en picos de montañas y los mínimos locales serán los valles. Computacionalmente, la distancia se determina almacenando el bit mayor del byte en memoria y los bits restantes, usualmente 7 se utilizan para representar la brillantez o distancia al borde. Este método probó ser consistente con las imágenes tratadas, comprobándose esto con otros analizadores comerciales (GIPS; PIPPIN) que utilizan diferentes métodos y algoritmos.

VI -. ANALISIS DE LAS IMAGENES DIGITALIZADAS

- Análisis digital de imágenes

El análisis digital de imágenes se refiere básicamente a la operación de **reducción o manejo** de datos de una imagen, de los que se obtendrán resultados lógicos factibles de ser expresados en términos numéricos. Una vez preparada la imagen obtenida por medios digitales o más específicamente, los números que se derivaron de este proceso, se procede a su cuantificación por medio de algoritmos matemáticos que aseguren la obtención de resultados correctos. El manejo de números, que de forma estructurada describan a la imagen en estudio, permite la obtención de resultados de alta precisión con un tiempo de proceso relativamente menor que en otros medios de análisis.

Algunos autores consideran que el Análisis de Imágenes se encuentra comprendido dentro del Procesamiento de Imágenes (2,3). Esto es cierto desde un punto de vista funcional; en realidad el procesamiento de una imagen es un medio para su análisis posterior. El objetivo final es obtener información útil de los objetos en estudio y esto será posible hasta haber realizado un estudio particular de cada uno de éstos respecto de un todo.

- Etiquetación de los objetos

Una vez que la imagen fue procesada hasta llegar a la segmentación o discriminación de los objetos que la componen, se presenta un nuevo problema: ¿Cómo reconocer a los objetos al momento de empezar a efectuar las mediciones? En otras palabras, el hecho de discriminar los objetos en estudio no garantiza que el proceso ni el procesador reconozcan o discriminen objetos diferentes. Es por esto que es necesario asignar una etiqueta a cada componente de la imagen en estudio. Esto es relativamente fácil después de toda la manipulación efectuada anteriormente.

Hasta este punto se tienen perfectamente diferenciadas las porosidades entre sí y del resto de la imagen (alúmina). Los pixels que la componen se encuentran agrupados en conjuntos con un solo identificador (máximo local), pero es muy probable que existan varios máximos locales con el mismo valor, orillado por la definición de los umbrales de brillantez. Por otro lado, la geometría irregular de las porosidades puede generar confusiones al momento de diferenciar "diferentes elementos" que se unan en otra parte de la imagen como es el caso de las formas como "U", "O", "X" o algunas otras con ramificaciones. Para etiquetar los objetos se sigue el algoritmo de codificación por cuerdas (1). Se efectúa un barrido como el que se realizó para segmentación de los objetos, asignando un valor arbitrario a cada uno de los objetos en cuestión dentro de una tabla de búsqueda de pseudocolores (ya predeterminados en cada procesador) para una mejor visualización del usuario.

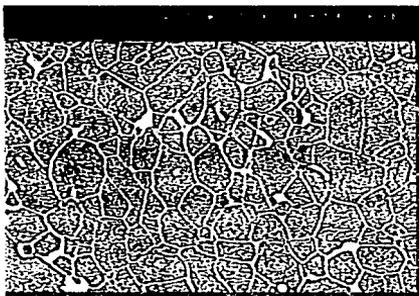


Fig. 21 Objetos identificados en la muestra

- Efectos de la porosidad sobre las propiedades de la alúmina

Como se mencionó en el capítulo II, el sinterizado juega un papel preponderante en la producción de las alúminas. Es en este proceso que la porosidad toma forma, y uno de los propósitos principales es el de controlar la velocidad de sinterización para así controlar el tamaño, cantidad, forma y distribución de la porosidad. Las propiedades buscadas en una cerámica por un ingeniero de diseño son principalmente la dureza, transparencia, resistencia, conductividad eléctrica, expansión térmica, permeabilidad y resistencia a la corrosión. La eliminación de la porosidad por ejemplo, maximiza la dureza, la transparencia y la conductividad térmica. Varios modelos cuantitativos (5) se han obtenido en función de las propiedades globales (subíndice 0), fracción densidad, f , y parámetros ajustables (A_1 , A_2) que dependen del tamaño del poro, su forma y espaciamiento o distribución en la muestra. A continuación se muestran algunos de ellos:

Propiedad a la compactación	Símbolo	Ecuación que incorpora el efecto de la porosidad
Conductividad eléctrica	Ω	$\Omega = \Omega_0 \rho^{\lambda^2}$
Saturación magnética	H	$H = H_0(A_1 + A_2 f)$
Resistencia	σ	$\sigma = \sigma_0 A_1 [1 - A_2(1-f)^{2/3}]$
Módulo Elástico	E	$E = E_0 \rho^{3/4}$
Módulo Cortante	G	$G = G_0 \rho^3$
Módulo de Poisson	ν	$\nu = 0.068 \exp(1.37f)$

Fig. 22 Efecto de la porosidad en algunas propiedades

La porosidad se define como la fracción volumen de los poros presentes en la muestra. La porosidad en una muestra puede variar desde cero hasta más del 90% del volumen total. En un polvo compacto, el volumen vacío V_v , que es el volumen no ocupado por el sólido, puede ser utilizado para definir porosidad p como:

$$p = \frac{V_v}{V_v + V_s}$$

en donde $V_v + V_s$ representa el total del volumen.

Existen dos tipos de porosidad en una cerámica: la porosidad abierta y la cerrada. La primera se refiere a los espacios libres que se encuentran expuestos a la superficie de la muestra. Este tipo de porosidad se ha estudiado más ampliamente debido a la facilidad relativa de caracterización por métodos comunes (porosimetría). Esta porosidad afecta principalmente a propiedades como la permeabilidad y es utilizada frecuentemente en caracterizaciones de cerámicos para propósitos de catálisis.

El tipo de porosidad que se analizó en el presente trabajo es la porosidad cerrada o interna. Esta propiedad es difícil medir con exactitud por medio de la porosimetría convencional, debido a la inaccesibilidad a los gases o líquidos penetrantes a los poros internos. Si se toma una muestra de alúmina, se realiza un corte transversal y se prepara por los métodos del capítulo V (pulido y erosión térmica), es posible obtener una visión exacta del interior de las muestras.

- Determinación de los parámetros geométricos de los poros.

Es en este paso en donde el manejo anterior de la imagen toma forma en números comprensibles y útiles para el ingeniero o científico que se encuentre estudiando un material. El siguiente paso es seleccionar un área de trabajo dentro de la imagen. Esta área se define como un marco que se encuentra dentro de la imagen analizada. Se predetermina la distancia a la cual este marco se coloca a partir del borde de la imagen de manera que siga siendo una área representativa y no se eliminen muchos objetos al reducir el espacio de trabajo. En este caso se escogió una distancia de 0.1 a partir del borde. Una vez determinado el marco de trabajo se presenta el problema de que no todas los objetos se encuentran dentro del área de trabajo.

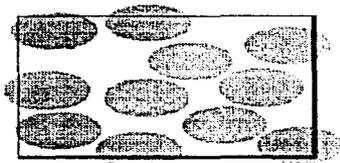


Fig. 23 Figuras que intersectan el marco

Para esta identificación se utilizan los valores obtenidos en la codificación por cuerdas del capítulo anterior. Se utiliza el primer punto obtenido por la intersección de la cuerda con el perímetro del objeto (en este caso el extremo izquierdo). Sólo se consideran los objetos que se encuentran totalmente dentro del marco y aquellos que intersecten con cualquiera de dos lados predefinidos (líneas gruesas). Los objetos que intersectan los lados superior e izquierdo no son contabilizados. Lo mismo para objetos que toquen uno de los lados prohibidos y otro. Esto permite obtener de manera insesgada un número estimado total de objetos por unidad de área.

Una vez realizada esta medición, podemos proceder a realizar mediciones sobre la porosidad de las muestras de alúmina. Las mediciones efectuadas sobre los objetos se enfocaron a dos grupos: Tamaño de los objetos analizados (Área, Diámetro, Perímetro, Longitud) y forma de éstos (Aspecto, Factor de Forma, Redondez, Convexidad, Solidez). Los parámetros del primer grupo determinan la cantidad y distribución de la porosidad en la muestra y los del segundo grupo sus características particulares, son dimensionales y proveen información adicional para identificar el tipo de porosidad formada en la sinterización.

Área: Existen dos tipos de mediciones que pueden realizarse en una imagen; parámetros globales y parámetros individuales. La medición más inmediata es el parámetro global como la fracción área. Esta medición se obtiene de forma inmediata al haber identificado los objetos de interés que se encuentren dentro del área de referencia antes mencionada, diferenciándolos del resto de la imagen. Si se toma una muestra seccional en un sólido multifase en donde las diferentes fases se encuentran aleatoriamente distribuidas, la fracción área de cada fase que se encuentre expuesta corresponderá a su fracción volumétrica de la fase en el sólido. Esta relación simple fue descubierta por Delesse en 1847 (2), y es el fundamento de muchas de las aplicaciones del análisis de imágenes. Esto es cierto especialmente en el caso aquí expuesto, donde el tamaño muestral estadístico puede ser grande debido a la flexibilidad del programa para efectuar de forma rápida mediciones en diferentes imágenes en un tiempo corto relativamente a otros métodos no computacionales. Como veremos a continuación, el área resultante de los objetos será utilizada como la base para la medición de parámetros derivados.

Diámetro: Una medición lineal que aproxima la forma de la porosidad a un círculo o esfera (vista en proyección) es el Diámetro Equivalente. Esta se calcula simplemente como:

$$D_{Circ} = ((4/\pi) * \text{Area})^{1/2}$$

$$D_{Sph} = ((6/\pi) * \text{Area})^{1/3}$$

Perímetro: Al haber basado el análisis en los pixels que forman los objetos, el perímetro de los poros se puede obtener directamente de la tabla de cuerdas creada durante la etiquetación de éstos. El perímetro será la suma del total de longitudes de las líneas del borde que se conecten en el final de cada una de las cuerdas.

Longitud: La longitud se obtiene por medio de rotaciones del sistema de coordenadas cartesianas de la imagen.

$$X' = X \cos \Theta - Y \sin \Theta$$

$$Y' = Y \sin \Theta + X \cos \Theta$$

De esta forma, se rota toda la figura comparándose las distancias resultantes para encontrar la máxima y mínima distancia entre puntos periféricos comparados. Para el tipo de figuras que analizadas se aplicaron 16 rotaciones, ya que son muy irregulares en algunos casos. A las distancias así obtenidas se las denomina también Diámetros de Calibración.

Aspecto: Este parámetro es uno de los que nos define que tan "redondo" es el objeto. El aspecto es la relación entre la Máxima y mínima longitudes obtenidas en el paso anterior. Para obtener en un grupo de objetos con orientaciones aleatorias, se puede estimar la relación de aspecto tridimensional basados en la probabilidad geométrica:

$$\text{Aspecto 3-D} = 1.0 + (4/\pi) * (\text{Máxima/mínima} - 1.0)$$

Entre más grande esta relación, más alargado es el objeto; entre más cercana a la unidad nos hablará de un objeto más redondeado.

Factor de Forma: El factor de forma aproxima la forma del objeto a una elipse. Valores de 1.0 nos hablan de círculos perfectos; este parámetro describe "la cantidad de perímetro" necesaria para circundar un área determinada.

$$\text{Factor de Forma} = (4/\pi)\text{Área}/\text{Perímetro}^2$$

Para cuadrados, el Factor de Forma es 0.785, para formas extremadamente irregulares el número será de centésimas.

Redondez: La redondez es muy semejante al factor de forma, pero en lugar del perímetro utiliza la Máxima longitud de la figura.

$$\text{Factor de Forma} = 4 \cdot \text{Área} / \pi \cdot \text{Máxima Longitud}^2$$

Esta es la fórmula para el área del círculo, pero proporciona información de que tan alargada es la forma de la porosidad o que tan irregular puede ser.

Área convexa: Si se utilizan los Diámetros de Calibración, que son tangentes a la figura y son sumados, se obtendrá el perímetro de la figura como si se estirara la figura hacia afuera para hacerla lo menos irregular posible. La relación entre este perímetro y el perímetro externo real se denomina convexidad. En figuras muy irregulares, con concavidades o indentaciones, esta relación será pequeña. Este parámetro se complementa con la redondez.

- Correlación tamaño del píxel - magnificación - tamaño real

Si se realizó un buen trabajo en el procesamiento anterior de la imagen, no resultará difícil obtener resultados coherentes y acordes con la realidad. Para "traducir" los números obtenidos en datos reales, es necesario realizar una calibración de la imagen. Como se mencionó al final del capítulo IV, el largo y el ancho de un

pixel son equivalentes a distancias físicas en términos reales. La calibración resultante del equipo utilizado (microscopio/digitalizador) en el presente trabajo, se presenta en la siguiente tabla:

MAGNIFICACIÓN	CALIBRACIÓN EN X	CALIBRACION EN Y
50	4.4358	3.0323
100	2.2050	1.5534
200	1.1028	0.7689
500	0.4411	0.3125
1000	0.2201	0.1553
2000	0.1102	0.0778
2500	0.0873	0.0593
3000	0.0743	0.0522
5000	0.0436	0.0310
10000	0.0221	0.0154
20000	0.0111	0.00763
30000	0.00739	0.00522

Fig. 24.- Valores de calibración para la Relación de Aspecto

Estos valores son alimentados al programa al momento de empezar el análisis, conociendo previamente la magnificación de la imagen con la cual se esté trabajando. Como se observa de los datos, el valor de la Relación de Aspecto (Y/X) es de 0.7, que es común en equipos de microscopía y digitalización computarizada.

Este es el último paso que se realiza en la imagen en sí, pues de esta manera se obtienen los valores reales que pueden compararse con parámetros físicos que correlacionen las características de la porosidad de la cerámica con propiedades macroestructurales como se comentaron al principio de este capítulo. Por las características de las muestras de alúmina con el propósito de analizar las porosidades en un área determinada, las imágenes utilizadas fueron hechas a una amplificación de X10,000, y aplicando la calibración anterior, los resultados dimensionales se obtuvieron en micrómetros (μm).

Una vez realizado el manejo digitalizado de la imagen, el programa tiene la salida en un formato de base de datos. Para facilitar su manejo, se convierten a un

archivo en Excel Microsoft por medio de una función MACRO para automatizar su tabulación y posterior graficación. El archivo permite la adición de los resultados de las mediciones de varias imágenes en

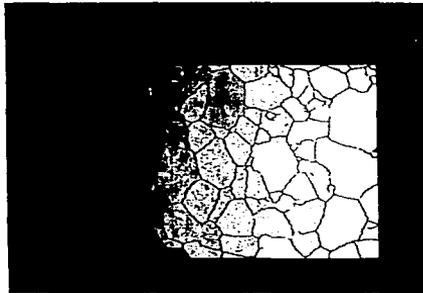


Fig. 25 Imagen de salida del programa

el mismo, para su posterior modificación, ampliación y manejo estadístico. El número de elementos de la muestra para llegar a resultados estadísticamente confiables variará de acuerdo a la prueba específica a la que se desee llegar.

Para una mejor comprensión, los resultados se grafican por medio de un histograma de frecuencias. El objetivo de realizar esto por medio de Excel es para que

el análisis sea flexible, de acuerdo a las necesidades de evaluación específicas de las muestras a analizar. Para su graficación se utilizó la función de paquetería HISTOGRAM de Excel. Dado que el rango de distribución de cualquier elemento de estudio en diferentes tipos de imagen puede variar, es recomendable diseñar un MACRO específico para cada tipo de muestras y así asegurar la obtención de gráficas correctas.

VII -. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la tabla de la siguiente página se tabulan los valores obtenidos para cada uno de los parámetros geométricos descritos anteriormente, en una muestra de 30 imágenes, con 291 porosidades obtenidas en las mediciones, por medio de pruebas de estadística descriptiva, para mostrar una forma de analizar las salidas del programa. En las páginas 72 a la 74 se presentan los histogramas de frecuencia de la distribución de áreas, diámetro circular y esférico, perímetro, longitud y factor de forma de la porosidad de las muestras. Estos datos son tabulados gráficamente de una forma más clara, para observar la distribución de los resultados obtenidos.

La forma gráfica más común es la del área, pues de ésta se desprenden la mayor parte de las otras mediciones, además de que la cuantificación de la misma, como se explicó anteriormente, es relativamente más sencilla y presenta una mayor información. Como se observa, el 50% de los elementos se encuentran distribuidos entre 0.2 a 1 centésima de micra, y el restante 50% de los elementos están distribuidos de 1.3 a 5.8 centésimas. Por otro lado, la gráfica de el factor de forma muestra una distribución más homogénea cercana a las 2 décimas de micra, por lo que se concluye que las formas son relativamente irregulares, poco circulares. Con estos dos datos, es posible modificar las condiciones del proceso de sinterización, principalmente tiempo y temperatura, para llegar a las características deseadas, como una porosidad más uniforme o por otro lado, más abundante, dependiendo el fin que se le quiera dar al material por medio de la ingeniería de diseño.

PARAMETROS GEOMETRICOS DE LAS POROSIDADES

IdNo	Area	Dcirc	Dsph	Perim	Length	Aspect	FormF	Round	Convex
36	1.78E-03	4.76E-02	1.51E-01	1.86E-01	7.63E-02	1.86E+00	7.19E-01	4.33E-01	1.03E+00
85	1.79E-03	4.77E-02	1.51E-01	1.51E-01	7.63E-02	1.89E+00	1.10E+00	4.33E-01	1.29E+00
86	1.82E-03	4.81E-02	1.52E-01	1.51E-01	6.12E-02	1.50E+00	1.10E+00	6.74E-01	1.14E+00
120	1.83E-03	4.83E-02	1.52E-01	1.78E-01	7.63E-02	1.89E+00	7.85E-01	4.33E-01	1.02E+00
131	1.83E-03	4.83E-02	1.52E-01	1.91E-01	6.87E-02	2.64E+00	6.86E-01	5.34E-01	9.28E-01
150	1.83E-03	4.83E-02	1.52E-01	1.73E-01	5.92E-02	1.44E+00	8.36E-01	7.21E-01	9.44E-01
184	1.89E-03	4.91E-02	1.54E-01	1.51E-01	6.12E-02	1.50E+00	1.10E+00	6.74E-01	1.14E+00
188	1.98E-03	5.02E-02	1.56E-01	1.66E-01	6.87E-02	1.41E+00	9.08E-01	5.34E-01	1.13E+00
575	1.98E-03	5.02E-02	1.56E-01	1.91E-01	6.87E-02	2.64E+00	6.86E-01	5.34E-01	9.28E-01
760	1.98E-03	5.02E-02	1.56E-01	3.23E-01	1.04E-01	3.84E+00	2.39E-01	2.34E-01	6.96E-01
1	2.16E-03	5.17E-02	1.59E-01	3.04E-01	1.32E-01	2.10E+00	7.18E-01	3.88E-01	1.03E+00
2	2.12E-03	5.20E-02	1.60E-01	3.70E-01	1.37E-01	2.05E+00	6.36E-01	4.70E-01	9.21E-01
40	2.17E-03	5.26E-02	1.61E-01	1.31E-01	9.58E-02	2.99E+00	8.00E-01	3.20E-01	1.18E+00
59	2.19E-03	5.28E-02	1.61E-01	2.08E-01	7.21E-02	1.40E+00	6.71E-01	5.66E-01	9.59E-01
126	2.23E-03	5.33E-02	1.62E-01	1.58E-01	8.70E-02	2.17E+00	1.17E+00	3.88E-01	1.28E+00
134	2.23E-03	5.33E-02	1.62E-01	1.88E-01	7.21E-02	1.81E+00	8.26E-01	5.66E-01	9.73E-01
144	2.29E-03	5.40E-02	1.64E-01	1.62E-01	7.63E-02	1.50E+00	1.11E+00	5.05E-01	1.26E+00
148	2.29E-03	5.40E-02	1.64E-01	1.73E-01	8.70E-02	1.79E+00	9.76E-01	3.88E-01	1.22E+00
180	2.30E-03	5.41E-02	1.64E-01	1.51E-01	1.33E-01	5.36E+00	1.27E+00	1.67E-01	1.95E+00
198	2.31E-03	5.42E-02	1.64E-01	2.21E-01	7.63E-02	1.89E+00	5.97E-01	5.05E-01	8.82E-01
542	2.31E-03	5.42E-02	1.64E-01	2.21E-01	7.63E-02	1.89E+00	5.97E-01	5.05E-01	8.44E-01
555	2.31E-03	5.42E-02	1.64E-01	2.21E-01	7.63E-02	1.89E+00	5.97E-01	5.05E-01	8.82E-01
500	2.31E-03	5.42E-02	1.64E-01	1.51E-01	1.32E-01	5.33E+00	1.27E+00	1.69E-01	1.88E+00
48	2.31E-03	5.42E-02	1.64E-01	2.36E-01	7.63E-02	1.35E+00	5.98E-01	5.77E-01	9.00E-01
51	2.31E-03	5.42E-02	1.64E-01	2.14E-01	8.70E-02	1.68E+00	7.28E-01	4.44E-01	1.03E+00
75	2.47E-03	5.61E-02	1.68E-01	2.21E-01	9.58E-02	2.35E+00	6.82E-01	3.66E-01	1.06E+00
108	2.49E-03	5.83E-02	1.69E-01	2.13E-01	1.11E-01	3.28E+00	7.35E-01	2.71E-01	1.17E+00
110	2.52E-03	5.86E-02	1.69E-01	2.58E-01	7.63E-02	1.89E+00	5.00E-01	5.77E-01	7.63E-01
132	2.52E-03	5.86E-02	1.69E-01	2.32E-01	1.04E-01	2.90E+00	6.19E-01	3.11E-01	1.02E+00
158	2.59E-03	5.74E-02	1.71E-01	1.81E-01	9.11E-02	2.36E+00	1.02E+00	4.05E-01	1.25E+00
164	2.64E-03	5.89E-02	1.72E-01	1.88E-01	7.63E-02	1.35E+00	9.44E-01	5.77E-01	1.14E+00
172	2.64E-03	5.89E-02	1.72E-01	2.51E-01	7.63E-02	1.35E+00	5.29E-01	5.77E-01	8.47E-01
196	2.64E-03	5.89E-02	1.72E-01	2.16E-01	8.54E-02	2.20E+00	7.01E-01	4.61E-01	9.58E-01

PARAMETROS GEOMETRICOS DE LAS POROSIDADES

IdNo	Area	Dcirc	Dsph	Perim	Length	Aspect	FormF	Round	Convex
199	2.71E-03	5.87E-02	1.73E-01	2.63E-01	9.01E-02	2.28E+00	4.80E-01	4.14E-01	8.35E-01
234	2.71E-03	5.87E-02	1.73E-01	4.29E-01	9.01E-02	1.68E+00	1.81E-01	4.14E-01	5.20E-01
3	2.73E-03	5.90E-02	1.74E-01	1.49E+00	4.72E-01	2.45E+00	3.52E-01	3.57E-01	7.08E-01
30	2.74E-03	5.91E-02	1.74E-01	2.07E-01	1.37E-01	3.61E+00	8.71E-01	2.01E-01	1.43E+00
133	2.86E-03	6.03E-02	1.76E-01	2.47E-01	1.15E-01	2.95E+00	6.14E-01	2.88E-01	1.04E+00
135	2.89E-03	6.07E-02	1.77E-01	2.88E-01	7.63E-02	1.38E+00	4.52E-01	6.49E-01	7.16E-01
193	2.92E-03	6.10E-02	1.78E-01	2.70E-01	8.54E-02	2.20E+00	5.14E-01	5.19E-01	7.88E-01
55B	2.97E-03	6.15E-02	1.79E-01	2.65E-01	1.11E-01	2.88E+00	5.34E-01	3.05E-01	9.50E-01
569	2.97E-03	6.15E-02	1.79E-01	2.00E-01	9.01E-02	2.28E+00	9.33E-01	4.66E-01	1.10E+00
4	2.97E-03	6.15E-02	1.79E-01	4.89E-01	1.63E-01	1.70E+00	5.72E-01	5.24E-01	8.82E-01
32	2.97E-03	6.15E-02	1.79E-01	2.21E-01	9.01E-02	1.68E+00	8.53E-01	5.18E-01	1.04E+00
101	3.30E-03	6.48E-02	1.85E-01	1.93E-01	1.04E-01	1.73E+00	1.11E+00	3.89E-01	1.34E+00
149	3.30E-03	6.48E-02	1.85E-01	2.62E-01	1.15E-01	2.20E+00	6.06E-01	3.18E-01	1.05E+00
161	3.30E-03	6.48E-02	1.85E-01	3.35E-01	1.33E-01	5.36E+00	3.71E-01	2.38E-01	8.86E-01
191	3.30E-03	6.48E-02	1.85E-01	2.17E-01	9.01E-02	2.28E+00	8.85E-01	5.18E-01	1.06E+00
557	3.30E-03	6.48E-02	1.85E-01	3.10E-01	9.01E-02	1.64E+00	4.33E-01	5.18E-01	7.67E-01
570	3.30E-03	6.48E-02	1.85E-01	3.40E-01	1.32E-01	5.33E+00	3.59E-01	2.41E-01	8.47E-01
42	3.30E-03	6.48E-02	1.85E-01	2.84E-01	9.59E-02	1.76E+00	5.68E-01	5.03E-01	8.81E-01
58	3.30E-03	6.48E-02	1.85E-01	2.84E-01	9.59E-02	1.76E+00	5.68E-01	5.03E-01	8.67E-01
94	3.45E-03	6.63E-02	1.88E-01	3.23E-01	9.99E-02	1.65E+00	4.37E-01	4.64E-01	8.32E-01
147	3.51E-03	6.69E-02	1.89E-01	3.73E-01	9.59E-02	1.76E+00	3.29E-01	5.03E-01	6.60E-01
564	3.53E-03	6.70E-02	1.89E-01	3.50E-01	1.33E-01	3.48E+00	3.73E-01	2.62E-01	8.39E-01
568	3.63E-03	6.80E-02	1.91E-01	2.58E-01	9.58E-02	1.85E+00	6.88E-01	5.03E-01	9.59E-01
603	3.63E-03	6.80E-02	1.91E-01	3.78E-01	1.23E-01	3.18E+00	3.19E-01	3.03E-01	7.22E-01
730	3.63E-03	6.80E-02	1.91E-01	6.48E-01	1.33E-01	3.48E+00	1.09E-01	2.62E-01	4.65E-01
41	3.63E-03	6.80E-02	1.91E-01	3.69E-01	1.37E-01	3.61E+00	3.67E-01	2.68E-01	8.58E-01
43	3.68E-03	6.85E-02	1.92E-01	3.81E-01	1.58E-01	4.35E+00	3.43E-01	2.01E-01	9.01E-01
146	3.85E-03	7.00E-02	1.95E-01	3.51E-01	1.12E-01	1.89E+00	4.05E-01	4.02E-01	7.76E-01
571	3.87E-03	7.02E-02	1.95E-01	3.28E-01	1.33E-01	3.48E+00	4.64E-01	2.86E-01	9.02E-01
63	3.88E-03	7.03E-02	1.95E-01	3.45E-01	9.87E-02	1.46E+00	4.53E-01	5.61E-01	7.85E-01
140	3.96E-03	7.10E-02	1.97E-01	3.69E-01	1.16E-01	2.18E+00	3.97E-01	4.08E-01	7.61E-01
168	4.06E-03	7.14E-02	1.97E-01	3.45E-01	1.43E-01	3.87E+00	4.54E-01	2.66E-01	9.14E-01
338	4.29E-03	7.39E-02	2.02E-01	6.17E-01	1.37E-01	2.64E+00	1.42E-01	2.91E-01	5.01E-01

PARAMETROS GEOMETRICOS DE LAS POROSIDADES

IdNo	Area	Dcirc	Dsph	Perim	Length	Aspect	FormF	Round	Convex
5	4.29E-03	7.39E-02	2.02E-01	1.17E+00	4.84E-01	4.71E+00	3.46E-01	2.05E-01	9.01E-01
141	4.29E-03	7.39E-02	2.02E-01	4.13E-01	1.76E-01	4.71E+00	3.66E-01	2.04E-01	9.23E-01
155	4.95E-03	7.94E-02	2.12E-01	6.05E-01	1.58E-01	4.21E+00	1.70E-01	2.51E-01	5.89E-01
541	4.95E-03	7.94E-02	2.12E-01	3.63E-01	1.11E-01	1.62E+00	4.72E-01	5.07E-01	7.89E-01
6	4.97E-03	7.95E-02	2.12E-01	3.63E-01	1.11E-01	1.62E+00	4.72E-01	5.07E-01	7.89E-01
50	4.95E-03	7.94E-02	2.12E-01	3.87E-01	1.37E-01	3.61E+00	4.44E-01	3.58E-01	8.50E-01
112	5.28E-03	8.20E-02	2.16E-01	3.73E-01	1.32E-01	2.12E+00	4.78E-01	3.88E-01	8.36E-01
536	5.28E-03	9.20E-02	2.16E-01	3.04E-01	1.32E-01	2.10E+00	7.18E-01	3.88E-01	1.03E+00
566	5.28E-03	8.20E-02	2.16E-01	3.29E-01	1.15E-01	1.76E+00	6.15E-01	5.09E-01	8.80E-01
587	5.35E-03	8.25E-02	2.17E-01	2.65E-01	1.16E-01	2.18E+00	9.48E-01	5.02E-01	1.10E+00
55	5.42E-03	8.31E-02	2.18E-01	6.03E-01	2.06E-01	3.48E+00	1.94E-01	1.68E-01	7.46E-01
84	5.55E-03	8.41E-02	2.20E-01	4.85E-01	1.84E-01	4.20E+00	3.00E-01	2.11E-01	8.21E-01
116	5.61E-03	8.45E-02	2.21E-01	4.29E-01	1.60E-01	3.18E+00	3.84E-01	2.81E-01	8.15E-01
178	5.61E-03	8.45E-02	2.21E-01	3.46E-01	2.42E-01	4.86E+00	5.91E-01	1.22E-01	1.50E+00
574	5.61E-03	8.45E-02	2.21E-01	3.59E-01	1.23E-01	2.35E+00	5.47E-01	4.69E-01	8.47E-01
114	5.61E-03	8.45E-02	2.21E-01	4.68E-01	1.92E-01	2.16E+00	3.41E-01	2.05E-01	9.52E-01
170	5.78E-03	8.58E-02	2.23E-01	4.78E-01	1.92E-01	3.14E+00	3.27E-01	2.05E-01	8.98E-01
117	5.94E-03	8.70E-02	2.25E-01	5.27E-01	1.71E-01	2.22E+00	2.84E-01	2.74E-01	7.48E-01
588	5.94E-03	8.70E-02	2.25E-01	2.84E-01	1.16E-01	1.69E+00	9.80E-01	5.96E-01	1.07E+00
7	6.27E-03	8.93E-02	2.29E-01	2.21E-01	7.63E-02	1.89E+00	5.97E-01	5.05E-01	8.44E-01
8	6.27E-03	8.93E-02	2.29E-01	3.95E-01	1.90E-01	3.40E+00	5.33E-01	2.33E-01	1.05E+00
92	6.50E-03	9.10E-02	2.32E-01	3.93E-01	1.26E-01	1.51E+00	5.37E-01	5.29E-01	8.37E-01
529	6.60E-03	9.17E-02	2.33E-01	5.45E-01	1.23E-01	1.82E+00	2.79E-01	5.52E-01	6.08E-01
543	6.60E-03	9.17E-02	2.33E-01	3.95E-01	1.90E-01	3.40E+00	5.33E-01	2.33E-01	1.05E+00
548	6.60E-03	9.17E-02	2.33E-01	3.46E-01	1.37E-01	2.64E+00	6.95E-01	4.47E-01	9.99E-01
9	6.71E-03	9.24E-02	2.34E-01	1.14E+00	3.46E-01	1.96E+00	2.86E-01	3.15E-01	7.53E-01
78	6.80E-03	9.30E-02	2.35E-01	3.98E-01	1.76E-01	2.22E+00	5.51E-01	2.85E-01	1.05E+00
106	6.93E-03	9.39E-02	2.37E-01	5.11E-01	1.71E-01	2.58E+00	3.34E-01	3.03E-01	7.69E-01
422	6.93E-03	9.39E-02	2.37E-01	5.55E-01	1.33E-01	1.61E+00	2.83E-01	5.00E-01	6.16E-01
537	6.93E-03	9.39E-02	2.37E-01	3.70E-01	1.37E-01	2.05E+00	6.36E-01	4.70E-01	9.21E-01
10	6.93E-03	9.39E-02	2.37E-01	2.34E+00	6.22E-01	1.68E+00	1.70E-01	2.44E-01	6.75E-01
554	6.99E-03	9.43E-02	2.38E-01	5.46E-01	1.84E-01	3.81E+00	3.07E-01	2.73E-01	7.67E-01
599	7.01E-03	9.45E-02	2.38E-01	6.24E-01	2.05E-01	3.76E+00	2.35E-01	2.19E-01	7.23E-01

PARAMETROS GEOMETRICOS DE LAS POROSIDADES

IdNo	Area	Dcirc	Dsph	Perim	Length	Aspect	FormF	Round	Convex
751	7.20E-03	9.57E-02	2.40E-01	6.03E-01	1.63E-01	2.49E+00	2.51E-01	3.47E-01	6.32E-01
72	7.28E-03	9.63E-02	2.41E-01	4.36E-01	1.98E-01	3.93E+00	5.02E-01	2.47E-01	1.02E+00
113	7.30E-03	9.64E-02	2.41E-01	5.17E-01	1.76E-01	1.89E+00	3.58E-01	3.12E-01	8.75E-01
585	7.59E-03	9.83E-02	2.44E-01	4.66E-01	1.84E-01	3.08E+00	4.39E-01	2.85E-01	8.89E-01
82	7.59E-03	9.83E-02	2.44E-01	4.36E-01	1.79E-01	2.33E+00	5.25E-01	3.16E-01	9.49E-01
98	7.70E-03	9.90E-02	2.45E-01	4.53E-01	1.60E-01	2.04E+00	4.85E-01	3.96E-01	8.67E-01
136	7.92E-03	1.00E-01	2.48E-01	4.36E-01	1.51E-01	1.99E+00	5.25E-01	4.42E-01	8.56E-01
265	7.92E-03	1.00E-01	2.48E-01	7.39E-01	1.76E-01	2.72E+00	1.83E-01	3.26E-01	5.48E-01
584	7.92E-03	1.00E-01	2.48E-01	7.90E-01	3.52E-01	9.69E+00	1.60E-01	8.14E-02	9.22E-01
737	7.92E-03	1.00E-01	2.48E-01	8.19E-01	1.80E-01	2.89E+00	1.49E-01	3.12E-01	5.03E-01
97	7.92E-03	1.00E-01	2.48E-01	3.90E-01	1.39E-01	1.73E+00	6.82E-01	5.46E-01	9.19E-01
105	7.95E-03	1.01E-01	2.48E-01	4.43E-01	1.51E-01	1.86E+00	5.30E-01	4.61E-01	8.46E-01
604	8.00E-03	1.01E-01	2.48E-01	3.87E-01	1.58E-01	2.42E+00	6.94E-01	4.19E-01	1.00E+00
109	8.25E-03	1.02E-01	2.51E-01	3.18E-01	1.43E-01	2.15E+00	1.07E+00	5.35E-01	1.18E+00
620	8.30E-03	1.03E-01	2.52E-01	6.93E-01	1.51E-01	1.56E+00	2.25E-01	4.79E-01	5.50E-01
163	8.58E-03	1.05E-01	2.54E-01	5.74E-01	1.92E-01	1.69E+00	3.40E-01	3.08E-01	8.29E-01
181	8.58E-03	1.05E-01	2.54E-01	7.26E-01	2.27E-01	3.79E+00	2.12E-01	2.21E-01	7.00E-01
486	8.90E-03	1.06E-01	2.57E-01	7.66E-01	1.60E-01	1.81E+00	1.91E-01	4.46E-01	5.20E-01
818	8.91E-03	1.07E-01	2.58E-01	8.31E-01	1.51E-01	1.22E+00	1.62E-01	4.98E-01	5.10E-01
34	8.91E-03	1.07E-01	2.58E-01	4.66E-01	1.80E-01	2.78E+00	5.35E-01	3.64E-01	9.22E-01
107	9.01E-03	1.07E-01	2.59E-01	6.85E-01	2.34E-01	3.34E+00	2.48E-01	2.15E-01	7.54E-01
373	9.24E-03	1.08E-01	2.61E-01	6.62E-01	1.43E-01	1.75E+00	2.65E-01	5.76E-01	5.81E-01
73	9.24E-03	1.08E-01	2.61E-01	8.38E-01	2.34E-01	3.66E+00	1.71E-01	2.23E-01	6.17E-01
128	9.35E-03	1.09E-01	2.62E-01	4.80E-01	1.66E-01	1.98E+00	5.23E-01	4.79E-01	8.65E-01
336	9.45E-03	1.10E-01	2.63E-01	7.07E-01	1.53E-01	1.50E+00	2.41E-01	5.20E-01	5.97E-01
45	9.57E-03	1.10E-01	2.64E-01	6.57E-01	1.99E-01	1.77E+00	2.88E-01	3.20E-01	7.51E-01
565	9.57E-03	1.10E-01	2.64E-01	8.46E-01	2.74E-01	4.98E+00	1.74E-01	1.68E-01	6.90E-01
583	9.90E-03	1.12E-01	2.67E-01	4.94E-01	1.80E-01	2.78E+00	5.11E-01	3.90E-01	8.77E-01
11	9.90E-03	1.12E-01	2.67E-01	7.02E-01	2.74E-01	2.63E+00	6.56E-01	4.38E-01	9.45E-01
95	9.90E-03	1.12E-01	2.67E-01	7.45E-01	1.80E-01	2.27E+00	2.32E-01	4.03E-01	6.08E-01
190	1.02E-02	1.14E-01	2.70E-01	7.37E-01	2.37E-01	3.72E+00	2.37E-01	2.32E-01	7.22E-01
561	1.02E-02	1.14E-01	2.70E-01	6.00E-01	2.10E-01	2.45E+00	3.58E-01	2.96E-01	7.76E-01
33	1.02E-02	1.14E-01	2.70E-01	5.40E-01	1.99E-01	2.69E+00	4.56E-01	3.41E-01	8.38E-01

PARAMETROS GEOMETRICOS DE LAS POROSIDADES

IdNo	Area	Dcirc	Dsph	Perim	Length	Aspect	FomF	Round	Convex
115	1.02E-02	1.14E-01	2.70E-01	9.21E-01	2.89E-01	3.45E+00	1.57E-01	1.61E-01	6.79E-01
123	1.06E-02	1.16E-01	2.73E-01	5.34E-01	1.71E-01	1.80E+00	4.65E-01	4.62E-01	7.93E-01
589	1.06E-02	1.16E-01	2.73E-01	5.10E-01	1.90E-01	2.95E+00	5.10E-01	3.72E-01	8.88E-01
12	1.06E-02	1.16E-01	2.73E-01	1.41E+00	3.79E-01	1.66E+00	2.66E-01	3.73E-01	6.66E-01
539	1.06E-02	1.16E-01	2.73E-01	4.89E-01	1.63E-01	1.70E+00	5.72E-01	5.24E-01	8.82E-01
167	1.07E-02	1.17E-01	2.74E-01	6.02E-01	2.26E-01	2.46E+00	3.90E-01	2.80E-01	8.84E-01
515	1.07E-02	1.17E-01	2.74E-01	7.49E-01	1.63E-01	1.70E+00	2.51E-01	5.40E-01	5.74E-01
29	1.08E-02	1.17E-01	2.75E-01	6.76E-01	2.65E-01	3.02E+00	3.18E-01	2.10E-01	8.61E-01
689	1.12E-02	1.20E-01	2.78E-01	8.22E-01	1.79E-01	2.25E+00	2.21E-01	4.74E-01	5.48E-01
13	1.16E-02	1.21E-01	2.81E-01	3.46E-01	1.37E-01	2.64E+00	6.95E-01	4.47E-01	9.99E-01
185	1.19E-02	1.23E-01	2.83E-01	5.07E-01	1.90E-01	2.42E+00	5.97E-01	4.31E-01	9.18E-01
305	1.22E-02	1.25E-01	2.86E-01	7.83E-01	1.63E-01	1.26E+00	2.50E-01	5.88E-01	5.79E-01
551	1.22E-02	1.25E-01	2.86E-01	9.14E-01	2.52E-01	2.04E+00	1.84E-01	2.44E-01	6.63E-01
567	1.22E-02	1.25E-01	2.86E-01	5.07E-01	2.42E-01	4.86E+00	5.98E-01	2.66E-01	1.06E+00
600	1.22E-02	1.25E-01	2.86E-01	7.42E-01	2.78E-01	4.22E+00	2.87E-01	2.07E-01	8.02E-01
212	1.22E-02	1.25E-01	2.86E-01	1.07E+00	2.05E-01	1.84E+00	1.42E-01	3.89E-01	4.74E-01
255	1.25E-02	1.26E-01	2.89E-01	8.33E-01	1.63E-01	1.45E+00	2.39E-01	6.35E-01	5.33E-01
74	1.29E-02	1.28E-01	2.91E-01	8.51E-01	3.39E-01	4.67E+00	2.35E-01	1.50E-01	8.45E-01
162	1.32E-02	1.30E-01	2.94E-01	1.09E+00	2.32E-01	1.41E+00	1.51E-01	3.21E-01	5.76E-01
174	1.35E-02	1.31E-01	2.96E-01	8.67E-01	2.06E-01	1.53E+00	2.26E-01	4.05E-01	6.08E-01
661	1.35E-02	1.31E-01	2.96E-01	9.23E-01	2.10E-01	1.84E+00	2.00E-01	3.92E-01	5.60E-01
704	1.35E-02	1.31E-01	2.96E-01	1.07E+00	2.57E-01	3.08E+00	1.50E-01	2.62E-01	5.46E-01
90	1.35E-02	1.31E-01	2.96E-01	9.01E-01	2.26E-01	2.34E+00	2.15E-01	3.47E-01	6.07E-01
137	1.35E-02	1.31E-01	2.96E-01	9.21E-01	3.46E-01	5.63E+00	2.05E-01	1.47E-01	8.01E-01
647	1.39E-02	1.33E-01	2.98E-01	8.69E-01	1.98E-01	2.19E+00	2.36E-01	4.60E-01	5.57E-01
206	1.39E-02	1.33E-01	2.98E-01	9.28E-01	2.18E-01	2.37E+00	2.12E-01	3.90E-01	5.75E-01
314	1.42E-02	1.34E-01	3.01E-01	9.90E-01	2.23E-01	2.49E+00	1.86E-01	3.74E-01	5.27E-01
576	1.45E-02	1.36E-01	3.03E-01	6.03E-01	2.27E-01	2.36E+00	5.13E-01	3.68E-01	8.83E-01
102	1.45E-02	1.36E-01	3.03E-01	4.90E-01	1.82E-01	1.48E+00	7.95E-01	5.85E-01	9.53E-01
678	1.49E-02	1.38E-01	3.05E-01	8.79E-01	2.27E-01	2.48E+00	2.47E-01	3.76E-01	6.19E-01
241	1.52E-02	1.39E-01	3.08E-01	1.02E+00	2.05E-01	1.91E+00	1.87E-01	4.68E-01	5.05E-01
663	1.52E-02	1.39E-01	3.08E-01	1.16E+00	2.91E-01	2.16E+00	1.46E-01	2.34E-01	6.27E-01
586	1.55E-02	1.41E-01	3.10E-01	7.25E-01	2.61E-01	2.13E+00	3.71E-01	2.89E-01	8.52E-01

PARAMETROS GEOMETRICOS DE LAS POROSIDADES

IdNo	Area	Dcirc	Dsph	Perim	Length	Aspect	FormF	Round	Convex
153	1.55E-02	1.41E-01	3.10E-01	6.69E-01	2.32E-01	1.52E+00	2.64E-01	3.75E-01	7.04E-01
594	1.55E-02	1.41E-01	3.10E-01	6.71E-01	2.86E-01	3.77E+00	4.43E-01	2.47E-01	9.62E-01
228	1.58E-02	1.42E-01	3.12E-01	9.07E-01	2.05E-01	1.72E+00	2.47E-01	4.88E-01	5.83E-01
111	1.58E-02	1.42E-01	3.12E-01	6.69E-01	2.27E-01	2.48E+00	4.65E-01	4.09E-01	8.10E-01
235	1.62E-02	1.43E-01	3.14E-01	9.62E-01	2.27E-01	2.13E+00	2.24E-01	4.09E-01	5.73E-01
56	1.65E-02	1.45E-01	3.16E-01	6.59E-01	2.10E-01	1.70E+00	4.87E-01	4.88E-01	8.41E-01
514	1.65E-02	1.45E-01	3.16E-01	1.11E+00	2.38E-01	1.89E+00	1.71E-01	3.80E-01	5.20E-01
687	1.68E-02	1.46E-01	3.18E-01	1.01E+00	2.45E-01	2.60E+00	2.20E-01	3.77E-01	5.75E-01
166	1.68E-02	1.46E-01	3.18E-01	8.43E-01	2.64E-01	2.28E+00	3.21E-01	3.31E-01	7.43E-01
478	1.78E-02	1.51E-01	3.24E-01	9.30E-01	2.05E-01	1.47E+00	2.64E-01	5.48E-01	6.14E-01
44	1.82E-02	1.52E-01	3.26E-01	7.99E-01	2.69E-01	2.59E+00	3.64E-01	3.24E-01	7.97E-01
474	1.82E-02	1.52E-01	3.26E-01	1.25E+00	2.57E-01	2.15E+00	1.50E-01	3.57E-01	5.07E-01
341	1.35E-02	1.53E-01	3.28E-01	1.04E+00	2.15E-01	1.61E+00	2.20E-01	5.17E-01	5.41E-01
69	1.85E-02	1.53E-01	3.28E-01	1.20E+00	9.93E-01	4.05E+00	1.66E-01	1.58E-01	7.06E-01
33	1.88E-02	1.55E-01	3.30E-01	1.32E+00	4.40E-01	3.40E+00	1.40E-01	1.28E-01	7.04E-01
591	1.91E-02	1.56E-01	3.32E-01	7.82E-01	2.60E-01	2.37E+00	4.01E-01	3.67E-01	7.63E-01
118	1.95E-02	1.57E-01	3.34E-01	9.66E-01	3.76E-01	5.05E+00	2.67E-01	1.78E-01	8.57E-01
125	1.95E-02	1.57E-01	3.34E-01	7.96E-01	2.74E-01	2.44E+00	3.93E-01	3.37E-01	8.49E-01
157	1.98E-02	1.59E-01	3.36E-01	7.87E-01	2.84E-01	2.89E+00	4.08E-01	3.17E-01	8.38E-01
387	1.98E-02	1.59E-01	3.36E-01	1.34E+00	3.52E-01	4.71E+00	1.43E-01	2.10E-01	5.72E-01
572	2.01E-02	1.60E-01	3.38E-01	9.72E-01	3.48E-01	3.96E+00	2.77E-01	2.19E-01	7.62E-01
96	2.05E-02	1.61E-01	3.40E-01	7.59E-01	2.57E-01	2.01E+00	4.61E-01	4.08E-01	8.15E-01
177	2.08E-02	1.63E-01	3.42E-01	1.00E+00	2.57E-01	1.40E+00	2.55E-01	4.08E-01	6.96E-01
200	2.11E-02	1.64E-01	3.43E-01	9.04E-01	3.38E-01	3.57E+00	3.30E-01	2.39E-01	7.89E-01
49	2.11E-02	1.64E-01	3.43E-01	1.16E+00	4.23E-01	3.33E+00	2.05E-01	1.57E-01	8.03E-01
770	2.15E-02	1.65E-01	3.45E-01	1.10E+00	2.64E-01	2.22E+00	2.32E-01	4.04E-01	5.87E-01
337	2.21E-02	1.68E-01	3.49E-01	1.11E+00	2.23E-01	1.33E+00	2.28E-01	5.77E-01	5.51E-01
81	2.21E-02	1.68E-01	3.49E-01	8.79E-01	3.42E-01	3.01E+00	3.70E-01	2.48E-01	9.02E-01
154	2.24E-02	1.69E-01	3.50E-01	9.43E-01	2.92E-01	1.42E+00	3.31E-01	3.50E-01	8.44E-01
175	2.28E-02	1.70E-01	3.52E-01	8.23E-01	2.27E-01	1.47E+00	4.35E-01	5.80E-01	7.46E-01
248	2.34E-02	1.73E-01	3.55E-01	1.36E+00	3.51E-01	3.84E+00	1.61E-01	2.46E-01	5.79E-01
14	2.34E-02	1.73E-01	3.55E-01	2.92E+00	9.74E-01	3.03E+00	2.76E-01	2.52E-01	7.82E-01
562	2.38E-02	1.74E-01	3.57E-01	1.10E+00	4.18E-01	3.49E+00	2.28E-01	1.78E-01	8.03E-01

PARAMETROS GEOMETRICOS DE LAS POROSIDADES

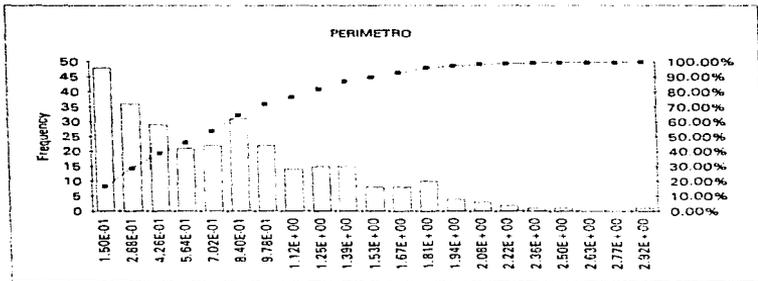
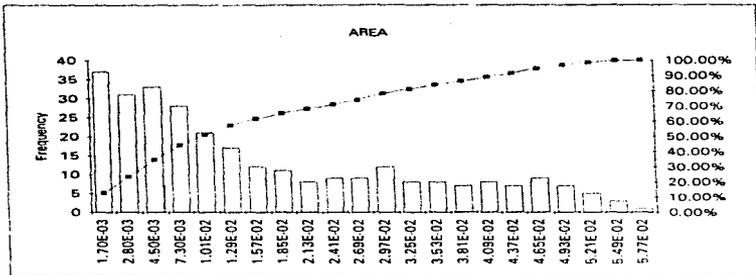
IdNo	Area	Dcirc	Dsph	Perim	Length	Aspect	FormF	Round	Convex
784	2.44E-02	1.76E-01	3.60E-01	1.07E+00	2.66E-01	1.61E+00	2.71E-01	4.47E-01	6.26E-01
763	2.44E-02	1.76E-01	3.60E-01	1.43E+00	2.81E-01	1.80E+00	1.53E-01	4.05E-01	5.03E-01
792	2.48E-02	1.78E-01	3.62E-01	1.45E+00	3.96E-01	4.25E+00	1.51E-01	2.06E-01	5.87E-01
15	2.51E-02	1.79E-01	3.64E-01	1.63E+00	5.57E-01	1.91E+00	3.33E-01	3.10E-01	7.82E-01
546	2.54E-02	1.80E-01	3.65E-01	7.02E-01	2.74E-01	2.63E+00	6.56E-01	4.38E-01	9.45E-01
16	2.57E-02	1.81E-01	3.67E-01	9.14E-01	2.52E-01	2.04E+00	1.84E-01	2.44E-01	6.63E-01
556	2.57E-02	1.81E-01	3.67E-01	1.03E+00	3.95E-01	2.18E+00	3.18E-01	2.19E-01	8.74E-01
727	2.67E-02	1.84E-01	3.71E-01	1.44E+00	3.59E-01	3.02E+00	1.67E-01	2.71E-01	5.58E-01
31	2.67E-02	1.84E-01	3.71E-01	1.04E+00	3.81E-01	3.76E+00	3.21E-01	2.44E-01	8.50E-01
57	2.74E-02	1.87E-01	3.74E-01	1.26E+00	4.70E-01	4.16E+00	2.21E-01	1.60E-01	8.35E-01
179	2.77E-02	1.88E-01	3.76E-01	1.61E+00	4.84E-01	4.29E+00	1.35E-01	1.51E-01	6.79E-01
447	2.77E-02	1.88E-01	3.76E-01	1.38E+00	3.39E-01	2.16E+00	1.91E-01	3.20E-01	5.53E-01
257	2.77E-02	1.88E-01	3.76E-01	1.18E+00	2.52E-01	1.67E+00	2.61E-01	5.81E-01	5.68E-01
278	2.87E-02	1.91E-01	3.80E-01	1.30E+00	2.91E-01	2.25E+00	2.18E-01	4.37E-01	5.49E-01
69	2.90E-02	1.92E-01	3.82E-01	8.70E-01	2.72E-01	1.69E+00	4.88E-01	5.06E-01	8.02E-01
89	2.90E-02	1.92E-01	3.82E-01	6.69E-01	2.43E-01	1.53E+00	8.25E-01	6.04E-01	9.82E-01
17	2.94E-02	1.93E-01	3.83E-01	1.39E+00	5.94E-01	9.00E+00	2.09E-01	1.16E-01	8.96E-01
544	2.94E-02	1.93E-01	3.83E-01	1.14E+00	3.46E-01	1.96E+00	2.86E-01	3.15E-01	7.53E-01
233	2.97E-02	1.94E-01	3.85E-01	1.41E+00	3.55E-01	3.06E+00	1.91E-01	3.04E-01	5.87E-01
595	2.97E-02	1.94E-01	3.85E-01	1.26E+00	5.51E-01	7.53E+00	2.40E-01	1.27E-01	9.42E-01
47	3.00E-02	1.96E-01	3.86E-01	9.00E-01	3.21E-01	1.89E+00	4.76E-01	3.80E-01	8.90E-01
100	3.04E-02	1.97E-01	3.87E-01	1.47E+00	4.40E-01	3.36E+00	1.81E-01	2.04E-01	7.03E-01
601	3.07E-02	1.98E-01	3.89E-01	1.02E+00	4.40E-01	4.89E+00	3.79E-01	2.06E-01	9.29E-01
65	3.10E-02	1.99E-01	3.90E-01	1.99E+00	6.60E-01	5.33E+00	1.00E-01	9.26E-02	7.12E-01
87	3.17E-02	2.01E-01	3.93E-01	1.04E+00	4.62E-01	4.37E+00	3.73E-01	1.91E-01	9.72E-01
194	3.20E-02	2.02E-01	3.94E-01	8.49E-01	3.05E-01	1.72E+00	5.56E-01	4.40E-01	8.89E-01
552	3.20E-02	2.02E-01	3.94E-01	1.39E+00	5.94E-01	9.00E+00	2.09E-01	1.16E-01	8.96E-01
76	3.20E-02	2.02E-01	3.94E-01	1.23E+00	4.38E-01	3.34E+00	2.70E-01	2.14E-01	7.94E-01
61	3.20E-02	2.02E-01	3.94E-01	1.46E+00	5.21E-01	4.51E+00	1.93E-01	1.53E-01	7.66E-01
382	3.23E-02	2.03E-01	3.96E-01	1.60E+00	3.78E-01	2.58E+00	1.61E-01	2.91E-01	5.36E-01
735	3.27E-02	2.04E-01	3.97E-01	1.48E+00	3.83E-01	2.89E+00	1.86E-01	2.84E-01	5.63E-01
119	3.27E-02	2.04E-01	3.97E-01	1.85E+00	5.60E-01	3.92E+00	1.23E-01	1.36E-01	6.59E-01
127	3.27E-02	2.04E-01	3.97E-01	1.82E+00	5.51E-01	3.98E+00	1.26E-01	1.40E-01	6.62E-01

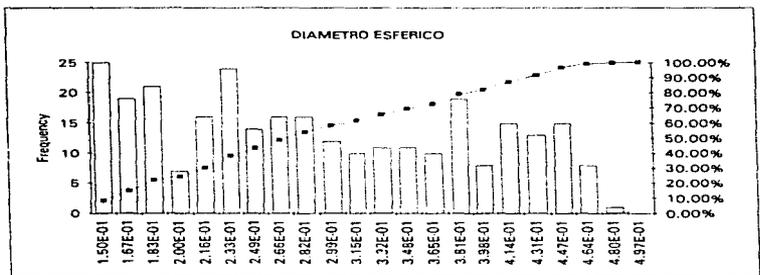
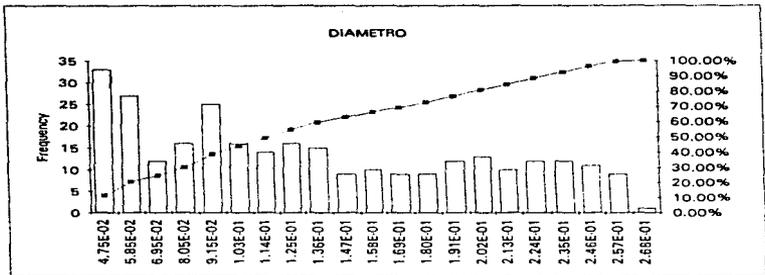
PARAMETROS GEOMETRICOS DE LAS POROSIDADES

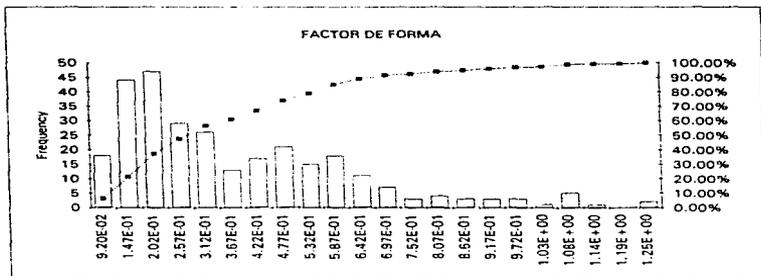
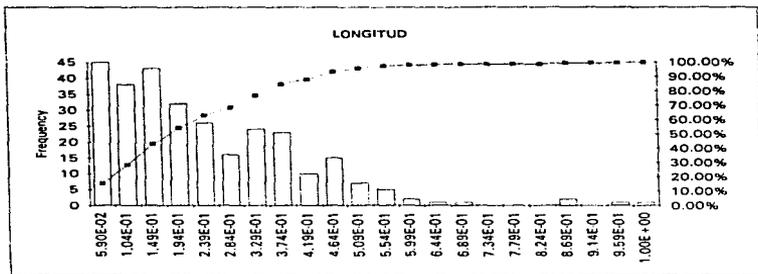
IdNo	Area	Dcirc	Dsph	Perim	Length	Aspect	FormF	Round	Convex
145	3.33E-02	2.06E-01	4.00E-01	9.42E-01	3.27E-01	1.62E+00	4.82E-01	4.05E-01	8.79E-01
394	3.33E-02	2.06E-01	4.00E-01	1.22E+00	2.82E-01	1.57E+00	2.88E-01	5.49E-01	5.95E-01
189	3.40E-02	2.09E-01	4.02E-01	1.25E+00	4.69E-01	3.76E+00	2.83E-01	2.02E-01	8.13E-01
425	3.43E-02	2.09E-01	4.04E-01	1.39E+00	3.38E-01	1.82E+00	2.34E-01	4.01E-01	6.02E-01
415	3.50E-02	2.11E-01	4.06E-01	1.36E+00	3.48E-01	2.19E+00	2.49E-01	3.86E-01	5.97E-01
443	3.60E-02	2.14E-01	4.10E-01	1.59E+00	3.38E-01	2.33E+00	1.83E-01	4.09E-01	5.24E-01
19	3.65E-02	2.16E-01	4.12E-01	5.46E-01	1.84E-01	3.81E+00	3.07E-01	2.73E-01	7.67E-01
152	3.65E-02	2.16E-01	4.12E-01	1.86E+00	4.98E-01	2.28E+00	1.37E-01	1.93E-01	6.16E-01
540	3.76E-02	2.19E-01	4.16E-01	1.17E+00	4.84E-01	4.71E+00	3.46E-01	2.05E-01	9.01E-01
577	3.76E-02	2.19E-01	4.16E-01	9.17E-01	3.81E-01	2.42E+00	5.67E-01	3.34E-01	9.64E-01
659	3.76E-02	2.19E-01	4.16E-01	1.56E+00	3.38E-01	1.78E+00	1.96E-01	4.24E-01	5.41E-01
83	3.80E-02	2.20E-01	4.17E-01	9.53E-01	3.05E-01	1.57E+00	5.39E-01	5.35E-01	8.40E-01
330	3.80E-02	2.20E-01	4.17E-01	1.47E+00	3.39E-01	1.81E+00	2.26E-01	4.30E-01	5.82E-01
676	3.89E-02	2.23E-01	4.21E-01	1.26E+00	3.05E-01	1.65E+00	3.12E-01	5.39E-01	6.09E-01
276	3.89E-02	2.23E-01	4.21E-01	1.50E+00	2.89E-01	1.31E+00	2.21E-01	6.05E-01	5.88E-01
598	3.93E-02	2.24E-01	4.22E-01	1.36E+00	3.46E-01	2.18E+00	2.69E-01	2.02E-01	7.35E-01
182	3.96E-02	2.25E-01	4.23E-01	1.09E+00	3.89E-01	3.03E+00	5.94E-01	3.39E-01	9.58E-01
593	3.96E-02	2.25E-01	4.23E-01	9.23E-01	3.89E-01	3.03E+00	2.29E-01	5.23E-01	5.34E-01
454	3.99E-02	2.25E-01	4.24E-01	1.50E+00	3.16E-01	1.59E+00	1.27E-01	1.84E-01	5.76E-01
617	4.03E-02	2.26E-01	4.26E-01	2.02E+00	5.33E-01	4.30E+00	3.17E-01	1.90E-01	9.16E-01
602	4.09E-02	2.28E-01	4.28E-01	1.28E+00	5.28E-01	4.71E+00	5.97E-01	5.05E-01	8.82E-01
20	4.09E-02	2.28E-01	4.28E-01	2.21E-01	7.63E-02	1.89E+00	2.66E-01	3.73E-01	6.86E-01
547	4.16E-02	2.30E-01	4.30E-01	1.41E+00	3.79E-01	1.65E+00	6.22E-01	5.03E-01	8.69E-01
581	4.19E-02	2.31E-01	4.31E-01	9.24E-01	3.27E-01	1.70E+00	4.97E-01	6.30E-01	7.78E-01
88	4.19E-02	2.31E-01	4.31E-01	1.04E+00	2.93E-01	1.27E+00	4.97E-01	4.98E-01	4.92E-01
452	4.22E-02	2.32E-01	4.32E-01	1.75E+00	3.32E-01	1.61E+00	1.77E-01	4.98E-01	6.48E-01
77	4.26E-02	2.33E-01	4.34E-01	1.89E+00	4.70E-01	1.34E+00	1.58E-01	2.55E-01	6.48E-01
260	4.32E-02	2.35E-01	4.36E-01	1.57E+00	3.76E-01	2.29E+00	2.26E-01	4.01E-01	5.95E-01
323	4.42E-02	2.37E-01	4.39E-01	1.81E+00	3.76E-01	2.27E+00	1.72E-01	4.04E-01	5.16E-01
21	4.46E-02	2.38E-01	4.40E-01	1.03E+00	3.95E-01	2.18E+00	3.18E-01	2.19E-01	8.74E-01
559	4.49E-02	2.39E-01	4.41E-01	1.52E+00	5.20E-01	2.23E+00	2.46E-01	2.13E-01	8.01E-01
714	4.52E-02	2.40E-01	4.42E-01	1.71E+00	4.06E-01	2.36E+00	1.96E-01	3.54E-01	5.42E-01
639	4.52E-02	2.40E-01	4.42E-01	1.55E+00	3.76E-01	2.18E+00	2.43E-01	4.16E-01	5.97E-01

PARAMETROS GEOMETRICOS DE LAS POROSIDADES

IdNo	Area	Dcirc	Dsph	Perim	Length	Aspect	FormF	Round	Convax
99	4.59E-02	2.42E-01	4.44E-01	2.30E+00	9.02E-01	9.30E+00	1.11E-01	7.28E-02	8.19E-01
440	4.62E-02	2.43E-01	4.46E-01	2.02E+00	4.84E-01	3.26E+00	1.35E-01	2.55E-01	5.15E-01
582	4.65E-02	2.43E-01	4.47E-01	2.52E+00	7.17E-01	3.71E+00	9.24E-02	1.16E-01	6.15E-01
762	4.69E-02	2.44E-01	4.48E-01	1.97E+00	4.40E-01	3.12E+00	1.53E-01	3.10E-01	5.25E-01
774	4.69E-02	2.44E-01	4.48E-01	1.69E+00	3.98E-01	2.14E+00	2.08E-01	3.83E-01	5.78E-01
573	4.72E-02	2.45E-01	4.49E-01	1.10E+00	3.72E-01	1.97E+00	5.00E-01	4.45E-01	7.99E-01
579	4.75E-02	2.46E-01	4.50E-01	9.21E-01	3.38E-01	2.12E+00	7.14E-01	5.38E-01	9.33E-01
66	4.82E-02	2.48E-01	4.52E-01	1.37E+00	3.98E-01	2.00E+00	3.28E-01	3.93E-01	7.39E-01
103	4.82E-02	2.46E-01	4.52E-01	1.88E+00	4.77E-01	2.00E+00	1.75E-01	2.73E-01	6.28E-01
91	4.88E-02	2.49E-01	4.54E-01	1.03E+00	3.38E-01	1.64E+00	5.93E-01	5.59E-01	8.48E-01
810	4.88E-02	2.49E-01	4.54E-01	2.15E+00	5.03E-01	3.81E+00	1.37E-01	2.47E-01	5.28E-01
79	5.02E-02	2.53E-01	4.58E-01	1.15E+00	4.11E-01	1.84E+00	4.78E-01	3.82E-01	8.51E-01
139	5.02E-02	2.53E-01	4.58E-01	2.47E+00	8.97E-01	7.79E+00	1.04E-01	7.95E-02	7.55E-01
473	5.05E-02	2.54E-01	4.59E-01	1.53E+00	3.28E-01	1.27E+00	2.73E-01	6.01E-01	5.86E-01
673	5.05E-02	2.54E-01	4.59E-01	2.22E+00	5.39E-01	3.58E+00	1.30E-01	2.23E-01	5.33E-01
54	5.08E-02	2.54E-01	4.60E-01	1.08E+00	3.38E-01	1.64E+00	5.59E-01	5.76E-01	8.49E-01
427	5.08E-02	2.54E-01	4.60E-01	1.84E+00	3.76E-01	1.65E+00	1.95E-01	4.69E-01	5.12E-01
456	5.18E-02	2.57E-01	4.63E-01	1.90E+00	3.93E-01	1.58E+00	1.83E-01	4.19E-01	5.52E-01
804	5.21E-02	2.58E-01	4.64E-01	1.77E+00	5.06E-01	4.02E+00	2.13E-01	2.64E-01	6.31E-01
129	5.25E-02	2.58E-01	4.65E-01	1.80E+00	5.86E-01	3.53E+00	2.08E-01	1.98E-01	7.28E-01
611	5.31E-02	2.60E-01	4.67E-01	1.85E+00	4.66E-01	2.90E+00	2.00E-01	3.19E-01	5.65E-01
293	5.35E-02	2.61E-01	4.68E-01	1.77E+00	4.49E-01	2.66E+00	2.20E-01	3.48E-01	5.90E-01
60	5.45E-02	2.63E-01	4.71E-01	1.70E+00	6.16E-01	5.54E+00	2.26E-01	1.86E-01	7.62E-01
220	5.51E-02	2.65E-01	4.73E-01	2.05E+00	5.04E-01	3.34E+00	1.62E-01	2.79E-01	5.46E-01
159	5.54E-02	2.66E-01	4.73E-01	1.58E+00	4.62E-01	1.69E+00	2.91E-01	3.47E-01	7.74E-01
365	5.58E-02	2.66E-01	4.74E-01	1.90E+00	3.76E-01	1.86E+00	2.05E-01	5.25E-01	5.17E-01
411	5.81E-02	2.72E-01	4.81E-01	1.59E+00	4.62E-01	1.69E+00	2.91E-01	3.47E-01	7.74E-01







La α -alúmina (Al_2O_3) es un material muy utilizado en la Ingeniería de Materiales por sus propiedades para elementos estructurales, principalmente por su ventaja de ser un material barato, debido a su abundancia en la naturaleza, lo que permite la creación de componentes estructurales efectivos a bajo costo. Como ejemplo de la aplicación de diferentes grados de porosidad en los materiales para diferentes usos (5) podemos mencionar tres:

1. La alúmina es utilizada en implantes para huesos por sus propiedades inertes biocompatibles. La porosidad del material ayudará a la cohesión del implante y el hueso por el crecimiento de éste dentro de los poros, para crear una unión resistente.
2. Como componentes de turbinas por su alta resistencia ante altas temperaturas, el nivel de porosidad, vista como defecto, definirá el nivel máximo permisible para mantener un buen desempeño ante el esfuerzo antes de sufrir una fractura, generalmente iniciada a partir de estas fallas microscópicas.
3. Asimismo, la industria electrónica utiliza la alúmina para los procesos de diseño de materiales dieléctricos. La porosidad aumenta las propiedades dieléctricas de los materiales, y puede ser manejada para encontrar el nivel óptimo de conducción dependiendo la carga aplicada.

En todos estos usos, la porosidad juega un papel importante para la predicción del comportamiento del material ante sus diversos usos. La técnica de análisis aquí descrita permite al ingeniero diseñador de materiales el análisis consistente a un tiempo reducido de los materiales de prueba, correlacionando las diversas características con sus nivel de porosidad para así modificar el proceso de fabricación - sinterización y llegar a la alúmina ideal en el proceso de diseño.

VII -. CONCLUSIONES

La aplicación de esta técnicas del análisis de imágenes en el estudio de las cerámicas se puede analizar desde varios puntos de vista:

- **Cantidad de información (imágenes) manejadas:** Las imágenes que se pueden obtener por medio del microscopio electrónico pueden ser almacenadas económicamente en CD´s y manejadas posteriormente en conjunto o individualmente. El mayor número de imágenes manejadas disminuye la variabilidad entre las muestras y ayuda a la obtención de datos que confirmen las hipótesis en la investigación.
- **Posibilidad de almacenamiento de datos y reproceso posterior:** Las muestras obtenidas se pueden guardar por periodos prolongados sin la degradación de la calidad de las mismas, para un reproceso posterior con métodos más avanzados o específicos para las muestras en cuestión.
- **Tiempo de procesamiento reducido:** Al disminuir el tiempo de procesamiento de datos, los métodos analíticos se hacen más eficientes y costeables, además de facilitar el trabajo al analista.
- **Mayor precisión en los resultados obtenidos:** Al ser un método analítico numérico, se reducen significativamente los errores que se puedan introducir al momento del manejo de las muestras y de los datos, siendo posible una evaluación posterior y comprobación por otros investigadores de los resultados obtenidos.
- **Industrialización a gran escala de métodos de análisis ópticos:** Con este tipo de análisis, se pueden industrializar los métodos de control de calidad de las industrias que se dediquen a la preparación de cerámicas.

- Áreas de oportunidad

Las áreas de aplicación de estas técnicas de análisis son extensas. A nivel de laboratorio, su utilización es cada vez más común. En trabajos de investigación intensivos, este tipo de métodos ayuda al científico y analista a realizar estudios de cerámicas u otros materiales semejantes para evaluar propiedades macroestructurales de los mismos. Los métodos probabilísticos se ven grandemente beneficiados al permitir el manejo de diversas muestras y gran cantidad de elementos en las mismas, manteniéndose los datos en forma tal que su revisión y posterior análisis es factible.

Otra área de aplicación importante es en el área industrial, específicamente en el control de calidad de los materiales producidos. En este tiempo en que la disminución de costo es determinante para la sobrevivencia de las empresas, la reducción del tiempo de análisis de control tiene un impacto grande en el costo del producto, ya que este análisis se puede realizar en línea con este método, por ser rápido y confiable al estar completamente automatizado. Además, los inventarios se ven reducidos y la calidad de los materiales producidos es más uniforme.

BIBLIOGRAFIA

- (1) Russ, J.C.; Computer Assisted Microscopy, Plenum Press, N.Y., 1990**

- (2) Joyce-Loebl; Image Analysis: Principles and Practice, Vickers, England. 1985**

- (3) Niblack, W.; An Introduction to Digital Image Processing, Strandberg Publishing Co., 1985**

- (4) Gitzen, W.H.; Alumina as a Ceramic Material, The American Society Inc., Columbus, OH.**

- (5) Engineered Materials Handbook, The Materials Information Society, Ceramic and Glasses, 4,**

- (6) Castaño M, Víctor; Estrategias en la Producción de Materiales: Retos, Amenazas y Oportunidades. Umbral XXI, 10, 1992**

- (7) Goldstein, J., et-al; Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis, Plenum Press, N.Y.**

- (8) Barrio Paredes, R.A.; Formación de Imágenes en el Microscopio Electrónico, U.N.A.M.,**

- (9) Brook, R.A., Purel, D.J.; On-line Image Aquisition and Analysis for Automatized Product Inspection, Inst. Phys. Conf. Ser. No. 44, Chap.4**

- (10) Canny, J.; A Computational Approach to Edge Detection, IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Nov. 1986**

- (11) Poulin-Moloney, A.; Fractography and Failure Mechanisms of Polymers and Composites, Elsevier Applied Science, London, 1989**

APENDICE I

Listado del Programa

{
program defects;

Antonio Villagomez A.

Danish Technological Institute,
Department of Chemistry,
1992

{
The purpose of this program is to identify defects in an image of etched ceramics and estimate some different statistics on the defects.

The program takes a grey level image as input. The image must be 8 bit/pixel (256 grey levels) and have size rows * cols. Rows and cols are constants specified below. The input image is double thresholded at levels specified as paramters and on the binary image the ellipses are identified. The image is considered to be on a hexagonal grid.

The output is written to a log file - if specified - otherwise to stdout. The data and format can be seen in the procedure 'statistics' below.

10/6-92 av

{
The program works in a number of steps:

- 1) Read parameters, get input, initialize, etc.
- 2) Perform double threshold. The result is a binary image.
- 3) Find the distance in all marked pixels to the background
- 4) Find local maxima in the distance image
- 5) Find gradients in distance image
- 6) Put labels on the local maxima
- 7) Make sure that every local maxima has only got one label
- 8) Label the rest of the image taking a label from the gradient direction
- 9) Collect statistics on all labels
- 10) Join (or unite) labels with the proper qualities
- 11) Exclude pixels outside the window
- 12) Count labels (particles) and give each label a color
- 13) Draw major axe for each ellipse in image
- 14) Write image on outfile

{ The hexagonal grid used is realized by moving odd rows 1/2 a pixel)

{ This version of the program is a 16 bit version and has to use a temporary file because of DOS size limit. It is suggested that this fil is on a RAM disk. The file size is 2*rows*cols byte. }

{ S M 20000,0,655360 }

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

```

uses
  dos, crt, uglobals, uems, uimfct1, uimfct2, uimstat, uimfile,
  uimgraph, uimshow;
const

```

```

version = 1.3;    Convert the program to use EMS )

```

```

var
  verbose, displevel      : integer;
  error                   : boolean;
  retval                  : integer;
  autothres, mkoutimage,
  blacklines              : boolean;
  highcut, lowcut        : integer;
  infile, outfile        : bfile;
  tmpfile                 : ifile;
  bpep                    : integer;
  emspage                 : emspagetbl;
  emsoffset               : emsoffsettbl;
  handle                  : emshandle;
  tmpfilename,
  pblogfilename, dblogfilename,
  infilename, outfilename,
  rootfilename, fileextension,
  sampleid, indexstr     : string255;
  fileindex1, fileindex2,
  samplerbr               : integer;
  dirinfo                 : searchrec;
  filedir                 : dirstr;
  inbasename              : namestr;
  fileext                 : extatr;
  kernelisz,
  kerneldist              : integer;
  nondogscale,
  minimumumarea,
  sdummy,
  l_d, pixelsz, pixelsze : real;
  window0, windowc0,
  window1, windowc1,
  extwin0, extwin0c,
  extwin1, extwin1c     : integer;
  image                   : blinearr;
  thisrow                 : ifullline;
  vptr                   : ifulllinep;
  shapeinfo               : shpcepttrarr;
  outcolor                : blabelarr;
  l, j, nrow              : integer;
  hour, minute, second,
  second100               : word;
  tottime                 : real;

```

```

procedure wait( level : integer );
var
  ch : char;
begin
  if (level>1) then
    begin
      while keypressed do ch := readkey;
      sound(365);
    end

```

```

        delay(50);
    }
    sound(666);
    delay(200);
    sound(333);
    delay(400);
}
nosound;
ch := readkey;
end;

begin
    {SR+}
    { ----- Read parameters, get input, initialize,
etc. }
    gettime(hour,minute,second,second100);
    tottime := second100/100+second+60.0*(minute+60.0*hour);
    { process parameters }
    fsplit(paramatr(0),progdtr,programe,progett);

    { default values }
    verbose      := 0;
    displayvol   := 0;
    highcut      := -1;
    lowcut       := -1;
    autothresh   := true;
    blacklines   := true;
    kernelsz     := 9;
    kerneldist   := 9;
    nondogscale  := 2;
    pixelszr     := 1;
    pixelszc     := 1;
    minimumarea  := 5;
    l_d          := 1e20;
    pplogfilename := '';
    dblogfilename := '';
    tmpfilename  := '';
    ifilename    := '';
    rootfilename := '';
    fileextension := '';
    fileindex1   := -1;
    fileindex2   := -1;
    mkoutimage   := false;
    windoww0     := 1;
    windoww1     := 1;
    windowc0     := 1;
    windoww1     := maxrow;
    windowc1     := cols;

    error := false;
    if (paramcount<2) then
        error := true;
    i := 1;
    while not error and (i<=paramcount) do
        begin
            if (paramstr(i)='-t') then begin
                i := i+1;
                val(paramstr(i),lowcut,retval);
            end;
        end;
    end;
end;

```

```

    if (retval<>0) or (lowcut<0) or (lowcut>255) then error := true;
    i := i+1;
    val(paramstr(i),highcut,retval);
    if (retval<>0) or (highcut<0) or (highcut>255) then error :=
true;
    autothresh := false;
    if (error) then
        writeln('Error near -t');
    end else
    if (paramstr(i)='-v') then begin
        val(paramstr(i+1),verbose,retval);
        if (retval=0) then
            i := i+1
        else
            verbose := 1;
    end else
    if (paramstr(i)='-ksz') then begin
        val(paramstr(i+1),kernelisz,retval);
        if (retval=0) then
            i := i+1
        else
            kernelisz := 5;
    end else
    if (paramstr(i)='-kdst') then begin
        val(paramstr(i+1),kernelidist,retval);
        if (retval=0) then
            i := i+1
        else
            kernelisz := 10;
    end else
    if (paramstr(i)='-sc') then begin
        val(paramstr(i+1),nondogscale,retval);
        if (retval=0) then
            i := i+1
        else
            nondogscale := 1;
    end else
    if (paramstr(i)='-psz') then begin
        val(paramstr(i+1),pixelszsz,retval);
        if (retval=0) then
            i := i+1
        else
            error := true;
        val(paramstr(i+1),pixelszszc,retval);
        if (retval=0) then
            i := i+1
        else
            error := true;
        if (error) then
            writeln('Error near -psz');
    end else
    if (paramstr(i)='-neg') then begin
        blacklines := not(blacklines)
    end else
    if (paramstr(i)='-minumarea') then begin
        val(paramstr(i+1),minimumarea,retval);
        if (retval=0) then
            i := i+1
        else
            begin

```

```

        error := true;
        writeln('Error near -minarea');
    end;
end else
if (paramstr(i)='-win') then begin
    val (paramstr(i+1),windowr0,retval);
    if (retval=0) then
        begin
            val (paramstr(i+2),windowc0,retval);
            if (retval=0) then
                begin
                    val (paramstr(i+3),windowr1,retval);
                    if (retval=0) then
                        begin
                            val (paramstr(i+4),windowc1,retval);
                            if (retval=0) then
                                begin
                                    i := i+4
                                end
                            else
                                error := true;
                        end
                    else
                        error := true;
                end
            end
        end
    else
        error := true;
end
else
    error := true;
end
else
    error := true;
end
else
    error := true;
if (error) then
    writeln('Error near -win');
end else
if (paramstr(i)='-tmp') then begin
    i := i+1;
    tmpfilename := paramstr(i);
end else
if (paramstr(i)='-Out') then begin
    dodump := true;      ! Dump all images shown on the screen
end else
if (paramstr(i)='-display') then begin
    displevel := 1;
end else
if (paramstr(i)='-demo') then begin
    displevel := 2;
end else
if (paramstr(i)='-pplog') then begin
    i := i+1;
    pplogfilename := paramstr(i);
end else
if (paramstr(i)='-dblog') then begin
    i := i+1;
    dblogfilename := paramstr(i);
end else
if (paramstr(i)='-in') then begin
    i := i+1;
    infilename := paramstr(i);
end else
if (paramstr(i)='-root') then begin
    rootfilename := paramstr(i+1);

```

```

val(paramstr(i+2),fileindex1,retval);
if (retval=0) then
  begin
    val(paramstr(i+3),fileindex2,retval);
    if (retval=0) then
      fileextension := paramstr(i+4)
    else
      error := true;
    end
  else
    error := true;
  if (error) then
    writeln('Error near -root');
  i := i+4;
end else
  begin
    writeln('Error near ',paramstr(i));
    error := true;
  end;
  i := i+1;
end;

if (displevel>0) then
  verbose := -abs(verbose);

if ((pplogfilename<>'') and (dblogfilename<>'')) then
  writeln('Warning: Two logfiles are generated',chr(7));
if ((pplogfilename='') and (dblogfilename='') then
  writeln('Warning: No logfiles are generated',chr(7));

if (LEIF) then
  ( interchange window specifications
  begin
    rdummy      := pixelszr;
    pixelszr    := pixelszc;
    pixelszc    := rdummy;
  end;

if (window0<1) or (window0>window1) or (window1>maxrow)
or (windowc0<1) or (windowc0>windowc1) or (windowc1>cols) then
  begin
    writeln('Error: Invalid window specification');
    error := true;
  end;

if (infilename='') and (rootfilename='') then
  begin
    writeln('Error: No input is specified (-in or -root)');
    error := true;
  end;

if (error) then
  begin
    writeln;
    write('Usage: ',program,' [-v [verbose] -display [-demo] ');
    write('[-t low thr high_threshold] ');
    write('[-neg] ');
    write('[-ksz kernelsize] [-kdst kerneldist] [-sc scaling] ');
    write('[-psz row_pxlsz col_pxlsz] ');
    write('[-minarea minimal_area] ');
  end;

```

```

write(['-win r0 c0 r1 c1 ']);
write(['-pplog logfile | -dblog logfile ']);
write(['-tmp tempfile ']);
writeln(['-in image | -root <rootname> <index_1> <index_n>
<ext>']);
writeln();
writeln('where Verbose level is an integer larger than 0');
writeln('Display shows the working area on a vga screen');
writeln('Demo shows almost all steps in the processing on a
vga screen');
writeln('Threshold in [0..255] (default is automatic
thresholding)');
writeln('Negate output image (use if black lines)');
writeln('KernelSize is size of Gaussian kernel (default is
5)');
writeln('KernelDistance is approx. 2 times the width of a
line (default is 10)');
writeln('ScaleOutput scales output (default is 2)');
writeln('Pixel size in reals');
writeln('Minimum area of an defect');
writeln('Window specifications: from l l to ',maxrow,'
',cols,' in pixels');
writeln('pplog logfile: Statistics is in pippin format');
writeln('dblog logfile: Statistics is in dbase format');
writeln('Tmpfile on a fast disk, e.g. VDISK. Use it only if
no EMS');
writeln('Inimage may be specified using wild cards');
writeln('or use rootname:index*extension where index runs
from index_1 to index_n');
halt(1);
end;

( Set working window up. It is slightly larger than the specified
window )
if (windowr0-NWINDOWEXT>1) then extwinr0 := windowr0-NWINDOWEXT
else extwinr0 := 1;
if (windowc0-WWINDOWEXT>1) then extwinc0 := windowc0-WWINDOWEXT
else extwinc0 := 1;
if (windowr1+SWINDOWEXT<maxrow) then extwinr1 := windowr1+SWINDOWEXT
else extwinr1 := maxrow;
if (windowc1+EWINDOWEXT<cols) then extwinc1 := windowc1+EWINDOWEXT
else extwinc1 := cols;

if (infilename<>'') then
begin
findfirst(infile,0,dirinfo);
if (doserror<>0) then
writeln(prgname,' : No input file(s)');
end
else
begin
str(fileindex1:0,indexstr);
dirinfo.name := rootfilename+indexstr+'.'+fileextension;
if (fsearch(dirinfo.name,'')=') or (retval<>0) then
fileindex1 := fileindex2; ( To stop the show )
doserror := 0;
end;

while (doserror=0) and (fileindex1<=fileindex2) do
begin

```

```

if (verbose>1) then
  writeln('Available memory ',memavail,', Largest block
',maxavail);
{ Init image structure }
for i:=1 to maxrow do
  image[i] := nil;

{SI-}
assign(infile,dirinfo.name);
reset(infile);
{SI+}
if ioreresult<>0 then
  begin
    writeln(progname,': Cannot open ',dirinfo.name);
    halt(1);
  end;

if (infilename<>'') then
  begin
    sampleid := dirinfo.name;
    samplerbr := -1;
  end
else
  begin
    sampleid := rootfilename;
    samplerbr := fileindex1;
  end;

split(dirinfo.name,filedir,inbasename,fileext);
if (fileext<>'dfc') then
  outfilename := inbasename+'.dfc'
else
  outfilename := inbasename+'###';
{SI-}
assign(outfile,outfilename);
rewrite(outfile);
{SI+}
if ioreresult<>0 then
  begin
    writeln(progname,': Cannot open ',outfilename);
    halt(1);
  end;

{ Read image file }
if (verbose>0) then
  writeln('Reading image');
if (extwinr>1) then
  begin
    if (filesize(infile)>=extwinr) then
      seek(infile,extwinr-1)
    else
      begin
        writeln(progname,': Window specification out of bounds in
',infilename);
        halt(1);
      end;
  end;
end;

```

```

nrows := 1;
repeat
  new(image[nrows]);
  read(infile, image[nrows]^);
  nrows := nrows+1;
until eof(infile) or (nrows>maxrow) or (nrows>extwinrl-
extwinr0+1);
nrows := nrows-1;
close(infile);

[ Open tmp storage ]
if not ems_is_available then
  begin
    ($I-)
    assign(tmpfile, tmpfilename);
    rewrite(tmpfile);
    ($I+)
    if (ioresult<>0) or (tmpfilename='') then
      begin
        writeln(progname, ': Cannot open tmpfile
"', tmpfilename, "'");
        writeln('  There is no EMS. You must use the -tmp switch
!!!');
        halt(1);
      end;

      if (
        (length(tmpfilename)>=2)
        and (tmpfilename[2]=':')
        and (diskfree(ord(tmpfilename[1])-ord('a')+1)<(extwinrl-
extwinr0+2.0)*sizeof(ifullline))
        or
        (
          (length(tmpfilename)=1)
          and (length(tmpfilename)>=2) and
(tmpfilename[2]<>' ')
          and (diskfree(0)<(extwinrl-
extwinr0+2.0)*sizeof(ifullline))
        ) then
        begin
          writeln('Too little disk space left for ', tmpfilename,
', need more than ', (extwinrl-
extwinr0+2.0)*sizeof(ifullline)/1024:5:0, ' Kbyte');
          halt(1);
        end;
      end
    else
      begin
        [ Set up EMS ]
        bpep := BYTES_PER_EMSPAGE div sizeof(ifullline);
        handle := ems_malloc((nrows+3) div bpep + 1,
bpep*sizeof(ifullline));
        for i:=0 to nrows+1 do
          begin
            emspage[i] := i div bpep;
            emsoffset[i] := (i mod bpep)*sizeof(ifullline);
          end;
        end;
      end
    if (displevel>0) then

```

```

begin
  show_initialize;
  show_image( tmpfile, false, image, emspage, emsoffset, handle,
             window0-extwinr0+1, windowc0,
             window1-extwinr0+1, windowc1,
             bw, 256, nrows, extwinc0, extwincl);
end;

negate( verbose, image, 1, extwinc0, nrows, extwincl );
if (autothresh) then
  begin
    if (nrows>window1-extwinr0+1) then
      find_gradient_dthresholds( verbose, image,
                                window0-extwinr0+1, windowc0,
                                window1-extwinr0+1, windowc1,
                                0, 255, lowcut, highcut)
    else
      find_gradient_dthresholds( verbose, image,
                                window0-extwinr0+1, windowc0,
                                nrows, windowc1,
                                0, 255, lowcut, highcut);

    wait(displevel);
    if (displevel>1) then
      show_image( tmpfile, false, image, emspage, emsoffset,
                 window0-extwinr0+1, windowc0,
                 window1-extwinr0+1, windowc1,
                 bw, lowcut, nrows, extwinc0, extwincl);
  end
else
  begin
    lowcut := 255-lowcut;
    highcut := 255-highcut;
  end;

double_threshold( verbose, image, nrows, extwinc0, extwincl,
                 lowcut, highcut);
wait(displevel);
if (displevel>0) then
  show_image( tmpfile, false, image, emspage, emsoffset, handle,
             window0-extwinr0+1, windowc0,
             window1-extwinr0+1, windowc1,
             bw, WHITE, nrows, extwinc0, extwincl);

negate( verbose, image, 1, extwinc0, nrows, extwincl );
label_connected_blobs(verbose, image, 1, extwinc0, nrows,
extwincl,
                               emspage, emsoffset, handle,
tmpfile);

wait(displevel);
if (displevel>0) then
  show_image( tmpfile, true, image, emspage, emsoffset, handle,
             window0-extwinr0+1, windowc0,
             window1-extwinr0+1, windowc1,
             lb1, 256, nrows, extwinc0, extwincl);

{ Free image memory; we need to use it in the graphics and the
  statistics section }

```

```

for i:=1 to nrows do
  dispose(image[i]);

wait(displevel);
if (displevel>0) then
  show_image( tmpfile, true, image, emspage, emsoffset, handle,
             window0-extwinr0+1, windowc0,
             window1-extwinr0+1, windowc1,
             lbl, 256, nrows, extwinc0, extwincl);
statistic_initialize( shapeinfo );
get_shape_stat( verbose, shapeinfo,
               image, 1, extwinc0, nrows, extwincl,
               emspage, emsoffset, handle,
tmpfile);
get_area_and_color( verbose, shapeinfo,
                   window0-extwinr0+1, windowc0,
                   window1-extwinr0+1, windowc1,
                   1, extwinc0, nrows, extwincl,
                   emspage, emsoffset, handle, tmpfile);

if (pplogfilename<>'') then
  pp_print_statistics( verbose, version, shapeinfo,
                     window0-extwinr0+1, windowc0,
                     window1-extwinr0+1, windowc1, minimumarea,
                     pixelszr, pixelszc, pplogfilename,
dirinfo.name);
if (dblogfilename<>'') or ((pplogfilename<>'') and
(dblogfilename<>'')) then
  dbase_single_print_statistics( verbose, version, shapeinfo,
                                window0, windowc0,
                                window1, windowc1, minimumarea,
                                pixelszr, pixelszc, lowcut, highcut,
                                dblogfilename, sampleid, samplerbr);

set_class( verbose, shapeinfo, GRAIN1, 0, pixelszr,
pixelszc,
outcolor );
statistic_finish(shapeinfo);

reset(infile);
nrows := 1;
repeat
  new(image[nrows]);
  read(infile, image[nrows]);
  nrows := nrows+1;
until eof(infile) or (nrows=mxaxrow);
nrows := nrows-1;
close(infile);

nonlinearlog( verbose, image, kernelSZ, kerneldist, nondogscale,
             Extremum, extwinr0, extwinc0, extwinr1,
extwincl );
if (blacklines) then
  ( This negates the output (white lines) )
  negate( verbose, image, extwinr0, extwinc0, extwinr1, extwincl
);
if not (-msu_is_available) then
  begin

```

```

        reset(tmpfile);
        read(tmpfile, thisrow);
    end;
    for i:=extwinr0 to extwinr1 do
    begin
        if (ems_is_available) then
            begin
                vptr := ptr( ems_getseg(handle, emspage(i-extwinr0+1)),
                emsoffset[i-extwinr0+1]);
                thisrow := vptr^;
            end
        else
            read(tmpfile, thisrow);
            for j:=extwinc0 to extwinc1 do
            begin
                if (image[i]^ [j]=255) then
                    image[i]^ [j] := 254;
                if (thisrow[j]<>NOLABEL) then
                    begin
                        if (i>=windowr0) and (i<=windowr1)
                            and (j>=windowc0) and
(j<=windowc1) then
                            image[i]^ [j] := 255
                        else
                            image[i]^ [j] := 254;
                    end;
                end;
            end;
        end;
    end;

    rewrite(outfile);
    if (diskfree(0)>filesize(outfile)*sizeof(blinc)) then
    begin
        { Write output }
        if (verbose>0) then
            writeln('Writing to disk');
        for i:=1 to nrows do
            write(outfile, image[i]^);
        end
    else
        writeln(progname, ': Skip writing output image. Not enough
diskspace');
    close(outfile);

    wait(displevel);
    if (displevel>0) then
        show_image( tmpfile, false, image, emspage, emsoffset, handle,
        windowr0-extwinr0+1, windowc0,
        windowr1-extwinr0+1, windowc1,
        mixed, 256, nrows, 1, cols);

    { Free memory }
    for i:=1 to nrows do
        dispose(image[i]);

    { Clean up }
    if not ems_is_available then
        close(tmpfile);
    else
        ems_free(handle);
    wait(displevel);

```

```

if (displevel>0) then
  show_finish;

if (infilename<>'') then
  findnext(dirinfo)
else
  begin
    fileindex1 := fileindex1+1;
    str(fileindex1:0,indexstr);
    dirinfo.name := rootfilename+indexstr+'.'+fileextension;
    if (fsearch(dirinfo.name,'')='') or (retval<>0) then
      begin
        fileindex1 := fileindex2;    ( To stop the show )
        doserror := 1;
      end
    else
      doserror := 0;
    end;
  end;

end;

if (displevel>0) then
  verbose := verbose;

gettime(hour,minute,second,second100);
tottime := second100/100+second+60.0*(minute+60.0*hour)-tottime;
if (verbose>0) then
  writeln('total time = ',tottime:10:2,' sec.
(' ,int(tottime/60):3:0,' ',60*frac(tottime/60):2:0,' min.));
end.

```