



PONTIFICIA **UNIVERSIDAD CATÓLICA** DEL PERÚ

Esta obra ha sido publicada bajo la licencia Creative Commons
Reconocimiento-No comercial-Compartir bajo la misma licencia 2.5 Perú.

Para ver una copia de dicha licencia, visite
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ANÁLISIS DE MICROESTRUCTURA EN HIERRO FUNDIDO
NODULAR Y EVALUACIÓN DE SUPERFICIE DE FRACTURA EN
PROBETAS DE IMPACTO CHARPY MEDIANTE EL USO DEL
SOFTWARE IMAGE-PRO PLUS.**

**Tesis para Optar el Título de :
INGENIERO MECÁNICO**

**Presentado por:
CARLOS ANZANI CANZIO ILDEFONSO**

**Lima – Perú
2006**

RESUMEN

El presente trabajo es la integración de un conjunto de elementos en un Sistema de Captura, Procesamiento y Análisis Digital de Imágenes, que nos permita la solución de problemas relacionados a la caracterización microestructural y/o macroestructural de materiales, obteniéndose con esto una mejora cualitativa y cuantitativa en los resultados de la solución de dichos problemas, desarrollados en la actualidad, generalmente mediante métodos visuales basados en la comparación con información gráfica proporcionada por normas internacionales especializadas.

Para el desarrollo del proyecto se ha identificado tres áreas:

1. **Software Especializado.** En esta parte desarrollamos todo lo relacionado al aprendizaje para el uso de un software especializado en captura, procesamiento y análisis digital de imágenes.
2. **Implementación del Sistema.** En esta parte desarrollamos la implementación del Sistema de Captura, Procesamiento y Análisis Digital de Imágenes.
3. **Parte Experimental.** En esta parte se desarrolla los procedimientos para la solución de problemas de aplicaciones específicas en el área de Metalurgia mediante el uso del software especializado y del sistema implementado.

En el área de software especializado, se utilizó Image-Pro[®] Plus versión 4.1 para Windows como herramienta principal para la captura, procesamiento y análisis digital de imágenes. Respecto al área de implementación del sistema se utilizó una computadora IBM Intel Pentium IV, una cámara de video CCD Smart Cam Javelin y un microscopio metalográfico como elementos constitutivos principales del sistema antes mencionado. En cuanto al área de aplicaciones se desarrolló el procedimiento para la caracterización microestructural y/o macroestructural de dos aplicaciones específicas en el área de metalurgia: la primera, para la evaluación del grafito presente en la microestructura de un hierro fundido nodular y la segunda, para la superficie de fractura en probetas sometidas al Ensayo de Impacto Charpy, ambas bajo las recomendaciones dadas por las normas ASTM. De esta manera se alcanza el objetivo de que la captura, procesamiento digital y la caracterización microestructural y/o macroestructural de materiales (análisis digital de imágenes) puede estar integrada en un solo sistema, sencillo y funcional.

DEDICATORIA



A mis queridos padres, Carlos y Doris, fuentes inagotables de inspiración.

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Roberto Lazarte, por todo lo brindado en la asesoría para el desarrollo de este trabajo.

Al Ing. Sócrates Cutipa, por compartir su tiempo, conocimientos y experiencia.

A cada uno de los integrantes del Laboratorio de Materiales de Ingeniería Mecánica, por su colaboración siempre oportuna.

A mis padres, Carlos y Doris, por su cariño, por el apoyo inmensurable e incondicional durante estos años, durante toda mi vida.

A Carlos Ildefonso, por muchísimas razones.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1. Caracterización Microestructural y Macroestructural de Materiales	3
1.1. Caracterización Microestructural de Materiales	3
1.1.1. Definición	3
1.1.2. Aplicación: Evaluación del Grafito en la Microestructura de un Hierro Fundido Nodular - ASTM A247 Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings	4
1.2. Caracterización Macroestructural de Materiales	6
1.2.1. Definición	6
1.2.2. Aplicación: Superficie de Fractura en el Ensayo de Impacto Charpy - ASTM E23 Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials	7
2. Fundamentos de Procesamiento Digital de Imágenes	9
2.1. Procesamiento Digital de Imágenes	9
2.2. Etapas del Procesamiento Digital de Imágenes	11
2.3. Elementos de los Sistemas de Procesamiento Digital De Imágenes	13
2.3.1. Adquisición	13
2.3.2. Almacenamiento	15
2.3.3. Procesamiento	15
2.3.4. Comunicación	18
2.3.5. Presentación	18
2.4. Ejemplo del Procesamiento Digital de Imágenes	19
3. Caracterización Microestructural y Macroestructural mediante Análisis de Imágenes	22
3.1. Sistema de Captura, Procesamiento y Análisis de Imágenes para Caracterización Microestructural y Macroestructural de Materiales	22

3.1.1.	Objetivos, Alcances y Limitaciones	25
3.1.1.1.	Objetivo General	25
3.1.1.2.	Objetivos Específicos	25
3.1.1.3.	Alcances y Limitaciones	25
3.1.2.	Descripción de los Componentes	25
3.1.2.1.	Tarjeta de Adquisición de Imágenes	26
3.1.2.2.	Microscopio Metalográfico	26
3.1.2.3.	Cámara de Video Javelin CCD	27
3.1.2.4.	Software de Procesamiento Digital de Imágenes Image-Pro Plus	28
3.1.2.5.	Plataforma Windows 2000	29
3.1.2.6.	Computadora	30
3.1.3.	Implementación del Sistema de Captura, Procesamiento y Análisis de Imágenes	30
3.1.3.1.	Entrada del Sistema	31
	a. Diseño de Acople Cámara de Video CCD - Microscopio Metalográfico	31
3.1.3.2.	Aplicación	33
3.1.3.3.	Salida del Sistema	34
4.	Parte Experimental	35
4.1.	Aplicación 1: Hierro Fundido Nodular	35
4.1.1.	Hierro Fundido Nodular	35
	4.1.1.1. Solidificación del Hierro Fundido Nodular	37
4.1.2.	Descripción de la Metodología	38
	4.1.2.1. Captura de Imagen	38
	a. Procedimiento para Captura de Imágenes	39
	i. Preparación de la Muestra	39
	ii. Ubicación y Enfoque de la Imagen	40
	iii. Iluminación	40
	iv. Calibración de Imagen	41
	b. Dificultades de Análisis debido a la Captura de Imágenes	42
	4.1.2.2. Procedimiento Manual	43
	a. Eliminación de Objetos No Deseados	43
	b. Binarización	44

c. Medición de Objetos	45
i. Consideraciones	45
ii. Medición	47
d. Análisis de Resultados	57
4.1.2.3. Análisis Estadístico	62
a. Análisis del Método 7	63
i. Análisis de Resultados: Método 7	64
b. Tamaño de Muestra Necesario	66
i. Obtención	66
ii. Análisis de Imágenes	69
iii. Análisis de Resultados:	
Tamaño de Muestra Necesario	69
iv. Reporte	72
4.2. Aplicación 2: Ensayo de Impacto Charpy – Superficie de Fractura	73
4.2.1. Ensayo de Impacto Charpy – Superficie de Fractura	73
4.2.1.1. Fractura Frágil	74
4.2.1.2. Transición Dúctil – Frágil	75
4.2.2. Descripción de la Metodología	78
4.2.2.1. Captura de Imagen	78
a. Procedimiento para Captura de Imágenes	79
i. Preparación de la Muestra	79
ii. Ubicación y Enfoque de la Imagen	79
iii. Iluminación	79
iv. Calibración de Imagen	79
b. Dificultades de Análisis debido a la Captura de Imágenes	81
4.2.2.2. Procedimiento Manual	82
a. Medición de Objetos	82
i. Consideraciones	84
ii. Medición	86
b. Análisis de Resultados	89
4.2.2.3. Análisis de Imágenes según Temperatura	90
a. Análisis de Imágenes	90
b. Análisis de Resultados para el Análisis de Imágenes	92
c. Reporte	93

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	95
BIBLIOGRAFÍA	97

ANEXOS:

- ANEXO 1 : Manual del Usuario: Image-Pro Plus.
- ANEXO 2 : Imágenes Analizadas Aplicación 1:
Hierro Fundido Nodular.
- ANEXO 3 : Imágenes Analizadas Aplicación 2:
Ensayo de Impacto Charpy-Superficie de Fractura.



INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico de las computadoras y el auge en la elaboración de softwares en el área del procesamiento digital de imágenes, han puesto a nuestra disposición herramientas para realizar determinadas actividades de la labor diaria como las del ámbito laboral y educativo, de manera más rápida y más efectiva en cuanto a su desarrollo, solución de problemas y obtención de resultados.

La capacidad de análisis de las imágenes que uno hace, de todo aquello que a uno pueda rodearle y con lo que uno pueda interrelacionarse se muestra en las particularidades de estos, como son sus colores, texturas y otras muchas características perceptibles por la visión humana. Se inicia poco tiempo después de nuestro nacimiento y es un privilegio para los que lo disfrutamos. Es esta capacidad, aunada a la búsqueda de soluciones a las necesidades que se van presentando diariamente en ámbitos como el profesional, que permiten que el procesamiento, análisis y entendimiento de las imágenes para los humanos llegue a concretarse en una labor y en una rutina.

En la actualidad, el procesamiento digital cumple un rol de gran importancia en diversas disciplinas mediante la aplicación de la captura, procesamiento y análisis de imágenes a través de las computadoras, convirtiéndose así en actividades cada vez más extendidas, siendo por ejemplo de gran importancia para aquellas que necesitan captar y procesar imágenes en tiempos relativamente pequeños, permitiendo así realizar funciones de gran interés asociadas a actividades como la robótica, asistencia en procesos productivos y muchas otras dentro de las cuales la caracterización microestructural y macroestructural de materiales presenta una afinidad en cuanto a la consecución de resultados de una manera más óptima con respecto a los métodos usados en la actualidad.

La tecnología desarrollada hasta la actualidad y disponible en el mercado, empleada para conseguir grandes prestaciones en esta rama suele ser costosa, estando muchas veces fuera del alcance del usuario común, sin embargo centros de estudios superiores como la Pontificia Universidad Católica del Perú, en la especialidad de Ingeniería Mecánica permiten la implementación de sistemas mediante el uso de materiales y componentes disponibles en sus laboratorios, logrando así el desarrollo de proyectos como este para la obtención de resultados de similar calidad que los que se obtendrían con equipos cuyos costos son superiores.

Existen dos ramas en este sector. La primera se refiere a los productos destinados a la captura de imágenes (hardware) y la segunda a los productos postproducción de imágenes (software), la unión de ellos, cada uno con sus características propias hace

que un sistema bien desarrollado e implementado permita su uso en determinadas aplicaciones como lo es en el análisis tanto a nivel microscópico como macroscópico de diversos materiales. Este análisis nos permite cuantificar características no perceptibles al ojo humano como por ejemplo tamaño de grano de un acero determinado, espesor de las placas de los microconstituyentes de la perlita, o número de esferulitas de un hierro fundido nodular, el cual es precisamente uno de los ejemplos desarrollados como aplicación en capítulos posteriores de este trabajo de tesis. Sin embargo se deja constancia que una computadora no resuelve el problema, sino que ayuda a su resolución apoyándose en su mayor cualidad como es la gran velocidad operacional tanto así como en la base teórica por parte de quien la usa.

El presente proyecto es el desarrollo de un conjunto de herramientas para la caracterización microestructural y/o macroestructural de materiales mediante el análisis digital de imágenes, usando así el sistema de captura y procesamiento digital implementado aplicado a una rama de la ingeniería mecánica, como lo es el área de materiales, en el cual se combinan las principales técnicas de procesamiento digital de imágenes implementadas en el software especializado Image-Pro Plus, disponible en el mercado, y la base teórica en metalografía.

La organización de este documento comienza en el capítulo 1 donde se presenta una breve descripción teórica de la caracterización microestructural y macroestructural de materiales en el área de la metalografía. Luego tenemos el capítulo 2 en el cual se tratan brevemente fundamentos relacionados con el procesamiento digital de imágenes, los cuales junto a lo presentado en el capítulo 1 serán la base para el posterior entendimiento del tema del presente proyecto. El capítulo 3 se detalla las consideraciones teóricas y técnicas que convenientemente agrupadas forman los componentes del proyecto de caracterización microestructural y macroestructural mediante análisis de imágenes a través del Sistema de Captura, Procesamiento y Análisis Digital de Imágenes desarrollado. En el capítulo 4 se presenta la parte experimental mediante el desarrollo de procedimientos para la solución de dos aplicaciones específicas en el área de metalurgia. Se finaliza este documento dando a conocer las conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos, de modo que puede servir de ampliación de conocimientos para el desarrollo de posteriores proyectos relacionados con los temas tratados en este trabajo.

1. Caracterización Microestructural y Macroestructural de Materiales.

Sin duda alguna, la parte más importante de la metalografía es el examen microscópico de una probeta adecuadamente preparada, empleando el microscopio metalográfico entre 50 y 1000 aumentos. Tales estudios microscópicos tienen una finalidad mucho más amplia que los macroscópicos, y en manos de un metalógrafo experimentado, proporcionan una abundante información sobre la constitución de la aleación o del metal investigado.

1.1. Caracterización Microestructural de Materiales.

A continuación presentamos una breve definición de caracterización microestructural de materiales seguido de un ejemplo desarrollado en forma resumida según las recomendaciones para la evaluación de microestructura de grafito en hierros fundidos como es la norma ASTM A247 Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings.

1.1.1. Definición.

La caracterización microestructural es el proceso por el cual se pueden definir con mucha claridad diversas características estructurales de muchos materiales entre los cuales podemos mencionar a los aceros, aleaciones etc., en estos se puede obtener de manera muy clara, características tales como el tamaño de grano, la forma y distribución de las fases que componen la aleación y de las inclusiones no metálicas, la presencia de segregaciones y heterogeneidades que tan profundamente pueden modificar las propiedades mecánicas y el comportamiento general del metal.

Cuando el examen microscópico ha permitido la determinación de estas y otras características constitucionales, es posible predecir con gran seguridad el comportamiento del metal cuando se le utilice para un fin específico. Importancia parecida tiene el hecho de que con ciertas limitaciones, la microestructura refleja casi la historia completa del tratamiento mecánico y térmico que ha sufrido el material. Solo el estudio a fondo de los metales en el microscopio ha permitido resolver muchos problemas de la metalurgia física y se puede predecir que los progresos en este campo serán parcial o totalmente debidos a los resultados del examen microscópico.

La experiencia demuestra que poco o nada se puede obtener del examen microscópico si antes no se prepara la probeta, para obtener una superficie satisfactoria, con arreglo a normas más o menos rígidas y precisas. Como los microscopios metalúrgicos modernos poseen una óptica de elevada precisión y permiten una resolución tan grande como una fracción de la longitud de onda de la luz empleada en la iluminación de la probeta, es fácil comprender que la perfecta

preparación de esta es del máximo interés. Una preparación defectuosa puede arrancar todas las inclusiones interesantes, destruir los bordes de grano, revenir un acero templado y, en resumen, originar una estructura, por lo menos en la superficie, que no guarda ninguna relación con la verdaderamente representativa y característica del metal. Esta claro que el examen de una superficie tal como la antes descrita dará lugar a interpretaciones erróneas y a conclusiones inadmisibles.

La preparación de la probeta consiste, en general, en obtener primero una superficie plana y semipulida, mediante el empleo de papeles de esmeril de finura de grano creciente o realizando este desbaste con discos adecuados sobre los que se deposita un abrasivo, terminando con un pulido fino y final sobre discos provistos de paños. El final de la operación es la obtención de una superficie especular que es la requerida para, después, efectuar el ataque y observar adecuadamente la estructura.

La preparación de una probeta es, en cuanto a su fundamento, una operación relativamente sencilla, pero en su realización pueden encontrarse numerosas dificultades. Realmente, tal preparación es todavía un arte, y su realización correcta requiere experiencia y habilidad manual, las cuales solo se adquieren después de mucha práctica. Uno de los factores más esenciales que influyen sobre la técnica de la preparación de probetas es el cuidado con que se les maneja en todas las fases de la operación. De igual importancia es el trabajar con limpieza, porque una partícula de esmeril o de una materia extraña puede inutilizar una probeta que sin ello estaría perfectamente pulida. [16]

1.1.2. Aplicación: Evaluación del Grafito en la Microestructura de un Hierro Fundido Nodular - ASTM A 247 Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings.

- Este método cubre la clasificación del grafito en los hierros fundidos según su forma, distribución y tamaño. Es aplicable en todas las aleaciones de acero y carbono que contienen partículas de grafito. Puede ser aplicado también al hierro fundido gris, fundiciones maleables y fundiciones dúctiles.
- Las partículas de grafito son designadas mediante números y letras, de modo que el tipo, distribución y tamaño de las partículas de grafito de las probetas observadas en el microscopio son comparadas con microestructuras ideales presentadas gráficamente en un conjunto de láminas (Plate I, II, III), buscando de esta manera en ellas, la que presente iguales o similares características a las que nos presenta nuestra probeta.
- Las probetas deben ser pulidas de modo que no se altere la presencia del grafito en la superficie a caracterizar.

- Para la clasificación del grafito presente en la muestra según su forma se presentan 7 tipos designados en números romanos desde el I hasta el VII, pudiendo ser láminas, esferoidales, etc., cuyas representaciones graficas se muestran en ASTM A247 – Lámina I (Plate I).
- Luego tenemos la clasificación de las partículas de grafito según su distribución, esta se hace usando las representaciones graficas presentadas en ASTM A247 – Lámina II (Plate II). Estos se designan con letras que van desde la A hasta la E.

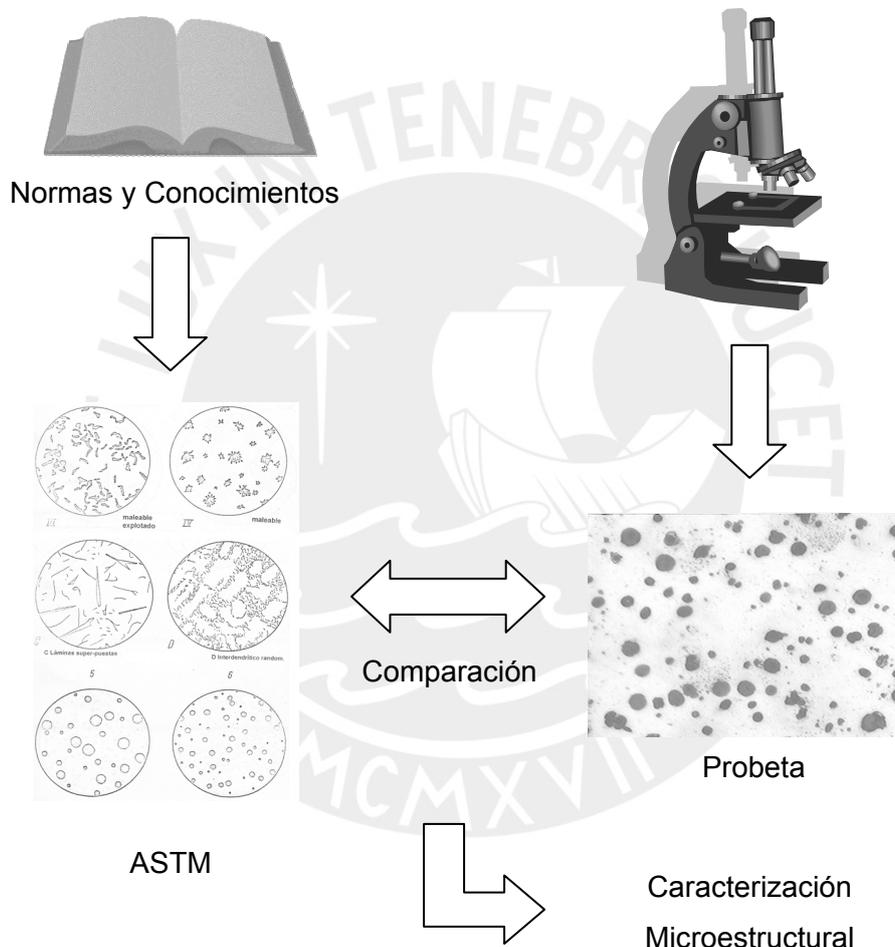


FIG. 1-1. Esquema de la caracterización microestructural según ASTM A247

- Para finalizar tenemos la clasificación de las partículas según su tamaño. Esta se hace trabajando con el ASTM A247 – Lámina III (Plate III), en el cual se presenta la representación gráfica tanto como para nódulos como para láminas para facilitar la comparación con lo observado en el microscopio. Los tamaños

son designados por números que van desde 1 hasta 8. Dichas representaciones gráficas se muestran a 100 aumentos por lo tanto la observación que se realiza en el microscopio también debe estar a 100X. Si existe más de un tamaño presente en la probeta, cada una de estas se debe reportar como un porcentaje del total.

- Para el reporte de la caracterización realizada se debe presentar según lo recomendado la identificación de la muestra, tipo o tipos de forma de grafito, distribución y tamaño de las partículas de grafito. Sin embargo algunas de esas características pueden ser omitidas según el tipo de hierro fundido a caracterizar.

1.2. Caracterización Macroestructural de Materiales.

La metalografía es esencialmente el estudio de las características estructurales de constitución de un metal o una aleación para relacionar esta con las propiedades físicas y mecánicas. Una fase importante de tal estudio es el examen macroscópico que a ojo desnudo o con ayuda de un microscopio de pocos aumentos, permite la observación visual de los detalles estructurales más groseros de un metal. Puesto que en este tipo de observación los aumentos empleados son escasos, usualmente por debajo de 10, el examen macroscópico solo da resultados relativamente limitados desde el punto de vista metalúrgico. A pesar de esta circunstancia, el examen macroscópico bien hecho es de gran importancia en muchos casos, hasta el punto de que ciertas características metálicas son reveladas de preferencia por este método.

A continuación presentamos una breve definición, seguido de un ejemplo desarrollado para la superficie de fractura en el Ensayo de Impacto Charpy según las recomendaciones de la norma ASTM E23 Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials en el cual se presenta solamente y de manera breve lo concerniente a este trabajo de tesis.

1.2.1. Definición.

Los datos metalúrgicos obtenidos mediante el análisis químico o el examen microscópico de una probeta metalográfica usualmente no son representativos de la pieza entera, como consecuencia de la naturaleza heterogénea de los metales. Tales datos, realmente, solo representan las características de la zona de la pieza de la que se tomó la muestra para análisis o la probeta metalográfica.

No hay duda de que uno o varios análisis químicos y la observación de una o varias probetas pueden dar la información valiosísima, pero tales datos son de ordinario

insuficientes para dictaminar sobre la utilidad para el servicio de la pieza en cuestión. No se obtienen datos sobre la distribución general de las inclusiones en la sección total de la pieza, la uniformidad de la estructura, la localización y magnitud de las segregaciones, los defectos de fabricación tales como grietas superficiales o grietas de forja, ni sobre defectos residuales procedentes del lingote, tales como los rechupes. Todas estas circunstancias influyen decisivamente sobre las propiedades de una sección dada y, en consecuencia sobre las condiciones de utilización de la pieza.

La naturaleza de las heterogeneidades de un metal y la magnitud en que se presentan, se observan mejor por macroataque de una pieza representativa y examen subsiguiente de las características puestas de manifiesto, a ojo desnudo, con un microscopio de pocos aumentos o con una lupa. Tales exámenes, denominados macroscópicos, se diferencian de los microscópicos, no solo porque se emplean pocos aumentos, sino también porque se observan áreas grandes de la probeta en lugar de zonas microscópicas. No debe olvidarse que su finalidad es por ejemplo detectar defectos sobre toda una sección o partes seleccionadas de ella. El macroataque y el examen subsiguiente de las secciones atacadas son muy usados como métodos de control en la fabricación de acero y de los metales y aleaciones no féreos. En las etapas sucesivas de un proceso de conformación por ejemplo el macroataque de secciones seleccionadas puede servir para detectar la primera aparición de un defecto en la secuencia de las operaciones, evitando el gasto que representaría la continuación del proceso que solo originaría productos de baja calidad.

1.2.2. Aplicación: Superficie de Fractura en el Ensayo de Impacto Charpy - ASTM E23 Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.

- En esta norma se describe lo relacionado al Ensayo de Impacto Charpy para materiales metálicos con probetas de diferentes tipos de ranura. Se muestra además sus diferentes requerimientos. De dicha información se obtiene que la probeta a usar para el ensayo y para el análisis posterior es tipo A (Type A).
- En el anexo 6 de esta norma se presenta lo relacionado a la determinación del porcentaje de fractura de corte sobre la superficie de fractura de la probeta sometida a ensayo y puede ser determinada usando una variedad de métodos. También se define dicho porcentaje como la diferencia entre el área total de fractura y el área de fractura plana.
- Los métodos de medición se describen a continuación de manera resumida y proporcionan un cálculo aproximado directo o indirecto para la fractura plana

macroscópica, pero no considera detalles del modo de fractura para esta región plana de fractura inestable:

- A6.1 Mediante la medición de la longitud y espesor de la región de fractura plana de la superficie de fractura y determinación con dichos datos del porcentaje de corte mediante una tabla que provee la norma.
- A6.2 Por comparación de la apariencia de la fractura de la probeta con la apariencia de la fractura mostrada en representaciones graficas ideales que nos provistas por la norma.
- A6.3 Por ampliación y comparación de la superficie de fractura con cartillas precalibradas o con la medición del porcentaje de fractura dúctil por medio de planímetros.
- A6.4 Mediante la ampliación de una fotografía de la superficie de fractura y la medición del porcentaje de fractura dúctil por medio de un planímetro.
- A6.5 Mediante la captura de una imagen digital de la superficie de fractura y la medición del porcentaje de fractura dúctil por medio de un software de análisis de imágenes.

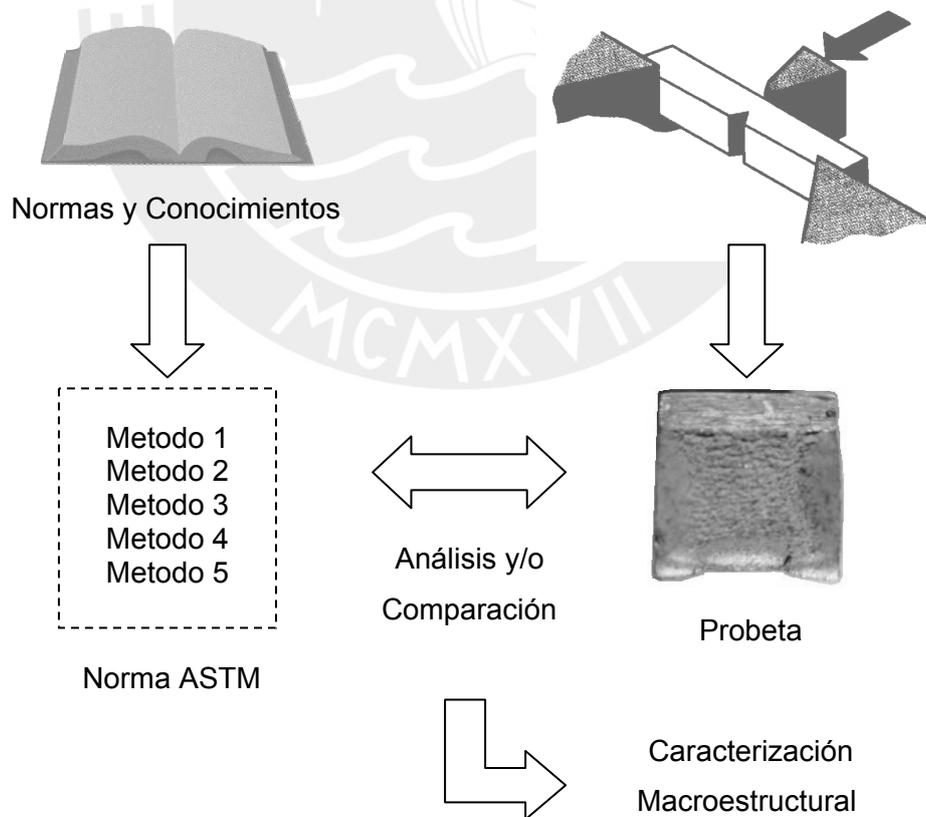


FIG. 1-2. Esquema de la caracterización macroestructural según ASTM E23

2. Fundamentos de Procesamiento Digital de Imágenes.

El procesamiento digital de imágenes empieza su auge desde el momento en que los recursos tecnológicos para captura y procesar información en grandes volúmenes se extienden en el mercado.

Los inicios del procesamiento digital de imágenes se remontan a los años 20, durante la transmisión de imágenes de fotografías periodísticas por cable submarino a través del Atlántico entre Londres y Nueva York, logrando con esto que el tiempo entre emisión y recepción de las imágenes pasara de más de una semana, que era la que se lograba al usar medios marítimos como los barcos, a un promedio de tres horas logrado mediante la transmisión por cable submarino. A partir de esto y durante algún tiempo, el desarrollo de las técnicas de codificación y reproducción de las imágenes, logro resultados como por ejemplo el paso en la representación de imágenes en 5 niveles de brillo en 1920 a quince niveles en 1929. Durante los posteriores 35 años se desarrollaron muchos avances en estos procedimientos llegando por ejemplo a servir para mejorar las imágenes enviadas por misiones a la Luna como el Ranger 7, el Surveyor, el Mariner a Marte, el Apollo etc. Es a partir justamente de 1964 que el desarrollo en el campo del procesamiento de imágenes se desarrolla vigorosamente. Pero estos hechos pueden considerarse aislados hasta la llegada de computadoras de gran potencia en las universidades, centros de investigación e industria la que puso de manifiesto el potencial de los conceptos del procesamiento digital de imágenes centrando su labor básicamente en dos campos, para la interpretación y análisis humano al obtener información de las imágenes y para la percepción de las máquinas en labores de reconocimiento, visión artificial etc.

Aunque originalmente las grandes computadoras fueron usadas para estos fines, hoy en día las microcomputadoras son muy populares obteniendo resultados de igual o mejor calidad.

2.1. Procesamiento Digital de Imágenes.

Procesamiento digital de imágenes es el término usado para denominar las operaciones desarrolladas sobre un set de datos que nos proporciona una imagen, para mejorarlas de alguna forma, para ayudar a su interpretación o para extraer algún tipo de información útil de ella. Estamos refiriéndonos también al tratamiento de las imágenes que han sido previamente digitalizados. Si habláramos en términos del lenguaje matemático podemos decir que una imagen digital es una función matemática que toma un valor en cada punto del espacio en el que esta definido. En particular, una imagen digital de las dimensiones es una imagen $f(x, y)$ que se ha discretizado tanto en las coordenadas espaciales como en el brillo, donde x e y representan las

coordenadas espaciales y el valor de f un punto cualquiera (x, y) es proporcional al brillo (o nivel de gris) de la imagen en ese punto.

También puede considerarse como una matriz cuyo índice de fila e índice de columna identifican un punto de la imagen y el valor del correspondiente elemento de la matriz indica el nivel de gris en ese punto. Los elementos de una distribución digital de este tipo se denominan elementos de la imagen o más comúnmente píxeles, abreviaturas de su denominación en inglés "Picture Elements". Es obvio entonces que el procesamiento de imágenes no puede producir información a partir de nada. Si en el set de datos no existe información concerniente a una aplicación o interpretación en particular, entonces no importa que cantidad de complicadas rutinas de procesamiento apliquemos, no se podrá obtener información. Es de gran importancia tener en cuenta que lo que estamos observando es una representación gráfica de números. Como vimos entonces los sistemas adquieren los datos píxel a píxel. La imagen es guardada como una grilla de píxeles. La radiancia de cada uno de esos píxeles es registrada por el sensor y entonces es digitalizada para permitir su manipulación por parte del computador. El proceso de digitalización transforma datos análogos continuos en datos digitales discretos.

El procesamiento digital de las imágenes es usado para dos diferentes propósitos:

- Mejoramiento de la apariencia visual de las imágenes del observador humano en los que se concluyen todas las técnicas asociadas a la captura, codificación y representación de las imágenes que no introducen sobre las mismas ningún tipo de interpretación.
- Procesamiento de los datos de la escena para la percepción autónoma por una máquina donde se hace referencia a las técnicas que tratan de indicar la información presente en la imagen con el fin último de hacer una interpretación de la escena representada en la imagen. En este caso, el trabajo se centra en los procedimientos para extraer información de las imágenes de forma conveniente para el procesamiento a realizarse mediante computadora, como por ejemplo los coeficientes de las transformadas de Fourier que es un tipo entre tantos de la información utilizados en la percepción automatizada. A menudo esta información tiene poco en común con los rangos visuales que los seres humanos emplean para interpretar el contenido de una imagen.

La aplicación en diversas áreas de la actividad humana del procesamiento digital de imágenes, es en nuestros días una herramienta importante para la resolución de problemas, como por ejemplo:

- En medicina, los procedimientos informatizados realzan el contraste o codifican los niveles de intensidad en colores para facilitar la interpretación de las imágenes de rayos X, muestras de sangre y otras imágenes biomédicas.
- En física y en campos afines, las técnicas del computador realizan en forma rutinaria imágenes de experimentos en áreas como los plasmas de alta energía y de microscopio de electrones.
- En la industria, para el reconocimiento automático de características en control de calidad e inspección de productos y ensamblaje.
- En restauración de imágenes debido a la degradación, de objetos irrecuperables, o de procedimientos costosos para su duplicación.
- Además otros como los reconocimientos en materia militar en lanzamiento de misiles, el tratamiento automático de huellas digitales, el procesamiento automático de imágenes aéreas y de satélite para la predicción del tiempo y la evaluación demográfica y urbanística y patrones de polución, así como también en astronomía, biología, medicina nuclear etc.

Estos ejemplos muestran de esta manera los resultados del procesamiento destinado a la interpretación humana.

2.2. Etapas del Procesamiento Digital de Imágenes.

El procesamiento digital de imágenes tiene 3 componentes fundamentales como son el hardware, el software y la base teórica específica para ejecutarla. La interrelación entre ellos nos permite realizar una tarea de procesamiento digital de imágenes.

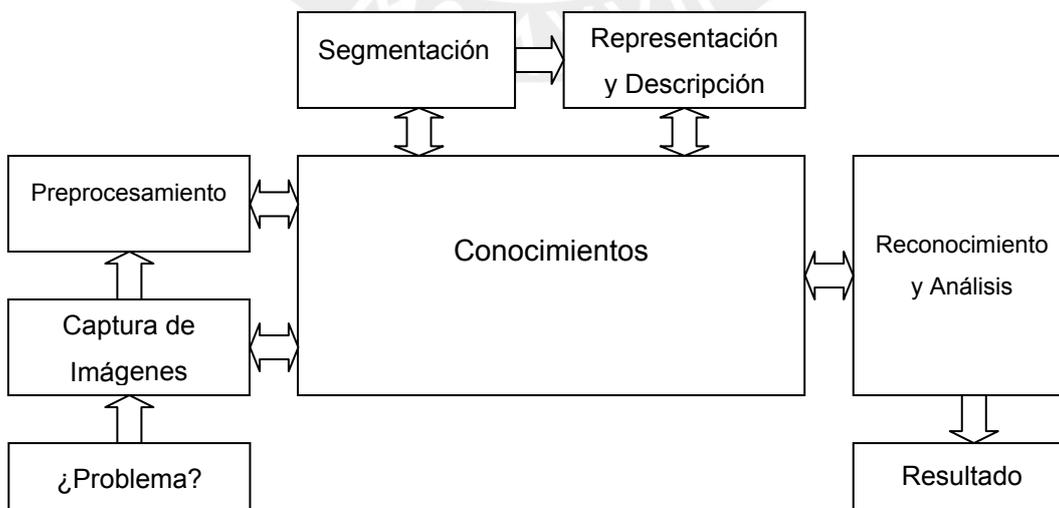


FIG. 2-1. Etapas del Procesamiento Digital de Imágenes

- El primer paso es la adquisición de las imágenes para la cual se requieren dos elementos, un sensor y un elemento digitalizador, como se explica más detalladamente en la sección 2.3.1. Cabe señalar que la naturaleza del sensor y las características de la imagen a capturar son determinadas por la naturaleza de la aplicación.
- Luego de que la imagen digital ha sido obtenida, el paso siguiente es el preprocesamiento de la imagen, en el cual se mejora la apariencia de la imagen de modo que nos permite muchas más posibilidades de éxito en los pasos siguientes.
- El tercer paso es la segmentación, mediante la cual se divide la imagen en sus partes o constituyentes. Este paso se desarrolla en íntima relación con la base teórica, es decir el reconocimiento en la imagen de la información que se desea obtener de ella está supeditada a la aplicación para la cual la imagen ha sido capturada. En los procesos autónomos de percepción, una de las tareas con mayor dificultad es justamente la segmentación pues requiere que este paso se ejecute en forma automática pudiendo según la información que se obtenga obtener grandes beneficios o lograr indeterminados perjuicios a determinados procesos. Un ejemplo de segmentación puede ser el reconocimiento de caracteres alfanuméricos en una hoja de papel.
- El paso siguiente es la representación y descripción. En el proceso de representación, la aplicación de algoritmos que permiten que lo seleccionado en la segmentación, tomen una forma definitiva como paso previo al análisis por parte de la computadora, es un procedimiento que se realiza de manera casi obligatoria. El proceso de descripción se refiere a las tareas de reconocimiento de los elementos seleccionados en la segmentación, de modo que se pueda obtener información a partir de agrupar dichos elementos u objetos en grupos con características particulares tales como tamaño, forma, características geométricas etc. para diferenciarlas de otras que también son parte del análisis total.
- El último paso, que es el de reconocimiento e interpretación, está básicamente relacionado a procesos de reconocimiento automatizado, en el cual todo lo hasta ahora desarrollado, es capaz de ser comparado con una base de datos provista por la persona que ejecuta la tarea de procesamiento digital de imágenes, para que la máquina desarrolle su labor en forma automática, asignando al final de la tarea un significado a lo que es resultado del análisis.
- Como se muestra en la figura 2-1, el conocimiento teórico trabaja simultáneamente y en forma bidireccional en cada paso que se va

desarrollando. En procesos de reconocimiento automatizado, esto se refiere a la base de datos con la que debe contar el sistema para desarrollar su labor sobre las regiones de las cuales debe obtener información por ejemplo defectos de fabricación comunes en procesos de fabricación de elementos, o rangos determinados para análisis de patrones de polución en imágenes aéreas para meteorología etc., en adición a eso, el conocimiento teórico de quien ejecuta la tarea es imprescindible y se puede denominar como la experiencia de trabajo. Sin embargo en procesos semiautomáticos como es el que se desarrolla en el presente trabajo de tesis, el conocimiento teórico esta dado solamente por quien ejecuta la tarea, pues es esta persona quien da las pautas para que el sistema ejecute la tarea, definiendo por ejemplo los grupos de elementos, características geométricas a analizar etc., bajo el conocimiento de saber que es lo que desea obtener del sistema, como lo es por ejemplo la caracterización microestructural de materiales. [13]

En general, es la aplicación para la que se usa el sistema la que determina que pasos se pueden obviar o que pasos deben ejecutarse más exhaustivamente.

2.3. Elementos de los Sistemas de Procesamiento Digital de Imágenes.

Los sistemas de procesamiento digital de imágenes presentan diferentes etapas, las cuales se desarrollan a continuación:

2.3.1. Adquisición.

La diferencia más importante entre la visión humana y las imágenes por computadora se encuentra en la forma en que éstas son adquiridas. Nuestro interés aquí, se centra principalmente en cómo son adquiridas las imágenes digitales por computadora. Para ello son básicos 2 elementos:

- Dispositivo físico sensible a una determinada banda del espectro electromagnético que produzca una señal eléctrica de salida proporcional al nivel de energía detectada. Los sensores de imagen son componentes sensibles a la luz que modifican su señal eléctrica en función de la intensidad luminosa que perciben. Las imágenes digitales representan información visual asociada con una escena ambiental real que correspondería a lo que observamos con el sentido de la vista o bien información no visible pero que puede ser medida utilizando sensores apropiados tales como radiación infraroja, ultravioleta, rayos X ultrasonidos etc. El proceso de adquisición de la imagen involucra un sensor apropiado para detectar el tipo de fuente de

información visual o emisión y convertirla en una señal eléctrica. Posteriormente esta señal eléctrica se convierte en un arreglo de cantidades binarias las cuales se pueden almacenar o procesar utilizando una computadora. La imagen digital corresponde a un arreglo de dos dimensiones que se podría denotar como $f(x, y)$ en donde cada píxel tiene asociadas las coordenadas espaciales definidas por x e y . La imagen tiene un tamaño de $N \times M$ píxeles en donde N corresponde al ancho de la imagen y M corresponde al largo de la imagen. Cada píxel corresponde a un valor de intensidad representativa de la información visual o emisión que se ha adquirido. Tal valor binario requiere un determinado número de bits para representar la información y lo más usual es 8 bits que corresponde a un byte o bien, 16 bits o 32 bits que corresponden a 2 bytes y 4 bytes respectivamente. La digitalización deja los datos con un formato adecuado para su manipulación por parte de la computadora y pueden ser ahora transformados en cualquier función matemática elegida usando un sistema de procesamiento de imágenes con un determinado software, pues cada uno desarrolla una tarea diferente de acuerdo a las necesidades que se presentan.

- El digitalizador que es un dispositivo para convertir la señal de salida del sistema en forma digital. Esta es la tarjeta de captura de imagen que permite transferir la imagen de la cámara a la memoria del ordenador con el fin de que este pueda realizar el procesamiento adecuado de las imágenes. Aspectos importantes de esta tarjeta son la velocidad de transmisión, el formato de los datos, la profundidad de píxel, la capacidad de captura por disparo, la capacidad del procesamiento de la imagen, la velocidad de transferencia de la imagen de la memoria de la tarjeta a la memoria del ordenador etc. Evidentemente, todos los datos relativos a velocidades de transmisión son especialmente importantes para poder trabajar en tiempo real algo que se ha desarrollado notablemente en los últimos años. Otros ejemplos de dispositivos digitalizadores son los digitalizadores ópticos que emplean dispositivos fotosensibles para convertir imágenes como fotografía o textos en señales que puedan ser manipuladas por la máquina. Otro ejemplo es el micrófono que es un dispositivo para convertir sonidos en señales que puedan ser almacenadas, manipuladas y reproducidas por el ordenador.

Hasta aquí los datos han sido grabados, digitalizados y guardados en la forma de una grilla de píxeles, si los datos fueran adquiridos por algún sensor capaz de producir imágenes, los datos pueden mostrarse en un monitor. Para que los datos sean mostrados en pantalla, el computador asigna a cada valor entero (o

rango de ellos) un color en particular, de forma tal que pueda ser distinguido visualmente.

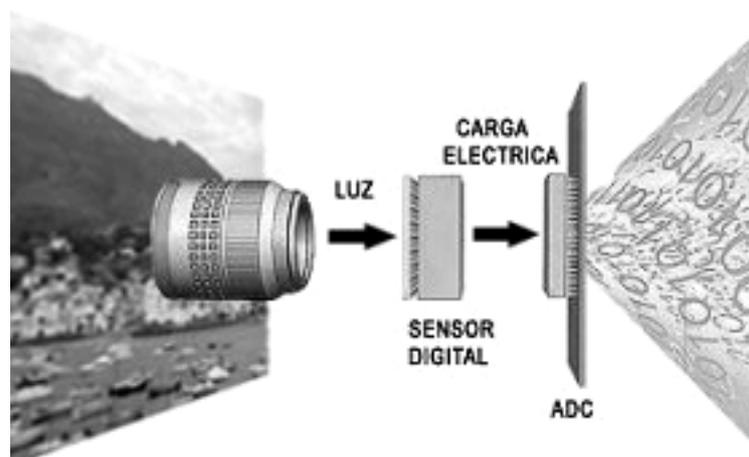


FIG. 2-2. Captura de Imágenes Digitales

2.3.2. Almacenamiento.

La unidad de tamaño de la información es el byte (8 bits) y según la dimensión del archivo se puede guardar también en kbytes (kilobytes o miles de bytes), Mbytes (megabytes o millones de bytes), Gbytes (gigabytes o miles de millones de bytes), Tbytes (terabytes o billones de bytes). Así por ejemplo una imagen de 8 bits y de 1024x1024 píxeles necesita 10 millones de bytes de memoria. Así el proporcionar la capacidad de almacenamiento adecuada es muy importante en el procesamiento digital de imágenes pudiendo ser esta de corto, mediano o largo plazo según la frecuencia de uso de la información almacenada.

Los dispositivos de almacenamiento externos más frecuentes son los disquetes, los discos duros etc. El hardware de almacenamiento sirve para almacenar permanentemente información y programas que el ordenador deba recuperar en algún momento.

2.3.3. Procesamiento.

Esta etapa se caracteriza generalmente por lo que los procedimientos están dados en forma de algoritmos, siendo el software el medio por el cual se implementan y ejecutan. Durante las tres primeras décadas de la informática, el principal desafío era el desarrollo del hardware de las computadoras, de forma que se redujera el costo de procesamiento y almacenamiento de datos. La necesidad de enfoques sistemáticos para el desarrollo y mantenimiento de productos de software se patentó en la década

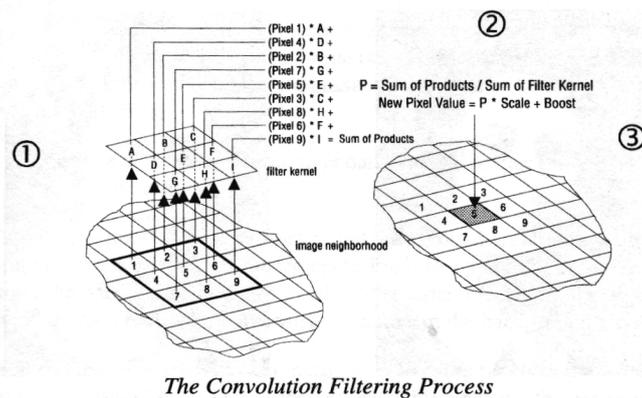
de 1960. Fue hasta el año 1968 que se convocó una reunión en Garmisch, Alemania Oriental estimulándose el interés hacia los aspectos técnicos y administrativos utilizados en el desarrollo y mantenimiento del software, y fue entonces donde se utilizó el término "Ingeniería del Software". A lo largo de la década de los ochenta, los avances en microelectrónica han dado como resultado una mayor potencia de cálculo a la vez que una reducción de costo. Hoy el problema es diferente. El principal desafío es mejorar la calidad y reducir el costo.

El procesamiento digital de imágenes, incluye un conjunto de técnicas que operan sobre la representación digital de una imagen, a objeto de destacar algunos de los elementos que conforman la escena, de modo que se facilite su posterior análisis, bien sea por parte de un usuario (humano) o un sistema de visión artificial. En general, las técnicas de procesamiento de imágenes son aplicadas cuando resulta necesario realizar o modificar una imagen para mejorar su apariencia o para destacar algún aspecto de la información contenida en la misma, o cuando se requiere, medir, contrastar o clasificar algún elemento contenido en la misma. También se utilizan técnicas de procesamiento, cuando se requiere combinar imágenes o porciones de las mismas o reorganizar su contenido.

Dentro de las principales técnicas de procesamiento se tiene la que es basada en una región, esta tiene muchas aplicaciones en la obtención de primitivas características de la imagen como por ejemplo la extracción de contornos, para realzar los contornos, para suavizar una imagen, para introducir borrosidad etc. Usan un grupo de píxeles dentro de la imagen a procesar, con el propósito de extraer información acerca de la misma. El grupo de píxeles que se estudia en este caso, se denomina usualmente vecindad. Por lo general la vecindad es una matriz bidimensional de valores de píxeles con un número impar de filas y columnas. El píxel de interés que normalmente es reemplazado por un nuevo valor, producto de la aplicación de un algoritmo, se ubica por lo general, en el centro de la vecindad. Al utilizar una vecindad en el procesamiento, se puede aprovechar la información acerca del comportamiento regional de la imagen en cuestión, mejor conocida como frecuencia espacial, la cual podría definirse como la tasa de cambio de la intensidad de los píxeles dividido por la distancia sobre la cual ocurre el cambio. La frecuencia espacial tiene componentes en las direcciones horizontal y vertical dentro de la imagen. Por ejemplo, la imagen de un patrón tipo tablero de ajedrez presentará un alto contenido de frecuencia espacial, el cual aumentará en la medida que el tamaño de los cuadros disminuya. Por su parte una imagen con un bajo contenido de frecuencia espacial por lo general tiene amplias áreas con valores casi constantes de los píxeles. El hecho de considerar los píxeles de una vecindad, hace que las técnicas de procesamiento basadas en una región tengan

un mayor costo de cálculo numérico que las técnicas basadas en un solo punto. Este costo dependerá del tamaño de la vecindad a considerar, así como del tipo de representación numérica utilizada. Sin embargo, para la mayoría de las aplicaciones y con las computadoras disponibles actualmente, se pueden obtener muy buenos resultados en términos de tiempo de cálculo, al procesar imágenes de un tamaño mediano (256 x 256 ó 512 x 512). En todo caso, el procedimiento que se sigue es el siguiente:

- Se realiza una sola pasada sobre la imagen de entrada realizando un barrido píxel por píxel, según las filas y columnas.
- Cada píxel de la imagen de entrada es procesado, considerando una vecindad del mismo y utilizando un algoritmo apropiado
- El nuevo valor del píxel, obtenido de acuerdo a lo especificado en la parte anterior es ubicado en la imagen de salida, ocupando la misma posición que ocupaba en la imagen de entrada.



THE CONVOLUTION FILTERING PROCESS	
STAGE	DESCRIPTION
1.	Each pixel in the image neighborhood is multiplied by the contents of the corresponding element in the filtering kernel.
2.	The results from the multiplication are summed and divided by the sum of the kernel.
3.	The result is scaled and boosted, and used to replace the center pixel in the image neighborhood.

FIG. 2-3. Procesamiento Digital de Imágenes

2.3.4. Comunicación.

Pueden ser conexiones locales entre sistemas de procesamiento de imágenes o de comunicación remota entre dos puntos. El hardware y software para comunicaciones locales son muy conocidos como lo son para transmisión entre computadoras. Según el lugar y el espacio que ocupen, las redes, se pueden clasificar en dos tipos:

- Redes de Área Local LAN (Local Area Network). Es una red que se expande en un área relativamente pequeña. Éstas se encuentran comúnmente dentro de una edificación o un conjunto de edificaciones que estén contiguos. Así mismo, una LAN puede estar conectada con otras LANs a cualquier distancia por medio de línea telefónica y ondas de radio. Pueden ser desde 2 computadoras, hasta cientos de ellas. Todas se conectan entre sí por varios medios y topología, a la computadora(s) que se encarga de llevar el control de la red es llamada “servidor” y a las computadoras que dependen del servidor, se les llama “nodos” o “estaciones de trabajo”. Los nodos de una red pueden ser computadoras que cuentan con su propio CPU, disco duro y software y tienen la capacidad de conectarse a la red en un momento dado; o pueden ser computadoras sin CPU o disco duro y son llamadas “terminales tontas”, las cuales tienen que estar conectadas a la red para su funcionamiento. Las LANs son capaces de transmitir datos a velocidades muy rápidas, algunas inclusive más rápido que por línea telefónica; pero las distancias son limitadas.
- Redes de Área Amplia WAN (Wide Area Network). Es una red comúnmente compuesta por varias LANs interconectadas y se encuentran en una amplia área geográfica. Estas LANs que componen la WAN se encuentran interconectadas por medio de líneas de teléfono, fibra óptica o por enlaces aéreos como satélites. Entre las WANs mas grandes se encuentran: la ARPANET, que fue creada por la Secretaría de Defensa de los Estados Unidos y se convirtió en lo que es actualmente la WAN mundial: INTERNET, a la cual se conectan actualmente miles de redes universitarias, de gobierno, corporativas y de investigación.

2.3.5. Presentación.

La capacidad del sistema para desplegar una imagen de gran tamaño esta condicionado por el tamaño físico de la pantalla, que debe ser lo suficientemente grande como para permitir el análisis e interpretación conveniente de las imágenes. El desplegado debe ser adecuado para el número de líneas y número de píxeles por línea en la imagen. El tamaño inadecuado del desplegado puede reducir la eficacia para el procesamiento de la imagen.

Existen dispositivos que permiten al usuario ver los resultados de los cálculos o de las manipulaciones de datos de la computadora. El dispositivo de salida más común es la unidad de visualización o VDU (Video Display Unit), que consiste en un monitor que presenta los caracteres y gráficos en una pantalla similar a la del televisor pudiendo ser monócromo o de color. Por lo general, las VDU tienen un tubo de rayos catódicos como el de cualquier televisor, aunque los ordenadores pequeños y portátiles utilizan hoy pantallas de cristal líquido o LCD (Liquid Crystal Display) o electroluminiscentes. En el monitor de rayos catódicos, semejante a un televisor, la información procedente de la CPU se representa empleando un haz de electrones que barre una superficie fosforescente que emite luz y genera imágenes. Otros dispositivos de salida más comunes son las impresoras y los módem. Un módem enlaza dos ordenadores transformando las señales digitales en analógicas para que los datos puedan transmitirse a través de las telecomunicaciones. El hardware de salida consta de dispositivos externos que transfieren información de la CPU de la computadora al usuario informático. La pantalla convierte la información generada por el ordenador en información visual. Otro dispositivo usado son las impresoras, estas reciben textos e imágenes de la computadora y los imprimen en papel. Las impresoras matriciales emplean minúsculos alambres que golpean una cinta entintada formando caracteres. Las impresoras láser emplean haces de luz para trazar imágenes en un tambor que posteriormente recoge pequeñas partículas de un pigmento negro denominado tóner. El tóner se aplica sobre la hoja de papel para producir una imagen. Las impresoras de chorro de tinta lanzan gotitas de tinta sobre el papel para formar caracteres e imágenes.

2.4. Ejemplo del Procesamiento Digital de Imágenes.

La digitalización deja los datos con un formato adecuado para su manipulación por parte del computador. Éstos pueden ser ahora transformados en cualquier función matemática elegida. Cada sistema de procesamiento de imágenes tiene su propio software asociado, cada uno desarrollando una tarea diferente. La secuencia de tareas aplicadas a una imagen se denomina procesamiento de imágenes, la cual puede variar dependiendo de las metas que se tengan en vista. A continuación se da una lista de técnicas básicas actualmente usadas en procesamiento de imágenes asociadas a un ejemplo para su mejor entendimiento. Tomemos un ejemplo desarrollado en una parte posterior de este trabajo de tesis, el trabajo consiste en obtener las características de los elementos constitutivos de un hierro fundido nodular.

Luego de cargar la imagen que fue previamente almacenada en la memoria de computadora mediante el software Image-Pro Plus, se inicia el preprocesamiento digital de la imagen con el propósito de resaltar los objetos presentes y determinadas características y con ello lograr que la medición de los objetos y los resultados que se obtengan de ellos tengan la máxima precisión. Dentro de las principales técnicas de procesamiento de imágenes se tiene a la manipulación de brillo o contraste y aplicación de funciones morfológicas, con ello se logra corregir o eliminar objetos cuya presencia en la imagen pueden alterar los resultados que se obtendrán con posterioridad como por ejemplo polvo, grietas, sombras etc., es decir objetos que no son importantes para el análisis de la imagen. De esta manera a la imagen capturada que está en un determinado formato (Color, Gray Level 8, etc.) se le modifica el contraste, logrando con ello que las zonas oscuras y claras de la imagen sean más evidentes. Como se menciona anteriormente, el procesamiento digital se puede representar a través de funciones matemáticas, por lo tanto al modificar el contraste de una imagen, lo que se hace es aplicar un algoritmo determinado al valor de cada píxel de la imagen, en donde el nuevo valor que obtendrá el píxel esta función de los valores de píxeles que lo rodean. De esta manera se tiene por ejemplo varios tipos de ajuste de contraste como Lineal, Logarítmica, Exponencial definidas cada una de manera diferente. Al aplicar el contraste lo que se logra en nuestro ejemplo es mejorar el contraste entre los nódulos y la matriz. Luego de ello se convierte a un formato Gray Scale 8 en la cual cada píxel es digitalizado en 8 bits lo cual le permite obtener 256 posibilidades de niveles de gris, en el cual el valor del color negro es 0 y el valor del color blanco es 255. Existen también otros formatos en los cuales se puede procesar y analizar la imagen por ejemplo Gray Scale 16, Floating Point (Gray Scale 32), RGB 24(True Color), RGB 36, RGB 48, Palette.

Otra de las técnicas usadas es el uso de funciones morfológicas denominados filtros las cuales reducen o aumentan el porcentaje de cambio de brillo en la imagen. De esta manera existen filtros especializados para actuar sobre zonas específicas de la imagen, como por ejemplo filtros para mejorar las características generales de la imagen, filtros para actuar sobre los bordes de dichos objetos, filtros para modificar el tamaño y forma de los objetos antes mencionados entre otros. Sin embargo los filtros más usados son los filtros morfológicos, algunos de los cuales se describen a continuación, para un mejor entendimiento de sus funciones:

- Erode. Nos permite modificar el tamaño de los objetos en la imagen, mediante la erosión de los bordes de los objetos brillosos, y el agrandamiento de los bordes de los más oscuros.

- Dilate. También nos permite modificar el tamaño de la imagen mediante el aumento en la zona de los bordes de los objetos brillantes y la erosión de los más oscuros.
- Open. Nos permite modificar la forma de los objetos de la imagen. Asumiendo que la imagen contiene objetos mas brillantes que el fondo oscuro, el filtro suaviza el contorno de los objetos, separando los objetos conectados de forma estrecha, y removiendo pequeños agujeros oscuros.
- Close. También nos permite modificar la forma. Asumiendo que la imagen contiene objetos más brillantes que el fondo oscuro, el filtro rellena los huecos y dilata conexiones pequeñas de modo que une objetos muy cercanos.
- Watershed. Este filtro separa los objetos que están en contacto. Para realizar esto, el filtro erosiona los objetos hasta desaparecerlos para luego dilatarlos nuevamente, pero esta vez sin permitir que entren en contacto

En esta parte del procesamiento las imágenes a analizar han modificado ciertas características lo que nos permitirá un análisis con menos complejidad. Después de las mejoras introducidas a la imagen, ésta debe ser interpretada, para así extraer el real significado de los datos digitales. Una imagen puede ser dividida en diferentes clases de tal manera que los píxeles que tengan propiedades espectrales similares queden agrupados en la misma clase. La separación de estas clases, es llevada a cabo usualmente mediante métodos estadísticos o geométricos. La clasificación es más exitosa cuando los objetivos son muy diferentes espectralmente. En esta etapa, se seleccionan todos aquellos píxeles de la imagen que estuviesen contenidos en un rango determinado de niveles de gris y que correspondieran a las figuras que se desean medir; generándose con ello una imagen compuesta de píxeles detectados (que conforman los objetos deseados o regiones de la imagen a analizar) y los píxeles no detectados (que son el fondo de la imagen). Esta combinación es conocida como imagen binaria. El tratamiento digital obtenido hasta la imagen final y la comparación con la imagen inicialmente capturada, nos indican como suficiente lo desarrollado para proceder a la medición y análisis de los objetos seleccionados.

3. Caracterización Microestructural y Macroestructural de Materiales mediante Análisis de Imágenes.

Para lograr este objetivo se implementó un Sistema de Captura, Procesamiento y Análisis de Imágenes el cual nos permite la caracterización microestructural y macroestructural de materiales mediante el desarrollo de procedimientos para la solución específica de aplicaciones.

3.1. Sistema de Captura, Procesamiento y Análisis de Imágenes para Caracterización Microestructural y Macroestructural de Materiales.

Un Sistema de Captura, Procesamiento y Análisis de Imágenes particulariza un conjunto de procedimientos sobre la unión de dos áreas, una relacionada a la captura de imágenes y la otra relacionada al procesamiento y análisis digital de las imágenes.

- El área de captura de imágenes se refiere a todo lo desarrollado e implementado para lograr la adquisición de imágenes digitales que representen al mundo real. Así tenemos lo desarrollado para la captura de imágenes cuyo origen es el microscopio metalográfico, logrando con esto que se pueda visualizar en el monitor de una computadora lo que se capta en el microscopio metalográfico en tiempo real, y por lo tanto a partir de ello ser susceptible a un nuevo método de análisis que nos permita obtener resultados más fiables en lo cuantitativo y en lo cualitativo, a través de un análisis a dichas imágenes digitales. La calidad de las imágenes obtenidas y capturadas del microscopio metalográfico y por lo tanto visualizadas en tiempo real en el monitor de la computadora dependen de muchos factores entre los cuales podemos mencionar al pulido, ataque químico, aumento proporcionado por el microscopio etc. El campo de acción del área de captura de imágenes también incluye otros mecanismos para la adquisición de imágenes como es el uso de dispositivos externos como scanners que permiten la conversión de fotografías a imágenes digitales de tal manera que la computadora pueda trabajar con la información que se obtiene de esta, aprovechando así una amplia gama de recursos aportados por el procesamiento digital. Así mismo, otros dispositivos de captura de imágenes de este tipo son las cámaras fotográficas digitales las cuales nos permiten obtenerlas directamente en este formato (imágenes digitales) evitando así el uso de otros dispositivos para la digitalización de fotografías convencionales.
- El área de procesamiento y análisis de imágenes basa su desarrollo y la calidad de sus resultados en lo obtenido en el área de captura de imágenes. Es

decir si bien el procesamiento digital de las imágenes, etapa previa al análisis digital de imágenes, puede mejorar determinadas características de la imagen de modo que se resalten las particularidades que se quieren analizar, poco se puede obtener si en el momento de la captura se pierden características importantes debido por ejemplo al mal preparado de la probeta, al uso no apropiado del aumento aplicado por el microscopio, a deficiencias técnicas en el uso de cámaras digitales o scanners etc. Como se mencionó anteriormente dentro de esta área podemos diferenciar dos campos específicos los cuales son el de procesamiento digital y el de análisis digital de las imágenes. El procesamiento digital se refiere a todos aquellos cambios que se le aplican a la imagen de modo que se mejore su presentación, estos cambios pueden ser por ejemplo la variación de la cantidad de brillo o contraste ambos relacionados a la iluminación proporcionada en el microscopio metalográfico en el momento de la captura, o también se pueden aplicar cambios, de modo que se resalten más, por ejemplo, los bordes o contornos de los granos de perlita en un acero de bajo carbono o de las partículas de grafito en los hierros fundidos de modo que se defina más su forma, en resumen todos los cambios que se aplican a la imagen digital para mejorar su presentación y la capacidad de obtener información se denominan procesamiento digital de imágenes. El segundo campo mencionado en esta área es el de análisis digital de imágenes, este se refiere a todo los procedimientos que se desarrollan para obtener información de una imagen digital. El éxito de este campo esta basado en dos factores principalmente, el primero referido al resultado obtenido en el campo de procesamiento digital de Imágenes pues es a partir de esto que se puede proceder al análisis digital de Imágenes, y el segundo tan importante como el primero que se refiere a la base y el conocimiento teórico de aquello que se esta visualizando, es decir la capacidad de distinguir y diferenciar por ejemplo granos de ferrita y perlita o diferenciar nódulos de grafito de laminas de grafito. Esta base teórica incluye también a todo el soporte teórico y técnico con el que se debe contar para el correcto desarrollo de procedimientos de análisis, por ejemplo en el caso nuestro donde tomamos la información proporcionada por normas especializadas para la caracterización de materiales a nivel microscópico o macroscópico de las normas ASTM American Society for Testings and Materials. Tener la posibilidad de manejar una imagen fuera del espacio del microscopio mediante la visualización de las imágenes generadas en el monitor de una computadora personal se puede ayudar al usuario a identificar y manejar problemas de forma más rápida y eficiente.

En un Sistema de Captura, Procesamiento y Análisis de Imágenes como este se usan herramientas de gran capacidad de procesamiento gráfico y alfanumérico, estas herramientas van dotadas de procedimientos y aplicaciones que nos permiten la visualización de la información en proceso. La mayor utilidad de este sistema esta íntimamente relacionada con la capacidad de obtener de él resultados confiables con un alto grado de precisión de situaciones que hasta la actualidad se desarrollan de manera manual con predominio del trabajo visual y comparativo como lo es el trabajo de caracterización de materiales mediante el uso principalmente de cartillas con información grafica proporcionada por normas especializadas como son las normas ASTM, sustituyendo esto con modelos o representaciones del mundo real con información digital, logrando generar con ello más información para el análisis. Sistemas como este sirven también a la metalografía de diferentes maneras por ejemplo, proporciona un entorno interactivo y dinámico que puede ayudar al metalografo especializado en los procesos tradicionales de caracterización de materiales mediante la integración de bases de datos, procedimientos analíticos y técnicas gráficas de visualización para el procesamiento de la información.

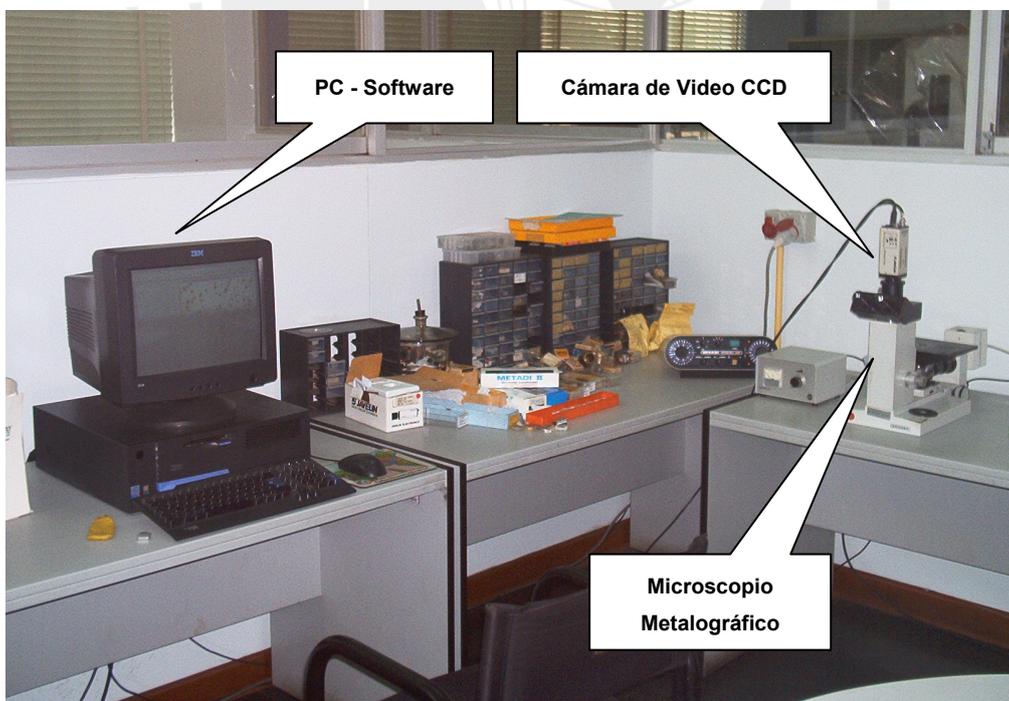


FIG. 3-1.— Sistema Implementado

3.1.1. Objetivos, Alcances y Limitaciones.

A continuación se describen los Objetivos, Alcances y Limitaciones del Sistema de Captura, Procesamiento y Análisis de Imágenes

3.1.1.1. Objetivo General.

- El objetivo general de este proyecto, es el desarrollo de un sistema que permita la caracterización de materiales mediante el análisis digital de imágenes usando una computadora personal y un software especializado.

3.1.1.2. Objetivos Específicos.

- Implementar el sistema de captura de imágenes computadora-cámara de video-microscopio, como uno de los medios de entrada del sistema total con los menores costos posibles y aumentando la facilidad y rapidez en la captura.
- Desarrollar el manual del software Image - Pro Plus a utilizar en procesamiento y análisis de imágenes.
- Desarrollar los procedimientos para el uso del Sistema de Captura, Procesamiento y Análisis de Imágenes aplicado a dos ejemplos de caracterización microestructural y/o macroestructural de materiales.

3.1.1.3. Alcances y Limitaciones.

- Las imágenes a analizar deben ser digitales pudiendo ser capturadas mediante el sistema de captura de imágenes implementado, cámaras fotográficas digitales o mediante el uso de otros dispositivos digitalizadores si se tuvieran fotografías. Estas imágenes deberán tener un formato determinado para que pueda ser visualizada en un monitor, permita su procesamiento y análisis en el software utilizado y a la vez permita también la posibilidad de almacenamiento, impresión o intercambio.

3.1.2. Descripción de los Componentes.

El sistema a implementar para el presente trabajo de tesis consta de un grupo de elementos, los cuales se describen a continuación, haciendo énfasis solo en las características más importantes en cuanto a su definición y funcionamiento, sin entrar a campos que salen del objetivo de este proyecto.

3.1.2.1. Tarjeta de Adquisición de Imágenes.

La tarjeta de adquisición de imágenes permite la digitalización de las imágenes que provienen de la salida analógica de la cámara de video CCD. Esta tarjeta se encuentra instalada en el CPU de la computadora. La tarjeta empleada es Tseng Labs ET6000 que contiene un chip de 128 bits que es uno de los mejores para Windows. La velocidad de refresco es el número de veces que se dibuja la pantalla por segundo; por lo tanto, cuanto mayor sea, menor será el cansancio que sufra la vista y el trabajo que realicemos será con más comodidad y con menos problemas visuales. Esta depende de dos parámetros:

- La velocidad del conversor analógico digital y debe ser lo mayor posible. En nuestra tarjeta es 135Mhz, que es una velocidad aceptable.
- La velocidad de la memoria de vídeo MDRAM de 2Mb, la cual es de 125Mhz

La memoria de vídeo en función de su tamaño y tipo determina si conseguiremos buenas velocidades de refresco de pantalla o no, es un tipo de memoria no muy común, pero de alta calidad. La tarjeta gráfica, como añadido que es a la computadora, se conecta a éste mediante un slot o ranura de expansión. Muchos tipos de ranuras de expansión se han creado precisamente para satisfacer a la ingente cantidad de información que se transmite cada segundo a la tarjeta gráfica. Para nuestra tarjeta es la PCI que es el estándar para conexión de tarjetas gráficas (y otros múltiples periféricos) y es suficientemente veloz para esta tarjeta.

3.1.2.2. Microscopio Metalográfico.

La finalidad del microscopio metalográfico es hacer posible la observación de detalles de un metal o aleación que son demasiados pequeños para ser visibles a simple vista. Generalmente un examen a ojo desnudo o con ayuda de una lupa permite observar, detalles aumentados hasta 20 veces. Sin embargo la examinación mediante el microscopio metalográfico usado nos permite la observación de detalles aumentados entre 50 a 1000 veces. Dada la capacidad del metal, la técnica microscópica aprovecha la reflectividad del mismo. El sistema óptico constituye la parte más importante del microscopio y consiste en una combinación adecuada de lentes dispuestos de tal manera que puede revelar claramente la máxima cantidad de detalles presentes en la muestra en estudio. Por razones obvias las lentes más cercanas al ojo del observador suele denominarse el ocular y las más cercanas al objeto en observación, objetivo. Los objetivos microscópicos están formados por un conjunto de lentes que forma un sistema óptico positivo convergente, capaz por si mismo de formar una imagen real aumentada.

3.1.2.3. Cámara de video Javelin CCD.

El CCD (Charge Coupled Device) o Dispositivo por Acoplamiento de Carga contiene celdas fotosensibles que generan una diferencia de potencial y almacena una carga eléctrica cuando son excitados por un fotón de luz o mejor dicho cuando son iluminados. Una celda fotosensible es equivalente a un píxel y el número de celdas por CCD (Chip) determina el número de píxeles de resolución que la cámara puede mostrar. Cuando mayor es el chip mejor la resolución de la imagen. El aumento de resolución va acompañado o por chips más grandes o usando un número mayor de ellos. La información de temporización para la posición vertical y horizontal, más el valor que genera el sensor CCD, son combinados para formar una señal de video. La señal de video que genera la cámara incluye un pulso de sincronización vertical (VSYNC) que identifica el comienzo de un campo ("field") y un pulso de sincronización horizontal (HSYNC) que identifica el comienzo de una línea. Generalmente actualizan la imagen de video a una tasa de 30 cuadros por segundo (30 frames/sec).

Es recomendable considerar las especificaciones técnicas de la cámara y del lente a utilizar en la captura de la imagen al adquirir una, tales como longitud focal, tamaño de los sensores CCD, distancia focal mínima etc., pues en función de los requerimientos puede ser para mediciones muy pequeñas. En nuestro caso la imagen que se captura mediante la cámara de video CCD es la misma imagen que se capta por los oculares del microscopio, por lo tanto esta combinación cámara de video-microscopio nos permite hacer mediciones de elementos muy pequeños sin necesidad de lentes extras. La cámara de video CCD usado en este trabajo de tesis es el modelo Javelin JE3762DSP a color, con un 1CCD y salida analógica, con zoom regulable. La adquisición de las imágenes puede realizarse ahora mediante un programa elaborado para este fin por Media Cybernetics como es Image Pro Plus mediante una computadora. Este software se desarrolla en una plataforma Windows, las cuales se describen más detalladamente líneas abajo. El CCD tiene aplicaciones, como se demuestra en este trabajo de tesis, en microscopia por lo que algunas referencias hacen alusión al microscopio utilizado, sin embargo la instalación puede realizarse en cualquier microscopio siempre y cuando se adecue mediante elementos posicionadores, como se hizo para en este caso para las funciones necesarias de modo que se pueda capturar imágenes de buena resolución en tareas científicas o industriales. Cuando los fotones de luz visible interaccionan con un elemento de la matriz del sensor CCD, en el elemento se liberan electrones y estos quedan atrapados en el mismo ya que actúa como un condensador eléctrico. La razón radica en que hay barreras de potencial eléctrico entre los diferentes elementos, que impiden la migración de la carga entre elementos. La lectura posterior de la carga almacenada

en cada elemento y su conversión a un valor digital es el proceso que permite obtener una imagen digital con estos sensores.

3.1.2.4. Software de Procesamiento Digital de Imágenes Image-Pro Plus.

Image-Pro Plus es uno de los softwares más utilizado y más difundidos a nivel mundial en el entorno del análisis de imagen, ha sido diseñado para investigadores y técnicos que necesiten soluciones de proceso y análisis de imagen. Para todos aquellos que utilicen microscopios o cualquier otro método de captura de imágenes.

Es además un software de análisis de imagen con muy buenas características para proporcionarle control y automatización de los sistemas de captura de imagen. Como aplicación de análisis de imagen le proporciona un completo rango de utilidades de captura, comunicación, proceso, medida, análisis, archivo, generación de informes e impresión de imágenes. Este software está específicamente diseñado para cualquier investigador que utilice los sistemas de adquisición de imagen para capturar, estudiar y almacenar imágenes y datos.

La combinación entre altas prestaciones y facilidad de uso hace mejorar aun más sus ventajas

Image-Pro Plus presenta las siguientes funciones:

- Adquisición de Imagen desde cámara analógica, digital o Escáner
- Lectura y Escritura de cualquier formato de archivo de imagen (TIFF, BMP, EPS, JPEG, GIF, TGA,...)
- Procesado de Imágenes Monocromo y color con profundidades de: 8, 10, 12, 16, 24, 36, 48 bits
- Incorpora una potente Base de Datos de Imágenes, Datos y Estadísticas
- Modificación y rotulación de la imagen para incluirla en informes o publicaciones
- Mejora de Imagen: Proceso de Niveles de Gris o Color, LUT, Filtros, Convoluciones, FFT
- Calibración Morfométrica, Densitométrica y de Perspectiva.
- Procesado de Color (RGB, HSI, HSV, etc.)
- Morfología Matemática Binaria, Niveles de Gris (Erode, Dilate, Watershed, etc.)
- Operaciones Matemáticas y Lógicas con Imágenes.
- Corrección y Substracción de Fondo.
- Mosaicos de Imágenes, y Ajuste de Imágenes por puntos de control.
- Medida Morfométrica y Densitométrica (Manual y Automática).
- Medida de Porcentajes de Elementos en la Imagen.

- Clasificación de elementos a partir de parámetros de medida.
- Evaluación y Medida de Agrupaciones de Objetos.
- Medidas en Secuencias de Imagen.
- Representación 3D de las imágenes.
- Generación Plantillas y Medida basada en Estereología.
- Generación de Informes (Incluyendo Logos, Imágenes, Resultados y Estadísticas).
- Automatización de los proceso mediante Macros de fácil generación.
- Edición de Macros y generación de aplicaciones mediante programación. [23]

3.1.2.5. Plataforma Windows 2000.

Los sistemas operativos internos fueron desarrollados sobre todo para coordinar y trasladar flujos de datos que procedían de fuentes distintas, como las unidades de disco o los coprocesadores (chips de procesamiento que ejecutan operaciones simultáneamente con la unidad central, aunque son diferentes). Windows 2000 es un sistema operativo o programa de control principal, almacenado de forma permanente en la memoria, que interpreta los comandos del usuario que solicita diversos tipos de servicios, como visualización, almacenamiento, impresión etc. respondiendo de manera adecuada a los requerimientos del Sistema de Captura, Procesamiento y Análisis Digital de Imágenes, sobretodo como soporte para el software de análisis de imágenes Image Pro Plus utilizado en el presente trabajo de tesis. En el ambiente Windows se hace referencia a la pantalla como si fuera un escritorio, las funciones se presentan en áreas que se denominan ventanas. En la actualidad la mayor parte de los ordenadores del mundo están corriendo bajo sistemas operativos gráficos, principalmente Windows. Se enfoca hacia la capacidad de interconexión y acceso a redes, seguridad y rendimiento optimizado. El sistema brinda una óptima estabilidad y tolerancia a fallos, superando con amplitud a los otros sistemas de escritorio. Los programas instalados sobre esta versión, pueden utilizar al máximo las capacidades del nuevo hardware instalado en su computador. Es ideal para tareas exigentes tales como diseño gráfico, bases de datos de gran tamaño y programación. Windows 2000 permite conectarse sin problemas a todos los dispositivos disponibles gracias a su mayor índice de compatibilidad. Puede sacar el máximo provecho de sus conexiones USB.

3.1.2.6. Computadora.

Las características que presenta la computadora es:

- 256 MB de memoria RAM, con buena performance y características para el procesamiento de imágenes.
- IBM Pentium IV con un procesador de 1.4GHz.
- Almacenamiento masivo veloz y con capacidad y suficiente espacio para satisfacer por lo menos las necesidades temporales con 40GB, aún si los archivos en última instancia se trasladan a otros dispositivos de almacenamiento.
- Puerto USB 2.0 que es aproximadamente 40 veces más rápido que su versión anterior para conectar a periféricos como los escáneres para adquisición de imágenes, o dispositivos USB para almacenamiento y transporte de imágenes, impresoras etc. y conexión de red de ancho de banda que pueda permitir un rápido acceso y transmisión de los archivos analizados a lugares remotos.

3.1.3. Implementación del Sistema de Captura, Procesamiento y Análisis de Imágenes.

Para lograr la implementación del sistema de modo que cumpla los objetivos planteados anteriormente se tomó como base las Etapas del Procesamiento Digital y los Elementos de los Sistemas de Procesamiento Digital de Imágenes desarrollados en las secciones 2.2 y 2.3 respectivamente.

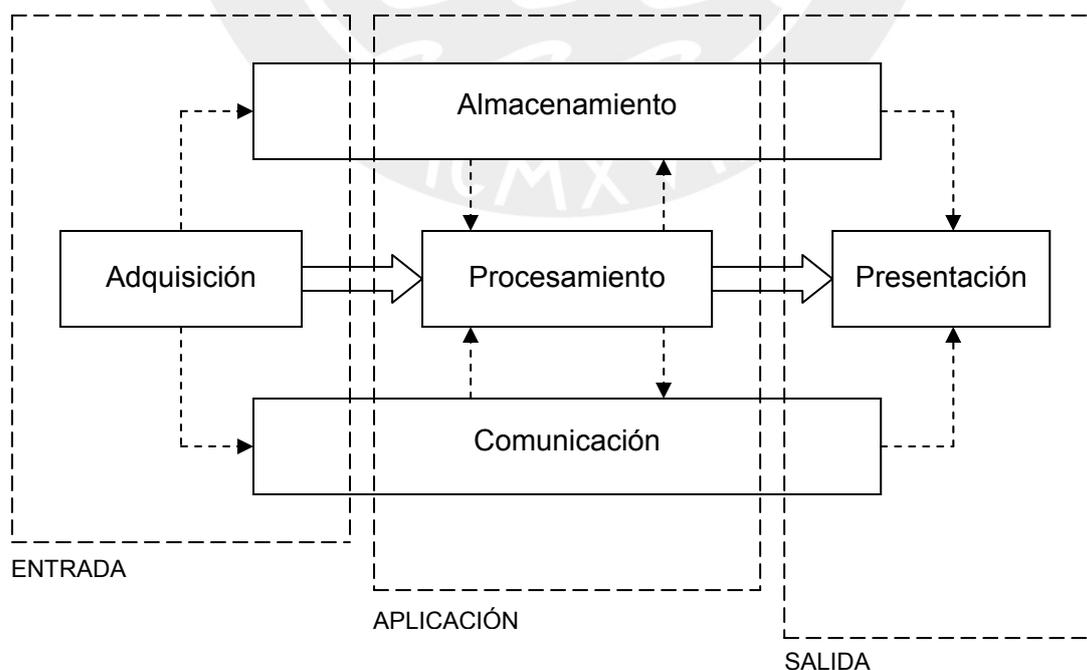


FIG. 3-2.— Diagrama Total del Sistema

A continuación se detalla cada uno de los bloques mostrados en la figura 3-2 así como su forma de implementación.

3.1.3.1. Entrada del Sistema.

La entrada del sistema se refiere a todos los elementos o conjunto de elementos denominados sistemas de adquisición de imágenes con capacidad de proveer al sistema de imágenes digitales. Como sistema de adquisición de imágenes principal se utiliza una cámara de video CCD y microscopio metalográfico cuyas principales características han sido detallados en la sección 3.1.2. Ambos elementos se unen mediante un tercero denominado “Acople”, diseñado para cumplir dicho objetivo y desarrollado en la sección siguiente. Como sistema de adquisición de imágenes secundario se utilizan diversos elementos como cámaras fotográficas digitales además de lo mencionado anteriormente como es el uso de cámaras fotográficas convencionales más un escáner para digitalizar las fotografías.

Uno de los objetivos principales del presente trabajo de tesis es la implementación para el uso permanente en el Laboratorio de Materiales del Sistema de Adquisición de Imágenes: Computadora - Cámara de Video CCD - Microscopio Metalográfico. Este sistema nos da como salida, imágenes en formato JPG con una resolución de 480 x 600 píxeles y con una profundidad de color de 24 bits o True Color.

a. Diseño de Acople Cámara de Video CCD - Microscopio Metalográfico.

En la actualidad se pueden adquirir en el mercado excelentes opciones de video microscopia de alta resolución, con diseño funcionales para trabajo a distancias remotas. Sin embargo algunas de las características que presentan estos equipos se pueden obtener mediante el ensamble de la cámara de video CCD y el microscopio metalográfico, obteniendo con ello ostensibles mejoras en cuanto a su productividad con relación al trabajo que realizan independiente cada uno de ellos, ahorrándose por ejemplo, el proceso que se realiza desde la captura mediante una cámara fotográfica convencional y la posterior digitalización mediante el scaneo de la fotografía, hechos que implican costos de tiempo, servicios etc. Por lo tanto este sistema pese a su simplicidad, y la simplicidad propia de los elementos que lo constituyen puede llegar a ser tan funcional, con las restricciones obvias, como los sistemas que se ofrece en el mercado teniendo como una característica muy importante el ahorro ostensible de dinero, que implicaría el costos de adquirir uno en el mercado para las mismas funciones y los costos relacionados a su instalación, mantenimiento etc. El acople de una cámara de video a un microscopio es muy común en estos días lo que permite

que los microscopios nos permitan visualizar en el monitor de una computadora lo que se percibe en los oculares del microscopio.

Sistemas como estos son usados por ejemplo para visión de maquinas, inspección electrónica, investigación en centros de enseñanza o en estudios más especializados en ramas de entomología, geología, zoología, anatomía, etc.

Dentro las mejoras que se pueden obtener con la implementación de este sistema podemos mencionar las siguientes:

- En lo ergonómico; para el microscopista, puede ser más cómodo trabajar con lo visualizado en el monitor de la computadora que en microscopio mismo.
- Permite la obtención de imágenes digitales, a pesar de la salida analógica de la cámara de video CCD, sea o no para un posterior procesamiento y análisis de la imagen capturada.
- Mejorar las características de antiguos microscopios para análisis digital de imágenes mediante una computadora personal.

Para el diseño del acople Cámara de Video CCD - Microscopio Metalográfico se tuvo en cuenta las siguientes características:

- Respecto al microscopio:
 - Se debe tener en consideración la óptica del microscopio, ya que este cuenta con aumentos desde 50X hasta 1000X.
 - El diseño esta restringido por las características físicas del microscopio y por lo tanto el acople se debe diseñar para que la zona de acople sea la que el microscopio dispone para la cámara fotográfica convencional. De lo anterior tenemos que el acople tiene acceso por la parte superior del microscopio y puede girar sobre ese eje, como un tubo macho - hembra.
 - No interfiera en las funciones propias del microscopio ya que también cuenta con otros dispositivos para captura como cámara fotográfica convencional, además el origen de la iluminación depende del microscopio.
- Respecto a la Cámara de Video CCD:
 - Se debe tener presente el zoom regulable de esta cámara de video.
- Respecto al acople:
 - Debe ser de fácil producción de modo que permita la intercambiabilidad en caso de daño.

- De ser posible tomar recomendaciones técnicas para el material a usar, acabado etc.

Las opciones que se tienen sobre el material a usar fueron acero, aluminio y bronce. La elección que se tomó es la de aluminio. El criterio de selección estuvo basado principalmente en el peso del acople que actuaría sobre el microscopio, su resistencia a la corrosión, y la facilidad para el maquinado, con un acabado final de anodizado para la corrosión y de color negro mate para fines estéticos.



FIG. 3-3.— Acople Cámara de Video CCD - Microscopio

Como resultado final se tiene el acople, el cual trabaja entre la cámara de video y el microscopio de modo que no tiene movimiento con respecto a la muestra a analizar, siendo solo los elementos del microscopio los que tienen movimiento relativo con respecto a la probeta.

3.1.3.2. Aplicación.

Una vez que se tienen las imágenes a color, se realiza el procesamiento digital de la imagen. Esto empieza con la calibración de la imagen, la variación del contraste para lograr fácilmente la detección de bordes y de color, aplicación de filtros morfológicos, conversión a escala de grises etc. dependiendo todos estos de la aplicación que se está desarrollando etc. El procesamiento digital de la imagen abarca dos áreas como se mencionó anteriormente, la de procesamiento y la de análisis. El desarrollo de esta parte se explica detalladamente para cada aplicación en el capítulo 4, pues como se mencionó anteriormente los pasos seguidos dependen de la muestra que se está caracterizando, por lo tanto pueden variar entre una aplicación y otra. Cabe mencionar que para el desarrollo de la aplicación se tomó como base lo desarrollado en la sección 2.2.

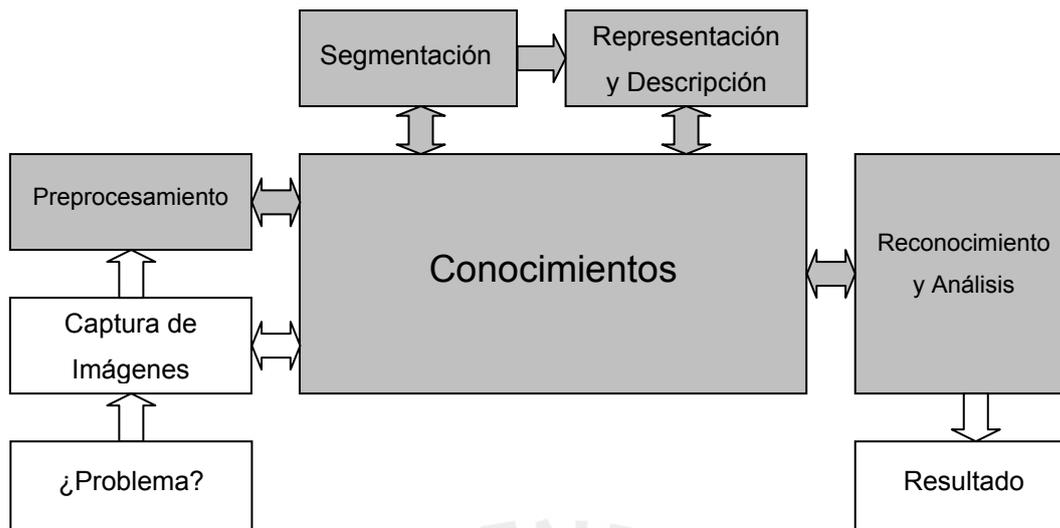


FIG. 3-4.— Etapas del Procesamiento Digital de Imágenes

3.1.3.3. Salida del Sistema.

Como salida de nuestro sistema obtenemos un reporte con los resultados de la caracterización microestructural. Además el sistema nos permite obtener las imágenes que han sido analizadas tanto en el monitor como para imprimir y adjuntar al reporte. Como el sistema es un sistema semiautomático la información que se obtiene del análisis de las imágenes, son relevantes y con valor alguno solo si el usuario del sistema lo considera conveniente, por la tanto es el usuario quien decide que información que puede proveer el sistema a través del software Image - Pro Plus es valida para el reporte de caracterización de materiales.

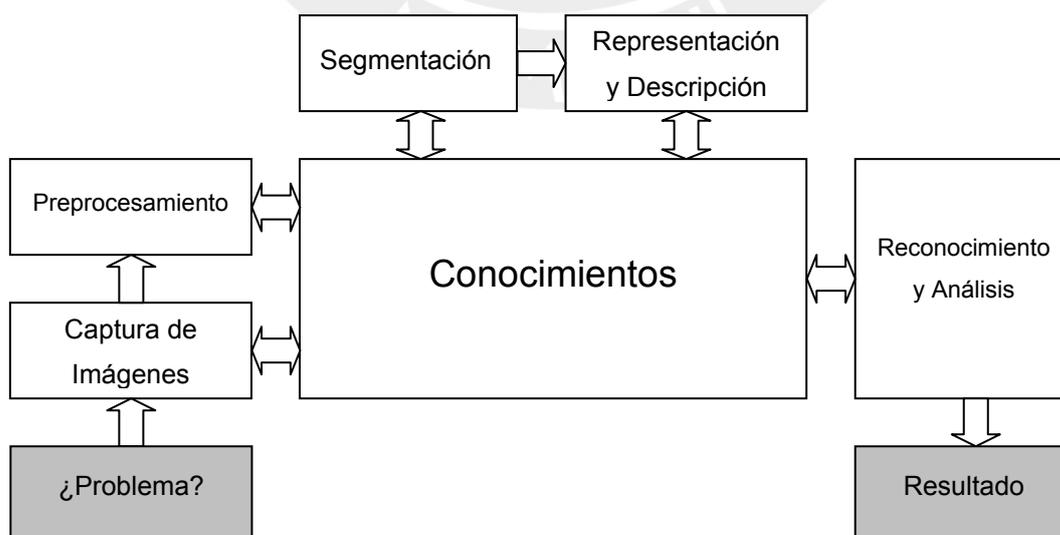


FIG. 3-5.— Entrada y Salida del Sistema

4. Parte Experimental.

En el presente capítulo de este trabajo de tesis se desarrollan dos aplicaciones, para las cuales se presentan los procedimientos para la caracterización de materiales usando lo desarrollado anteriormente, es decir el Sistema de Captura, Procesamiento y Análisis Digital de Imágenes. La primera aplicación es la relacionada al hierro fundido nodular y la segunda lo es para la superficie de fractura en el Ensayo de Impacto Charpy.

4.1. Aplicación 1: Hierro Fundido Nodular.

La primera aplicación que se va a desarrollar usando el Sistema de Captura, Procesamiento y Análisis Digital de Imágenes aplicado a la caracterización microestructural de materiales, es la relacionada al hierro fundido nodular, en la cual se desarrollará un procedimiento para su caracterización en función al análisis de nódulos de grafito según la norma ASTM A247. Para ello se hace una breve introducción teórica sobre el material a analizar de modo que pueda ayudar en la comprensión de la aplicación.

4.1.1. Hierro Fundido Nodular.

Los hierros fundidos nodulares consisten de esferoides de grafito dispersados en una matriz de ferrita, perlita o ambos. Durante la solidificación del hierro nodular, la mayoría del carbono se forma como grafito esferoidal, en contraste a las hojuelas de grafito formado en los hierros fundidos grises. La microestructura usual en el estado fundido de los hierros nodulares, consiste de nódulos de grafito rodeados por ferrita libre (estructura ojo de buey) en una matriz de perlita.

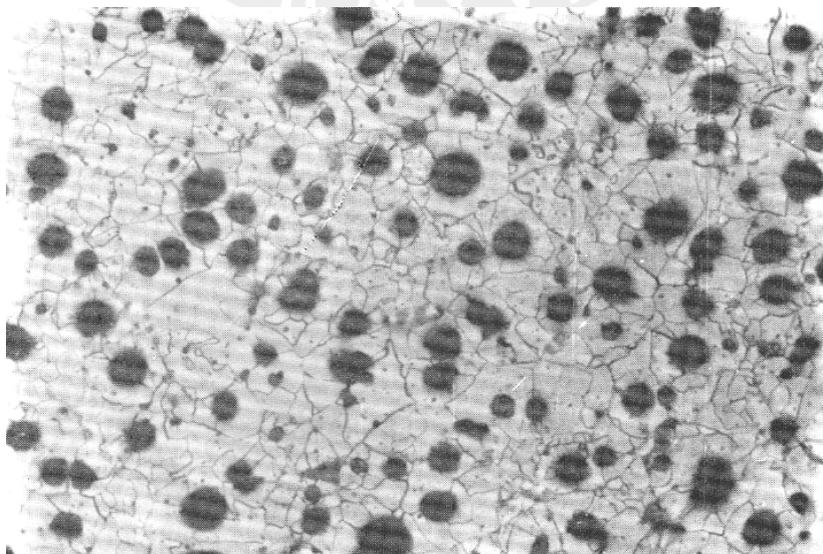


FIG. 4-1.— Hierro fundido nodular.

Los hierros fundidos nodulares tienen una inusual combinación de propiedades, ya que su grafito ocurre como nódulos en vez de hojuelas. Las ventajas de los hierros sobre los hierros grises son el poseer un bajo punto de fusión, buena fluidez y colabilidad, excelente maquinabilidad y buena resistencia al desgaste. Aunque también tiene una alta resistencia, ductilidad, tenacidad y trabajabilidad en caliente. Como resultado de sus propiedades favorables, los hierros nodulares han mostrado un crecimiento fenomenal en popularidad desde que fue descubierto en 1948. Los principales tipos y aplicaciones para los hierros nodulares fundidos están dados en la tabla 4-1. Como en el caso de los hierros fundidos grises, los diferentes tipos de hierros fundidos nodulares son designados por su resistencia a la tracción. Son producidos diferentes tipos, cambiando la microestructura de la matriz. Algunos hierros fundidos nodulares son producidos y utilizados en la condición fundida, mientras que los tipos regulares de alta resistencia, requieren un tratamiento térmico después de la fundición. No hay generalmente diferencia en el análisis químico de los tipos regulares. Algunas veces, son necesarias pequeñas adiciones químicas y cambios en el procesamiento de fundición, para obtener la microestructura deseada.

Tipo	R _t	L _f	%e	Dureza	Tratamiento	Micro Estructura	Aplicaciones
R _t - L _f - %e	Kg/mm ²	Kg/mm ²	%	HBN	térmico	Típica	Típicas
42-28-18	42	28	18	137-170	Recocido	Todo ferrítico	Piezas de presión, tales como válvulas y carcazas de bombas.
46-32-12	46	32	12	149-229	-	Ferrítico	Piezas de maquinaria sujeto a choques y cargas de fatiga.
56-39-06	56	39	6	179-255	-	Ferrítico y perlítico	Engranajes de ejes de bielas y cilindros de laminación.
70-49-03	70	49	3	229-302	Normalizado	Todo perlítico	Engranaje de alta resistencia, componentes de automóviles y máquinas.
85-63-02	85	63	2	250-350	Templado y revenido	Martensita revenida	Piñones, engranajes, laminadores, cilindros

R_t: Resistencia a la tracciónL_f: Límite de fluencia

%e: % de elongación

TABLA 4-1.— Tipos y aplicaciones típicas de los hierros fundidos nodulares.

4.1.1.1. Solidificación del hierro fundido nodular.

Para producir el hierro fundido nodular, es añadida una pequeña cantidad de magnesio (casi 0.1%) al hierro fundido, el cual tiene 3 a 4% C y 1.8 a 2.8% Si. La función del magnesio es desoxidar y desulfurar al hierro fundido. Si el azufre y el oxígeno son absorbidos sobre la interfase grafito/metal fundido, durante la solidificación, será formado las hojuelas del grafito tales como las encontradas en los hierros grises. En orden para producir los nódulos de grafito de los hierros nodulares, las impurezas de azufre y oxígeno del hierro fundido deben ser removidas. En la ausencia de estas impurezas, el crecimiento normal del grafito conduce a la morfología esferoidal.

Para dar la forma a los nódulos, debe haber una combinación de un crecimiento de una interfase inestable y de un plano basal. Las impurezas absorbidas tales como azufre y oxígeno envenenan el crecimiento de las partes sobre los planos basales y por lo tanto estabilizan la interfase metal/ plano basal. Como resultado, las hojuelas de grafito son formados en vez del grafito esferoidal. La solidificación de los hierros nodulares es un proceso similar a la solidificación de los hierros grises, excepto que el grafito crece en direcciones radiales y asume una morfología nodular. La nucleación para los nódulos de grafito esferoidal en los hierros nodulares es probablemente la misma para dividir en hojuelas el grafito en el hierro gris, excepto que los productos de las adiciones de nodulización pueden servir también como nucleantes. Estos productos que sirven como nucleantes pueden ser sulfato de magnesio o silicato de magnesio, identificado como $3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. La acción de estos productos como nucleantes en el hierro fundido nodular, podría ayudar a explicar el contenido más alto de celdas eutécticas observado, así comparado a los hierros grises.

El número de esferoides de grafito esta determinado en las etapas iniciales del proceso de solidificación. Cuando el hierro nodular es enfriado a más bajas temperaturas, el carbono precipita como grafito en los esferoides existentes, a temperaturas abajo del rango eutectoide. Así como en el hierro gris, la velocidad de enfriamiento a través del rango eutectoide, determina la estructura de la matriz. La microestructura de ojo de buey es típica en la estructura ferrítico-perlítico de los hierros fundidos nodulares.

En general, el hierro nodular combina las ventajas del procesamiento de los hierros grises con las ventajas de ingeniería del acero. Ningún otro material ferroso puede igualar la versatilidad de los hierros nodulares. Tienen buena fluidez y excelente maquinabilidad, además de buena resistencia al desgaste. En suma, los hierros

nodulares tienen un número de propiedades similares a los de los aceros, en términos de alta resistencia, tenacidad, ductilidad, trabajabilidad en caliente y templabilidad.

Por ejemplo en cuanto a la resistencia al desgaste, el grafito esferoidal en el hierro nodular es capaz de retener aceite y de este modo prevenir el rozamiento de partes móviles particularmente durante el encendido. El hierro nodular tiene una resistencia al desgaste equivalente al hierro gris. En cuanto a la maquinabilidad, el hierro nodular tiene una maquinabilidad superior al hierro gris, para una dureza equivalente. [2]

4.1.2. Descripción de la Metodología.

4.1.2.1. Captura de imagen.

El procesamiento y análisis digital de imágenes está estrechamente vinculado con la calidad de imagen, por lo cual deben controlarse todas aquellas variables (o por lo menos caracterizar las de mayor importancia) que estén involucradas en la etapa de captura de la imagen, teniendo en cuenta que el sistema trabaja con el reconocimiento de los niveles de brillo y contraste sobre las diferentes regiones de la imagen. Otro aspecto importante, es la óptica utilizada, en la que se debe considerar tanto como sea posible, aberraciones de lentes, alineamiento, limpieza, diafragma de apertura y solidez en la instalación para reducir las eventuales vibraciones.

El sistema de captura que se usó básicamente es el descrito a continuación:

- Un microscopio metalográfico, cuya finalidad es hacer posible la observación de detalles de un metal o aleación que son demasiados pequeños para ser visibles a simple vista. Generalmente un examen a ojo desnudo o con ayuda de una lupa permite observar, detalles aumentados hasta 20 veces. Sin embargo la examinación microscópica óptica permite la observación de detalles aumentados entre 50 a 1000 aumentos. La imagen analizada fue aumentada 100 veces
- En los dispositivos ópticos se instala la cámara de video CCD y ésta a su vez se conecta al hardware de la computadora. La imagen capturada cubre un área real de la muestra de $500 \times 350 \mu\text{m}$. Cada toma luego de capturada en el microscopio se cuantificó a 632×480 píxeles.
- El software para análisis de imágenes Image-Pro Plus, utilizado a nivel mundial en el entorno del análisis de imagen, diseñado para soluciones de

proceso y análisis de imagen a nivel investigador y técnico y para todos los sistemas que utilicen microscopios o cualquier otro método de captura de imágenes.



FIG. 4-2.— Sistema de captura de imágenes.

a. Procedimiento para Captura de Imágenes.

i. Preparación de la Muestra.

Para el momento de captura, la muestra presenta las siguientes características:

- Se extrajo una muestra de hierro fundido nodular con dimensiones 78.53mm^2 de área (área circular de diámetro aproximado igual a 10mm) y embebido en resina de 10mm de altura como se muestra en la figura 4-32.
- La muestra fue sometida a desbaste y pulido:
 - El desbaste consistió en presionar la superficie de la muestra sobre papel abrasivo N°220, N°320, N°400 y N°600 por periodos de 3 minutos sucesivamente, con lo cual se prepara la superficie plana a examinar. El desbaste se realizó sobre papel abrasivo en medio húmedo, es decir con un flujo permanente de agua sobre el papel abrasivo y en la zona de desbaste. La presión ejercida sobre la muestra fue lo suficientemente grande para sentir el corte de las partículas del abrasivo sobre la superficie del metal. En el paso entre uno y otro papel abrasivo, la muestra fue girada 90° , para eliminar las rugosidades producidas en la etapa anterior.

- Luego se procedió al pulido basto y fino, en el primero se usó pasta de diamante en lubricante DP azul, con el disco girando a 250rpm durante 8 minutos asegurando con ello la eliminación de rugosidades del desbaste fino. Para el pulido fino se usó alúmina en suspensión de $3\mu\text{m}$ por 5 minutos y finalmente con alúmina en suspensión de $0.1\mu\text{m}$ también por 5 minutos. Durante cada uno de las etapas de pulido, la muestra fue movida ocasionalmente en sentido contrario al del giro del disco acompañado de pequeños giros. [10]
- No se aplicó el ataque químico, pues en materiales como las fundiciones, la observación en estado pulido es imprescindible para clasificar la forma y tamaño del grafito libre que es tan decisivo en las propiedades de estos materiales. En la aplicación que estamos desarrollando esto es muy importante pues el objetivo principal es la caracterización de los nódulos de grafito, y no tanto así la matriz en la que estos se encuentran. [7]

ii. Ubicación y enfoque de la imagen.

- Se logró manteniendo la muestra en la ubicación óptima sobre la mesa portaobjetos del microscopio metalográfico y usando para mejorar el enfoque, el regulador vertical grueso y el regulador vertical fino. Para centrar la imagen se usó el regulador transversal y longitudinal de la mesa portaobjetos.
- Al utilizar el sistema de captura de imágenes, lo que se observa en el ocular del microscopio metalográfico, también se observa en la pantalla de la computadora. Como lo que se va a capturar es lo que aparece en la pantalla de la computadora, si se desea se puede ajustar el enfoque con el regulador vertical fino del microscopio metalográfico.

iii. Iluminación.

Se usó el sistema de iluminación del microscopio metalográfico, con un variador para la intensidad de luz aplicada a la muestra, que se conservó igual para todas las muestras tanto en ubicación como en intensidad de iluminación. Dada la capacidad del metal, la técnica microscópica aprovechada es la reflectividad del mismo. Para la iluminación de la muestra se utilizó el sistema de iluminación que provee el microscopio metalográfico en la escala 5.

iv. Calibración de imagen.

Ante la necesidad de efectuar medidas precisas, como el área, diámetro etc., de los objetos a analizar (esferolitas) sobre la superficie de la muestra metalográfica, o la de superponer una escala de medida micrométrica a la imagen capturada. El sistema es calibrado introduciendo una referencia del mundo real objetivo y entregándole el equivalente de píxeles por unidad para el análisis de las imágenes.

Esto se hizo empleando un micrómetro objeto (patrón de medida), que es una lámina de vidrio en la que están exactamente grabadas unas divisiones que corresponden, cada una a 0.1mm y que cubren una extensión de 10mm. Se coloca en la mesa portaobjetos del microscopio metalográfico, y se captura la imagen del micrómetro objeto, bajo las mismas condiciones que se usarán para capturar las imágenes de la muestra a analizar. Mediante este procedimiento se captura la imagen del micrómetro objeto para cada combinación de objetivo-ocular de medida, específicamente en esta aplicación para un aumento de 100X (véase el Anexo 1: Manual del Usuario), con esto tenemos calibrados los píxeles obtenidos de la imagen capturada del micrómetro objeto. De la misma manera y bajo las mismas condiciones con respecto al microscopio metalográfico, capturamos la imagen de la muestra a analizar, y le hacemos corresponder la calibración obtenida de lo obtenido con el micrómetro objeto, con esto logramos que la imagen capturada de la muestra a analizar también este al mismo aumento con el cual se capturó al micrómetro objeto.

En el proceso de calibración de la imagen se debe tener presente algunas consideraciones:

- La imagen visualizada en el ocular del microscopio metalográfico es diferente en aumentos que la que se observa en la pantalla de la computadora, debido al aumento adicional que proporciona el sistema de captura de imágenes que es una cámara de video CCD, además del proporcionado por el monitor mismo. Para determinar los aumentos totales y tenerlos como referencia, se proyecta el micrómetro objeto y se mide la dimensión de la proyección sobre la pantalla. Los aumentos totales obtenidos por todo el sistema de captura de imágenes es de 250X aproximadamente.
- La cámara de video CCD, proporciona una herramienta de zoom regulable según la necesidad de lo que se desea capturar de las muestras a analizar. La acción del zoom solo se muestra en la pantalla de la computadora, y es de un valor de hasta 2X con respecto a lo visualizado en el ocular del microscopio metalográfico. Como se mencionó anteriormente, el aumento al que se esta trabajando es 100X que es el que corresponde a lo observado en el ocular del

microscopio metalográfico. Al tener un zoom regulable en la cámara de video CCD y un aumento fijo de 100X (microscopio metalográfico) se obtienen muchas combinaciones totales para el aumento de la imagen que se obtiene en la pantalla de la computadora, por lo que trabajaremos en esta aplicación sólo con las combinaciones extremas, es decir 1X y 2X más el aumento de 100X, a los que denominaremos en el desarrollo de esta aplicación 100XD (100X Down, correspondiente a un aumento mínimo: 1X) y 100XU (100X Up, correspondiente a un aumento máximo: 2X), las cuales se refieren al alejamiento y al acercamiento relativo del zoom de la cámara de video CCD con respecto a la muestra respectivamente. Esto provoca que lo observado en la pantalla de la computadora, es decir cada imagen capturada de 632x480 píxeles obtenida mediante el microscopio metalográfico y la cámara de video CCD en la pantalla, sea un número mayor de objetos (esferulitas, etc.) a 100XD que lo que se obtiene en la pantalla si se captura a 100XU, obteniendo con ello mayor información disponible para el posterior análisis estadístico puesto que cuando más objetos se incluyan, más representativa será la información que brinde la imagen. De lo antes mencionado la calibración se hace a 100XD.

b. Dificultades de análisis debido a la Captura de Imágenes.

Se presentaron las siguientes dificultades en la captura de imágenes:

- Los producidos en la etapa de pulido como los llamados cola de cometa que dificultaron con ello el reconocimiento de los nódulos de grafito en el momento del análisis. Esto se superó con nuevo procesos de pulido.
- Los problemas relacionados al brillo y contraste de la imagen se controlaron con el software de procesamiento digital de imágenes Image-Pro Plus, manteniendo estas condiciones constantes para cada una de las imágenes. Del mismo modo se usó filtros, que permiten con diferentes posibilidades la mejora de la imagen sin cambiar ostensiblemente la información que contiene.
- La presencia de partículas extrañas no deseadas en la imagen a analizar se supera con el procedimiento manual, el cual nos permite mediante una serie de operaciones sobre la imagen, corregir los aspectos no deseados, y de ese modo prepararla para un análisis correcto que brinde información confiable en el análisis posterior de los nódulos de la muestra de hierro fundido nodular.

4.1.2.2. Procedimiento Manual.

Luego de cargar la imagen que fue previamente almacenada en la memoria de computadora mediante el software Image-Pro Plus, se inicia el preprocesamiento digital de la imagen con el propósito de resaltar los objetos presentes y con ello lograr que la medición de los objetos y los resultados que se obtengan de ellos tengan la máxima precisión. Para ello se procedió de la siguiente manera:

a. Eliminación de objetos no deseados.

Los denominados objetos no deseados o errores visualizados también son captados en la imagen pudiendo ser por ejemplo polvo, grietas, sombras, desfases ópticos, objetos parcialmente capturados, discontinuidades, superposición entre dos o más objetos, huecos en su interior etc., es decir objetos que no son importantes para el análisis de la imagen. Estos se corrigen utilizando herramientas que nos brinda el software usado como la conversión del formato de la imagen, edición de la imagen mediante la manipulación de brillo o contraste y aplicación de funciones morfológicas. De esta manera a la imagen capturada que está en formato *color* (véase la Fig. 4-3) se le aplica un *best fit equalization* para mejorar con esto el contraste entre los nódulos y la matriz y lograr con ello el máximo contraste (véase la Fig. 4-4).

Luego de ello se convierte a un formato *gray level 8* (véase la Fig. 4-5), en la cual cada píxel es digitalizado en 8 bits lo cual le permite obtener 256 posibilidades de niveles de gris, en el cual el valor del color negro es 0 y el valor del color blanco es 255 como se muestra en la figura 4-6.

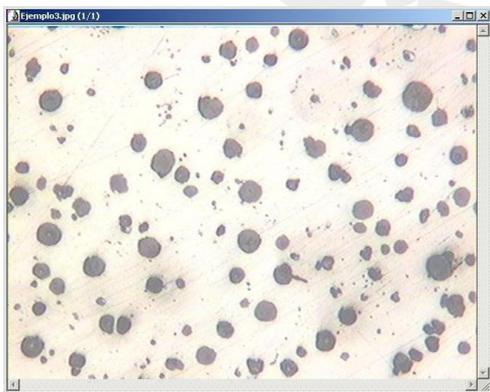


FIG. 4-3.— Imagen con formato *color*.

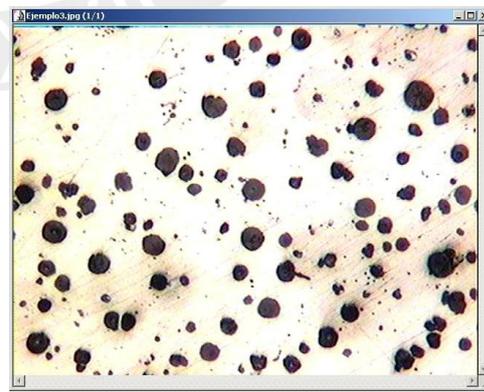


FIG. 4-4.— Imagen con formato color luego de aplicar *best fit equalization*.

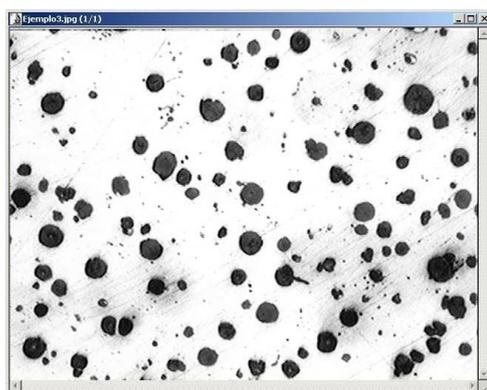


FIG. 4-5. Imagen con formato *gray level 8*.



FIG. 4-6. Las 256 posibilidades de gris (8 bits).

Se tiene ahora una imagen con formato *gray level 8*, en la cual se pueden observar objetos no deseados en gamas de gris. Para corregir esto usamos funciones morfológicas como la función morfológica *dilate* la cual agranda las bordes de los objetos brillosos y erosiona los pequeños objetos negros. Los cambios que producen la aplicación de esta función morfológica se pueden apreciar en la figura 4-7. De la misma manera se presentan objetos que presentan agujeros, esta característica es superada activando *fill holes* para llenar los agujeros antes mencionados. En resumen el problema de la extracción de objetos, está enfocado básicamente a separar los cuerpos que son de interés y prepararlos para su medición y clasificación.

b. Binarización.

En esta etapa, se seleccionan todos aquellos píxeles de la imagen que estuviesen contenidos en un rango determinado de niveles de gris y que correspondieran a las figuras que se desean medir; generándose con ello una imagen compuesta de píxeles detectados (que conforman los objetos deseados o regiones de la imagen a analizar) y los píxeles no detectados (que son el fondo de la imagen). Esta combinación es conocida como imagen binaria (véase Fig. 4-8).

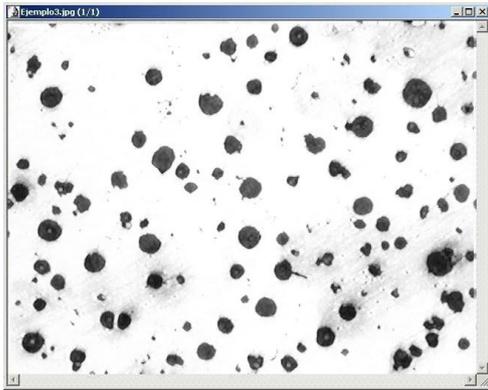


FIG. 4-7.— Imagen *gray level 8*, luego de *dilate*.

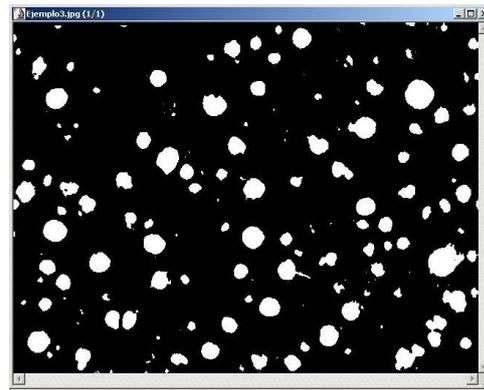


FIG. 4-8.— Imagen binaria previa al análisis.

El tratamiento digital obtenido hasta la imagen final (Fig. 4-8) y la comparación con la imagen inicialmente capturada (Fig. 4-3), nos indican como suficiente lo desarrollado para proceder a la medición de los objetos seleccionados.

c. Medición de objetos.

i. Consideraciones.

Para la medición de los objetos se tuvo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las mediciones realizadas se hicieron en la imagen binaria total (Fig. 4-8), que proviene del preprocesamiento digital de la imagen obtenida directamente de la muestra mediante el sistema de captura de imágenes.

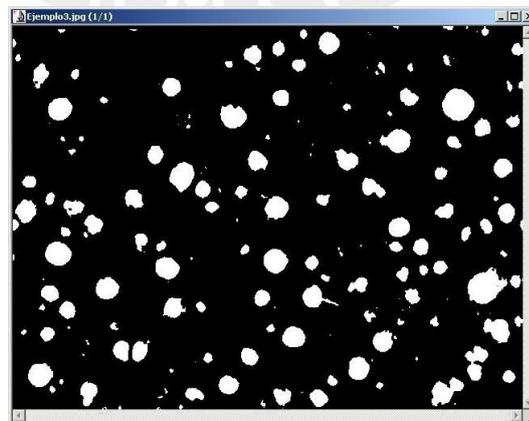


FIG. 4-9.— Imagen binaria total con objetos a analizar.

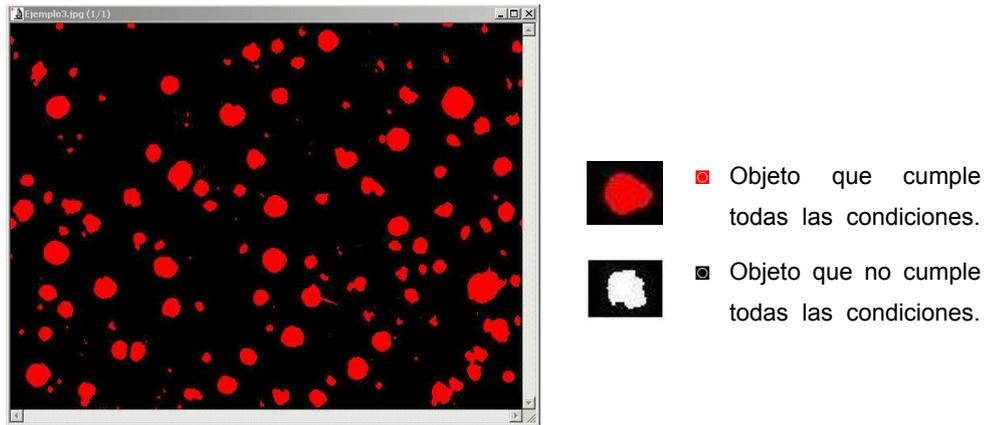


FIG. 4-10.— Imagen binaria total con objetos analizados.

- Para realizar la medición de los objetos se procedió primero a escoger la calibración de la imagen, para ello se seleccionó la calibración 100XD. Esta calibración se refiere a un aumento de 100X proporcionado por el microscopio metalográfico combinado con el zoom a 1X de la cámara de video CCD como se explica detalladamente en la sección 4.1.2.1.
- Los parámetros de medida seleccionados para el análisis de todas las muestras, fueron los siguientes:

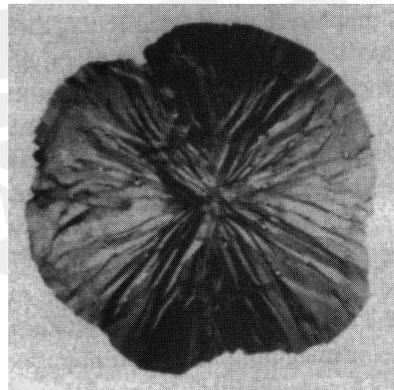


FIG. 4-11.— Esferolita a 1500X. [5]

- Área - *Area*
- Diámetro Promedio - *Diameter (Mean)*
- Redondez - *Roundness*

Este parámetro requiere además de la selección de otros parámetros que permiten obtener una mejor precisión en la medición de la redondez, ya que por defecto se usa otros (*Perimeter2*, *Area*) para hallar dicho valor.

Estos son:

- Perímetro - *Perimeter*
- Área(Polígono) – *Area (Polygon)*

$$\text{Redondez} = \frac{\text{Perímetro}^2}{4 * \pi * \text{Area}}$$

ECUACIÓN 4-1.— Fórmula de la redondez.

- Además de los parámetros antes mencionados que se refieren al análisis de objetos individuales (esferolitas regulares, esferolitas irregulares etc.). También se medirán otros parámetros como cantidad de objetos según área, diámetro promedio etc., así como también porcentajes de las cantidades antes mencionadas sobre el total.

ii. Medición.

La etapa de medición de los objetos, la podemos dividir en varios pasos consecutivos, para lo cual debemos tener en cuenta lo que se muestra en la figura 4-12:



FIG. 4-12.— Leyenda para objetos analizados.

a) Antes y después de análisis.

b) Comparación entre imágenes consecutivas.

- Medición de todos los objetos (esferolitas regulares, esferolitas irregulares, partículas extrañas, polvo en los elementos del microscopio metalográfico y la muestra, inclusiones y todos aquellos objetos capturados por la cámara de video). Todos los objetos de la figura 4-13 son seleccionados como se muestran en la figura 4-1.

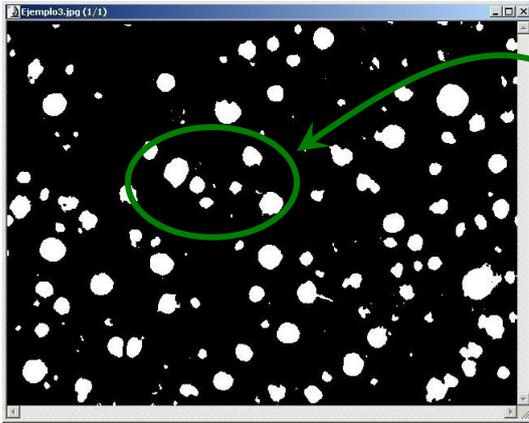


FIG. 4-13.— Imagen binaria total con objetos a analizar.

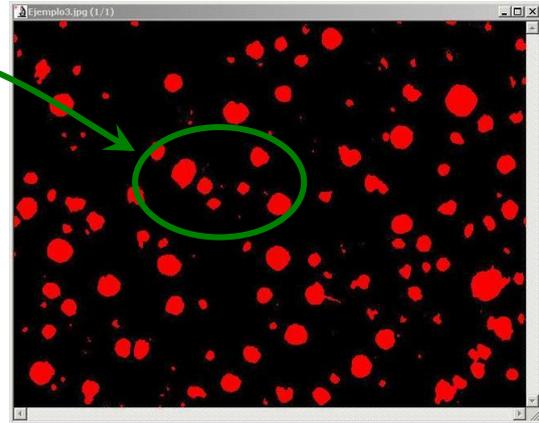


FIG. 4-14.— Imagen binaria total con objetos analizados.

- Aplicación de la herramienta *watershed split* que separa los objetos en racimo, es decir que siendo un grupo de objetos, son medidos y analizados como uno solo, debido a errores característicos en la captura de la imagen y al proceso de selección del rango de píxel que incluye a los objetos a analizar. Luego de esto, el conteo y medición de objetos se actualiza automáticamente, tomando ahora cada objeto separado como uno y con características propias. Los objetos agrupados de la figura 4-15 que están seleccionados son separados como se muestran en la figura 4-16 y a su vez siguen seleccionados pero ahora individualmente.

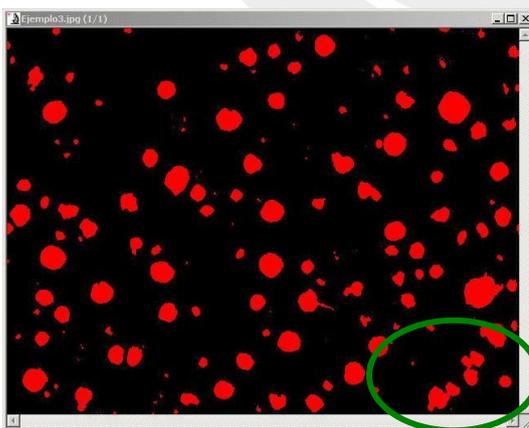


FIG. 4-15.— Imagen binaria total con objetos analizados antes de *watershed split*.

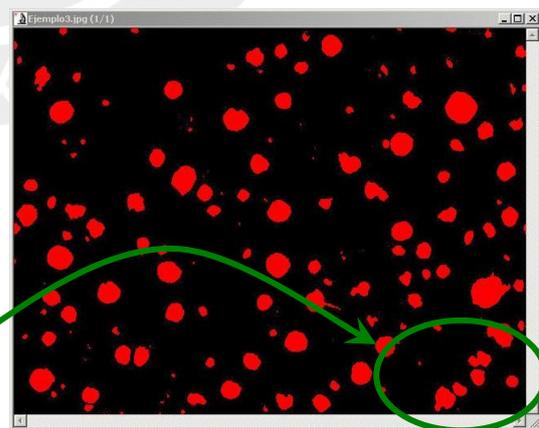


FIG. 4-16.— Imagen binaria total con objetos analizados después de *watershed split*.

- Primer proceso de filtrado de objetos, el cual retira de la lista de objetos contados y medidos a todos aquellos objetos que están en los límites de la imagen captada, y cuya área es parte por los límites de esta. Estos objetos que en la figura 4-17 se muestran seleccionados se muestran ahora como no seleccionados en la figura 4-18.

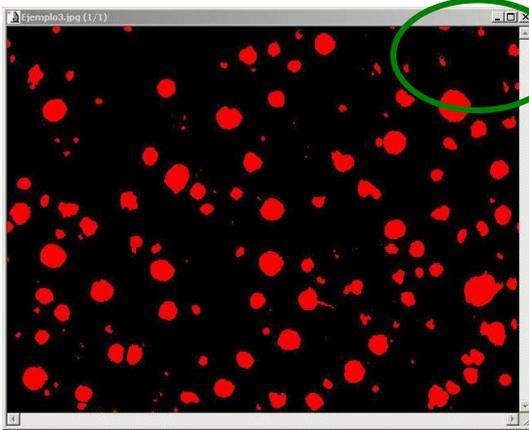


FIG. 4-17.— Imagen binaria total con objetos analizados antes de 1^{er} filtro.

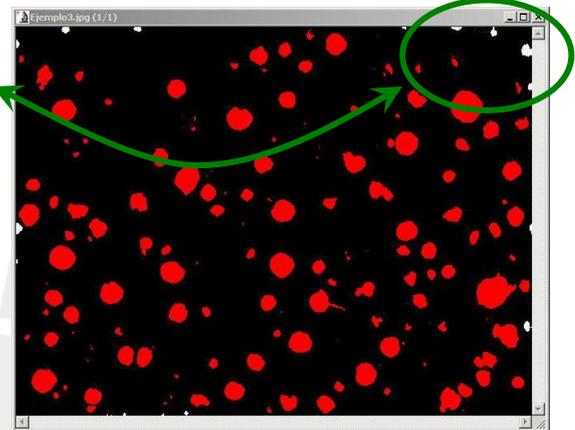


FIG. 4-18.— Imagen binaria total con objetos analizados después de 1^{er} filtro.

- Segundo proceso de filtrado de objetos, el cual retira de la lista de objetos contados y medidos a todos aquellos cuya área es menor que $50\mu\text{m}^2$, considerados en esta aplicación específica como partículas extrañas, que por su cantidad pueden alterar los resultados y el posterior análisis estadístico. Dichos objetos que son retirados se acumulan a los que se lo fueron anteriormente y de la misma manera que lo mostrado en el paso anterior se muestran como no seleccionados en la figura 4-20 en comparación con la figura 4-19, donde si lo están.

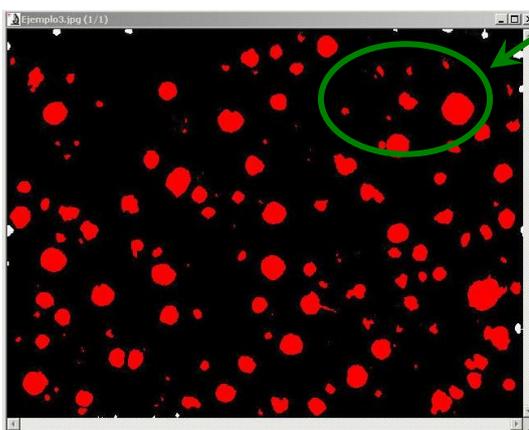


FIG. 4-19.— Imagen binaria total con objetos analizados antes de 2^{do} filtro.

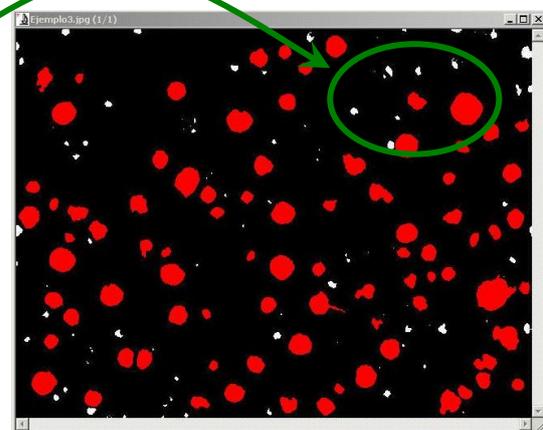


FIG. 4-20.— Imagen binaria total con objetos analizados después de 2^{do} filtro.

- Tercer proceso de filtrado de objetos, el cual nos permitirá conocer el número de objetos denominados esferolitas cuya redondez varía entre 1 y 1.2, con respecto al número total de objetos obtenidos luego del primer proceso de filtrado de objetos. No existen referencias teóricas sobre el límite al cual un objeto que está siendo analizado se le deja de considerar una esferolita, por lo tanto el límite que ponemos en este trabajo, que es 1.2 o 20% de variación permitida sobre una redondez ideal de valor 1, es el resultado básicamente de una inspección visual de una cantidad elevada de objetos, las cuales presentan características geométricas que describen a las esferolitas si y solo si pertenecen a dicho rango, perdiendo características de redondez al acercarse más a dicho límite. Del mismo modo, los objetos filtrados se acumulan a los anteriormente descartados como se muestra en la figura 4-22 en comparación con la figura 4-21.

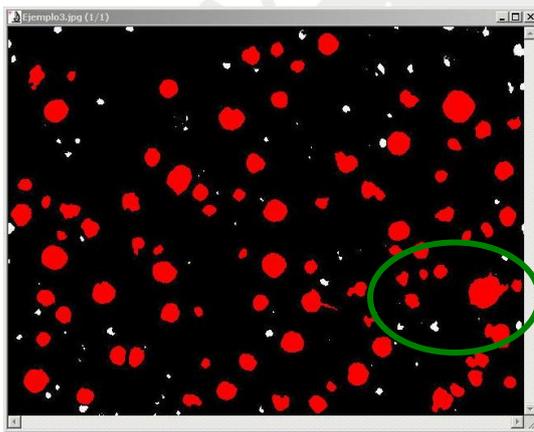


FIG. 4-21.— Imagen binaria total con objetos analizados antes de 3^{er} filtro.

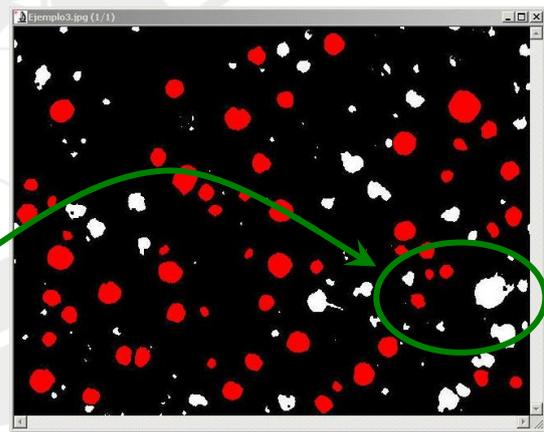


FIG. 4-22.— Imagen binaria total con objetos analizados después de 3^{er} filtro.

- Cuarto proceso de filtrado de objetos, el cual nos permitirá conocer el número de esferolitas, resultado del segundo proceso de filtrado de objetos, que según su diámetro promedio pertenece a un determinado *size class* según ASTM A247 (Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings).

Basándonos en la norma ASTM A247, el procedimiento que usaremos es el siguiente:

- Trabajando en una imagen capturada a 100X mediante el microscopio metalográfico, obtener la medida del diámetro promedio máximo de las partículas de grafito analizados, esto se puede obtener con una regla

milimétrica en el ocular del microscopio , o en nuestro caso mediante el software de análisis de imágenes

- Con el valor del diámetro promedio obtenido, remitirnos a la tabla 4-2 y con ello tenemos el *size class*.
- Sin embargo, la norma ASTM A247 también se refiere al caso de cuando existe más de un *size class* en la muestra de la siguiente manera: Donde se presente una mezcla de uno o más tamaños en la misma muestra, estos pueden ser reportados como porcentajes del área total de grafito presente en la muestra.
- Como en nuestra muestra a analizar se presenta más de un tamaño de esferolita y como el diámetro promedio máximo varía en un rango total muy amplio, nos vemos en la necesidad de crear rangos parciales en torno a los *size class* proporcionados por la norma ASTM A247, de modo que estos rangos parciales tomaran para el reporte; el número de *size class* contenido en ellos, y además, todos aquellos objetos medidos cuyo valor de diámetro promedio máximo este contenido en uno de dichos rangos parciales, tomará también dicho número de *size class*.

Para la determinación de dichos rangos parciales que en este trabajo de tesis representarán a un *size class* determinado se procedió de la siguiente manera:

- De lo observado en la tabla 4-2 proporcionada por ASTM A247 se tiene que el diámetro máximo esta en función de una variable “n” de la forma siguiente:

$$DM = 2^n$$

ECUACIÓN 4-2.— Diámetro máximo.

Donde: DM : Diámetro máximo

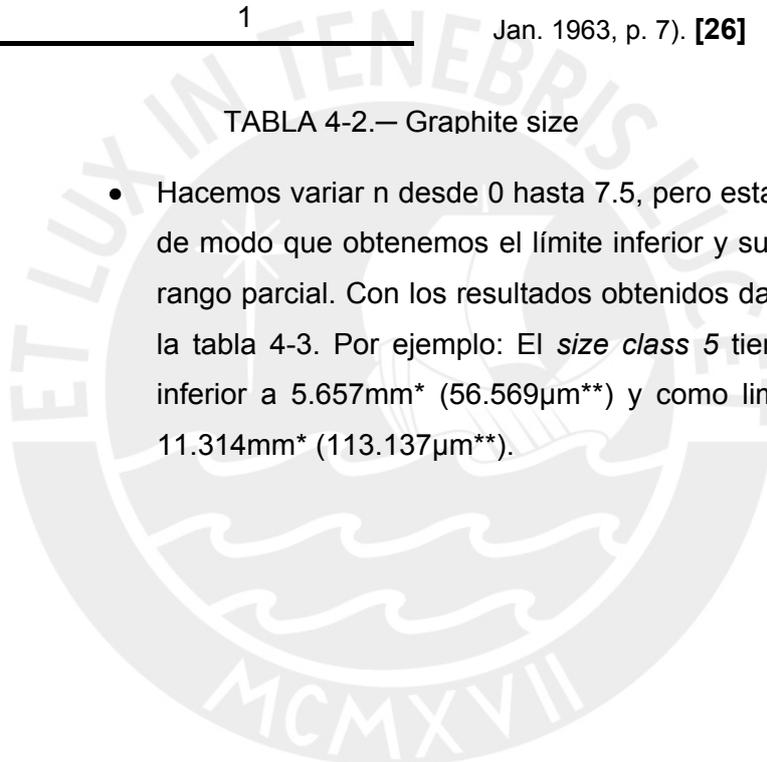
n : Número entero que varía de 0 a 7, correspondientes a las *size class* 8 hasta la *size class* 1, respectivamente.

<i>size class</i>	Maximum Dimension at x 100, mm ^A
1	128
2	64
3	32
4	16
5	8
6	4
7	2
8	1

^A The graduation of sizes shown in each *size class* from the maximum dimension were computer calculated at the National Bureau of Standards using data obtained from actual micrographs (Wyman, L. L., and Moore, G. A., "Quantitative Metallographic Evaluations of Graphite Microstructures," Modern Castings, Vol 43, No. 1 Jan. 1963, p. 7). [26]

TABLA 4-2.— Graphite size

- Hacemos variar n desde 0 hasta 7.5, pero esta vez cada 0.5, de modo que obtenemos el límite inferior y superior de cada rango parcial. Con los resultados obtenidos damos formato a la tabla 4-3. Por ejemplo: El *size class* 5 tiene como límite inferior a 5.657mm* (56.569µm**) y como límite superior a 11.314mm* (113.137µm**).



<i>size class</i>	n	DM(mm)*	DM(μm)**
8	0	1	10
	0.5	1.141	14.142
7	1	2	20
	1.5	2.828	28.284
6	2	4	40
	2.5	5.657	56.569
5	3	8	80
	3.5	11.314	113.137
4	4	16	160
	4.5	22.627	226.274
3	5	32	320
	5.5	45.255	452.548
2	6	64	640
	6.5	90.510	905.097
1	7	128	1280
	7.5	181.019	1810.193

* Se refiere a la medida que se obtendría si la medición se realizaría sobre la imagen a un aumento de 100X y esta dado en mm.

** Se refiere a la medida obtenida de la imagen, que nos proporciona el software que se encuentra calibrada a 100X y en μm.

Ejemplo:

A 100X:

Size Class 5 debe medir 8mm, entonces su medida real es:

$$\frac{8\text{mm}}{100} = 0.08\text{mm}$$

Tenemos entonces:

$$0.08\text{mm} \times \frac{1000\mu\text{m}}{\text{mm}} = 80\mu\text{m}$$

TABLA 4-3.— Imagen binaria total con objetos analizados.

De lo antes mencionado, lo que haremos a continuación es analizar rango por rango, entregándole al software los valores de los rangos parciales, el cual nos remitirá como resultado la cantidad de objetos que pertenezcan a dicho rango además del análisis individual de cada objeto(esferolitas regulares).

- Escogemos primero el rango que va desde 0 hasta 14.142μm de diámetro promedio máximo pertenecientes al *size class* 8.

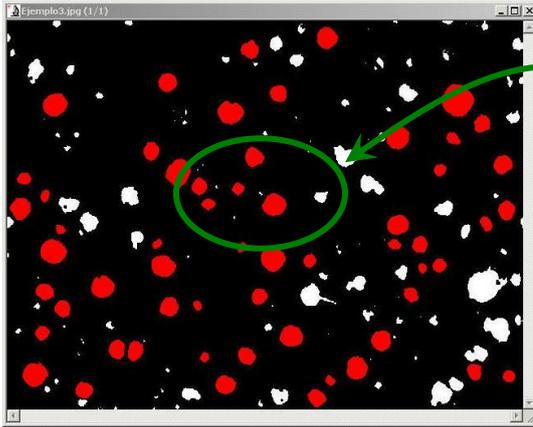


FIG. 4-23.— Imagen binaria total con objetos analizados disponibles para el 1^{er} rango.

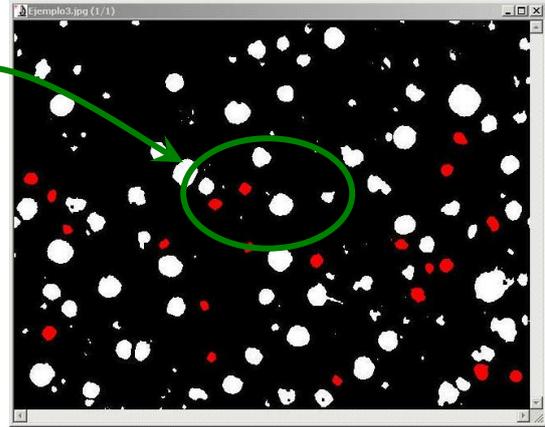


FIG. 4-24.— Imagen binaria total con objetos analizados pertenecientes al size class 8.

- Luego escogemos el rango que va desde 14.142 μ m hasta 28.284 μ m de diámetro promedio máximo pertenecientes ahora al size class 7.

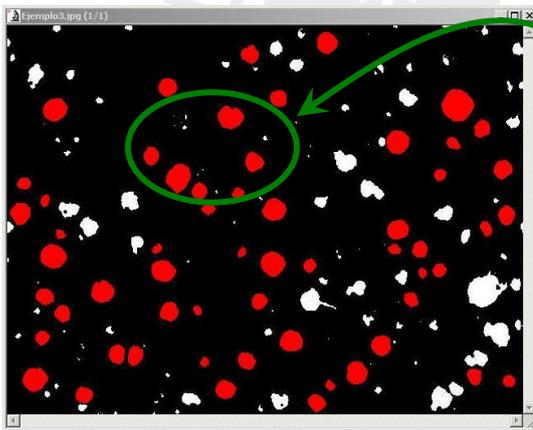


FIG. 4-25.— Imagen binaria total con objetos analizados disponibles para el 2^{do} rango.

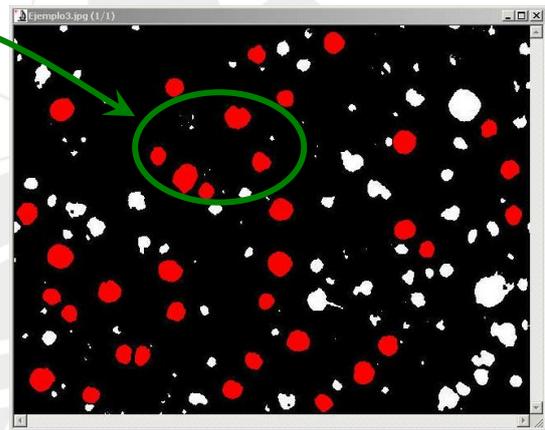


FIG. 4-26.— Imagen binaria total con objetos analizados pertenecientes al size class 7.

- Escogemos ahora el rango que va desde 28.284 μ m hasta 56.569 μ m de diámetro promedio máximo pertenecientes al *size class* 6.

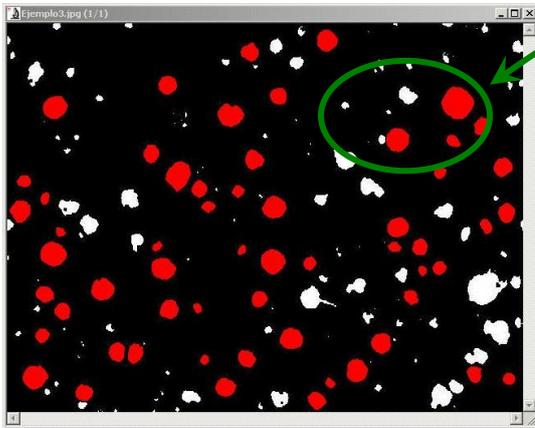


FIG. 4-27.— Imagen binaria total con objetos analizados disponibles para el 3^{er} rango.

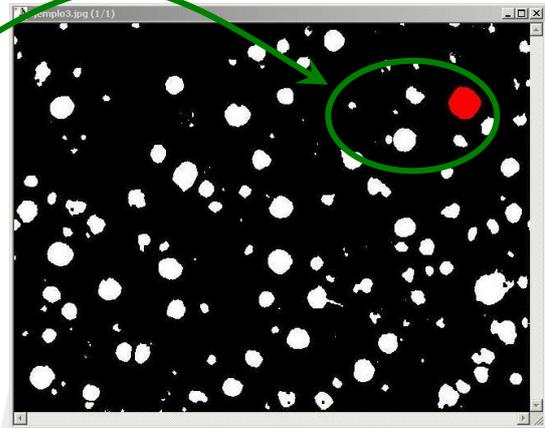


FIG. 4-28.— Imagen binaria total con objetos analizados pertenecientes al *size class* 6.

- Escogemos ahora el rango que va desde 56.569 μ m hasta 113.137 μ m de diámetro promedio máximo pertenecientes al *size class* 5. Como se ve en los gráficos que a continuación se muestran, no se encuentran objetos pertenecientes a este *size class*.

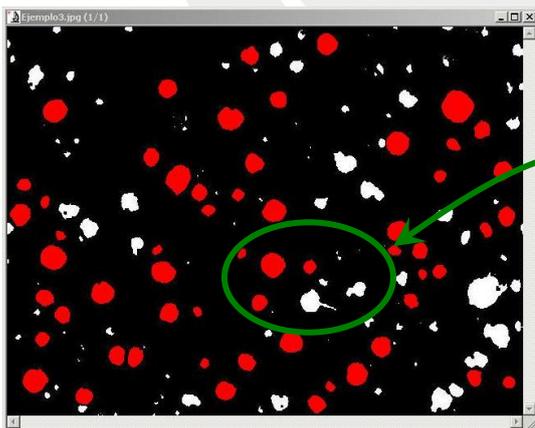


FIG. 4-29.— Imagen binaria total con objetos analizados disponibles para el 4^{to} rango.

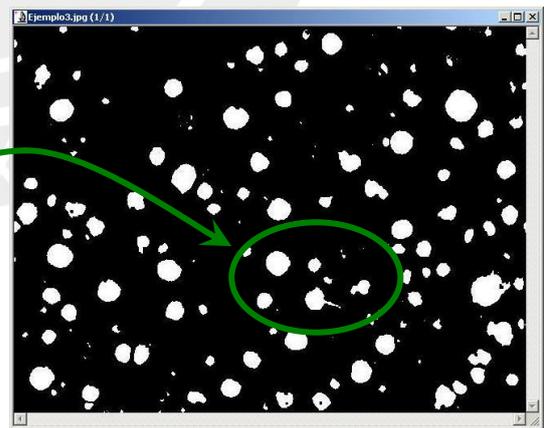


FIG. 4-30.— Imagen binaria total con objetos analizados pertenecientes al *size class* 5.

- De la misma manera, escogemos los rangos que van desde $113.137\mu\text{m}$ hasta $226.274\mu\text{m}$, desde $226.274\mu\text{m}$ hasta $452.548\mu\text{m}$, desde $452.548\mu\text{m}$ hasta $905.097\mu\text{m}$, y finalmente desde $905.097\mu\text{m}$ hasta $1810.193\mu\text{m}$, sin mostrar objetos pertenecientes a ninguno de dichos *size class*
- En la figura 4-31 se muestran aquellos cuerpos que fueron medidos, teniendo en cuenta dicho criterios.



FIG. 4-31.— Imagen binaria total con objetos analizados.

- En la tabla 4-4 se muestra un resumen de lo analizado anteriormente, el número de esferulitas por *size class*.

<i>size class</i> *		Resultados
Rango	Estimado(μm)	
1	1810.193	0
	1280	
2	905.097	0
	640	
3	452.548	0
	320	
4	226.274	0
	160	
5	113.137	0
	80	
6	56.569	1
	40	
7	28.284	32
	20	
8	14.142	21
	10	
	0	

TABLA 4-4.— Número de esferolitas regulares por *size class*.

d. Análisis de Resultados.

Con los resultados obtenidos de las mediciones anteriores y usando una hoja de cálculo, tenemos para la imagen que se esta utilizando como ejemplo:

Ejemplo 3	
Total None	187
Total None W	190
Total All Borders	168
Total All Borders W	171
Area (μm^2)	> 50
Accepted	85
Rejected	86
%Accepted	49.708
%Rejected	50.292
Roundness	1 – 1.2
Accepted	54
Rejected	31
%Accepted	63.529
%Rejected	36.471
% Esferolitas	63.529
Tamaño Esferolitas	Número Esferolitas x Size Class
<i>Size Class</i>	
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	1
7	32
8	21
Número Esf. Total	54
Tamaño Esferolitas	Porcentaje Esferolitas x Size Class
<i>Size Class</i>	
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	1.852
7	59.529
8	38.889

TABLA 4-5.— Tabla de resultados x imagen

Donde:

Total None: Representa el número total de objetos que están presentes en la imagen y que han sido analizados por el software, ya sea que estos se encuentren completa o parcialmente incluidos en ella. En nuestras imágenes podrían representar esferolitas regulares, esferolitas irregulares, esferolitas distorsionadas, esferolitas estalladas, esferolitas en racimo (esferolitas agrupadas que por su cercanía son analizadas como un solo objeto), incrustaciones, partículas extrañas, polvo etc.

Total None Watershed Split: Representa el número total de objetos que están presentes en la imagen y que han sido analizados por el software, ya sea que estos objetos se encuentren completa o parcialmente incluidos en ella, incluyendo además de los objetos mencionados en *total none*, a aquellos que han sido separados y que antes formaban las esferolitas en racimo.

El *watershed split* analiza automáticamente cada objeto contado y separa los objetos que por alguna razón se encuentran agrupados y que anterior a este proceso son contados como uno solo (esferolitas en racimo). El método usado por *watershed split* es erosionar los objetos hasta desaparecerlos, luego los expande nuevamente tanto como puedan mientras no se toquen.

Total All Borders: Representa el número de objetos medidos que están incluidos en la imagen, y que de ninguna manera son cortados por los límites de la esta. En nuestras imágenes podrían representar esferolitas regulares, esferolitas irregulares, esferolitas distorsionadas, esferolitas estalladas, esferolitas en racimo (esferolitas agrupadas que por su cercanía son analizadas como un solo objeto), incrustaciones, partículas extrañas, polvo etc.

Total All Borders Watershed Split: Representa el número de objetos medidos que están incluidos en la imagen, y que de ninguna manera son cortados por los límites de la esta, incluyendo además de los objetos mencionados en *total all borders*, a aquellos que han sido separados y que antes formaban las esferolitas en racimo, habiéndole aplicado para esto el *watershed split*.

Area: Representa el rango en el cual los objetos analizados provenientes de *total all borders watershed split* son aceptados como validos. El rango usado para validar estos objetos es todos aquellos cuyas áreas sean mayores o iguales a $50\mu\text{m}^2$.

- Accepted: Representa el número de objetos medidos que están dentro del rango dado en *area*, pudiendo ser estos esferolitas regulares, esferolitas irregulares o esferolitas distorsionadas.
- Rejected: Representa el número de objetos medidos que están fuera del rango dado en el *area*, siendo estos todos los objetos con áreas menores a $50\mu\text{m}^2$,
- %Accepted: Representa el porcentaje de objetos *accepted* sobre el total de objetos disponibles *total all borders watershed split*.
- %Rejected: Representa el porcentaje de objetos *rejected* sobre el total de objetos disponibles *total all borders watershed split*.

Roundness: Representa el rango en el cual los objetos analizados provenientes de *Area: Accepted* son aceptados como validos. El rango usado para validar estos objetos es todos aquellos cuyo valor de redondez sea mayor que 1 pero menor o igual a 1.2.

- Accepted: Representa el número de objetos medidos que están dentro del rango dado en *roundness*, siendo estos objetos considerados como esferolitas regulares.
- Rejected: Representa el número de objetos medidos que están fuera del rango dado en *roundness*, siendo estos los considerados como esferolitas irregulares, esferolitas distorsionadas, etc.
- %Accepted: Representa el porcentaje de objetos *accepted* sobre el total de objetos disponibles *Area: Accepted*, y representa el %esferolitas, requerido para el reporte según la norma ASTM A247.
- %Rejected: Representa el porcentaje de objetos *rejected* sobre el total de objetos disponibles *Area: Accepted*, y representa el porcentaje de objetos que no son considerados como esferolitas regulares con respecto al total de objetos con características considerables que constituyen la imagen.

%Esferolitas: Representa el porcentaje de objetos medidos que están presentes en la imagen y que están incluidos en los rangos determinados en *Area* y *Roundness* con respecto a la cantidad dada en *Area: Accepted*. Este %esferolitas

representa el porcentaje de esferolitas regulares con respecto al total de objetos con características considerables que constituyen la imagen.

Tamaño Esferolitas: Nos muestra las diferentes *size class* a las que pueden pertenecer los objetos medidos anteriormente, que están incluidos en los rangos dados en *Area* y *Roundness*, es decir los objetos dados en *Roundness: Accepted* o esferolitas regulares. El tamaño de las esferolitas regulares esta dado según 8 *size class*, los cuales están en función del diámetro promedio o *diameter (mean)* como se muestra en la tabla 4-2.

- Size Class: Nos muestra cada uno de los 8 *size class* a los que pueden pertenecer los objetos dados en *Roundness: Accepted* es decir las esferolitas regulares.

Número Esferolitas Total: Representa el número total de objetos medidos que pertenecen a cada una de las 8 *size class*, o número total de esferolitas regulares.

Número Esferolitas x Size Class: Representa el número de objetos medidos que pertenecen a cada una de las 8 *size class*, según su diámetro promedio o *Diameter (mean)* como se muestra en la tabla 4-3.

Porcentaje Esferolitas x Size Class: Representa el porcentaje de objetos medidos(esferolitas regulares) que pertenecen a cada una de las 8 *size class*, según su diámetro promedio o *diameter (mean)*, con respecto al total de objetos que están incluidos en los rangos dados en *area* y *roundness*, es decir los objetos dados en *Roundness : Accepted* o número esferolitas total.

De todo lo anterior, y tomando los valores obtenidos de la tabla 4-5 tenemos que nuestra muestra de hierro fundido nodular posee para el análisis de la imagen que se toma como ejemplo:

- 0% *size class 1*
- 0% *size class 2*
- 0% *size class 3*
- 0% *size class 4*
- 0% *size class 5*

- 1.852% *size class 6*
- 59.259% *size class 7*
- 38.889% *size class 8*

Además posee:

- 63.529% Esferolitas regulares
- 36.471% Esferolitas irregulares

4.1.2.3 Análisis Estadístico.

En la sección 4.1.2.2.d se mostró el análisis de resultados para una sola imagen, sin embargo estos no son suficientes para poder caracterizar una muestra, pues dentro de ella se podrían hacer un número elevado tomas, y al analizarlas podríamos obtener resultados que difieren uno del otro, por lo tanto el procedimiento a seguir en este trabajo de tesis es:

- Hacer el análisis a 7 imágenes, método desarrollado para un uso practico en el Laboratorio de Materiales, para caracterizar muestras por comparación y en forma visual, usando para ello lo recomendado en la norma ASTM A247 principalmente en su ítems:
 - 7. Classification of Graphite Form with Chart.
 - 8. Classification of Graphite Distribution with Chart.
 - 9. Classification of Graphite Size by Chart, en las cuales por medio de Laminas (Plate I, Plate II y Plate III) y comparando la información que se brinda en ellas con lo que se observa en el microscopio metalográfico se procede a caracterizar las muestras.
 - 10. Report of Graphite Microstructure.
- Este método se desarrollará esta vez con el software de análisis de imágenes, para luego con estos resultados obtener una desviación estándar estimada, que será la que se use para hallar el tamaño de muestra necesario para caracterizar nuestra muestra dado un nivel de confianza y una precisión deseada. A este método lo denominaremos Método 7. El valor de la estimación de la desviación estándar según el Método 7, consiste en trabajar

con 7 imágenes, eliminar los valores extremos, es decir el mayor y el menor, y trabajar estadísticamente con los datos restantes.

- Con la desviación estándar estimada obtenida del Método 7, hallamos el tamaño de muestra necesario para caracterizar nuestra muestra dado un nivel de confianza y una precisión deseada. Para ello usamos la ecuación 4-3.
- Hacemos el análisis a cada una de las imágenes que determina el tamaño de muestra. Con los resultados y el análisis estadístico obtenido de este método, se caracterizará a la muestra.

El área de la muestra de la cual se capturan las imágenes es aproximadamente $78,53\text{mm}^2$ (área circular de diámetro 10mm) lo que nos permite obtener aproximadamente 450 tomas, siendo las dimensiones de cada imagen capturada aproximadamente $500 \times 350 \mu\text{m}$ de la muestra, lo que hace que el área de cada imagen capturada sea aproximadamente $175000 \mu\text{m}^2$

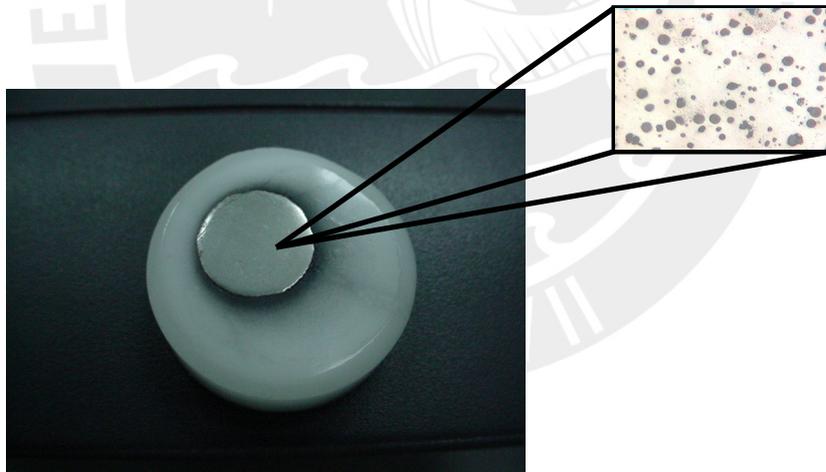


FIG. 4-32.— Muestra de hierro fundido nodular

a. Análisis del Método 7.

Del mismo modo como se trabajó para hacer el análisis de imagen de una toma en la sección 4.1.2.2.c, se trabaja ahora para cada una de las 7 imágenes tomadas arbitrariamente de la muestra a caracterizar. Los resultados se obtienen de la misma manera que la tabla 4-5 para cada imagen, y son resumidos en la tabla 4-6.

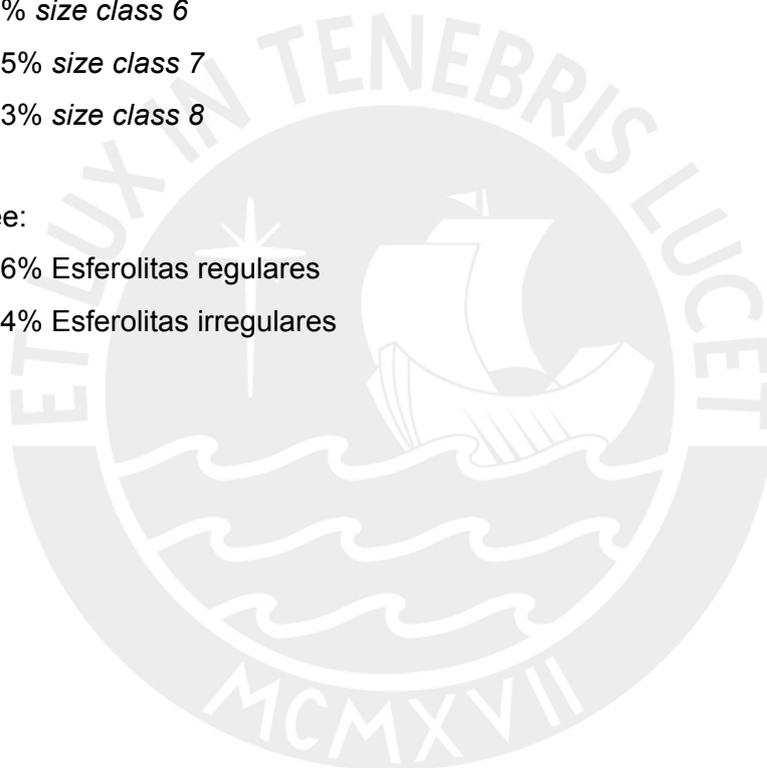
i. Análisis de Resultados del Método 7.

De todo lo anterior, y tomando los valores obtenidos de la tabla 4-6 tenemos que nuestra muestra de hierro fundido nodular posee para el análisis según el Método 7 los siguientes resultados:

- 0% *size class 1*
- 0% *size class 2*
- 0% *size class 3*
- 0% *size class 4*
- 0% *size class 5*
- 1.294% *size class 6*
- 51.625% *size class 7*
- 47.303% *size class 8*

Además posee:

- 66.326% Esferolitas regulares
- 33.674% Esferolitas irregulares



	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7			
Total None	159	149	187	183	164	189	177			
Total None W	172	162	190	186	171	197	190			
Total All Borders	146	136	168	166	150	176	168			
Total All Borders W	158	149	171	179	156	184	180			
Area (μm^2)	> 50									
Accepted	87	89	85	92	78	87	103			
Rejected	71	60	86	87	78	97	77			
%Accepted	55.063	59.732	49.708	51.397	50	47.283	57.222			
%Rejected	44.937	40.268	50.292	48.603	50	52.717	42.778			
Roundness	1 – 1.2									
Accepted	56	58	54	67	54	59	67	Desviación Estándar	Promedio	
Rejected	31	31	31	25	24	28	36			
%Accepted	64.368	65.169	63.529	72.826	69.231	67.816	65.049			
%Rejected	35.632	34.831	36.471	27.174	30.769	32.184	34.951			
% Esferolitas	64.368	65.169	63.529	72.826	69.231	67.816	65.049	2.090	66.326	
Tamaño Esferolitas										
	Número Esferolitas x Size Class									
Size Class										
1	0	0	0	0	0	0	0			
2	0	0	0	0	0	0	0			
3	0	0	0	0	0	0	0			
4	0	0	0	0	0	0	0			
5	0	0	0	0	0	0	0			
6	0	1	1	2	0	3	0			
7	31	28	32	34	28	28	36			
8	25	29	21	31	26	28	31			
Número Esf. Total	56	58	54	67	54	59	67	Desviación Estándar	Promedio	
Tamaño Esferolitas										
	Porcentaje Esferolitas x Size Class									
Size Class										
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
6	0	1.724	1.852	2.985	0	5.085	0	1.295	1.294	
7	55.357	48.276	58.59	50.746	51.852	47.458	53.731	2.726	51.625	
8	44.643	50	38.889	46.269	48.148	47.458	46.269	1.339	47.303	

TABLA. 4-6.— Tabla de resultados x imagen

b. Tamaño de Muestra Necesario.

El tamaño de muestra necesario se refiere a la mínima cantidad de imágenes que debemos analizar, de modo que los resultados que se obtengan de dichos análisis, nos permitan una caracterización representativa de la muestra que estamos analizando.

i. Obtención.

Ahora debemos hallar el tamaño de muestra necesario. Esta tendrá un nivel de confianza del 99.7%, además queremos obtener una estimación del porcentaje medio de esferolitas por *size class*, que este dentro de $\pm 2\%$ del porcentaje medio verdadero de esferolitas por *size class*. Asumiremos que tenemos una estimación de “s” cuyos valores se muestran en la tabla 4-7, obtenidos del Método 7, según lo mencionado anteriormente. Para obtener el tamaño de la muestra requerido hallamos n de la ecuación 4-3.

$$n = \frac{a^2 * s^2}{p^2}$$

ECUACIÓN 4-3.— Tamaño de muestra necesario

Donde:

- n : Tamaño de la muestra
- a : Número entero que depende del nivel de confianza
 - 68% → 1
 - 95% → 2
 - 99.7% → 3
- s : Estimación de la desviación estándar
- p : Precisión

Usando una hoja de cálculo, como se muestra en la tabla 4-7, obtenemos el tamaño de muestra necesario, dados los requerimientos antes mencionados. Por lo tanto, habiendo realizado el análisis a cada una de las 7 imágenes del Método 7 y en función de ellos tenemos la tabla 4-7.

Por lo tanto de lo obtenido en esta tabla, tenemos que un tamaño de muestra necesario igual a 17 nos asegura una precisión de $\pm 2\%$, si se toma los valores dados, tanto en el %esferolitas como en el porcentaje por *size class* de esferolitas. Este número de tomas asegura largamente los requerimientos para las *size class* presentes, es decir *size class 6*, *size class 7*, *size class 8* y para el %esferolitas.

Como vemos tenemos que analizar por lo menos 17 imágenes de las aproximadamente 450 posibles, por lo que hallamos el factor de corrección con la ecuación 4-4:

$$F.C. = \sqrt{\frac{N-n}{N-1}}$$

ECUACIÓN 4-4.— Factor de corrección
debido al tamaño de la población

Donde

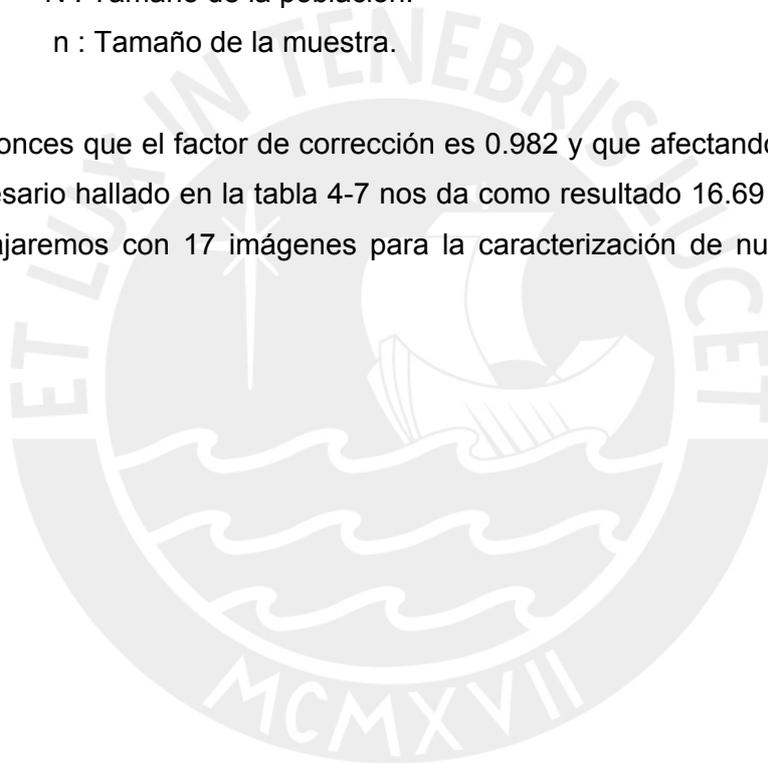
F.C. : Factor de corrección debido al tamaño de la población

N : Tamaño de la población.

n : Tamaño de la muestra.

Tenemos entonces que el factor de corrección es 0.982 y que afectando al tamaño de muestra necesario hallado en la tabla 4-7 nos da como resultado 16.69 imágenes, por lo tanto trabajaremos con 17 imágenes para la caracterización de nuestra muestra.

[17]



	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7						
Total None	159	149	187	183	164	189	177						
Total None W	172	162	190	186	171	197	190						
Total All Borders	146	136	168	166	150	176	168						
Total All Borders W	158	149	171	179	156	184	180						
Area (μm^2)	> 50												
Accepted	87	89	85	92	78	87	103						
Rejected	71	60	86	87	78	97	77						
%Accepted	55.063	59.732	49.708	51.397	50	47.283	57.222						
%Rejected	44.937	40.268	50.292	48.603	50	52.717	42.778						
Roundness	1 – 1.2												
Accepted	56	58	54	67	54	59	67	Desviación Estándar	Precisión	Tamaño de Muestra Necesario			
Rejected	31	31	31	25	24	28	36						
%Accepted	64.368	65.169	63.529	72.826	69.231	67.816	65.049						
%Rejected	35.632	34.831	36.471	27.174	30.769	32.184	34.951						
% Esferolitas	64.368	65.169	63.529	72.826	69.231	67.816	65.049				2.090	2	9.824
Tamaño Esferolitas													
Número Esferolitas x Size Class													
Size Class													
1	0	0	0	0	0	0	0						
2	0	0	0	0	0	0	0						
3	0	0	0	0	0	0	0						
4	0	0	0	0	0	0	0						
5	0	0	0	0	0	0	0						
6	0	1	1	2	0	3	0						
7	31	28	32	34	28	28	36						
8	25	29	21	31	26	28	31						
Número Esf. Total	56	58	54	67	54	59	67	Desviación Estándar	Precisión	Tamaño de Muestra Necesario			
Tamaño Esferolitas													
Porcentaje Esferolitas x Size Class													
Size Class													
1	0	0	0	0	0	0	0				0	2	0
2	0	0	0	0	0	0	0				0	2	0
3	0	0	0	0	0	0	0				0	2	0
4	0	0	0	0	0	0	0				0	2	0
5	0	0	0	0	0	0	0				0	2	0
6	0	1.724	1.852	2.985	0	5.085	0				1.295	2	3.771
7	55.357	48.276	58.59	50.746	51.852	47.458	53.731	2.726	2	16.724			
8	44.643	50	38.889	46.269	48.148	47.458	46.269	1.339	2	4.035			

TABLA 4-7.— Tabla de resultados x imagen



ii. Análisis de Imágenes.

Procedemos ahora a analizar cada una de las imágenes que determina el tamaño de muestra necesario. Luego de realizar el análisis a cada una de las 17 imágenes de la muestra requerida para obtener una estimación del porcentaje medio de esferolitas por *size class*, con un nivel de confianza del 99.7%, que esta dentro de $\pm 2\%$ del porcentaje medio verdadero de esferolitas por *size class*, obtenemos los resultados, los cuales se muestran en la tabla 1.7a y en la tabla 1.7b.

iii. Análisis de Resultados para el Tamaño de Muestra Necesario.

Luego de realizar el análisis a 17 imágenes obtenidas de la muestra de hierro fundido nodular ferrítico cuyos resultados se muestran en las tabla 4-8a y 4-8b, obtenemos los siguientes valores:

- 0% *size class 1*
- 0% *size class 2*
- 0% *size class 3*
- 0% *size class 4*
- 0% *size class 5*
- 1.568% *size class 6*
- 50.057% *size class 7*
- 48.375% *size class 8*

Además posee:

- 67.792% esferolitas regulares
- 32.208% esferolitas irregulares

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
Total None	171	162	167	193	179	182	151	138	175	188
Total None W	180	174	178	202	187	197	168	148	183	203
Total All Borders	156	150	145	172	168	166	139	123	164	166
Total All Borders W	161	161	154	180	176	181	156	133	172	181
Area (μm^2)	> 50									
Accepted	92	88	88	88	84	81	100	76	78	99
Rejected	69	73	66	92	92	100	56	96	96	82
%Accepted	57.143	54.658	57.143	48.889	47.727	44.751	64.103	44.186	44.186	54.696
%Rejected	42.857	45.342	42.857	51.111	52.273	55.249	35.897	55.814	55.814	45.304
Roundness	1 – 1.2									
Accepted	62	59	63	63	57	52	68	52	52	74
Rejected	30	29	25	25	27	29	32	24	24	25
%Accepted	67.391	67.045	71.591	71.591	67.857	64.198	68	68.421	68.421	74.747
%Rejected	2.609	32.955	28.409	28.409	32.143	35.802	32	31.579	31.571	25.253
% Esferolitas	67.391	67.045	71.591	71.591	67.857	64.198	68	69.421	68.421	74.747
Tamaño Esferolitas	Número Esferolitas x Size Class									
Size Class										
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	1	3	1	0	0	0	1	0
7	30	32	27	28	34	29	33	35	26	31
8	32	27	34	32	22	23	35	19	25	43
Número Esf. Total	62	59	62	63	57	52	68	54	52	74
Tamaño Esferolitas	Porcentaje Esferolitas x Size Class									
Size Class										
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	1.613	4.762	1.754	0	0	0	1.923	0
7	48.387	54.327	43.237	44.444	59.649	55.769	48.529	64.815	50	41.892
8	51.613	45.763	54.839	50.794	38.596	44.231	51.471	35.185	48.077	58.108

TABLA. 4-8a.— Tabla de resultados: Tamaño de muestra necesario (Imagen1 a Imagen 10). Continua.



	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	
Total None	195	170	151	164	169	171	167	
Total None W	210	188	163	179	179	183	181	
Total All Borders	174	159	137	146	54	155	152	
Total All Borders W	187	172	146	161	164	166	165	
Area (μm^2)	> 50							
Accepted	101	94	82	93	85	84	91	
Rejected	86	78	64	68	79	82	74	
%Accepted	54.011	54.651	56.164	57.764	51.829	50.602	55.152	
%Rejected	45.989	45.349	43.836	42.236	48.171	49.398	44.848	
Roundness	1 – 1.2							
Accepted	77	63	56	62	56	50	60	
Rejected	24	31	26	31	29	34	31	
%Accepted	76.238	67.021	68.293	66.667	65.882	59.524	65.934	Promedio (%)
%Rejected	23.762	32.979	31.707	33.333	34.118	40.476	34.066	
% Esferolitas	76.238	67.021	68.293	66.667	65.882	59.524	65.934	67.792
Tamaño Esferolitas	Número Esferolitas x Size Class							Promedio
Size Class								
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	1	0	4	2	0	3	0.941
7	32	33	26	32	34	21	27	30
8	45	29	30	26	20	29	30	29.471
Número Esf. Total	77	63	56	62	56	50	60	60.412
Tamaño Esferolitas	Porcentaje Esferolitas x Size Class							Promedio (%)
Size Class								
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	1.587	0	6.452	3.571	0	5	1.568
7	41.558	52.381	46.429	51.613	60.714	42	45	50.057
8	58.442	46.032	53.571	41.935	35.714	58	50	48.375

TABLA 4-8b.— Tabla de resultados: Tamaño de muestra necesario
(Imagen10 a Imagen 17)



iv. Reporte.

Según lo recomendado por la norma ASTM A247, para el reporte de la caracterización de muestras con microestructuras de grafito en hierros fundidos se deben tener en cuenta lo siguiente:

1. Identificación de la muestra.
2. Tipo o tipos de la forma del grafito.
3. Distribución del grafito.
4. *Size Class* del grafito.

De lo antes mencionado, el reporte de la caracterización de nuestra muestra es:

Hierro Fundido Nodular:

- 1.6% VI 6*
- 50% VI 7
- 48.4% VI 8

Además posee aproximadamente:

- 67.8% esferolitas regulares
- 1 esferolita *size class 6* / Area de imagen**
- 30 esferolitas *size class 7* / Area de imagen**
- 29 esferolitas *size class 8* / Area de imagen**

*1.6% VI 6 corresponde a 1.6% de grafito de forma esferoidal (*Form VI, Plate I, ASTM A247*) y tamaño del *size class 6* (*Size Class 6, Plate III o Table 1, ASTM A247*).

**Area de imagen corresponde a $175000\mu\text{m}^2$.

4.2 Aplicación 2: Ensayo de Impacto Charpy – Superficie de Fractura

La segunda aplicación que se va a desarrollar usando el Sistema de Captura, Procesamiento y Análisis de Imágenes aplicado esta vez a la caracterización macroestructural de materiales, es el relacionado al Ensayo de Impacto Charpy, en el cual se desarrollará un procedimiento para la evaluación de la superficie de fractura tomando como referencia la norma ASTM E23. Para ello se hace una breve introducción teórica de modo que pueda ayudar en la comprensión de la aplicación.

4.2.1 Ensayo de Impacto Charpy – Superficie de Fractura

La fractura de materiales de ingeniería es casi siempre un hecho indeseable por varias razones las que incluyen, la seguridad de vidas humanas, pérdidas económicas, y la interferencia con la disponibilidad de productos y servicios.

Aun cuando las causas de fractura y el comportamiento de materiales pueden ser conocidos, la prevención de fracturas puede ser difícil de garantizar. Las causas usuales de ello son la selección de materiales, procesado y diseños inadecuados de los componentes o su mal manejo. Es responsabilidad del ingeniero anticipar y planificar las posibles facturas y, en el caso de que ocurran, determinar sus causas y tomar medidas preventivas apropiadas para futuros incidentes.

Las típicas clases de fracturas son fractura dúctil, fractura frágil, fractura por fatiga, fractura por Creep y fractura debida al medio ambiente.

Las fractura simple es la separación de un cuerpo en dos o mas trozos como respuesta a una tensión que puede ser estática (constante o variando lentamente con el tiempo) y a temperaturas que son bajas en relación a la temperatura de fusión del material. Las tensiones aplicadas pueden ser de tracción, compresión, de corte o torcionales.

Los tipos de fracturas típicos son dúctiles y frágiles. Esta clasificación esta basada en al capacidad del material a experimentar deformación plástica. Los materiales dúctiles típicamente exhiben una sustancial deformación plástica, con alta absorción de energía antes de la fractura. Por otro lado, hay una pequeña deformación plástica y una baja absorción de energía en la fractura frágil.

Cualquier proceso de fractura involucra dos etapas, iniciación de la fisura y su propagación como respuesta a las tensiones impuestas. El tipo de fractura es altamente dependiente de los mecanismos de propagación de la fisura. La fractura dúctil esta caracterizada por una gran deformación plástica en al vecindad de la punta de fisura.

Además, el proceso se lleva a cabo relativamente lento a medida que la fisura se extiende. Así se dice que la fisura es estable. Esto significa que se resiste a cualquier

propagación a menos que haya un incremento en las tensiones aplicadas. Además generalmente se apreciara un incremento grosero en la deformación en sus superficies de fractura.

Por otro lado para la fractura frágil, la fisura se puede propagar extremadamente rápido (300 a 2000 m/s) con muy poca deformación plástica. Tales fisuras se llaman inestables y su propagación, una vez comenzada, continuará espontáneamente sin un incremento en las tensiones aplicadas. Se aclara que también pueden existir inestabilidades dúctiles.

La fractura dúctil es casi preferible por dos razones. Primero, la fractura frágil ocurre repentina y catastróficamente sin ninguna advertencia, consecuencia de la espontánea rápida y propagación de la fisura. Por otro lado, en la fractura dúctil la presencia de deformación plástica da aviso que la fractura será inminente, permitiendo que se tomen medidas preventivas.

La segunda, es que se requiere mayor energía para inducir la fractura dúctil por los que los materiales dúctiles son generalmente más tenaces. Bajo la acción de una tensión de tracción, la mayoría de los metales son dúctiles, mientras que los cerámicos son notablemente frágiles.

4.2.1.1. Fractura Frágil.

La fractura frágil es una particularidad de los materiales que tienen estructura cristalina cúbica de cuerpo centrado (BCC) y hexagonal., Estos materiales tienen suficiente ductilidad alrededor de la temperatura ambiente, pero se vuelven frágiles a bajas temperaturas.

Las superficies de fractura frágil esta caracterizada por dos tipos de marcas llamadas “V shaped chevron” y “river patterns” como se muestran en las figuras 4-33 y 4-34 respectivamente.



FIG. 4-33.— Marcas de V chevron características.



FIG. 4-34.— Patrones tipo “river patterns” característicos de la fractura frágil.

La dirección de movimiento de la fisura es aproximadamente perpendicular a la dirección de las tensiones aplicadas y da una superficie de fractura relativamente plana.

Para la mayoría de los materiales cristalinos frágiles, la propagación de la fisura corresponde a sucesivas y repetidas roturas de los enlaces atómicos a lo largo de planos cristalinos específicos. A este proceso se le conoce con el nombre de clivaje. Este tipo de fractura se dice que es transgranular debido a que las fisuras atraviesan los granos.

Macroscópicamente, la superficie de la fractura tiene una textura granular a facetada como el resultado de cambios en la orientación de los planos de clivaje de un grano a otro. Esta característica es más evidente en una micrografía electrónica de barrido.

En algunas aleaciones, la propagación de la fisura se da a lo largo de los bordes de grano, esta fractura se denomina intergranular. En una micrografía electrónica de barrido que muestra una típica fractura intergranular, se puede observar la naturaleza tridimensional de los granos. Este tipo de fractura normalmente se produce luego de algún proceso que debilita o fragiliza la región de bordes de grano.

La fractura frágil ha ocurrido en gran cantidad de estructuras soldadas tales como barcos, puentes, recipientes a presión, tuberías.

Como resultado de la investigación detallada de la causa y medidas preventivas de la fractura frágil, se encontró que las siguientes tres condiciones deben presentarse simultáneamente:

1. La existencia de un concentrador de tensiones
2. La existencia de tensiones de tracción
3. Falta de tenacidad de la entalla (baja temperatura)

Las entallas que originan la fractura frágil pueden ser defectos de soldaduras tales como fisuras, falta de penetración socavados, y solapes etc.

4.2.1.2. Transición Dúctil – Frágil

Un acero con bajo % de carbono tiene fractura dúctil alrededor de la temperatura ambiente, pero se vuelve frágil a más bajas temperaturas.

La energía de impacto, también llamada tenacidad de la entalla, se usa para evaluar cuantitativamente esta transición. Los ensayos Charpy (el más común) y el de Izod fueron diseñados y son aún utilizados para medir la energía de impacto. Para la técnica de Charpy V, la probeta tiene una sección cuadrada, con una entalla maquinada como se muestra en la figura 4-35, junto a la máquina para hacer este ensayo.

La carga es aplicada como un impacto de un martillo pendular con una cierta masa cuando se libera desde una posición fijada a una altura “h”. La probeta a ensayar se posiciona en la base como se muestra.

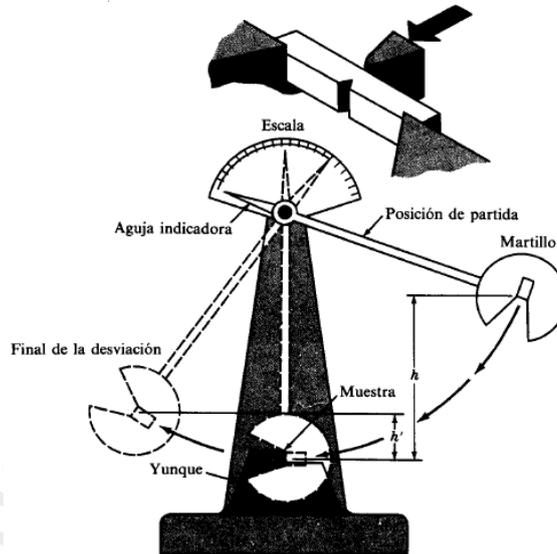


FIG. 4-35.— Ensayo Charpy.

Cuando el péndulo es liberado, un borde en forma de cuña, golpea (con alta velocidad de impacto) y fractura la probeta en la entalla, la cual actúa como un punto de concentración de tensiones. El péndulo continúa su recorrido alcanzado a una altura máxima “h’”, la que es menor que “h”. La energía de absorción, computada de la diferencia entre h y h’, es una medida de la energía de impacto.

En un ensayo de Charpy el tamaño y forma de la probeta tanto como la configuración de la entalla y su profundidad son fijas, pero si las cambiamos los resultados del ensayo variarían.

La figura 4-36 muestra la relación entre la energía de impacto Charpy V con la temperatura. A altas temperaturas la energía de Charpy V es relativamente alta, correlacionándose con el modo de fractura dúctil. Cuando se observa una fractura 100% fibrosa la energía se llama “upper shelf energy”. A medida que la temperatura desciende, la energía absorbida cae relativamente rápido en un rango de temperaturas estrecho. A menores temperaturas la energía absorbida tiene un valor pequeño y aproximadamente constante. Esta zona corresponde a la fractura frágil. Esta curva es llamada curva de transición dúctil-frágil.

Alternativamente, la apariencia de la superficie de fractura es indicativa de la naturaleza de la fractura. Para fractura dúctil, esta superficie aparece fibrosa; contrariamente una superficie totalmente frágil tiene una textura granular (o carácter

clivaje). Entre la transición dúctil-frágil existen las características de ambos tipos. Frecuentemente el porcentaje de fractura de cizalladura es graficado en función de la temperatura como se muestra en la figura 4-37.

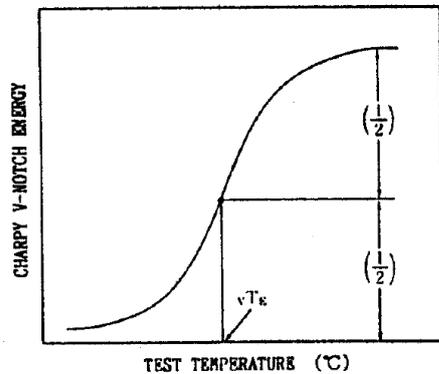


FIG. 4-36.— Relación entre temperatura y energía Charpy V

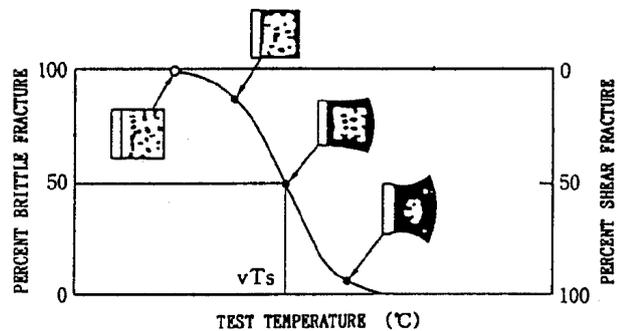


FIG. 4-37.— Dependencia de la temperatura del porcentaje de fractura de cizalladura

Para muchas aleaciones hay un rango de temperaturas donde se produce la transición dúctil-frágil; esto presenta alguna dificultad en especificar una sola temperatura de transición dúctil-frágil. No ha sido explicitado un criterio, y entonces esta temperatura es comúnmente definida como la temperatura a la cual la energía de Charpy V cae a la mitad de la energía superior (llamada temperatura de energía de transición, vT_e). Otras formas de definirla es cuando la fractura es del 50% dúctil (llamada Temperatura de transición de la superficie de fractura vT_s) o cuando la energía es de 20 Joules. Estos criterios para definir la temperatura tienen aproximadamente los mismos valores. Cuando ejecutamos un ensayo de fractura usando grandes probetas la temperatura de transición es mayor con entallas más marcadas, espesores mayores, la tensión residual es más grande y la velocidad de carga es más alta. Esto significa que la fractura frágil se produce fácilmente.

No todas las aleaciones muestran una transición dúctil-frágil. Aquellos que tienen estructuras cúbicas de caras centradas (Fcc) (incluyendo aleaciones de Al y Cu) permanecen dúctiles aun a extremadamente bajas temperaturas.

Sin embargo, aleación cúbicas centradas en el cuerpo y hexagonales alto empaquetamiento experimentan esta transición.

La mayoría de los cerámicos también experimentan una transición dúctil-frágil aunque la transición ocurre solamente a elevadas temperaturas, comúnmente por encima de los 1000°C.

4.2.2. Descripción de la Metodología.

4.2.2.1. Captura de imagen.

El procesamiento y análisis digital de imágenes está estrechamente vinculado con la calidad de imagen que se captura, por lo cual es necesario controlar todas aquellas variables (o por lo menos caracterizar las de mayor importancia) que estén involucradas en la etapa de captura de la imagen, teniendo en cuenta que el sistema trabaja con el reconocimiento de los niveles de brillo y contraste sobre las diferentes regiones de la imagen. Otro aspecto muy importante, es la óptica utilizada, en la que se debe considerar tanto como sea posible la eliminación de factores que puedan mermar en la calidad de las imágenes que se obtienen.

El Sistema de Captura que se usó básicamente es el descrito a continuación:

- Una cámara digital fotográfica Sony Cybershot. Cada toma luego de capturada se cuantificó a 640x480 píxeles.
- El software para análisis de imágenes Image-Pro Plus, utilizado a nivel mundial en el entorno del análisis de imagen, diseñado para soluciones de proceso y análisis de imagen a nivel investigador y técnico y para todos los sistemas que utilicen microscopios o cualquier otro método de captura de imágenes.

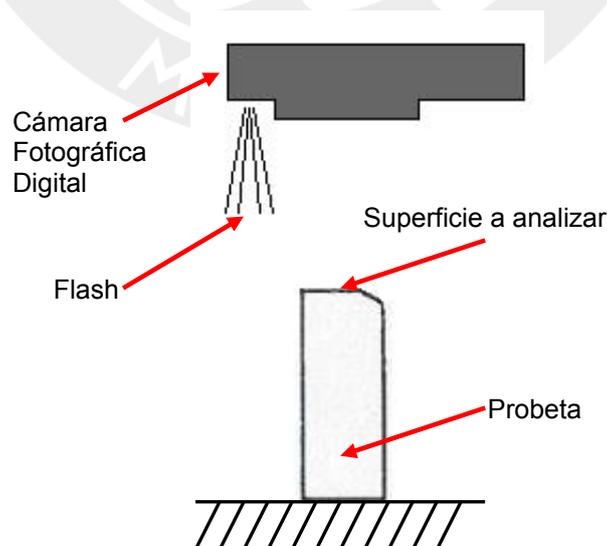


FIG. 4-38.— Captura de imágenes.

a. Procedimiento para Captura de Imágenes.

i. Preparación de la Muestra.

Para el momento de captura, la muestra presenta las siguientes características:

- Se capturaron las imágenes de las mitades obtenidas luego del ensayo de impacto de probetas con dimensiones fabricadas según la norma ASTM E23 Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.
- Las probetas son de Acero AISI 1045
- La muestra no fue sometida a desbaste y pulido.
- No se aplicó el ataque químico.

ii. Ubicación y enfoque de la imagen.

- Se logró manteniendo la muestra en la ubicación óptima sobre una superficie que nos brinde el mejor contraste y que refleje el flash instantáneo de la cámara fotográfica digital en la cantidad mínima, ya que la ubicación de la cámara fotográfica digital es paralela (en lo posible) a la superficie a capturar y a la vez paralela a la superficie de la mesa que sirve de base a dicha muestra, trabajando esta superficie base como un espejo, reflejando así el flash instantáneo en el momento de la captura de la imagen, dando como resultado imágenes con baja calidad de información.
- La distancia entre la superficie a capturar y la cámara digital se trató de mantener en lo posible constante para todas de las muestras a capturar, de modo que el enfoque automático de la cámara fotográfica digital trabaje de la misma manera para cada una de las muestras.

iii. Iluminación.

Se usó Iluminación natural además del sistema de iluminación propia de la cámara fotográfica digital (flash), tratando de conservar las mismas condiciones para todas las muestras tanto en ubicación como en intensidad de iluminación.

iv. Calibración de imagen.

Ante la necesidad de efectuar mediciones precisas como lo es el área sobre la superficie obtenida del ensayo de impacto que se muestra en la imagen capturada, se procedió a calibrar el sistema, introduciéndole para ello una referencia del mundo real

objetivo y entregándole el equivalente de píxeles por unidad para el análisis de las imágenes.

Esto se hizo empleando la información que nos brinda la norma ASTM E23 - 02 (Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials) en la sección 7. Test Specimens, información que se acompaña con la figura 4-39.

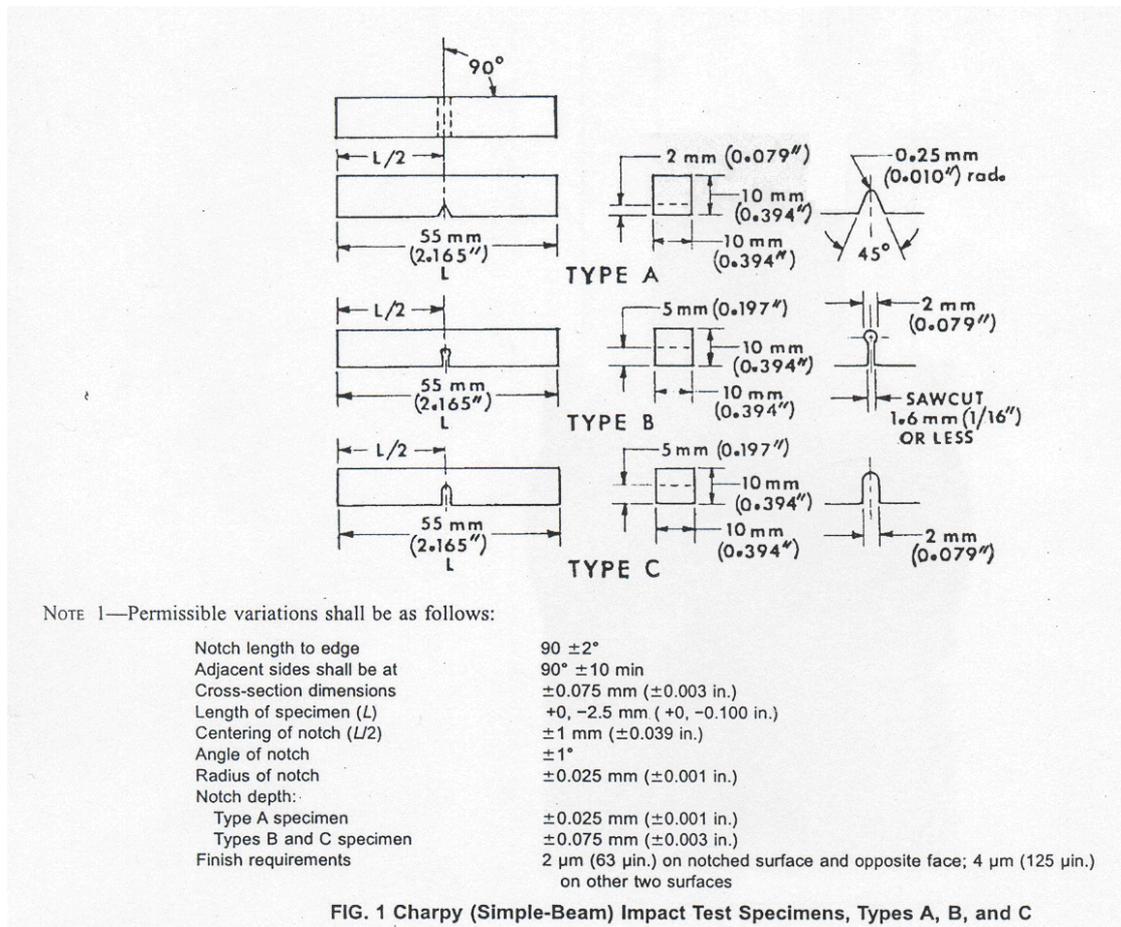


FIG. 4-39.— Dimensiones de las probetas.

Puesto que la muestra que se sometió al ensayo de impacto es del tipo A (*Type A*) las medidas que se debe tener en cuenta para la calibración son las mostradas en la figura 4-40.

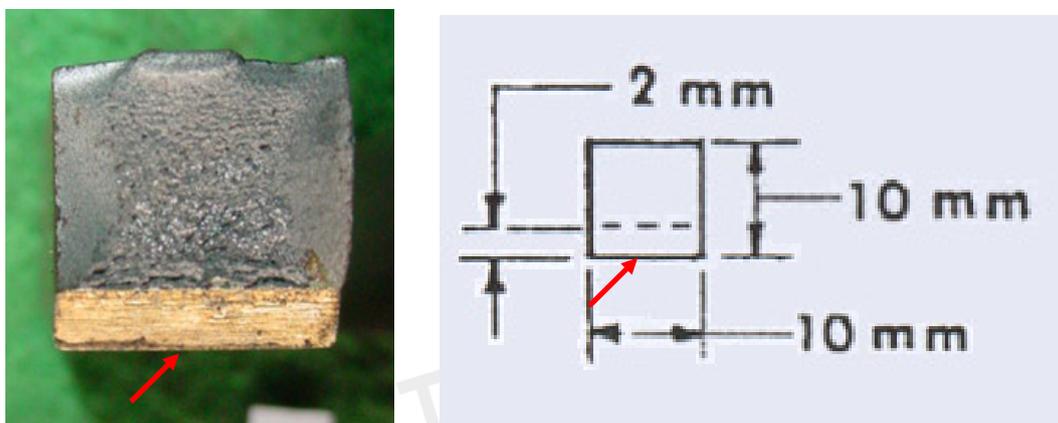


FIG. 4-40.— Información para calibración.

De lo antes mencionado se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones para realizar la calibración:

- La calibración se debe realizar en la arista exterior de la ranura en V, como se indica con la flecha en la figura 4-40, de una de las mitades de la muestra obtenida luego del ensayo de impacto, puesto que esta zona de la muestra no sufre deformación.
- Para un procedimiento mas detallado de la calibración véase la sección respectiva en el Manual del Usuario que se presenta en los anexos de este trabajo de tesis.

b. Dificultades de análisis debido a la Captura de Imágenes.

Se presentaron las siguientes dificultades debido a la captura de imágenes:

- La captura de las imágenes mediante la cámara fotográfica digital limita la calidad de las mismas, debido a las limitaciones de zoom, presencia de sombras etc.
- Los problemas relacionados al brillo y contraste de la imagen se controlaron con el software de procesamiento digital de imágenes Image-Pro Plus.
- La presencia de óxido en las probetas ensayadas dificulta la distinción de zonas en algunas de las probetas, debido a que a determinadas temperaturas, la zona externa es tan delgada y esta cubierta casi totalmente por óxido.

4.2.2.2. Procedimiento Manual.

Luego de capturar las imágenes, estas se almacenan en la memoria de la cámara fotográfica digital para luego ser trasladadas a la memoria de la computadora mediante una tarjeta de memoria. Se procede a cargar la imagen que se desea analizar mediante el software Image-Pro Plus, iniciándose así el preprocesamiento digital de la imagen con el propósito de resaltar las características presentes y con ello lograr que la medición de los objetos y los resultados que se obtengan de ellos tengan la máxima precisión. Para ello se procedió de la siguiente manera:

a. Medición de objetos.

En las siguientes líneas se procederá a explicar las consideraciones y procedimientos que se tuvieron presente para realizar la medición de los objetos.

- El porcentaje de fractura por cizallamiento en la superficie de fractura de la probeta de impacto puede ser determinada usando una variedad de métodos. Los métodos aceptables son definidos en el Anexo A6 de la norma ASTM E23 - 02 (Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials) y se describen líneas abajo. Para cada método, el usuario debe distinguir entre regiones formadas por mecanismos de crecimiento de la grieta dúctil estable y regiones formadas por propagación rápida de la grieta frágil. Las típicas zonas de apariencia de fractura son mostradas en la figura 4.41, donde las zonas de fractura plana (*Flat Fracture*) es la región donde ocurre el crecimiento de la grieta inestable en una escala de tiempo de microsegundos.
- El porcentaje del área de cizallamiento en la superficie de fractura de una probeta de impacto Charpy es generalmente calculado como la diferencia entre el área total de fractura y el área de fractura plana.

Los métodos de medición descritos aquí proporcionan un cálculo aproximado para la fractura plana macroscópicamente (directa o indirectamente), pero que no considera detalles del modo de fractura para esta región plana de fractura inestable.

Los 5 métodos que nos recomienda la norma ASTM E23 - 02 (Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials) en el Anexo A6 son usados para determinar el porcentaje de fractura dúctil sobre la superficie de impacto de la probeta. Es recomendable que el usuario caracterice cualitativamente el modo de fractura de la zona de fractura plana y proporcione la descripción de cómo la medición del cizallamiento fueron hechos. Los métodos recomendados que a continuación se describen son agrupados ordenadamente de menor a mayor precisión:

- A6.1 Medición de la longitud y espesor de la región de fractura plana de la superficie de fractura, como se muestra en figura 4-41, y se determina luego el porcentaje de corte usando la tabla 4-9 para mediciones en mm.

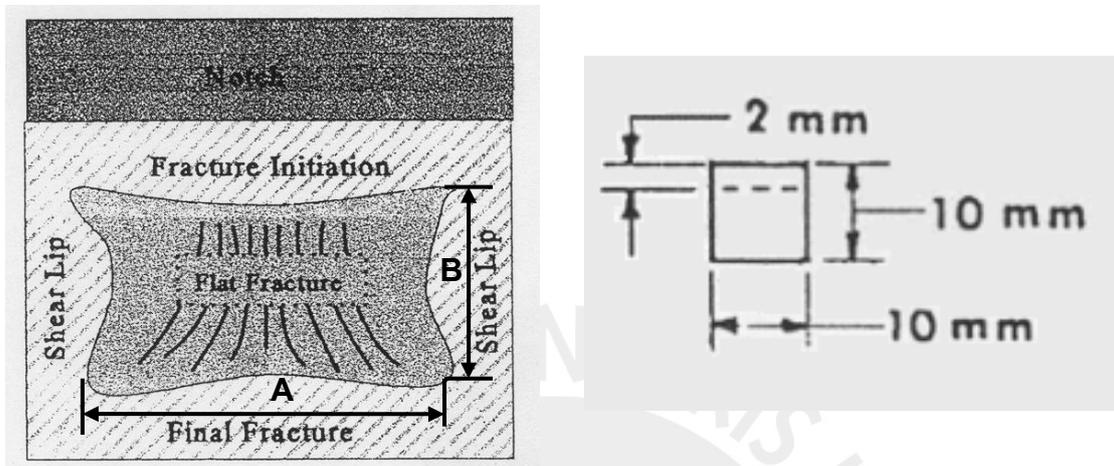


FIG. 4-41.— Información para Método 1.

Note 1—100 % shear is to be reported when either *A* or *B* is zero.

Dimension <i>B</i> , mm	Dimension <i>A</i> , mm																		
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10
1.0	99	98	98	97	96	96	95	94	94	93	92	92	91	91	90	89	89	88	88
1.5	98	97	96	95	94	93	92	92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	82	81
2.0	98	96	95	94	92	91	90	89	88	86	85	84	82	81	80	79	77	76	75
2.5	97	95	94	92	91	89	88	86	84	83	81	80	78	77	75	73	72	70	69
3.0	96	94	92	91	89	87	85	83	81	79	77	76	74	72	70	68	66	64	62
3.5	96	93	91	89	87	85	82	80	78	76	74	72	69	67	65	63	61	58	56
4.0	95	92	90	88	85	82	80	77	75	72	70	67	65	62	60	57	55	52	50
4.5	94	92	89	86	83	80	77	75	72	69	66	63	61	58	55	52	49	46	44
5.0	94	91	88	85	81	78	75	72	69	66	62	59	56	53	50	47	44	41	37
5.5	93	90	86	83	79	76	72	69	66	62	59	55	52	48	45	42	38	35	31
6.0	92	89	85	81	77	74	70	66	62	59	55	51	47	44	40	36	33	29	25
6.5	92	88	84	80	76	72	67	63	59	55	51	47	43	39	35	31	27	23	19
7.0	91	87	82	78	74	69	65	61	56	52	47	43	39	34	30	26	21	17	12
7.5	91	86	81	77	72	67	62	58	53	48	44	39	34	30	25	20	16	11	6
8.0	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5	0

TABLA 4-9.— Valores para A y B (Método 1)

- A6.2 Comparar la apariencia de la fractura de la probeta con la apariencia de la fractura mostrada en la cartilla mostrada en la figura 4-42.

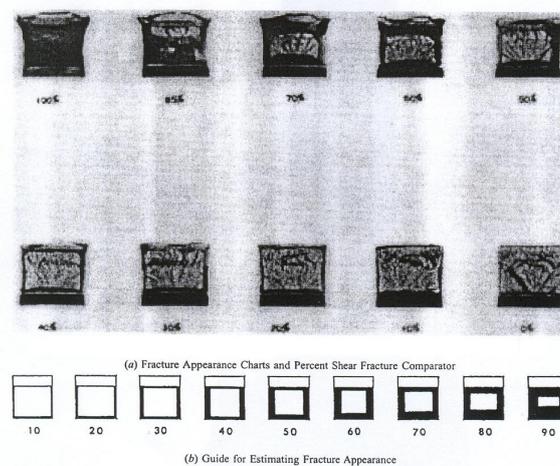


FIG. 4-42.— Cartilla para comparación de apariencia de fractura (Método 2).

- A6.3 Ampliar la superficie de fractura y compararla sobreponiendo una cartilla precalibrada o midiendo el porcentaje de fractura dúctil por medio de planímetros.
- A6.4 Fotografiar la superficie de fractura ampliada adecuadamente y medir el porcentaje de fractura dúctil por medio de un planímetro.
- A6.5 Capturar una imagen digital de la superficie de fractura y medir el porcentaje de fractura dúctil usando un software de análisis de imágenes. [25]

i. Consideraciones.

Para la medición de los objetos se tuvo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las mediciones realizadas se hicieron en la imagen con formato *color* (Fig. 4-43), a la cual solo se le aplicó el *best fit equalization* de modo que se maximizó el contraste en la imagen. La imagen en la cual se realizó la medición es la que proviene del preprocesamiento digital de la imagen original, obtenida directamente de la muestra mediante el sistema de captura de imágenes o cámara fotográfica digital. El formato que posee la imagen es *RGB24*.



FIG. 4-43.— Imagen con formato *color*.



FIG. 4-44.— Imagen con formato *color* luego de aplicar *best fit equalization*.

- Para realizar la medición de los objetos se procedió primero a escoger la calibración de la imagen. Para ello se seleccionó la calibración adecuada para cada una de ellas, puesto que la captura de estas mediante la cámara fotográfica digital vario en cuanto a la distancia entre la cámara y la superficie a capturar, determinando esto que el tamaño de cada superficie capturada varíe en cada imagen, de modo que el uso de una única calibración para todas las imágenes conlleva a errores. Esto determina entonces el uso de una calibración específica para cada imagen. El procedimiento para realizar una calibración correcta se explica detalladamente en la sección 4.2.2.1 sobre calibración de la imagen.
- Los parámetros de medida seleccionados para el análisis de todas las muestras, fueron los siguientes y se indican en las figuras 4-45 y 4-46.

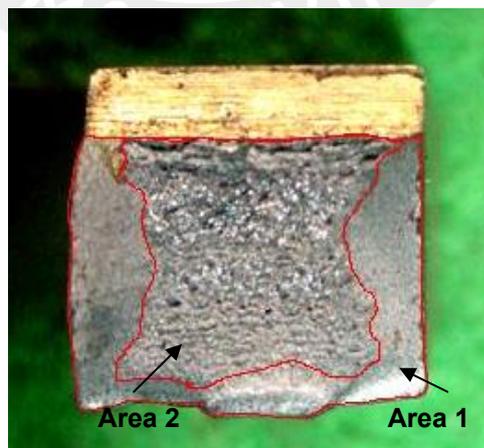


FIG. 4-45.— Zonas a analizar.

- Área 1: Área total final que incluye las zonas de fractura dúctil y plana.
- Área 2: Área de la región de fractura plana.

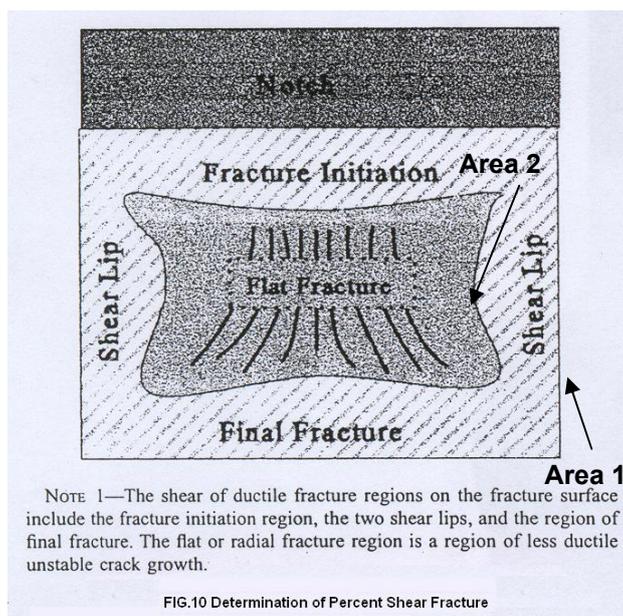


FIG. 4-46.— Superficie de fractura

ii. Medición.

La etapa de medición de los objetos, la podemos dividir en varios pasos consecutivos, para lo cual debemos tener en cuenta lo que a continuación se detalla:

- Para esta aplicación, la herramienta a usar principalmente es la que nos permite la selección manual de las regiones que son objetivo principal de nuestro análisis y se denomina herramienta de mediciones manuales (*Manual Measurements*).
- Medición del Área 1. La medición del área 1 incluye toda la superficie de la muestra que ha sido capturada, excepto la que pertenece a la entalladura (*Notch*) ubicada en la parte superior de las imágenes mostradas en las figuras 4-47 y 4-48. La superficie a analizar incluye la región de fractura dúctil y la región de fractura plana (*Flat Fracture*). La región de fractura dúctil esta compuesta por la región de iniciación de la fractura (*Fracture Initiation*), los labios de cizallamiento (*Shear Lip*) y la región de fractura final (*Final Fracture*). Todas estas regiones se muestran en la figura 4-48.

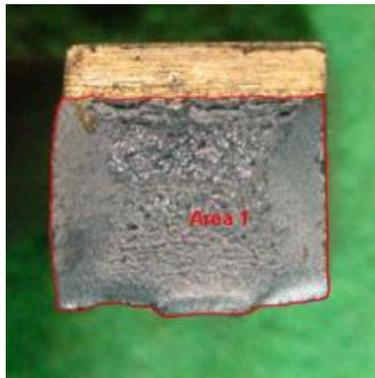


FIG. 4-47.— Área 1.

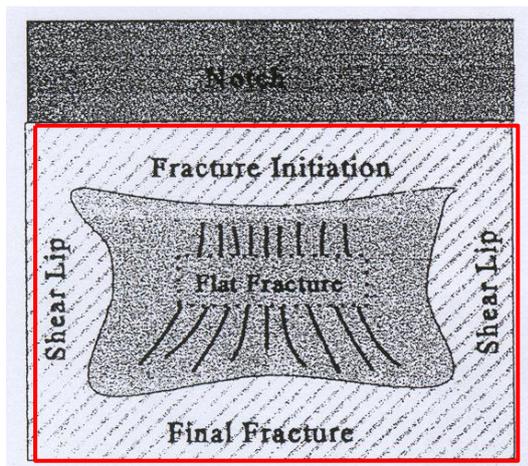


FIG. 4-48.— Área 1.

- Medición del Área 2. La medición del área 2 solo incluye una región en la zona central de la muestra cuya superficie ha sido capturada para el análisis, Esta región es denominada región de fractura plana (*Flat Fracture*) y se muestra en las figura 4-49 y figura 4-50.

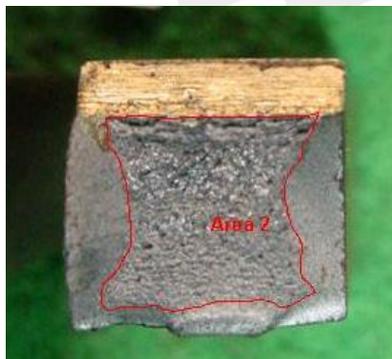


FIG. 4-49.— Área 2.

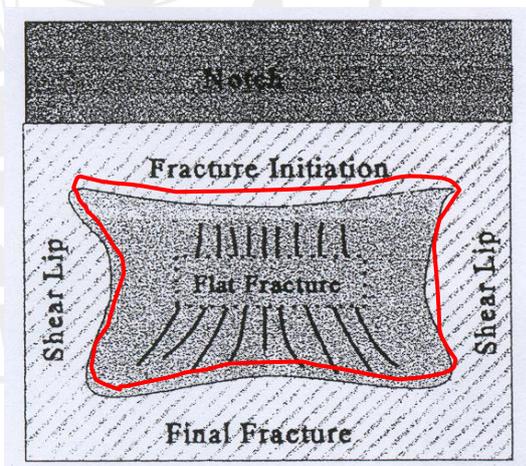


FIG. 4-50.— Área 2.

- La medición del área 1 y del área 2 se realiza de la siguiente manera:
 - Selección de la herramienta de mediciones manuales (*Manual Measurements*).
 - Selección dentro del grupo de opciones que nos permite la herramienta de mediciones manuales (*Manual Measurements*) la que nos permite crear figuras libres (*Create Polygon Feature*).

- Definir los valores de las diferentes propiedades aplicables al trazo definido como el perímetro o contorno de las áreas a analizar, por ejemplo valor 0 para el suavizado (*Smooth*), ya que el área a definir es de forma irregular y con cambios de dirección del trazo muy radicales que no necesitan ser suavizados.
- Con la herramienta de mediciones manuales (*Manual Measurements*) para figuras libres (*Create Polygon Feature*) dibujar el perímetro de cada una de las áreas a analizar.
- Los resultados de las mediciones aparecen automáticamente, luego de terminados los pasos anteriormente mencionados y se muestran en la tabla 4-10 que a continuación se presenta.

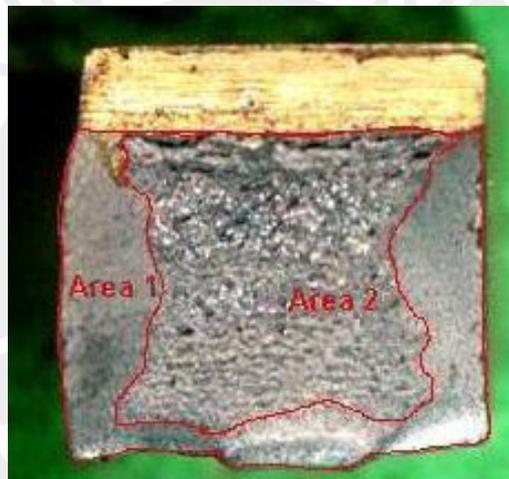
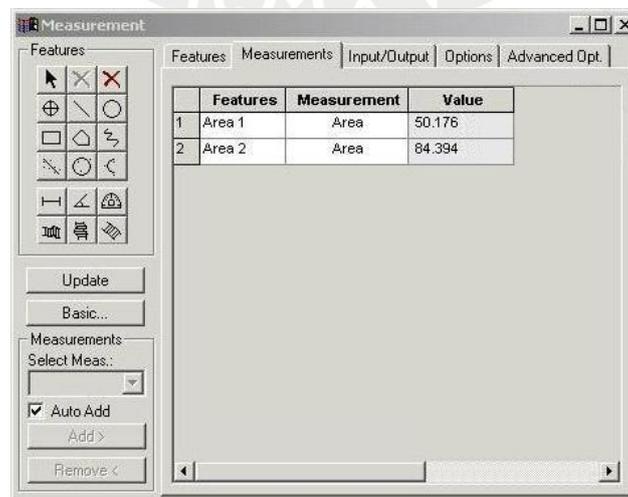


FIG. 4-51.— Medición final



Features	Measurement	Value
1 Area 1	Area	50.176
2 Area 2	Area	84.394

Nota:
Las unidades de medida de los resultados son los mismos que se usaron para la calibración

TABLA 4-10.— Resultados

b. Análisis de Resultados.

Con los resultados obtenidos de las mediciones anteriores y usando una hoja de cálculo, tenemos para la imagen que se está utilizando como ejemplo los valores siguientes:

Temperatura 150°C	A3
Area 1 (mm ²)	84.394
Area 2 (mm ²)	50.176
Area Diferencia (mm ²)	34.218
Area Total Inicial (mm ²)	80
% Shear Area	40.546

TABLA 4-11.— Tabla de resultados x imagen

Donde:

Temperatura 150°C: Representa la temperatura a la cual fue realizado el Ensayo de Impacto. Pudiendo ser 0°C, Temperatura Ambiente o 150°C.

A3: Es el código que designa a la probeta, pudiendo ser A (150°C), B (Temperatura Ambiente) o C (0°C), además el número que acompaña a dicha letra representa el número de probeta, pudiendo variar de 1 a 5, que es la cantidad de probetas ensayadas por cada temperatura.

Área 1 : Representa el área total final y esta dada en mm².

Área 2 : Representa el área de fractura plana y esta dada en mm².

Área Diferencia : Representa la diferencia entre el área 1 y el área 2 y esta dada en mm².

Área Total Inicial : Representa el área total inicial y esta dada en mm².

% Shear Area : Representa el porcentaje fractura dúctil con respecto al área 1.

Por lo tanto, nuestra probeta presenta:

- 40.546% fractura dúctil
- 59.454% fractura frágil

4.2.2.3. Análisis de Imágenes según Temperatura.

En esta parte de la aplicación, se realizara el análisis a 3 grupos de probetas, cada grupo fue ensayado a diferente temperatura siendo estas:

- 150°C
- Temperatura Ambiente
- 0°C

a. Análisis de Imágenes.

Procedemos ahora a analizar cada una de las imágenes. Siendo estas en total 15, ya que se tiene 5 probetas por cada temperatura. En la tabla 4-12 se muestran los valores obtenidos para las diferentes probetas según su temperatura de ensayo



FIG. 4-52.— Apariencia de la fractura a 150°C.



FIG. 4-53.— Apariencia de la fractura a temperatura ambiente.



FIG. 4-54.— Apariencia de la fractura a 0°C.

Temperatura 150°C	A1	A2	A3	A4	A5
Area 1 (mm ²)	81.543	80.879	84.394	82.644	81.888
Area 2 (mm ²)	45.571	44.157	50.176	42.593	45.093
Area Diferencia (mm ²)	35.972	36.722	34.218	40.051	36.795
Area Total Inicial (mm ²)	80	80	80	80	80
% Shear Area	44.114	45.404	40.546	48.462	44.933

Temperatura Ambiente	B1	B2	B3	B4	B5
Area 1 (mm ²)	84.177	82.764	81.288	80.951	81.657
Area 2 (mm ²)	80.312	78.18	75.275	74.776	76.259
Area Diferencia (mm ²)	3.865	4.584	6.013	6.175	5.398
Area Total Inicial (mm ²)	80	80	80	80	80
% Shear Area	4.592	5.539	7.397	7.628	6.611

Temperatura 0°C	C1	C2	C3	C4	C5
Area 1 (mm ²)	80.354	81.267	80.014	81.114	82.317
Area 2 (mm ²)	≈ Area1				
Area Diferencia (mm ²)	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0
Area Total Inicial (mm ²)	80	80	80	80	80
% Shear Area	0	0	0	0	0

TABLA. 4-12.— Tabla de resultados x temperatura

b. Análisis de Resultados para el Análisis de Imágenes.

Luego de realizar el análisis a las 15 imágenes obtenidas de las probetas sometidas a ensayo de impacto a 3 temperaturas diferentes, 5 por cada temperatura, se muestran los resultados en la tabla 4-13:

% Shear Area (Método 5)	
Temperatura	
150°C	
A1	44.114
A2	45.404
A3	40.546
A4	48.462
A5	44.933
Temperatura	
Ambiente	
B1	4.592
B2	5.539
B3	7.397
B4	7.628
B5	6.611
Temperatura	
0°C	
C1	0
C2	0
C3	0
C4	0
C5	0

TABLA 4-13.— Tabla de resultados Método 5

Haciendo uso de las recomendaciones que hace la norma ASTM E23 - 02 (Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials) en el Anexo 6, presentamos a continuación los resultados también para los Métodos 1 y 2.

	A	B	% Shear Area (Método 1)		% Shear Area (Método 2)
Temperatura				Temperatura	
150°C				150°C	
A1	8	8	20	A1	30
A2	7	6	47	A2	50
A3	8	6	40	A3	40
A4	8	6	40	A4	40
A5	7	5	56	A5	50
Temperatura				Temperatura	
Ambiente				Ambiente	
B1	10	7	12	B1	10
B2	9	7	21	B2	20
B3	10	7	10	B3	10
B4	10	7	10	B4	10
B5	9	7	21	B5	20
Temperatura				Temperatura	
0°C				0°C	
C1	10	8	0	C1	0
C2	10	8	0	C2	0
C3	10	8	0	C3	0
C4	10	8	0	C4	0
C5	10	8	0	C5	0

TABLA. 4-14.— Tabla de resultados Método 1

TABLA 4-15.— Tabla de resultados

c. Reporte.

Según lo recomendado por la norma ASTM E 23, para el reporte del ensayo de impacto se debe tener en cuenta lo siguiente:

10.1 Valores de Energía Absorbida.

10.2 Para una aceptación de ensayos comerciales:

10.2.1 Tipo de probeta

10.2.2 Temperatura de Ensayo

10.2.3 Energía Absorbida

10.2.4 Otro requerimiento contractual

10.3 Como información adicional con frecuencia se reporta la siguiente información:

- 10.3.1 Expansión Lateral
- 10.3.2 Probetas no quebradas
- 10.3.3 Apariencia de la Fractura (%)
- 10.3.4 Orientación de la Probeta
- 10.3.5 Ubicación de la Probeta

Sin embargo, el objetivo de esta aplicación es solo el de presentar lo relacionado al porcentaje en la superficie de fractura, por lo tanto en el reporte nos remitiremos solo a los antes mencionado.

Acero AISI 1045

Probeta Tipo A

Temperatura: 150°C

- Probeta 1 : 44.114%
- Probeta 2 : 45.404%
- Probeta 3 : 40.546%
- Probeta 4 : 48.462%
- Probeta 5 : 44.933%

Temperatura: Ambiente

- Probeta 1 : 4.592%
- Probeta 2 : 5.539%
- Probeta 3 : 7.397%
- Probeta 4 : 7.628%
- Probeta 5 : 6.611%

Temperatura: 0°C

- Probeta 1 : 0%
- Probeta 2 : 0%
- Probeta 3 : 0%
- Probeta 4 : 0%
- Probeta 5 : 0%

NOTA: A 0°C la presencia de fractura dúctil es casi nula por lo que se le da valor 0%.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Mediante el sistema implementado para la ejecución de las tareas de caracterización de materiales, se demostró la eficiencia del procesamiento digital de imágenes aplicado a dichas tareas, obteniéndose resultados e información en forma más rápida, tanto en lo cuantitativo como en lo cualitativo que los que se obtienen con procedimientos usados en la actualidad para realizar las mismas tareas.
- Este sistema cumple con gran parte de las expectativas iniciales, aunque gran parte de su mejora radica en la calidad de los sistemas de adquisición de imágenes, como lo es el microscopio metalográfico que presenta algunas deficiencias propias del tiempo de uso, y la destreza del usuario que desarrollará las aplicaciones, lo que implica también el conocimiento en el manejo del software. Por lo tanto se llegó a la conclusión que este sistema puede ser utilizado para procesar imágenes de modo que permita la caracterización de materiales, sin hacer uso de otros dispositivos, es decir solo con lo que esta conformado más la base teórica, conocimientos, recomendaciones especializadas y recursos estadísticos para hacer más confiables los resultados obtenidos del sistema.
- El software usado, Image Pro Plus, resultó una herramienta muy efectiva para el desarrollo de este tipo de labores que en conjunción con los dispositivos de entrada, mostraron suficientes características para la captura de imágenes en el desarrollo de las aplicaciones con propósito de demostración y con buenos augurios para otras aplicaciones. Con la evaluación de las distintas herramientas proporcionadas por este software se demostraron las mejoras en las características de las imágenes en comparación con las características que presentaban las imágenes iniciales de las probetas a analizar, llegándose a la conclusión que en cuanto al procesamiento digital, el uso de la variaciones de contraste y el uso de filtros morfológicos, da resultados positivos en la definición de las formas contenidas en la imagen a analizar. Por lo que se recomienda el uso de una combinación de ambos para mejorar las

características de la imagen antes del análisis y/o para superar problemas relacionados a procesos previos a la captura como son pulido y/o ataque químico, como presentar formas no muy bien definidas como límites, fronteras o bordes no muy claros.

- Si bien con este trabajo se pudieron establecer mejoras ostensibles en dos tareas de caracterización de materiales solo con los elementos disponibles que constituyen cada parte del sistema implementado, este hace posible también el desarrollo y ejecución de una infinidad de tareas de caracterización de materiales mediante el análisis digital de las imágenes, por lo tanto se debe desarrollar procedimientos y metodologías particulares para cada tarea en el análisis de las imágenes, según los objetivos propios de cada caracterización requerida, usando como base para ello lo desarrollado en la parte experimental de este trabajo de tesis además del manual del usuario que se presenta como anexo, el cuál permite el uso de otras herramientas que nos provee el software Image - Pro Plus y el cual se desarrolló para su uso en el Laboratorio de Materiales.
- Como se mencionó en varias partes del presente trabajo, uno de los factores mas importantes para la obtención de una buena imagen es el trabajo previo que se realiza a la probeta antes de su captura, es decir el pulido y ataque químico, de esto se recomienda el uso o la implementación de métodos de pulido mas avanzados, según sea el material, como el electropulido el cual permitiría definir más las características de una probeta, cuyas imágenes se desea analizar.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Abrigo, Y. J. ***Metalografía y Propiedades de los Metales Industriales***. Lima: CONCYTEC, 1996.
- [2] Apraiz, J. ***Tratamientos Térmicos de los Aceros***. Madrid: Dossat, 2001.
- [3] Apraiz, J. ***Fundiciones***. Madrid.
- [4] Baxes, G. A. ***Digital image processing: principles and applications***. New York: Jhon Wiley & Sons, 1994.
- [5] Beeley, P. ***The Hatfield Memorial Lectures***. London: Maney, 2001, p. 41.
- [6] Bernd, J. ***Digital image processing: concepts, algorithms, and scientific applications***, 4ª. ed. Berlin: Springer, 1997.
- [7] Blázquez, V. M. ***Laboratorio de Metalotecnía***. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 1997, p. 54.
- [8] Blázquez, V. M. ***Metalografía de las Aleaciones Férricas***. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- [9] Chellapa, R. ***Digital Image Processing***. Los Alamitos, CA.: IEEE Computer Society Press, 1992.
- [10] Cutipa, S. ***Metalurgia Andina “Fundamentos de Metalografía”***. Lima.
- [11] Frost, J. D. y Wright, J. R. ed. ***Digital Image Processing: Techniques and applications in civil engineering***. New York: American Society of Civil Engineers, 1993.

- [12] Gifkins, R. C. ***Optical microscopy of metals***. London: The Pitman Press, 1970.
- [13] Gonzales, R. C. y Woods, R. E. ***Digital Image Processing***. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1992.
- [14] Gonzales, R. C. y Wintz, P. R. ***Digital Image Processing, 2ª. ed.*** Mass.: Addison-Wesley, 1987.
- [15] Hussain, Z. ***Digital image processing: practical applications of parallel processing Techniques***. New York: Ellis Horwood, 1991.
- [16] Kehl, G. L. ***Fundamentos de la Práctica Metalográfica***. Madrid: Aguilar, S.A. de Ediciones, 1949.
- [17] Kinnear, T. C. y Taylor J. R. ***Investigación de Mercados: Un Enfoque Aplicado, 5ª. ed.*** Bogotá: McGraw-Hill, 1998, pp. 415 - 446.
- [18] Levin, R. I. ***Estadística para administradores, 6ª. ed.*** México: Prentice-Hall Hispanoamericana, 1996, pp. 656-676.
- [19] Place, T. A. ***Computer-aided Microscopy and Metallography: Proceedings of the Twenty-Second Annual Technical Meeting of the International Metallographic Society***. Materials Park, OH: American Society for Materials International, 1990.
- [20] Prat, W. K. ***Digital Image Processing, 2ª. ed.*** New York: Wiley, 1991.
- [21] Samuels, L. E. ***Optical Microscopy of Carbon Steels***. Metals Park, OH: American Society for Metals, 1992.
- [22] Tomer, A. ***Structure of Metals Through Optical Microscopy***. Metals Park, OH: American Society for Metals, 1991.
- [23] ***Image-Pro Plus Start-Up Guide for Windows™***

- [24] **Image-Pro Plus Reference Guide for Windows™**
- [25] **Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials (E-23)**. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01: pag. 1-26, 2002.
- [26] **Standard Test Method for Evaluating the Microstructures of Graphite in Iron Castings (A-247)**. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01: pag. 129-130, 1990.
- [27] **Standard Guide for Electrolytic Polishing of Metallographic Specimens (E-1558)**. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01: pag. 917-928, 1993.
- [28] **Standard Test Method for Determining Average Grain Size (E-112)**. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01: pag. 229-251, 1996.
- [29] **Standard Test Methods for Determining Average Grain Size Using Semiautomatic and Automatic Image Analysis (E-1382)**. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01: pag. 855-877, 1997.
- [30] Núñez, O. **Herramientas de software para la captura y tratamiento de imágenes**. Tesis (Ing.) Pontificia Universidad Católica del Perú. Facultad de Ciencias e Ingeniería. Lima. 242p., 1999.
- [31] Restrepo, A. **Método Semiautomático para la Caracterización del Hormigón empleando Procesamiento Digital de Imágenes**. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Escuela de Sistemas. Medellín. [en línea] [consultado 2005/04/10] <<http://www.iit.upco.es/palacios/dip/>>
- [32] Medina, R. y Bellera, J. **Bases del Procesamiento de Imágenes Medicas**. Universidad de Los Andes. Facultad de Ingeniería. Grupo de Ingeniería Biomédica. Venezuela. [en línea] [consultado 2005/04/10] <<http://www.ing.ula.ve/gibula/>>

- [33] Palacios, R. I. **Procesamiento Digital de Imágenes**. Pontificia Universidad Comillas. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Instituto de Investigación Tecnológica. Madrid. [en línea] [consultado 2005/04/10] <<http://www.iit.upco.es/palacios/dip/>>
- [34] Molina, R. **Introducción al Procesamiento y Análisis de Imágenes Digitales**. Universidad de Granada. Departamento de Ciencias de la Computación. Granada. [en línea] [consultado 2005/04/10] <http://www-etsi2.ugr.es/depart/ccion/mia/complementario/Procesamiento_Imagenes.pdf/>





**Capítulo 1. Caracterización Microestructural y Macroestructural
de Materiales.**



**Capítulo 2. Fundamentos de Procesamiento Digital de
Imágenes.**



Capitulo 3. Caracterización Microestructural y Macroestructural de Materiales mediante Análisis de Imágenes.







Anexo 1. Manual del Usuario: Image-Pro Plus.



