



Análisis metalográfico de fundiciones de hierro usando técnicas de procesamiento digital de imágenes y visión artificial.

Fredy Mauricio Ríos Sánchez.

Ingeniero de telecomunicaciones

Asesor:

David Stephen Fernández Mc Cann, PhD

Universidad de Antioquia

Facultad de ingeniería

Telecomunicaciones

Medellín

2024

Cita	(Ríos Sánchez, 2024)
Referencia	Ríos Sánchez, F. M. (2024). <i>Análisis metalográfico de fundiciones de hierro usando técnicas de procesamiento digital de imágenes y visión artificial</i> . Trabajo de grado. Universidad de Antioquia, Medellín.
Estilo APA 7 (2020)	



Ingeniería de telecomunicaciones.



CENDOI

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Eduard Emiro Rodríguez Ramírez

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Agradecimientos

Agradezco a mi círculo familiar, quienes me han brindado apoyo incondicional en este camino de formación como persona e ingeniero. También al laboratorio de fundición de ingeniería de materiales a la cabeza de Ricardo Aristizábal, quienes me brindaron espacio y material vital, para el desarrollo de los objetivos plateados en este trabajo. Por último, agradezco a los profesores David Fernández Mc Cann y Adrián Montoya Lince por su paciencia y saber guiar.

Resumen

Este trabajo, más que un escrito, presenta una estrategia para aquellas personas que realizan metalografías de fundiciones de hierro, siguiendo un paso a paso para obtener resultados de apoyo confiables que confirmen la veracidad del trabajo manual. Por ello, se expone una metodología simple de preparación de muestras, una manera correcta de obtener una buena metalografía, un diseño de software que puede abrir mentes para aplicar estas técnicas en otras áreas similares y un desarrollo de una aplicación, que en su conjunto, sirvan de apoyo y a futuro sea una herramienta indispensable para quienes trabajan en estas área puedan obtener resultados rápidos y confiables, los cuales se confirman al final de esta metodología general con los análisis y resultados, validados por personas expertas en el tema de metalografías de fundiciones de hierro.

Contenido

1.	Introducción.....	6
2.	Objetivos.....	7
2.1.	Objetivo general	7
2.2.	Objetivos específicos.....	7
3.	Marco teórico.....	8
3.1.	Materiales e ingeniería	8
3.2.	Caracterización de materiales.....	8
3.3.	Fundiciones de hierro	8
3.4.	Microestructura de los metales y estudios metalográficos.....	11
3.5.	Norma usada para la clasificación de grafito en fundiciones de hierro.....	11
3.6.	Muestras para la metalografía	11
3.7.	Procesamiento digital de imágenes (PDI) y visión artificial	17
4.	Metodología para análisis de metalografías de fundiciones de hierro con software.	19
4.1.	Metodología de preparación de muestras.....	19
4.2.	Diseño del software	21
4.3.	Desarrollo del software TG	24
5.	Resultados y análisis.....	28
6.	Conclusiones.....	34
7.	Poster	35
8.	Bibliografía.....	36

1. Introducción

A pesar de que las fundiciones de Hierro – Carbono (Fe-C), o simplemente fundiciones de hierro, pueden ser fácilmente caracterizadas e identificadas a través de una metalografía, que expone su microestructura y la forma del grafito de manera clara, una persona experta en análisis de microestructuras puede cometer varios errores en la tipificación del grafito, en la detección del tamaño, en la identificación de clases o en el conteo de hojuelas y nódulos de grafito, ya que depende solo del ojo y su criterio como herramienta. Lo anterior, se convierte en una labor de paciencia y concentración para el experto, ya que debe mantener la postura cada que vaya a analizar una metalografía de fundición de hierro, y un instante de desconcentración puede inducir errores que se vean reflejados en los informes a presentar a los clientes o interesados, o incluso hasta tener que volver a empezar el análisis de las clasificaciones mencionadas, lo que se traduciría en tiempo y por ende dinero.

Por tanto, se busca con este trabajo desarrollar una herramienta de PDI (Procesamiento Digital de imágenes) y de visión artificial que sirva de apoyo a las personas expertas ayudándoles a optimizar el tiempo y obtener resultados más confiables en la clasificación del grafito de las fundiciones de Fe-C.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Desarrollar una metodología que use técnicas de PDI y visión artificial, apoyadas en normas establecidas de preparación de muestras y análisis de fundiciones de hierro, para ayudar al ojo experto en la caracterización, extracción y clasificación de propiedades de interés de las metalografías de dicha fundición para almacenarlas en una base de datos.

2.2. Objetivos específicos

- Planificar la metodología de preparación de probetas de las fundiciones de hierro para obtener una correcta metalografía a través de un microscopio óptico y almacenarlas en una base de datos de imágenes (BDi).
- Diseñar el procesamiento digital y de visión artificial que se realizará a las metalografías en la BDi, bajo la norma de análisis de fundiciones de hierro A247-19, para garantizar su debida caracterización y clasificación.
- Desarrollar el software, bajo el diseño anterior, que reciba las metalografías de la BDi y muestre como resultado la información de interés, para luego consolidarlas un reporte que contenga su caracterización y clasificación.
- Validar que el entorno de simulación y el software desarrollado cumplan con las expectativas de funcionamiento y luego, con ayuda de una persona experta en metalografías de hierro, se compruebe que la metodología general funciona correctamente.

3. Marco teórico

3.1. Materiales e ingeniería

Continuamente el hombre ha venido buscando la manera de mejorar su condición de vida y para ello se ha visto en la necesidad de implementar servicios y productos que le permitan transformar su entorno económico, social e industrial. En el caso de los productos, éstos están conformados con materiales conocidos como polímeros, cerámicos, metales y compuestos (siendo estos últimos una combinación de los tres primeros) y que de la mano con la tecnología permiten seguir creando una cronología de avance en lo que a materiales se refiere. La aplicación de la tecnología facilita el seguimiento, desarrollo e innovación de nuevos materiales, incluso ofreciendo nuevos servicios para el análisis de materiales y sus características; es aquí donde entra en contexto la caracterización de materiales.

3.2. Caracterización de materiales

La “caracterización” es una palabra que puede tener muchos significados dependiendo el contexto; sin embargo, bajo un ámbito científico en general se puede definir como el proceso de tomar datos para describir y diferenciar accesiones de una determinada muestra. Si no se conocen las características de los recursos genéticos disponibles no se pueden utilizar, por lo tanto, es necesario contar con la información adecuada sobre las características de la muestra en estudio. Entonces, en la caracterización de materiales se está haciendo énfasis en esa información intrínseca de cada material a partir del estudio de sus propiedades físicas, químicas y estructurales, para así referenciar su naturaleza con otras ya conocidas y de esta manera determinar su mejor aplicación en el ámbito ingenieril [1].

Por otro lado, existen un sin número de métodos de caracterización de materiales que van desde los métodos clásicos hasta ir evolucionando hoy en día como los métodos instrumentales, y cuyo método a aplicar dependerá del tipo de material a analizar (polímero, cerámico, metal o compuesto) y de sus propiedades. Sin embargo, para intereses de este trabajo el enfoque se acota a la caracterización de metales, específicamente las fundiciones de hierro [2].

3.3. Fundiciones de hierro

Las fundiciones de hierro, junto a los aceros, hacen parte de los llamados materiales metálicos ferrosos, cuyo diagrama de fase se puede observar en la Figura 1. Para un porcentaje de carbono menor a 2.11 %, se forman los aceros, mientras que para un porcentaje de carbono

entre 2.11 y 6.7 % se tienen las fundiciones, que como su nombre lo sugiere, se pretende que fundan en la forma deseada en vez de trabajar con ellos en estado sólido [3].

3.3.1. Tipos de fundiciones de hierro

Existen 5 tipos de fundiciones de hierro dependiendo la distribución del carbono en sus microestructuras: blanca, gris, nodular, maleable y de alta aleación, ver Figura 2. Sin embargo, la última no es tomada en cuenta debido a que la composición química se enmascara con las demás fundiciones y por ende no puede ser diferenciada por análisis de composición química. Por tanto, las fundiciones se reducen a 4 tipos [3]:

- I. Fundición blanca: esta fundición está compuesta en su gran mayoría por carburos de hierro en su matriz y sus contenidos de carbono y silicio son relativamente bajos (2,5 – 3 por 100 de C y 0,5 – 1,5 por 100 de Si). El Silicio actúa como un elemento estabilizante del grafito en los hierros fundidos. A pesar de que puede ser usada por su resistencia al desgaste y la abrasión, su fragilidad es un punto débil y termina convirtiéndose industrialmente en materia prima o material bruto para conformar el hierro maleable.

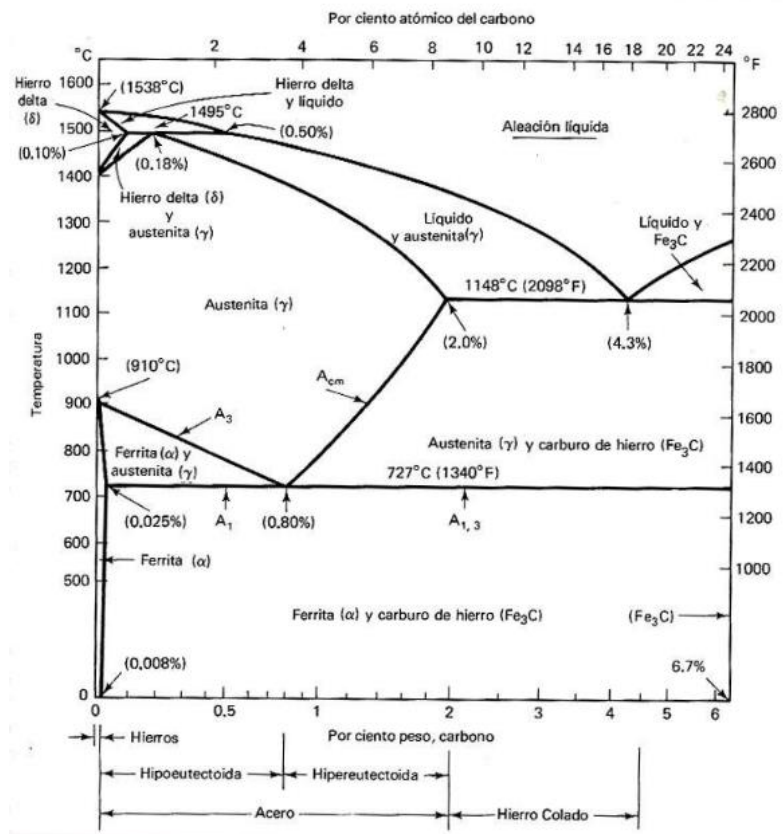


Figura 1. Diagrama de fase Fe-C (Acero < 2,11 % C y 2,11 % C < Fundición < 6,7 % C) [3].

- II. Fundición gris: se forma cuando hay carbono suficiente no disuelto que, con ayuda del silicio, hace precipitar el exceso como hojuelas de grafito (2,5 – 4 por 100 de C y 1 – 3 por 100 de Si). Esta fundición es un importante material de ingeniería debido a su bajo costo, excelente capacidad de mecanizado, buena dureza, resistencia al desgaste y buena capacidad de amortiguación, por lo que es usado en la industria para conformar bloques de cilindros de camiones y tractores, cabezas de cilindros, discos de embrague, cajas de cambio pesadas y partes de motores diésel.
- III. Fundición Nodular o dúctil: este tipo de fundición combina las ventajas de la fundición gris (posee buena fluidez, moldeabilidad, excelente capacidad de mecanizado y buena resistencia al desgaste) y el acero (alta resistencia, tenacidad, ductilidad, trabajabilidad en caliente y templabilidad) debido a la presencia de los nódulos de grafito no disuelto. En este caso se hace uso del precursor Magnesio (Mg), que reacciona con el poco Azufre (S) y oxígeno (O) presente, favoreciendo la formación de los nódulos. Los porcentajes de Carbono y Silicio son similares a los de la fundición gris (3 – 4 por 100 de C y 1,8 – 2,8 por 100 de Si) esta fundición es muy usada en fabricación de válvulas, cuerpos de bomba, cigüeñales, engranajes, laminadoras y piñones.
- IV. Fundición maleable: esta es un resultado de realizar un tratamiento térmico a la fundición blanca, lo que le proporciona mejoras en sus propiedades, brindándole moldeabilidad, mejor resistencia, tenacidad, resistencia a la corrosión y uniformidad. Dentro de sus usos más comunes se encuentran las piezas de alta resistencia como barras de conexión y juntas de culata.

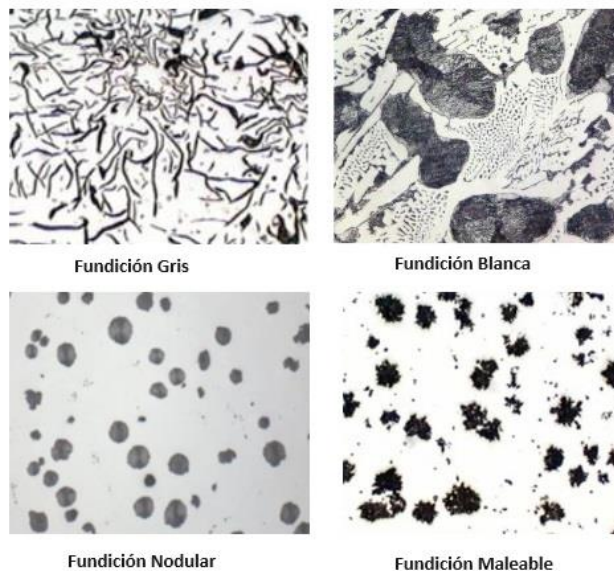


Figura 2. Tipos de fundiciones de hierro [3].

3.4. Microestructura de los metales y estudios metalográficos

La microestructura tiene una fuerte influencia en las propiedades y aplicaciones de metales y aleaciones y es por ello que el examen metalográfico es tan importante, debido a que permite inspeccionar y realizar controles de calidad y cumplimiento de especificaciones para garantizar que se cumplan los requisitos exigidos en la industria. Otros usos importantes del examen metalográfico son el análisis de fallas y la investigación y el desarrollo.

3.5. Norma usada para la clasificación de grafito en fundiciones de hierro.

Para realizar una debida clasificación de las fundiciones de hierro, se tiene como base principal la “*Norma de método de prueba para evaluación de microestructuras de grafito en hierros fundidos*” **A247 – 19**. Ésta tiene como alcance cubrir la clasificación del grafito en las fundiciones de hierro en términos de tipo, distribución y tamaño, comparando visualmente las metalografías (conocidas también como fotomicrografía) problema con las metalografías de referencia en los recuadros o figuras allí expuestas; estas últimas no deben ser entendidas como una especificación sino, como la palabra lo indica, una “referencia” que ayuda a definir el tipo de microestructura de grafito en la fundición de hierro problema [4].

3.6. Muestras para la metalografía

Los especímenes de prueba o muestras son tomadas de una sección cortada de un lugar específico del material de hierro fundido a conveniencia entre el fabricante y el comprador [4].

3.6.1. Preparación de la muestra

La preparación de las muestras se realizó bajo la “*Norma guía para la preparación de especímenes de metalografías*” **E3 – 11** (Actualizada en el 2017). Esta norma tiene como objetivo exponer la forma adecuada de preparar las muestras para su posterior análisis en el microscopio óptico o electrónico de barrido [5].

Inicialmente, es necesario cortar una porción del metal de la sección de interés. Para fines prácticos, las dimensiones de esta porción deben oscilar entre 12 y 25 mm² (0,5 a 1,0 inch²), o aproximadamente de 12 a 25 mm de diámetro si la muestra es cilíndrica. La altura de la muestra debe limitarse al mínimo necesario para facilitar su manejo durante el proceso de pulido [5].

Para seleccionar el método de corte, es crucial elegir uno que no altere la estructura del metal durante el proceso. Los métodos más comunes para obtener la muestra incluyen [5]:

- Aserrado: se puede realizar manualmente o con máquinas lubricadas. Este método es sencillo, rápido y eficaz.
- Corte con hoja abrasiva: produce una superficie lisa, que a menudo está lista para un pulido fino. Este método de seccionamiento suele ser más rápido que el aserrado.
- Uso de cizallas: las cizallas son herramientas de corte que permiten cortar materiales en forma de alambre, lámina, placa o varilla entre dos cuchillas opuestas.

Cada uno de estos métodos tiene características específicas que los hacen adecuados para diferentes tipos de muestras y requisitos de preparación. Durante la preparación de la muestra, es esencial mantener la limpieza para eliminar todas las grasas, aceites, refrigerantes y residuos de las hojas de corte durante el proceso. Para mejorar la comodidad del pulido y aumentar la estabilidad de la pieza al momento de tomar la fotografía en el microscopio, la muestra se debe embeber en resina epóxica.

Para finalizar la preparación, la muestra debe frotarse sobre lijas comunes de carburo de silicio (SiC) desde un grano grueso (#100) hasta un grano más fino (#1500-2000), utilizando agua como lubricante. Este proceso debe durar entre 15 y 45 segundos por lija, tal como se detalla en la Tabla 1. Este procedimiento garantiza que la superficie de la muestra quede lisa y sin rayas, lo cual es crucial para obtener una imagen nítida y clara al momento de fotografiarla bajo el microscopio [5].

Tabla 1. Métodos de preparación de muestras metálicas para hacer metalografía [5].

Surface	Lubricant	Abrasive Type/Size ANSI (FEPA)	Time sec.	Force ^A N(lbf)	Platen RPM ^B	Rotation
Planar Grinding paper/stone	water	120–320 (P120–400) grit SiC/Al ₂ O ₃	15–45	20–30 (5–8)	200–300 ^C	CO ^D
Fine Grinding paper	water	240 (P220) grit SiC	15–45	20–30 (5–8)	200–300	CO
paper	water	320 (P500) grit SiC	15–45	20–30 (5–8)	200–300	CO
paper	water	600 (P1200) grit SiC	15–45	20–30 (5–8)	200–300	CO
Rough Polishing low/no nap cloth	compatible lubricant	6µm diamond	120–300	20–30 (5–8)	100–150	CO
Final Polishing med./high nap cloth	compatible lubricant	1µm diamond	60–120	10–20 (3–5)	100–150	CO
synthetic suede ^E	water	0.04µm colloidal silica or 0.05µm alumina	30–60	10–20 (3–5)	100–150	CONTRA ^F

3.6.2. Clasificación del grafito usando las imágenes de referencia de la norma A247 – 19

3.6.2.1. Clasificación por la forma del grafito

En la Figura 3 se pueden observar 7 metalografías tomadas a través de un microscopio electrónico a 100 aumentos (100 X), donde cada una muestra la microestructura de grafito que se puede presentar en las fundiciones de hierro y que se explican brevemente a continuación:

- Tipo de grafito I: se define como un grafito nodular y es el más deseable para conformar hierros dúctiles.
- Tipo de grafito II: grafito en nódulos ligeramente irregulares que no proporcionan mayor efecto en la ductilidad del hierro.
- Tipo de grafito III: son partículas de grafito irregulares debido a un tratamiento térmico de recocido que favorece la maleabilidad del hierro, sin embargo, es común seguir observando partículas de grafito tipo I o II.
- Tipo de grafito IV: el grafito se presenta en forma vermicular y es el principal componente que conforma un hierro compacto, no obstante, se sigue presentando con porcentajes de grafito tipo I y II.
- Tipo de grafito V: en este caso las partículas de grafito tienen forma de roseta. Este tipo de grafito es considerado un defecto en el proceso de enfriamiento y conformación de la fundición dúctil.
- Tipo de grafito VI: aquí las partículas de grafito tienen forma de nódulo explotado y al igual que el tipo de grafito V es considerado un defecto que se puede presentar durante la fabricación de la fundición dúctil.
- Tipo de grafito VII: el grafito tiene forma de hojuelas o escamas y es el principal constituyente del hierro o fundición gris.

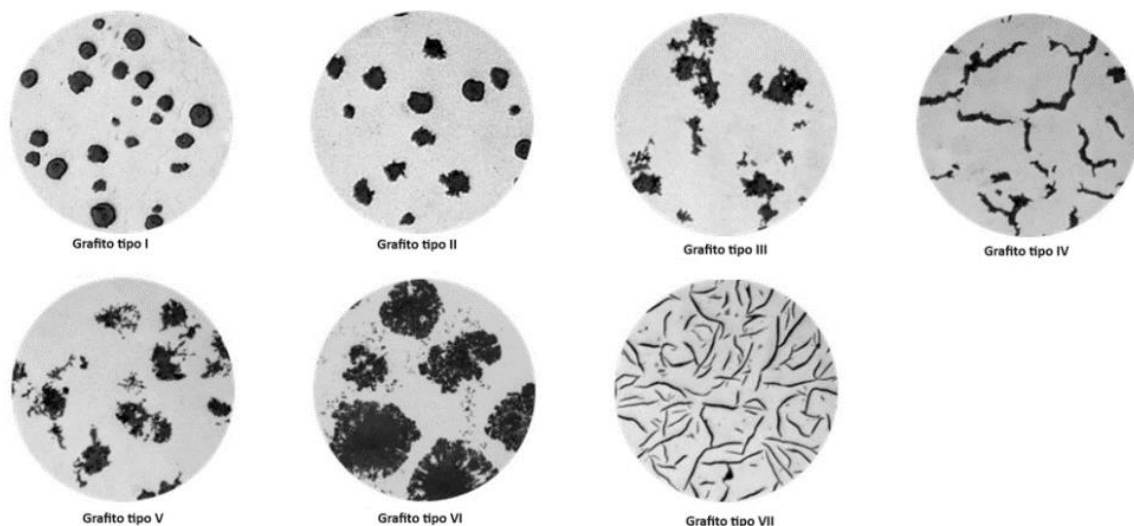


Figura 3. Tipos de grafito que se encuentran en las fundiciones de hierro [4].

3.6.2.2. Clasificación por la distribución del grafito

Esta clasificación es útil cuando se analizan metalografías a 100 X de grafito tipo VII, en hojuelas o escamas, presente en la fundición gris. Dicha distribución, como se nota en la Figura

4, va desde la A hasta la E. No obstante, en los hierros maleables puede aparecer en un patrón de distribución no aleatorio de hojuelas que se pueden clasificar con las distribuciones desde B hasta E.

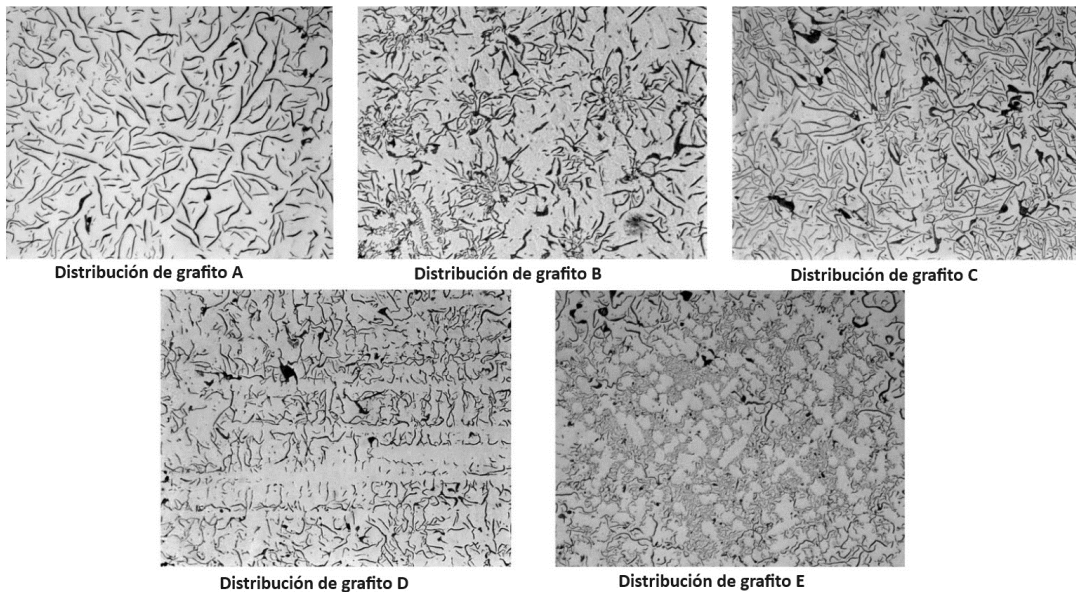


Figura 4. Distribución de grafito para fundición gris o fundición maleable [4].

3.6.2.3. Clasificación por tamaño del grafito

En este caso se definen 8 clases para fundición gris y 4 clases en fundición nodular, cuyas metalografías se pueden observar en la Figura 5 y en la Figura 6, respectivamente. Las clases de la fundición nodular (Figura 6) van desde la clase 4 hasta la 7, esto con el fin de tener correspondencia equitativa con el tamaño de las partículas de la fundición gris (Figura 5). El tamaño de las partículas de grafito para ambas fundiciones se enumera en la Tabla 2. Al igual que la clasificación por tipos, las metalografías fueron capturadas con un aumento de 100 X [4].

Tabla 2. Clasificación de las fundiciones gris y nodular dependiendo el tamaño de las partículas [4].

Clase de tamaño	Dimensión real en μm (Tamaño)
1	Tamaño ≥ 640
2	$320 \leq \text{Tamaño} < 640$
3	$160 \leq \text{Tamaño} < 320$
4	$80 \leq \text{Tamaño} < 160$
5	$40 \leq \text{Tamaño} < 80$
6	$20 \leq \text{Tamaño} < 40$
7	$10 \leq \text{Tamaño} < 20$
8	Tamaño < 10

Normalmente, la comparación visual con cualquiera de las dos figuras es suficiente para definir la clase de tamaño. Cuando ocurre una mezcla de uno o más tamaños de grafito en la misma muestra, las clases pueden informarse como porcentajes respecto al área total.

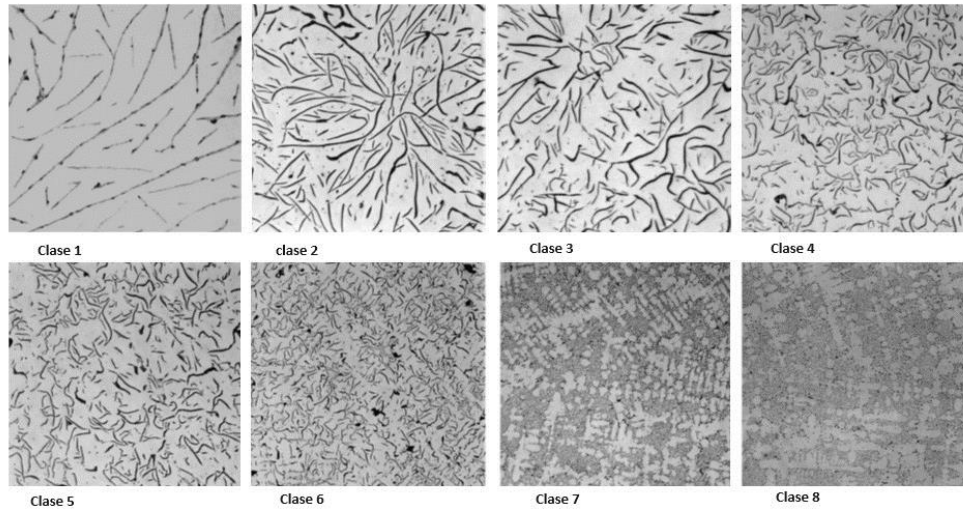


Figura 5. Clases de grafito por tamaño en hierro gris [4].

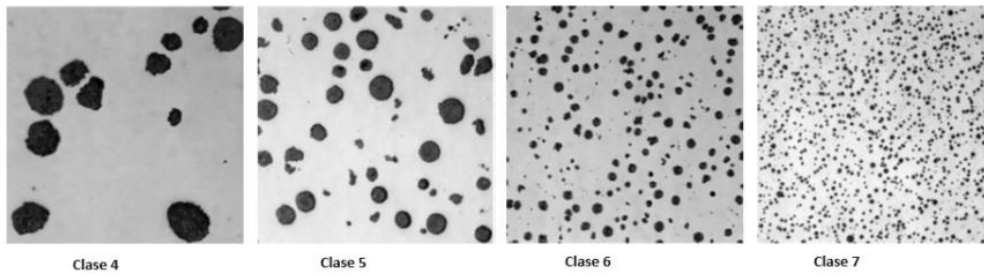


Figura 6. Clases de grafito por tamaño en fundición nodular [4]

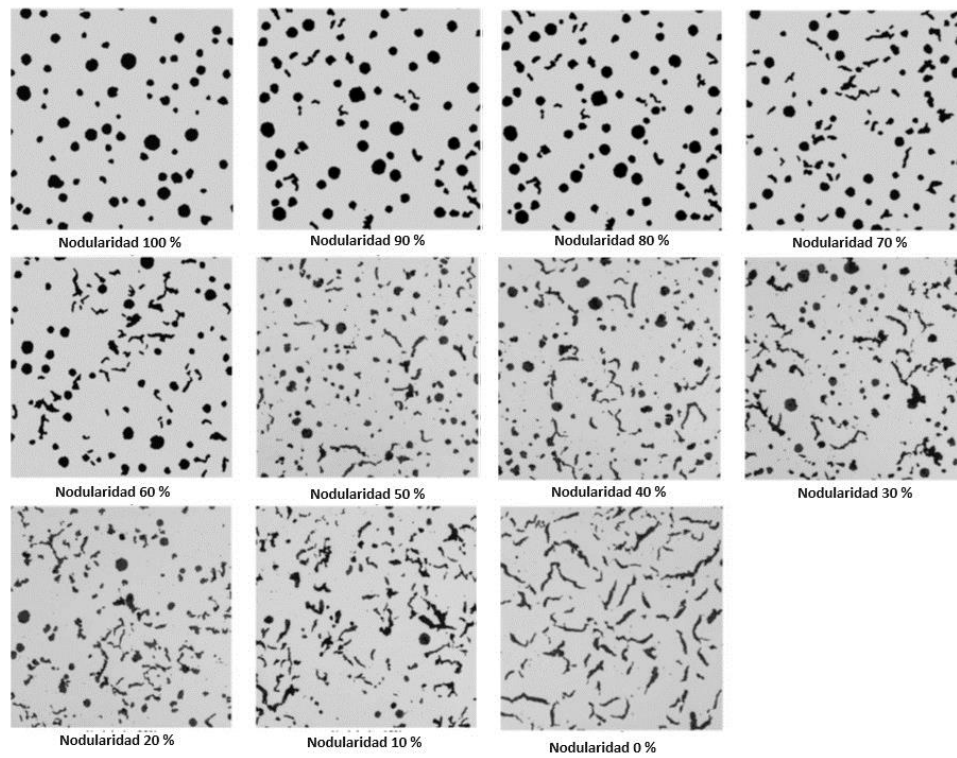


Figura 7. Ejemplos de porcentaje de nodularidad para metalografías de fundiciones de hierro a 100X [4].

3.6.2.4. Clasificación por porcentaje de nodularidad del grafito

En la Figura 7 se exponen metalografías de fundiciones de hierro donde las partículas nodulares se expresan en porcentaje del grafito total presente en la misma. Los hierros dúctiles suelen exhibir una nodularidad entre el 80 y el 100 %, los hierros grises una nodularidad del 0 % y los hierros de grafito compacto una nodularidad del 0 al 20 %. La nodularidad debe evaluarse tomando más de un campo de visión y por lo tanto el informe final a presentar a una empresa o cliente debe indicar el número de campos de visión o área de la muestra evaluada.

3.6.2.5. Clasificación por conteo de nódulos de grafito

El recuento de nódulos se expresa como el número nódulos de grafito por mm^2 ($\#\text{nódulos}/\text{mm}^2$). En la Figura 8 se puede notar una comparación entre el conteo de nódulos de hierro dúctil para diferentes porcentajes de nodularidad (100 % de nodularidad, 90 % de nodularidad y 80 % de nodularidad), respectivamente. Es de tener en cuenta que, aunque un recuento alto de nódulos indica una buena calidad metalúrgica, existe un rango óptimo para este parámetro y cuando éste es excedido resultar en una degradación de las propiedades del material [4].

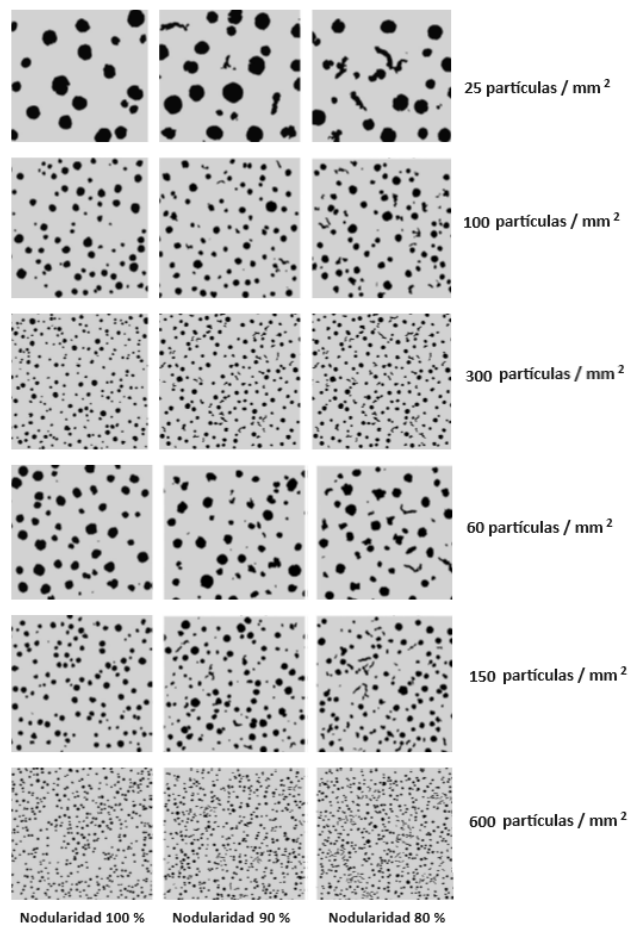


Figura 8. Conteo de partículas para porcentajes de nodularidad de 100, 90 y 80 % para metalografías tomadas a 100 X [4].

3.6.2.6. Reporte de la microestructura de grafito según la norma A247 – 19

El informe para presentar a un cliente o empresa después de realizar los estudios del grafito presente en una fundición de hierro debe contener principalmente el resultado del tipo o tipos de forma de grafito, la distribución de grafito y la clase de tamaño de grafito, donde el tipo o tipos de grafito se designan mediante números romanos del “I” al “VII”, la distribución del grafito se designa con una letra mayúscula de la “A” a la “E” y el tamaño del grafito se designa con un número arábigo del “1” al “8”, respectivamente. Por otro lado, la distribución del grafito estará designada para la fundición gris y por ende puede omitirse para el caso del hierro maleable y dúctil.

3.7. Procesamiento digital de imágenes (PDI) y visión artificial

Estas dos técnicas buscan simular el ojo humano a través de cámaras que capturen imágenes, y algoritmos que puedan ser desarrollados en una computadora para obtener resultados específicos, incluso lograr que la máquina adquiera métodos de aprendizaje similares a los de la experiencia humana (a través de Deep Learning - aprendizaje profundo -). Ambos conceptos, PDI y visión artificial, aunque diferentes en definición, suelen ser complementarios, incluso en algunos casos hacen uso de Deep Learning para favorecer los resultados de predicción que se buscan en el análisis de imágenes.

3.7.1. Procesamiento Digital de imágenes

PDI busca tratar las imágenes de forma que se puedan ajustar a las exigencias requeridas para posteriores análisis o para extraer información cuantitativa de la misma. Algunos ejemplos de tratamientos de imágenes son: dar formato, crear mapas de bits, modificar colores, crear histogramas, mejorar su resolución, modificar el tamaño de los objetos presentes, el contraste y realizar transformaciones, entre otros [6]. En general, con PDI se pueden detectar objetos, contabilizarlos y realizarle tratamientos a beneficio; justo las propiedades que se necesitan resaltar en el tratamiento de metalografías de fundiciones de hierro.

3.7.2. Visión artificial

La visión artificial funciona de manera muy similar a la visión humana. Ésta entrena a las máquinas para realizar funciones similares a las del ojo, pero tiene que hacerlo en mucho menos tiempo con cámaras, datos y algoritmos en lugar de retinas, nervios ópticos y corteza visual [7].

A diferencia de PDI, la visión artificial permite detectar el tipo de objeto y diferenciarlos de otros, lo cual es una ventaja de gran utilidad en la caracterización de fundiciones de hierro y en la clasificación del grafito.

3.7.3. Análisis de imágenes

Normalmente, el análisis consta de dos etapas. La primera, es el preprocesamiento de la imagen, en la cual se prepara la imagen limpiando y removiendo el ruido, para luego realzar los objetos a analizar; por tanto, es una etapa de vital importancia si se quieren lograr buenos resultados. La segunda, consiste en el reconocimiento y detección de objetos, donde se pueden clasificar las imágenes dependiendo si se tienen muestras para comparar (OCR – Reconocimiento óptico de caracteres -) o si no se tienen las muestras, detectando características específicas de los objetos como el tamaño, el color y la textura, entre otros [7]. En ambas etapas se puede hacer uso de las herramientas de Deep Learning, lo cual puede brindar resultados interesantes en la tipificación y clasificación de las metalografías de fundiciones de hierro.

4. Metodología para análisis de metalografías de fundiciones de hierro con software.

Con esta metodología se busca una ruta a seguir para caracterizar y clasificar el grafito en las fundiciones de hierro con ayuda de un software. Por tanto, la primera pauta consiste en las indicaciones para preparar la muestra de manera adecuada. Después, se busca obtener una imagen de la muestra que refleje su microestructura y sea guardada en una base de datos. Luego, esta imagen es llevada al software, que hará un análisis de la misma, según las técnicas definidas para su procesamiento y la caracterizará y clasificará. Por último, los datos obtenidos se guardarán en una base de datos con el objetivo de tener disponible esta información para posteriores estudios.

Para lograr lo anterior, primero se debe realizar una metodología de preparación de muestra, posteriormente un diseño del software y consecuentemente el desarrollo del mismo. Una vez obtenido el software, éste será validado con un experto para garantizar que los resultados obtenidos son confiables y por tanto la metodología puede ser aplicada para la tipificación, caracterización y clasificación de grafito en las fundiciones de hierro.

4.1. Metodología de preparación de muestras

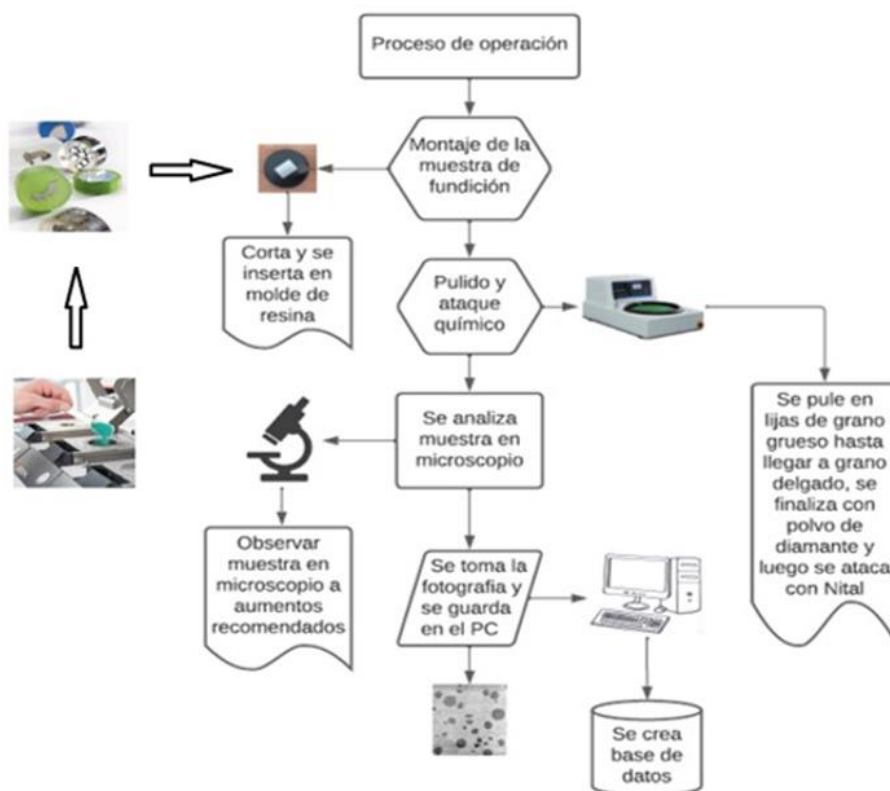


Figura 9. Metodología de preparación de muestras.

En la Figura 9 se puede observar un mapa conceptual que describe la metodología creada y usada para la preparación de las muestras de diferentes fundiciones de hierro, siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM E3 – 11. Por otro lado, en la Figura 10 se observan ejemplos de las muestras usadas en este trabajo, montadas en la resina y pulidas, listas para tomar la imagen metalográfica.



Figura 10. Muestras después del montaje en resina y proceso de pulido.

En la Figura 11 se expresan los aumentos y las escalas a las cuales se pueden tomar las microfotografías en un microscopio óptico para todo tipo de muestras. Sin embargo, para las fundiciones de hierro y con base al cumplimiento de la norma A247-19, las muestras deben ser clasificada en 100X y una escala de 250 μm .

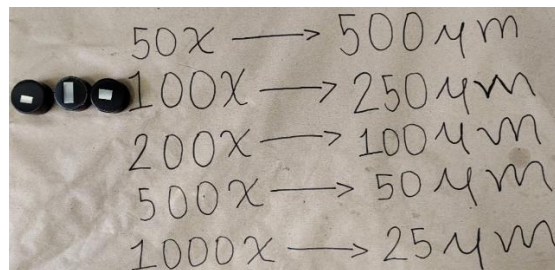


Figura 11. Clasificación de las muestras de Fe-C según la norma A247-19.

Finalmente, a través del microscopio óptico se proyecta luz sobre la muestra para observar su microestructura. Esta imagen se puede observar en el monitor de una computadora con ayuda del software Nikon DS-F12 camera, para las referencias Nikon Eclipse MA100.

- Descripción técnica del microscopio óptico:

Nikon SMZ1500 LED Stereoscope Stereo Zoom Fluorescence Microscope Pred SMZ25 Unit2:

- Base: P-BERG Trinocular Head, (2) C-W10xA/22 Eyepieces.
- Objetivo: 1.6X WD24 HR Plan Apo.
- Iluminación: LED Light Ring DPD-60HW w/ power supply.
- Cámara: 10MP CMOS Camera.

- *Descripción técnica del PC:*

Computador portátil o de escritorio donde se pueda instalar el software de control del microscopio. 16G RAM - Core i5 10Th – Nvidia RTX 3050 – 1.5 T

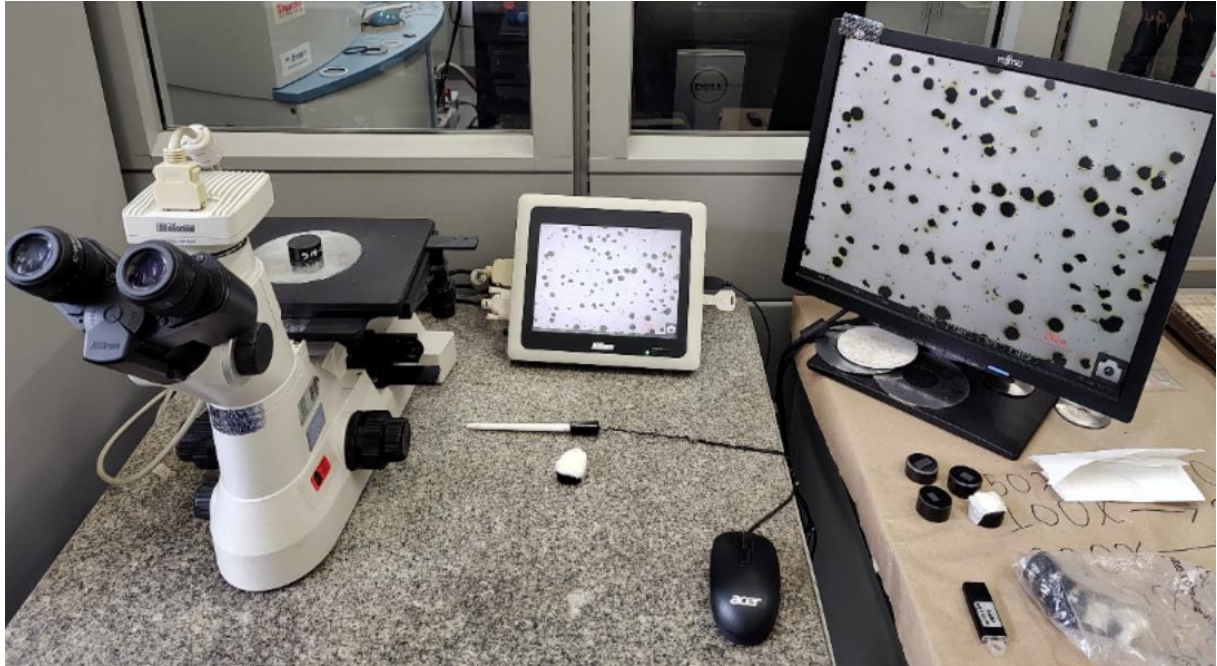


Figura 12. Microscopio óptico con su respectivo montaje.

4.2. Diseño del software

El diseño del software en este trabajo se realiza bajo la visión funcional que, en resumen, describe lo que hace cada componente. Entonces, una vez se tiene una imagen metalográfica dentro de la Base de Datos de imágenes (BDi), se realizan una serie de procesos que permitirán extraer de la misma información valiosa para lograr obtener un resultado fiable, el cual, debe presentarse de la manera más amigable bajo una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI). Por tanto, es muy importante conocer que resultados se buscan obtener con el programa, ya que esto ayudará a describir que debe realizar cada componente para lograr alcanzar estas metas. En consecuencia, primero se describen los resultados que se desean obtener y mostrar en la GUI y luego la manera como se van a tratar las imágenes para alcanzar dichos resultados. Se busca que la única entrada que va a tener la aplicación es la imagen.

4.2.1. Resultados esperados

Lo que se debe observar cómo resultados en la GUI, según la Figura 13, se define a continuación:

De la Tabla de “clasificación por porcentaje y conteo nódulos”, que según la norma A247 – 19 solo aplica para los tipos de grafito I a IV, se tiene como resultado:

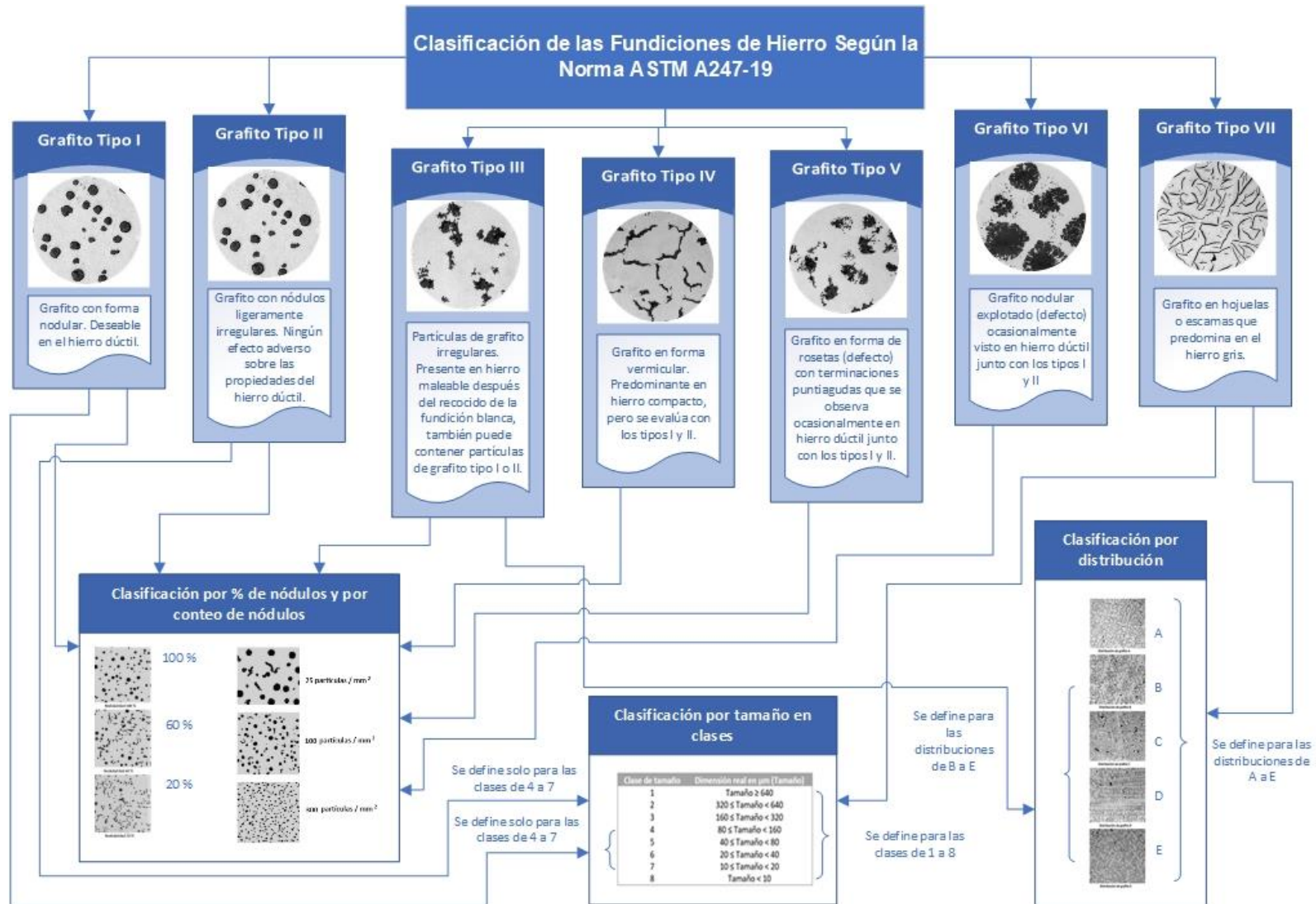


Figura 13. Mapa conceptual para la caracterización y clasificación de fundiciones de hierro [4].

- Porcentaje de grafito nodular con respecto al grafito total.
- Cantidad de las partículas de grafito nodular (conteo de nódulos).

De la Tabla de “clasificación por distribución”, que aplica solo para grafitos tipo III y VII, se concluye:

- Distribución para grafito Tipo III se etiquetan desde la letra B hasta la E.
- Distribución para grafito tipo VII se etiquetan desde la A hasta la E.

De la Tabla de “clasificación por tamaño”, que solo aplica para los tipos de grafito I, II y VII, se debe obtener:

- Tamaño promedio de las partículas de grafito nodulares (I y II) enumeradas de 4 a 7.
- Tamaño de partículas de grafito en forma de hojuelas (VII), enumeradas de 1 a 8.

4.2.1. Tratamiento de las imágenes

Consiste en describir los procesos que se van a realizar a cada una de las imágenes metalográficas extraídas de la BDi. Primero, se debe realizar a la imagen un preprocesamiento, cuyo objetivo principal es binarizarla para facilitar la visualización de los objetos con respecto al fondo de la imagen. Después, se procede a realizar un procesamiento, con el fin de eliminar el ruido y partículas u objetos no deseados, en pocas palabras, reducir al mínimo la basura en la imagen y de esta manera dejarla virgen para el próximo paso. Por último, aplicar algoritmos de análisis para segmentar, contabilizar y medir áreas de los objetos de interés. En la Figura 14 se puede observar un mapa conceptual general de los tratamientos a realizar a la imagen metalográfica.

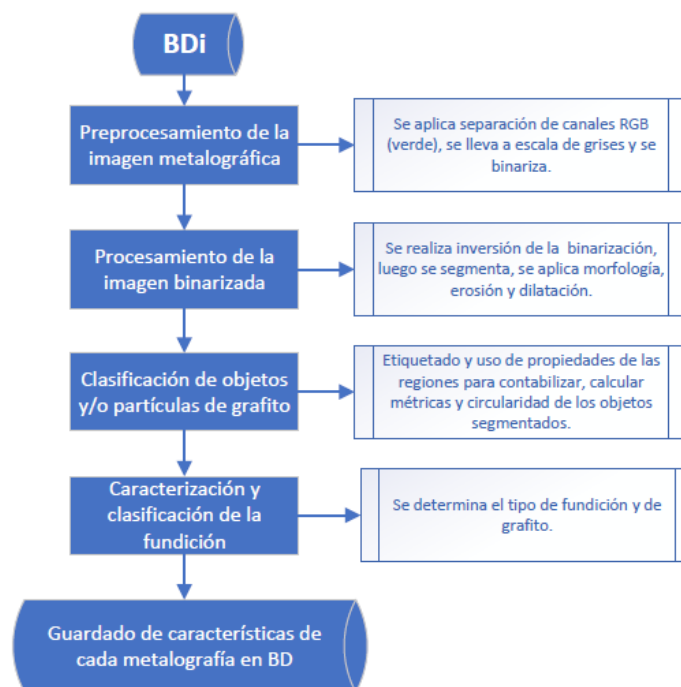


Figura 14. Estructura del proceso que debe realizar software a la imagen para obtener los resultados esperados.

Para poder obtener los resultados esperados, se debe crear un algoritmo que permita tipificar y clasificar el grafito presente en las fundiciones de hierro, por tanto, debe estar en la capacidad de diferenciar:

- Los tipos de grafito, del I hasta VII. Esto se logra aprovechando que las partículas de grafito presentes en las metalografías son de diferentes formas, distribuciones y tamaños, lo cual permite aprovechar estas características para aplicar herramientas como la variación del radio con respecto al centroide de cada objeto en la imagen, conocida como circularidad, para determinar el tipo de fundición. Por ejemplo, si la circularidad es nula ($\text{circularidad} < 35\%$), se puede decir que es grafito tipo VII correspondiente a una fundición gris. Si el rango es $70\% > \text{circularidad} > 35\%$, se consideran dentro de los tipos III, IV, V o VI; donde V y VI se consideran grafitos defectuosos que hacen parte de las funciones dúctiles; si el porcentaje de partículas irregulares de grafito tipo III es mayor a las partículas nodulares presentes, se considera un hierro maleable; y si el porcentaje de grafito tipo IV también es alto, se define como un hierro compacto. Por último, si $\text{circularidad} > 70\%$ es una partícula de grafito nodular y por tanto pertenecería a los tipos I o II.
- Después de definir el grafito, si éste es tipo I, II, III, IV, V o VI, y apoyados en la norma A247-19, el paso a seguir por el software es calcular:
 - Porcentaje de grafito nodular con respecto al grafito total.
 - Cantidad de las partículas de grafito nodular (conteo de nódulos).
 - Tamaño de los nódulos limitados entre las clases 4 a 7.

Si el grafito presente es tipo VII, la aplicación deberá mostrar:

- La distribución de grafito en hojuelas, con etiquetas que pueden estar entre la clasificación de la A hasta la E.
- Tamaño de partículas de grafito en forma de hojuelas, que pueden estar enumeradas entre la clase 1 hasta la 8.

En adición, si el software clasifica el grafito en tipo III, el software realizará:

- La distribución de grafito con etiquetas que pueden estar entre la clasificación de la B hasta la E.

4.3.Desarrollo del software TG

Para el desarrollo de esta aplicación se hizo uso de la herramienta Matlab, dentro de la cual se encuentra una herramienta para el diseño de la interfaz gráfica conocida como App Designer.

4.3.1. Matlab

Se hace uso de la herramienta Matlab por su versatilidad y facilidad del lenguaje a la hora de realizar algoritmos para PDI e inteligencia artificial (IA), además, por la cantidad de librerías disponibles para procesamiento, análisis de imágenes y aprendizaje de máquina.

4.3.1.1. Desarrollo de la interfaz gráfica usuario (GUI) con App Designer

Esta aplicación de Matlab permite crear una app sin necesidad de ser un desarrollador de software experimentado. La facilidad de arrastrar y poner componentes brinda la construcción de una GUI amigable y simple de utilizar, justo lo que se está buscando implementar para la tipificación, clasificación y caracterización de las fundiciones de hierro. En la Figura 15 se puede observar la implementación de la GUI con sus respectivas entradas y salidas.

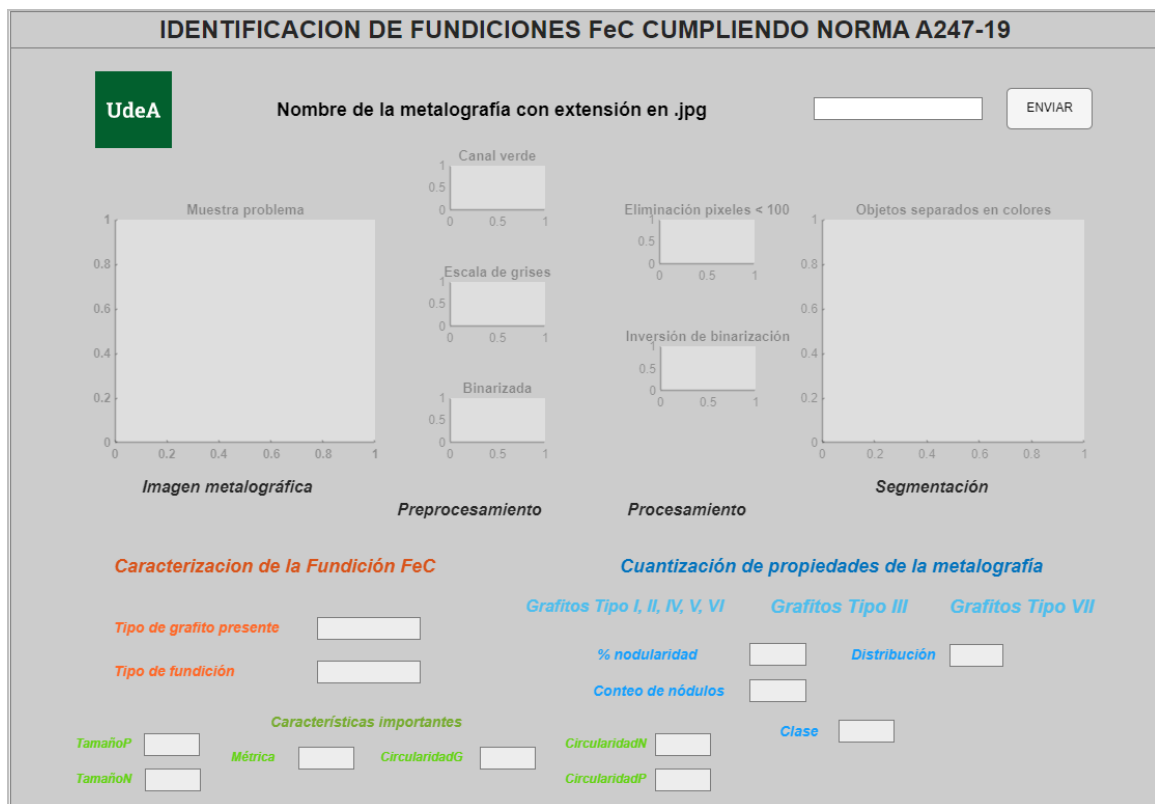


Figura 15. Desarrollo de la interfaz gráfica de usuario (GUI) en APP Designe de MATLAB.

A continuación, se expone la estructura del código implementado para la aplicación.

4.3.1.2. Desarrollo de los algoritmos para el procesamiento digital de la imagen y visión artificial.

- Etapa de preprocesamiento

Se carga la imagen en el software para iniciar el preprocesamiento.

```
nameMet = string(app.NombredelametalografaconsuextensinEjjpgTIFGIFEditField.Value);
ImgMet = strcat("D:\ubicacion de la carpeta\",nameMet);
metalografiaC = imread(ImgMet);
```

Luego, se procesa la imagen para llevarla a canal verde, lo que corresponde a obtener un solo plano para valores de píxeles entre 0 y 255, que en palabras coloquiales implica trabajar solo en una dimensión de color. Posteriormente se aplica una función para convertir a escala de grises, facilitando el siguiente paso, el cual corresponde a la binarización cuyo objetivo es el de facilitar la visual entre los objetos de la imagen y el fondo de la misma (obtener una imagen en blanco y negro).

```
% ---- Separar la img en sus componentes RGB de interes el verde
metalografiaCG = metalografiaC(:,:,2);

% ---- Se lleva la img a escala de grises
metalografiaCG_g = im2gray(metalografiaCG);

% ---- Se binariza img con Thres hold
metalografiaCG_b=graythresh(metalografiaCG_g);
metalografiaCG_t=imbinarize(metalografiaCG,metalografiaCG_b);
```

- Etapa de procesamiento

La inversión de la binarización permite observar con más facilidad los objetos basura y el ruido que exista sobre la imagen binarizada, incluso, permite ver los sectores vacíos dentro de los objetos de interés. Por tanto, se procede a invertir la binarización, a eliminar objetos menores a 20 píxeles y a rellenar los huecos internos dentro de los objetos de interés.

```
% Se invierte binarización
metalografiaCG_n = not(metalografiaCG_t);
% Se eliminan objetos que contengan menos de 20 pixeles
metalografiaCG_n = bwareaopen(metalografiaCG_n,20);
```

- Etapa de segmentación y análisis de áreas

Una vez preparada la imagen y resaltados los objetos de interés, se procede a segmentar los objetos.

```
% Etiquetado y enumeración de objetos
[B,L] = bwboundaries(metalografiaCG_n,"noholes");
% Se establecen las propiedades de circularidad, longitud y centroide de la región
stats = regionprops(L,"Area","Circularity","Centroid", "MajorAxisLength", "MinorAxisLength", "Area", "Perimeter");
% Se obtiene la circularidad de la etiqueta "k" o del objeto correspondiente
circ_value = stats(k).Circularity;
% Se obtiene la métrica de la etiqueta "k" o del objeto correspondiente
metrica_value = perimetro_value^2 / (4*pi*area_value);
```

- Etapa de cálculos

En este apartado, se realizan los cálculos de circularidad y métrica que ayudaron a determinar los tipos de fundición y tipos de grafito, distribución, clase, conteo de nódulos y porcentaje de nodularidad.

```
% Porcentaje promedio de circularidad de las partículas
circularidadP = circularidadT / conteoParticulas;
% Se calcula la metrica de las particulas de grafito
metricaP = metricaT / conteoParticulas;
```

- Etapa creación de base de datos

Los datos de interés para los expertos son guardados en una BD en Excel, que pueden ser usadas en cualquier momento. La idea es recopilar la mayor cantidad de resultados posibles para usarlos posteriormente en áreas de la inteligencia artificial y de procesamiento de datos.

```
% Se crea el archivo excel
filename = 'BDMet.xlsx';
ruta = strcat('D:\MEGA\TRABAJO DE GRADO\Trabajo de grado TG\Software Matlab TG\',filename);
% Si el archivo en la ruta ya existe, se lee
if isfile(ruta)
    ruta = readtable(ruta);
% Sino, se crea un archivo nuevo en la ruta
else
    ruta = table(NOMBRE, TIPO_FUNDICION, TIPO_GRAFITO, PORCENTAJE_NODULARIDAD, CONTEO_NODULOS, CLASE, DISTRIBUCION);
end
% Se crean los titulos de las columnas
NOMBRE = nameMet;
TIPO_FUNDICION = tipoFundicion;
TIPO_GRAFITO = tipoGrafito;
PORCENTAJE_NODULARIDAD = porcentajeNodularidad;
CONTEO_NODULOS = conteoNodulos;
CLASE = clase;
DISTRIBUCION = distribucion;
% Se crea la nueva fila
nuevaFila = table(NOMBRE, TIPO_FUNDICION, TIPO_GRAFITO, PORCENTAJE_NODULARIDAD, CONTEO_NODULOS, CLASE, DISTRIBUCION);
% Se agrega al archivo en la ruta la nueva fila
ruta = [ruta; nuevaFila];
writetable(ruta, filename)
```

5. Resultados y análisis

Después de desarrollar la aplicación en MATLAB, se realizaron pruebas de funcionamiento del software, donde se escogieron algunas metalografías de fundiciones de Fe-C al azar. En la Figura 16 se muestra la metalografía de una fundición cuyo resultado indica que contiene grafito Tipo I, correspondiente a una fundición nodular.

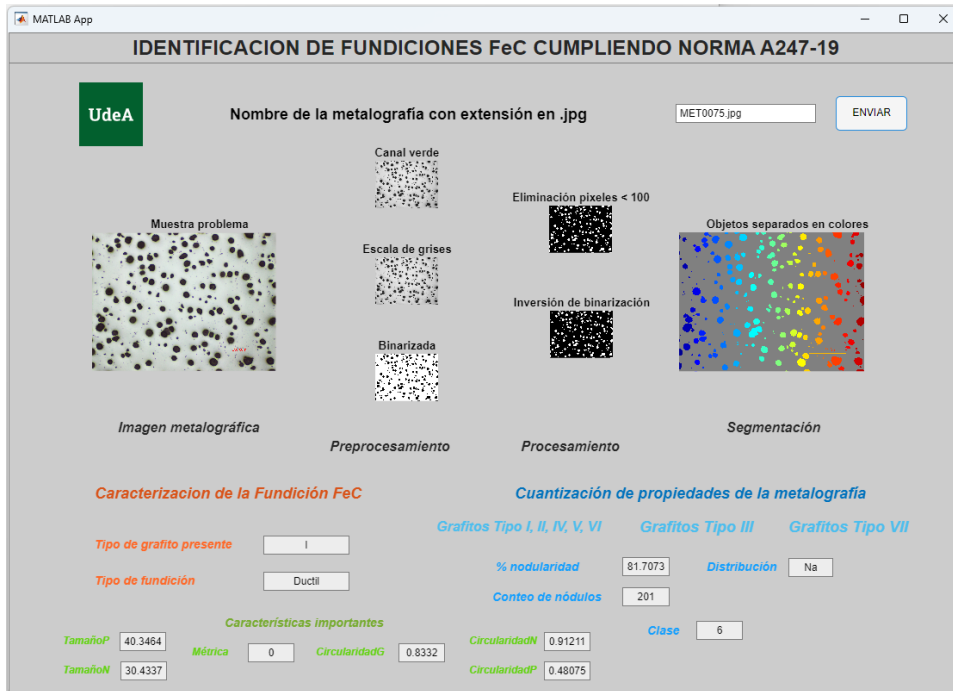


Figura 16. Fotografía de la información arrojada por la aplicación para una fundición nodular.

Los parámetros de interés para este tipo de fundición, según la norma A247-19 son: el porcentaje de nodularidad, la cantidad de nódulos y la clase, 81.7073 %, 201 y 6, respectivamente.

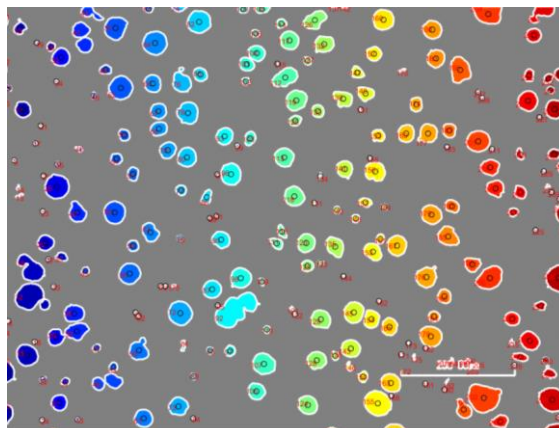


Figura 17. Fotografía donde se muestra el proceso de segmentación de la metalografía.

En la Figura 17 se puede observar el proceso de segmentación de la metalografía. Los segmentos o partículas con un círculo negro en su interior son clasificadas como nodulares, y los números en rojo indican el conteo de cada partícula. Por otro lado, los colores se usan para diferenciar las regiones. Por último, a cada partícula se le genera un contorno que permita visualizar sus límites.

Comparando la anterior información obtenida con el ojo de los expertos (los profesores Oscar Ríos y Andrés Santa Cruz, quienes laboran realizando metalografías de este tipo, entre otras, en el laboratorio de fundición de la Facultad de Ingeniería de la UdeA) indican que los resultados son muy similares a los realizados por ellos: 74.95 %, 183 y 6 para el porcentaje de nodularidad, conteo de nódulos y clase, correspondientemente. Concluyendo que el tipo de grafito es Tipo I, para fundición nodular. El porcentaje de nodularidad fue realizado con la herramienta ImageJ.

Por tanto, para esta primera prueba del software, se obtuvieron resultados muy similares, teniendo como ventaja que los arrojados por la aplicación, se logran simplemente con un click. Explican los expertos que los resultados con ImageJ tiene un porcentaje de error debido a que es una medida que depende directamente de la persona y de la mano de quien lo esté realizando, lo mismo sucede con el conteo de nódulos y la medición de las partículas.

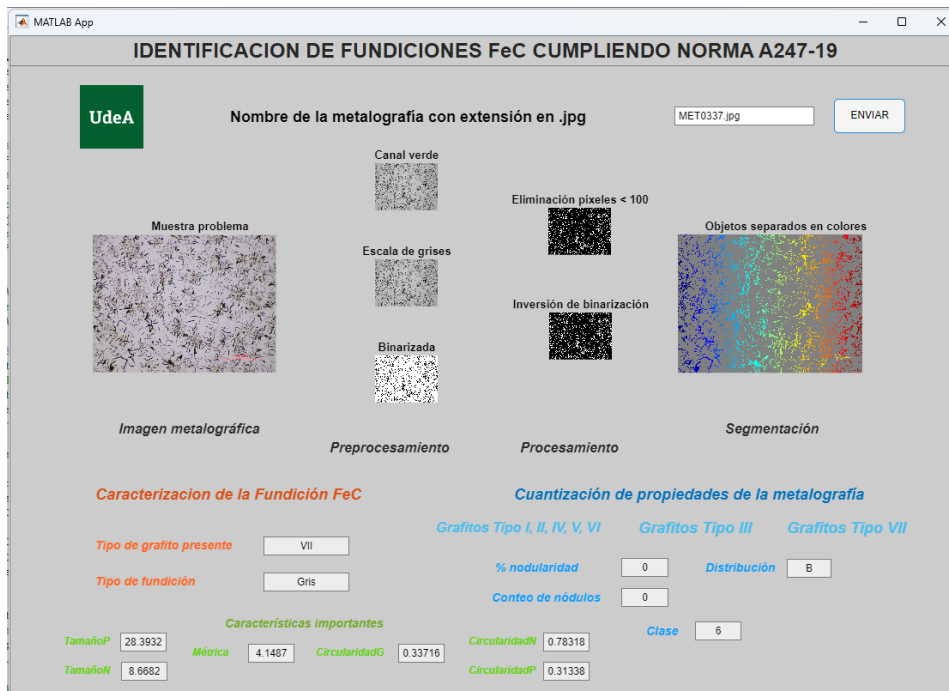


Figura 18. Fotografía de la información arrojada por la aplicación para una fundición gris.

Continuando, en la Figura 18 se nota la metalografía de una fundición gris que, a simple ojo y a través de su experiencia, los expertos indican es una fundición gris Tipo VII, y al compararla con las imágenes de apoyo de la norma A247-19 concluyen que es de distribución B, ya que posee una estructura concentrada en puntos específicos, como tipo flor o rosa, y al tomar medidas con ImageJ, determinan un tamaño correspondiente a la clase 6.

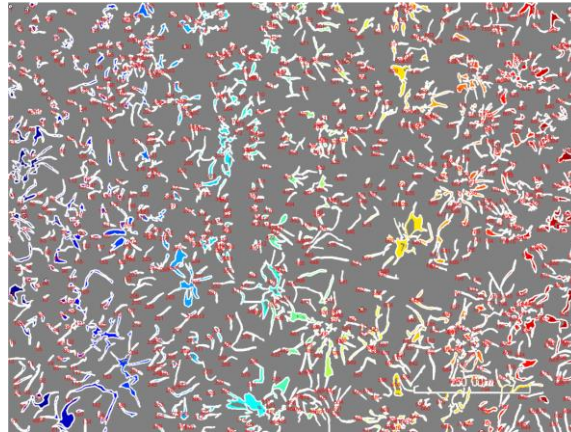


Figura 19. Fotografía con análisis de visión artificial de imagen de una fundición gris.

Entonces, al introducir la metalografía en la aplicación, se puede observar en la Figura 18 los resultados arrojados por la misma. Donde se muestra una fundición gris, Tipo VII, de distribución B y clase 6. Por tanto, los resultados son equivalentes entre ambas partes. En la Figura 19 se observa el conteo de partículas, donde la gran mayoría son objetos en forma de hojuelas enumeradas para ser analizadas una a una.

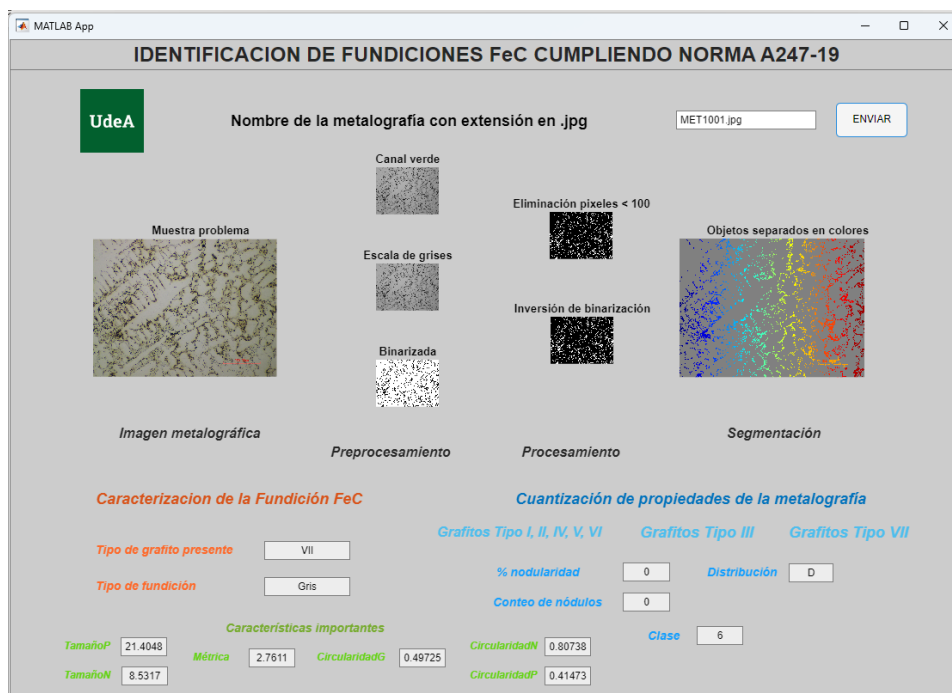


Figura 20. Fotografía de la información arrojada por la aplicación para una fundición gris.

La tercera metalografía, Figura 20, analizada con el software es otra fundición gris cuyos resultados indican Tipo VII, distribución D y clase 6. Lo importante de este análisis es que aparentemente el proceso de métrica y circularidad aplicados en el desarrollo del software hace su trabajo de la mejor manera, diferenciando las distribuciones y las clases correctamente, brindando soluciones con bajo error y que sean satisfactorias para el ojo experto.

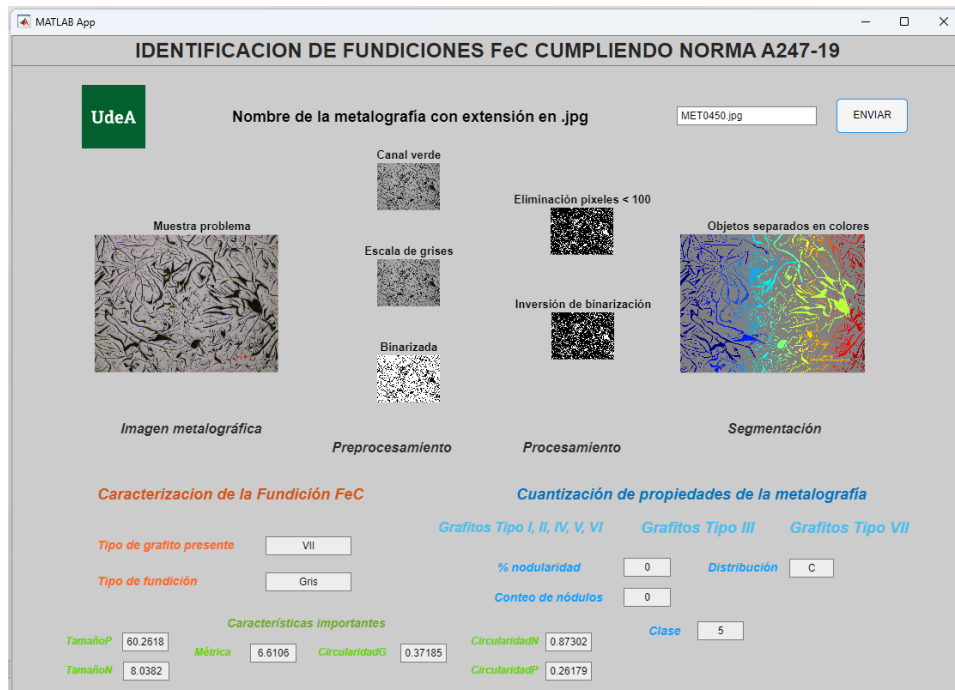


Figura 21. Fotografía de la información arrojada por la aplicación para una fundición gris.

A continuación, se expone el estudio de otra metalografía con características diferentes. Ver Figura 21, donde los expertos concluyen que es una fundición gris, Tipo VII, de distribución C y clase 5, lo que es coherente con el software.

Procediendo, se introduce en la aplicación una metalografía de un tipo diferente a los ya analizados. La Figura 22, muestra la microestructura de una fundición que no es similar a ningún de las anteriormente vistas, y que, en su estudio por los expertos comentan que probablemente sea una fundición maleable con porcentaje de nodularidad del 25% y conteo de nódulos de 80. Introducida la imagen en la aplicación, se muestra que es una fundición maleable, tipo III, pero que aun siendo de este tipo, se caracteriza con las propiedades de los tipos I y II, por ello se observa un porcentaje de nodularidad bajo (33.6493 %), con una cantidad de nódulos de 71, que se encuentran en la Clase 7, la más pequeña para los nódulos, ya que como se observa en la interfaz del programa (Figura 22), en la parte inferior izquierda, su

tamaño correspondiente de nódulos promedio es de 9.8892 μm , que al ser comparada con los tamaños de la Tabla 2, corresponde a dicha clase.

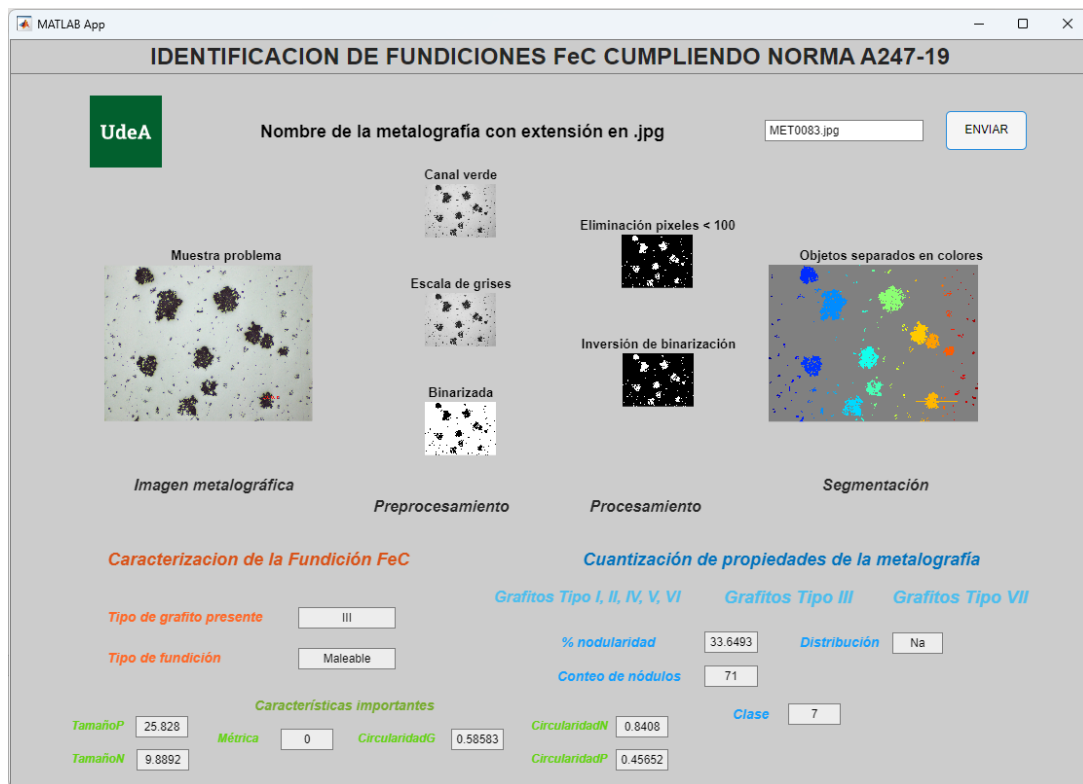


Figura 22. Fotografía de la información arrojada por la aplicación para una fundición maleable.

Comentan los expertos que estas metalografías son las que mayores dificultades les presentan, ya que el conteo de nódulos se hace muy engorroso y por ende el porcentaje de nodular es muy inexacto. Sin embargo, al realizar las comparaciones con la Tabla 2 y con las metalografías de apoyo de la Figura 6, se puede verificar que los resultados obtenidos por la aplicación son muy acertados.

	A	B	C	D	E	F	G
	NOMBRE	TIPO_FUNDICION	TIPO_GRAFITO	PORCENTAJE_NODULARIDAD	CONTEO_NODULOS	CLASE	DISTRIBUCION
1	MET0075.jpg	Ductil	I	81,70731707	201	6	Na
2	MET0337.jpg	Gris	VII	0	71	6	B
3	MET1001.jpg	Gris	VII	0	273	6	D
4	MET0450.jpg	Gris	VII	0	112	5	C
5	MET0083.jpg	Maleable	III	33,6492891	71	7	Na

Figura 23. Base de datos creada por el software.

Para finalizar, en la Figura 23 se puede observar un repositorio de toda la información obtenida por cada metalografía que fue arrojada por el software y que es de vital importancia para los análisis del experto y para conformar una base de datos lo suficientemente extensa para realizar posteriormente estudios con inteligencia artificial y procesamiento de datos.

6. Conclusiones

La metodología de preparación de muestras fue todo un éxito, ya que permitió obtener las fotografías de las microestructuras de las probetas de fundiciones de FeC con la mayor facilidad y calidad posible.

El diseño de la aplicación suministró bases importantes para el desarrollo de la misma, ya que permitió descubrir y conceptualizar los resultados que buscan los expertos para presentar sus informes apoyándose en la norma. Por tanto, en la metodología, se buscó realizar inicialmente un estudio de salidas y para asociarlas con las entradas.

El desarrollo de la aplicación fue toda una odisea, sin embargo, con ayuda de la AppDesigne de Matlab, se facilitó el proceso de creación de la interfaz gráfica. Además, con la versatilidad del lenguaje de Matlab y sus librerías, se pudieron usar herramientas que a favor permitieron conseguir los resultados esperados.

Se comprobó con los expertos en metalografía, que la aplicación cumplía a cabalidad con la tipificación, caracterización y clasificación de las propiedades de las fundiciones de hierro, y que la metodología en realidad facilita la obtención de resultados, optimizando tiempos de trabajo.

Se pudo desarrollar una metodología general para la identificación y extracción de propiedades de interés que cumplen todas las condiciones exigidas por las normas y que puede ser tranquilamente usada en cualquier espacio que lo exija.

7. Poster

Departamento de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones

Análisis metalográfico de fundiciones de hierro usando técnicas de procesamiento digital de imágenes y visión artificial.



UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
Facultad de Ingeniería

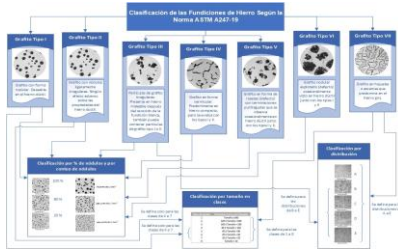
PRACTICANTE: Fredy Mauricio Ríos Sánchez
ASESORES: David Stephen Fernández McCann

PROGRAMA: Ingeniería de telecomunicaciones
Semestre de la práctica: 2022



Resumen

Este trabajo tiene como resultado una metodología para facilitar el análisis de las metalografías de fundición de Fe-C, donde se usaron herramientas de procesamiento de imágenes y visión artificial.



Introducción

A pesar de que las fundiciones de Hierro – Carbono (Fe-C), o simplemente fundiciones de hierro, pueden ser fácilmente caracterizadas e identificadas a través de una metalografía, que expone su microestructura y la forma del grafito de manera clara, una persona experta en análisis de microestructuras puede cometer varios errores en la tipificación del grafito, en la detección del tamaño, en la identificación de clases o en el conteo de hojuelas y nódulos de grafito, ya que depende solo del ojo y su criterio como herramienta. Lo anterior, se convierte en una labor de paciencia y concentración para el experto, ya que debe mantener la postura cada que vaya a analizar una metalografía de fundición de hierro, y un instante de desconcentración puede inducir errores que se vean reflejados en los informes a presentar a los clientes o interesados, o incluso hasta tener que volver a empezar el análisis de las clasificaciones mencionadas, lo que se traduciría en tiempo y por ende dinero.



Objetivos

Desarrollar una metodología que use técnicas de PDI y visión artificial, apoyadas en normas establecidas de preparación de muestras y análisis de fundiciones de hierro, para ayudar al ojo experto en la caracterización, extracción y clasificación de propiedades de interés de las metalografías de dicha fundición para almacenarlas en una base de datos.

- Planificar la metodología de preparación de probetas de las fundiciones de hierro para obtener una correcta metalografía a través de un microscopio óptico y almacenarlas en una base de datos de imágenes (BD).
- Diseñar el procesamiento digital y de visión artificial que se realizará a las metalografías en la BD, bajo la norma de análisis de fundiciones de hierro A247-19, para garantizar su debida caracterización y clasificación.
- Desarrollar el software, bajo el diseño anterior, que reciba las metalografías de la BD y muestre como resultado la información de interés, para luego consolidarlas un reporte que contenga su caracterización y clasificación.
- Validar que el entorno de simulación y el software desarrollado cumplan con las expectativas de funcionamiento y luego, con ayuda de una persona experta en metalografías de hierro, se compruebe que la metodología general funciona correctamente.

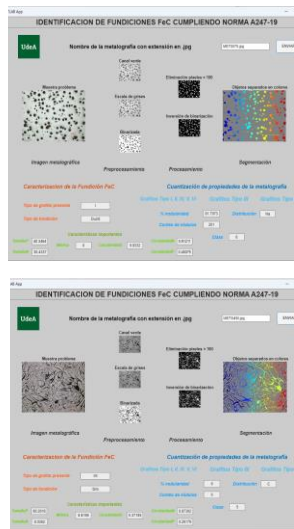


Metodología

Metodología	#
Extraer de la norma ASTM E3-11 la para preparación de muestras de fundiciones de hierro.	1
Diseñar la metodología para preparar las muestras con base en la norma.	2
Aplicar la metodología de preparación de muestras para tomar correctamente las metalografías de las fundiciones de hierro.	3
Tomar las imágenes de las metalografías en el microscopio óptico y organizar las imágenes en BD con nombres sencillos y enumerados.	4
Crear la metodología de la primera etapa de análisis de imágenes con PDI para acondicionar correctamente las imágenes metalográficas.	5
Desarrollar la metodología de la segunda etapa de análisis de imágenes con PDI y visión artificial, apoyándose en la norma ASTM A247-19, para proceder con la detección y reconocimiento de objetos de las metalografías.	6
Compilar ambas metodologías para obtener el diseño general de análisis de imágenes metalográficas.	7
Realizar el software con interfaz gráfica que permita seleccionar la imagen desde BD y muestre los resultados de interés.	8
Guardar los resultados en una BD como reporte.	9
Validar los resultados de la metodología en dos pasos, uno con verificación del software, y el otro con ayuda de un ojo experto en fundiciones de hierro para garantizar su veracidad.	10



Resultados



Conclusiones

- La metodología de preparación de muestras fue todo un éxito, ya que permitió obtener las fotografías de las microestructuras de las probetas de fundiciones de FeC con la mayor facilidad y calidad posible.
 - El diseño de la aplicación suministró bases importantes para el desarrollo de la misma, ya que permitió descubrir y conceptualizar los resultados que buscan los expertos para presentar sus informes apoyándose en la norma. Por tanto, en la metodología, se buscó realizar inicialmente un estudio de salidas y para asociarlas con las entradas.
 - El desarrollo de la aplicación fue toda una odisea, sin embargo, con ayuda de la AppDesigne de Matlab, se facilitó el proceso de creación de la interfaz gráfica. Además, con la versatilidad del lenguaje de Matlab y sus librerías, se pudieron usar herramientas que a favor permitieron conseguir los resultados esperados.
 - Se comprobó con los expertos en metalografía, que la aplicación cumplía a cabalidad con la tipificación, caracterización y clasificación de las propiedades de las fundiciones de hierro, y que la metodología en realidad facilita la obtención de resultados, optimizando tiempos de trabajo.
- Se pudo desarrollar una metodología general para la identificación y extracción de propiedades de interés que cumplen todas las condiciones exigidas por las normas y que puede ser tranquilamente usada en cualquier espacio que lo exija.

DATOS DE CONTACTO DEL AUTOR:

+57 3217411325

fmauricio.rios@udea.edu.co



https://www.linkedin.com/in/mauricio-rios-sanchez-96a5a9230?utm_source=share&utm_campaign=share_via&utm_content=profile&utm_medium=android_app

8. Bibliografía

- [1] J. M. A. Martín, Introducción a la ciencia de materiales; técnica de preparación y caracterización., España : Consejo superior de investigación , 1993.
- [2] J. H. F. Douglas A Skoog, Análisis instrumental, España: McGraw Hill, 1995.
- [3] W. Smith, Fundamentos de ingeniería y ciencias de los materiales, España: Mc GRaw Hill, 1993.
- [4] ASTM , Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings (A247 – 19), 2019.
- [5] ASTM, Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens (E3 – 11), 2017.
- [6] R. E. W. Rafael C. Gonzales, Digital Image Processing, N.J.: Prentice Hall, 2008.
- [7] MATLAB, «Técnicas de visión artificial y procesamiento de imágenes con MATLAB.,» 2022. [En línea]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=sJ2eAW_Xg9M.