

Universidad Central «Marta Abreu» de las Villas
Facultad de Ingeniería Mecánica
Departamento de Soldadura



Trabajo de Diploma

Título: *Estimación de las propiedades mecánicas y tamaño de grano del acero AISI 1045 utilizando técnicas de procesamiento digital de imágenes obtenida a través de un microscopio óptico metalográfico*

Diplomante: *Adrian Alfonso López*

Tutor: *Dr. Alejandro Duffus Scott*

Santa Clara

2013

*El día que el hombre se diese cuenta de sus profundas equivocaciones,
habría terminado el progreso de la ciencia*

Marie Curie

*A mi Mamá y mi Papá, por traerme a la vida y convertirme en el hombre
que soy.*

*A mi Mamá, por ser ella la representación de lo bello y hermoso y que
tengo el privilegio de tener.*

*A mi Papá, por ser mi guía y ejemplo en todos los aspectos de la vida al
que quiero y admiro.*

A ellos especialmente está dedicado este trabajo.

A mi hermano y mejor amigo, a mi mujer y compañera

A mis amigos Yandry, Artiles, Trevor y Lenier

*A mi tutor Duffus que desde algunos años atrás hasta la actualidad tuve
la satisfacción de tener y que siempre tendré presente en la vida como
máximo impulsor de mi interés en la ciencia de los materiales.*

*A los profesores Enrique y Vitico por su apoyo en la realización de este
trabajo.*

*Quiero agradecer a esta revolución que me ha formado como un
hombre de bien y a la cual me debo*

*A todas las personas que de una forma u otra tuvieron que ver con la
realización de este trabajo.*

MUCHAS GRACIAS.

Resumen

El presente trabajo trata el tema de la estimación de propiedades mecánicas de un acero AISI 1045 utilizando técnicas de procesamiento digital de imágenes obtenidas a través de un microscopio óptico metalográfico. Se expone el marco teórico referencial relacionado con el procesamiento digital de imágenes. La aplicabilidad del software libre ImageJ, permitió la determinación de importantes parámetros microestructurales. Se establece un procedimiento de trabajo para la utilización de este programa en la determinación de los porcentos de perlita y ferrita en probetas del acero 1045 en estado normalizado o recocido, así como su contenido de carbono. En una segunda etapa del procedimiento se utilizan los resultados obtenidos del porcentaje de perlita para estimar la resistencia a la tracción (σ_B), y con ella la dureza (HB), el límite de fluencia (σ_F), el límite de fatiga (σ_{-1}), y el tamaño de grano del acero investigado .

Abstract.

This paper deals with the estimation of the mechanical properties of a steel AISI 1045 using digital image processing techniques obtained through an optical microscope metallography. It exposes the referential theoretical framework related to the digital processing of images. The applicability of the free software Image J, allowed the determination of important microstructural parameters. Establishing a working procedure for the use of this program in the determination of the requent ferrite and pearlite in specimens of the 1045 steel in normalized status or annealing, as well as their carbon content. In a second stage of the procedure uses the results of the percent of perlite for estimating the tensile strength (σ_B), and with it the hardness (HB), the yield strength (σ_F), the fatigue limit (σ_{-1}), and the grain size of the steel investigated.

Índice

Introducción.....	1
Capítulo 1: Técnicas de procesamiento digital de imágenes aplicadas al análisis de microestructuras en muestras de un acero. Marco Teórico referencial.....	4
1.1 Introducción	4
1.2 Metalografía	4
1.2.1 Preparación Metalográfica	5
1.2.2 Elementos de metalografía cuantitativa	7
1.2.3 Métodos de determinación del tamaño del grano	8
1.2.4 Estimación de propiedades mecánicas de aceros hipoeutectoides	9
1.3 Introducción al procesamiento digital de imágenes	9
1.3.1 Conceptos fundamentales sobre procesamiento digital de imagen	10
1.3.2 Etapas para el procesamiento digital de imágenes	11
1.3.3 Potencialidades del procesamiento digital de imágenes	12
1.3.4 Programas profesionales para el procesamiento digital de imágenes	13
1.4 Conclusiones parciales	14
Capítulo 2: Materiales y métodos de la investigación	16
2.1 Introducción.....	16
2.2.1 Composición química de las coladas seleccionadas de un acero 1045	16
2.2.2 Propiedades mecánicas de las coladas seleccionadas de un acero 1045	16
2.3 Equipos empleados en la investigación	17
2.3.1 Microscopio óptico metalográfico.....	17
2.3.2 Cámara fotográfica digital.....	17
2.3.3 Computadora	18
2.4 Relación entre las propiedades mecánicas y la microestructura de los aceros hipoeutectoides en estado recocido y normalizado	18

2.4.1 Resistencia a la tracción (σ_B).....	18
2.4.2 Correlación entre dureza y la resistencia a la tracción	18
2.4.3 Límite de fluencia (σ_F).....	19
2.4.4 Límite de fatiga (σ_{-1}).....	20
2.5 Procedimiento desarrollado para determinar el tamaño de grano y porcentaje de perlita propiedades mecánicas en los aceros al carbono hipoeutectoides	21
2.5.1 Procedimiento para determinar el porcentaje de perlita en los aceros al carbono hipoeutectoides utilizando el software ImageJ.....	22
2.5.2 Procedimiento para estimar el porcentaje de Carbono (%C) y las propiedades mecánicas en los aceros al carbono hipoeutectoides.....	28
2.6 Determinación del tamaño de grano	30
2.7 Conclusiones Parciales.....	30
Capítulo 3. Análisis y discusión de resultados	32
3.1. Introducción	32
3.2. Determinación del tamaño de grano	32
3.3 Determinación de los porcentos de perlita (%P) y carbono (%C)	33
3.3.1 Estimación de las propiedades mecánicas del aceros 1045.....	38
3.3.2 Comparación de las propiedades mecánicas del acero 1045, empleando el software ImageJ, con los valores reportados en la Empresa Planta Mecánica	38
3.4 Conclusiones parciales	41
Conclusiones Generales	43
Recomendaciones	
Bibliografía	
Anexo	

Introducción

Normalmente, todas las determinaciones cuantitativas de fases y propiedades en aceros a partir del análisis microestructural mediante el uso del microscopio óptico metalográfico, se realizan directamente sobre la microestructura o sobre las micrografías reveladas y como lo indica Castro [1], sus resultados dependen, en gran medida, de la habilidad del técnico especialista.

Debido a la naturaleza de las imágenes, la extracción manual de los parámetros microestructurales implican largo tiempo de análisis, limitaciones en el tratamiento de los datos estadísticos y el empleo de un criterio poco objetivo en las medidas, lo que conlleva a una poca precisión.

El desarrollo tecnológico de las computadoras y el auge en la elaboración de software en el área del procesamiento digital de imágenes, han puesto a disposición de herramientas para determinar con mayor precisión y rapidez el porcentaje de las fases presentes en los aceros, según Velandia [2] y Fajado [3], para así estimar su contenido de carbono y las propiedades mecánicas (resistencia a la tracción, dureza, límite de fluencia y límite de fatiga) en aceros de bajo y medio carbono, sin tener que realizar las pruebas o ensayos mecánicos correspondientes en los laboratorios.

El empleo de probetas normalizadas, las prácticas destructivas y el número de veces que hay que repetir un ensayo, aumentan el costo y el tiempo requerido para lograr la caracterización de los materiales.

De poseer programas de cómputo especializados, accesibles a los pequeños empresarios, a centros de investigaciones o instituciones con pocos recursos, permitiría a partir del procesamiento digital de imágenes caracterizar a los aceros de uso industrial, sin la necesidad del uso de un laboratorio con gran inversión, es decir, con gran infraestructura, con máquinas tradicionales como durómetros, máquinas para el ensayo de fatiga, máquinas para ensayo de tracción y equipos para la determinación del por ciento de carbono por análisis químico, lo cual ahorraría tiempo, dinero y se evitaría el uso de probetas normalizadas permitiendo entonces la realización de estimación o caracterización de estos aceros "in situ".

Problema Científico

La no utilización de técnicas de procesamiento digital de imágenes, accesibles y de bajo costo, aplicada al análisis microestructural en probeta de aceros al carbono, mediante microscopía óptica, trae como consecuencia: alta dependencia de expertos, la necesidad de aplicar ensayos destructivos y el uso de equipos y máquinas costosas.

Hipótesis

Si se implementa una técnica para el procesamiento digital de imágenes, sobre las micrografías obtenidas a través de un microscopio óptico metalográfico, permitiría en primera instancia determinar el contenido de carbono a partir de las fases presentes en los aceros al carbono, lo que facilitaría la estimación de propiedades mecánicas tales como, dureza, resistencia a rotura, límite a fluencia, resistencia a la fatiga y el tamaño de grano, dejando a un lado el uso de las máquinas tradicionales empleadas para el ensayo mecánico.

Objetivo General

Estimar las propiedades mecánicas (resistencia a la tracción, dureza, límite de fluencia y límite de fatiga,) y tamaño de grano de un acero AISI 1045 a partir de técnicas de procesamiento digital de imágenes obtenidas a través del microscopio óptico metalográfico.

Objetivos específicos

- 1.- Analizar los principales software utilizados para el procesamiento digital de imágenes.
- 2.- Implementar un procedimiento que permita realizar correctamente el procesamiento digital de imágenes obtenidas con un microscopio óptico.
- 3.- Cuantificar, para diferentes muestras de un acero de medio contenido de carbono, porcentaje de perlita y de ferrita, empleando técnicas de procesamiento digital de imágenes.

- 4.- Estimar valores de dureza, resistencia a tracción, límite de fluencia, límite de fatiga, diferentes probetas de un acero AISI 1045, a partir de los valores estimados del porcentaje de perlita y ferrita.
- 5.- Determinar el tamaño de grano del acero estudiado utilizando técnicas de procesamiento digital de imágenes.
- 6.- Comparar los resultados obtenidos, con los establecidos en las normas y/o con los ensayos realizados directamente al acero estudiado.

Tareas

- 1.- Adquisición del acero AISI 1045 (fundido por planta).
- 2.- Análisis de los principales software utilizados en el procesamiento digital de imágenes
- 3.- Puesta a punto de la instalación experimental que permita obtener la imagen desde el microscopio óptico.
- 4.- Elaboración del marco teórico conceptual acerca de: microscopía óptica, digitalización y procesamiento de imágenes, correlaciones de contenido de fases presentes en aceros y contenido de carbono con las propiedades mecánicas.
- 5.- Determinación del tamaño de grano, primero por el método de comparación y luego por la técnica digital.
- 6.- Validar por comparación los resultados obtenidos en la estimación de las propiedades mecánicas del acero 1045.

Capítulo 1: Técnicas de procesamiento digital de imágenes aplicadas al análisis de microestructuras en muestras de un acero. Marco Teórico referencial

1.1 Introducción

La microscopia óptica es una herramienta tradicional, muy importante, para el estudio de materiales, en particular, las aleaciones metálicas. Teniendo en cuenta que aún cuando las técnicas de microscopía electrónica hayan evolucionado a formas cada vez más sofisticadas, la microscopia óptica sigue siendo la herramienta indicada para el estudio de un amplio espectro de temas vinculados con la metalurgia física, tales como estructuras de solidificación, productos de transformaciones de fase, estructuras de grano, superficies de fractura, entre otros. Actualmente, la implementación de modernas técnicas de digitalización y procesamiento de imágenes, facilitan y mejoran la obtención de información como el programa ImagenJ.

Las etapas del análisis metalográfico consisten en la preparación de la superficie a estudiar, el ataque de la misma con algún reactivo que permita distinguir las fases presentes, y la observación mediante microscopía óptica. La metalografía cuantitativa es de gran ayuda en la comprensión del comportamiento de una pieza metálica, la cual ha recibido un gran impulso con el desarrollo de las facilidades de análisis de imágenes.

1.2 Metalografía

Es la ciencia que estudia las características estructurales o constitutivas de un metal o aleación relacionándolas con sus propiedades físicas y mecánicas. Entre las características estructurales están el tamaño de grano, contenido, forma y distribución de las fases que comprenden la aleación y de las inclusiones no metálicas, así como la presencia de segregaciones y otras irregularidades que profundamente pueden modificar las propiedades mecánicas y el comportamiento general de un metal. La metalografía cuantitativa pudiera definirse como la técnica de muestreo utilizada para cuantificar los aspectos morfológicos de las imágenes

obtenidas de un material mediante microscopía óptica, microscopía de barrido o microscopía de transmisión.

Los ensayos se realizan con la ayuda de un microscopio en donde se observa la estructura de ciertas muestras, previamente preparadas, las cuales nos permitirán obtener una aproximación muy vaga del tipo de aleación que se tiene, del contenido de carbono y tamaño de grano (de manera aproximada). Una vez que se logra esto la muestra se podrá relacionar con las propiedades físicas y mecánicas que se desean.

1.2.1 Preparación Metalográfica

La experiencia ha demostrado que el éxito en el estudio microscópico depende en mucho del cuidado que se tenga para preparar la muestra. El microscopio más costoso no revelará la estructura de una muestra que haya sido preparada en forma deficiente. El procedimiento que se sigue en la preparación de una muestra es comparativamente sencillo y requiere de una técnica desarrollada sólo después de práctica constante. El último objetivo es obtener una superficie plana, sin rayas, semejante a un espejo, la obtención de una superficie perfectamente plana y pulido especular, nos permitirá llegar a conclusiones exactas y ello dependerá exclusivamente del tecnicismo aplicado y del esmero con que se realice esa tarea, esto se logra con la realización de un método sistemático de preparación, siguiendo la técnica recomendada en las normas ASTM E3.

El primer paso dentro de esta área técnica metalográfica será la zona micrográfica a estudiar y que deberá ser representativa del fenómeno a observar, teniendo en cuenta la forma, función y origen del material. El método de preparación se puede resumir en las siguientes etapas:

➤ **Selección y extracción:** Hay veces que una vez recibido el material es necesario seccionarlo o cortarlo en una forma determinada. Se trata de lograr superficies planas con la menor deformación posible. En general, los mejores resultados se obtienen con corte abrasivo húmedo, de lo contrario se estaría

modificando la estructura original. Si se corta con en todos los casos, la muestra que se extraiga, debe representar las características del material de origen.

- **Montaje:** Cuando se considere necesario para mejorar la manipulación de la muestra o para evitar la conservación de los bordes o alguna capa constituyente, es necesario montar o embutir la muestra en una resina denominada bakelita.
- **Esmerilado grueso:** Su objetivo es eliminar la superficie de la muestra que fue deformada por el proceso anterior y lograr un solo plano de pulido para las etapas posteriores. Se utilizan abrasivos de grano grueso en forma de discos o papeles abrasivos al agua. El agua tiene por objeto refrigerar y barrer de la superficie las partículas de material tanto de la muestra como del abrasivo. Para pasar de un papel a otro se debe obtener una superficie plana, uniforme y las rayas deben estar en una misma dirección. Una vez logrado esto, se gira la muestra 90° y se precede de la misma forma.
- **Esmerilado fino:** Es la etapa final del esmerilado. El procedimiento es igual al anterior con papeles contentivos de abrasivos de (400 a 1200).
- **Pulido mecánico:** Se utiliza para lograr una eliminación efectiva y rápida de material. Es en esta etapa cuando se consigue una superficie tipo espejar. Se realiza en paños especiales (lona o paño de mesa de billar) colocados en platos giratorios. Como abrasivo se utilizan suspensiones coloidales de óxidos de materiales como SiO, Al₂O₃, MgO en una proporción determinada en agua destilada.
- **Ataque químico:** El ataque se realiza sumergiendo la muestra metálica pulida en una solución ácida o básica débil que ataca a la superficie a una velocidad que varía con la orientación cristalina de la misma. Después del ataque las interacciones de los límites de grano atacados en la superficie, quedan marcados por una red de escarpaduras poco profundas. Para la determinación del reactivo se tiene en consideración al material y el objetivo buscado por el ataque. Las normas ASTM E 304 y ASTM E407 recomiendan reactivos químicos según el material para macroataque y microataque.

1.2.2 Elementos de metalografía cuantitativa

La metalografía cuantitativa fundamenta sus procedimientos en la Estereología, ciencia que permite analizar de manera efectiva la forma tridimensional de los sólidos a partir de la información obtenida con secciones bidimensionales o secciones planas de los mismos, hay que resaltar que la estereología no busca reconstruir un objeto tridimensional en su totalidad, normalmente usa sólo unas pocas secciones o muestras del material en estudio, aplicando sobre ella técnicas simples de estimación no paramétrica (parámetros geométricos) tales como el volumen y el área. La estimación resultante es válida sólo sobre hechos fundamentalmente geométricos y orientados en la teoría clásica de muestreo estadístico, es por ello que los métodos estereológicos son casi siempre suposiciones libres y por tanto, son aplicables en diferentes ciencias como la biología y las ciencias de los materiales.

La metalografía cuantitativa permite la determinación de la cantidad de fases o de microconstituyentes presentes en una aleación. Esta técnica se basa en métodos tales como: puntual, lineal y de área.

Según Velandia [2], uno de los métodos más simples y utilizados, que se aplican para estimar las fracciones o volumen de los constituyentes microestructurales, es el conteo de puntos (también descrito en ASTM E562). Aún cuando se puede emplear otros procedimientos, el conteo de puntos es el más eficiente, es decir da la mejor seguridad con el mínimo esfuerzo.

La metalografía cuantitativa, juega un rol importante en la ciencia de los materiales y la ingeniería pues permite establecer relaciones entre los procesos, microestructura y propiedades mecánicas de los materiales suministrando información de primera mano necesaria para el establecimiento de modelos matemáticos, que permitan el control y optimización de procesos y productos.

El desarrollo y avance de tecnologías en el área de la electrónica y la computación han permitido la automatización de procedimientos de análisis de imágenes que reducen el tiempo y los posibles errores en el análisis de muestras metalográficas.

Velandia [2], también señala que, los cálculos de la fracción de volumen a partir de las mediciones cuantitativas sobre una superficie de un material opaco solamente puede proporcionar valores aproximados.

1.2.3 Métodos de determinación del tamaño del grano

Existen varios métodos estándares para determinar el tamaño de grano en correspondencia con la norma ASTM E 112 según el gráfico siguiente:

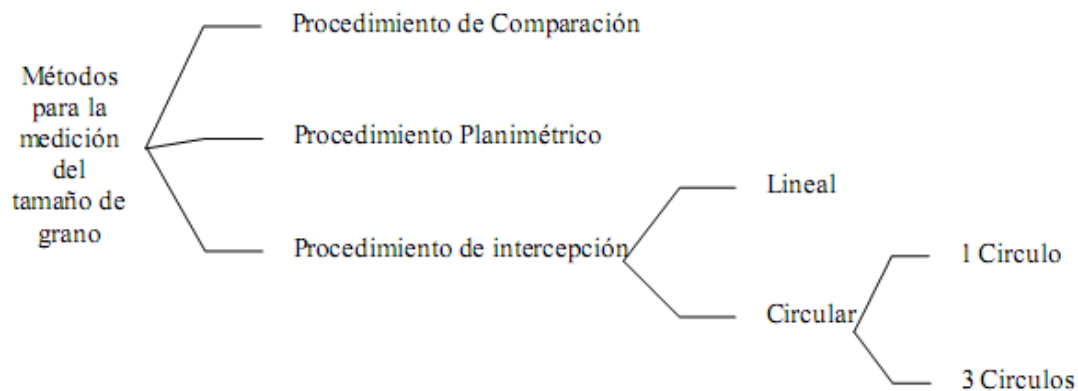


Fig. 1. Diferentes métodos para la determinación del tamaño de grano

- **Procedimiento Planimétrico:** involucra el conteo del número de granos dentro de un área determinada.
- **Procedimiento de Intersección:** involucra el conteo de los granos interceptados por una línea de ensayo o el número de intersecciones de la línea con los bordes de grano.
- **Procedimiento de Comparación:** como su nombre lo indica, el método involucra la comparación de la estructura del grano que se está observando, ya sea en una foto o directamente con el microscopio, con una serie de ocho (08) imágenes graduadas y normalizadas (plantillas), ya sea en una tabla - reglilla o directamente en el ocular del microscopio.

A cada una de esta plantilla corresponde un índice, del 1 al 8, denominado Índice de Tamaño de Grano, el mayor índice tiene el menor tamaño de grano. El tamaño del

grano (G) se asigna por comparación directa con el índice del tamaño de grano de la carta más parecida a la imagen observada.

En caso de utilizar otra magnificación debe corregirse este valor mediante la suma del factor de corrección Q, como se indica en la tabla número 1.

El método de comparación es más conveniente y bastante preciso en muestras de granos de ejes iguales, por lo que este procedimiento se aplicará completamente a los materiales recristalizados o con granos equiaxiales.

Tabla 3. Factor de corrección Q.

Magnificación M	Factor de corrección Q (para Mb=100x) $Q = 6,64 \log_{10} \left(\frac{M}{Mb} \right)$
50x	-2
100x	0
200x	2
400x	4

1.2.4 Estimación de propiedades mecánicas de aceros hipoeutectoides

Estos aceros poseen gran plasticidad y resistencia. La plasticidad decrece y la dureza aumenta a medida que la ferrita decrece con la cantidad de contenido de carbono.

Guliaev [4], indica que para los aceros hipoeutectoides los cambios en las propiedades son lineales y ellas pueden ser expresadas con razonable precisión por simples ecuaciones que relacionan las propiedades específicas con el porcentaje de carbono y la proporción de ferrita y perlita presente en la microestructura.

1.3 Introducción al procesamiento digital de imágenes

El procesamiento digital de imágenes es el término usado para denominar las operaciones desarrolladas sobre un set de datos que nos proporciona una imagen, ya sea 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 [1]. Una imagen

está definida como la representación de un objeto real (3D) en el plano (2D). Desde un punto de vista físico, una imagen puede considerarse como un objeto plano cuya intensidad luminosa y color puede variar de un punto a otro. Si se trata de imágenes monocromas (blanco y negro), se pueden representar como una función continua $f(x, y)$ donde (x, y) son sus coordenadas y el valor de f es proporcional a la intensidad luminosa (nivel de gris) en ese punto [5]. Igualmente [6] indica que el procesamiento digital de imágenes 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”. El procesamiento de imágenes no puede producir información a partir de nada. Es de gran importancia tener en cuenta que lo que se está observando es una representación gráfica de números. La imagen es guardada como una grilla de píxeles. El proceso de digitalización transforma datos análogos continuos en datos digitales discretos. Durante el procesamiento de la imagen, los procedimientos están dados en forma de algoritmos, siendo el software el medio por el cual se implementan y ejecutan. El principal desafío es mejorar la calidad y reducir su costo. En general las técnicas de procesamiento de imágenes son aplicadas cuando resulta necesario realzar 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.

1.3.1 Conceptos fundamentales sobre procesamiento digital de imagen

Las técnicas de procesamiento de imágenes son aplicadas cuando resulta necesario realzar 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.

Con el procesamiento digital de imágenes, Fajardo [3] y Wainschenker [7], aseguran que se desarrollan operaciones sobre un set de datos que proporcionan una imagen, para mejorarlas de alguna forma, para ayudar a su interpretación o para extraer

algún tipo de información útil de ella. Esto refiere también al tratamiento de las imágenes que han sido previamente digitalizadas.

Igualmente, estos autores, Fajardo [3] y Wainschenker [7], indican que el procesamiento digital de imágenes 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 de gran importancia tener en cuenta que lo observado es una representación gráfica de números. La imagen es guardada como una rejilla de píxeles. El proceso de digitalización transforma datos análogos continuos en datos digitales discretos.

1.3.2 Etapas para el procesamiento digital de imágenes

En la figura 1 muestra las diferentes etapas que involucran cualquier procesamiento de imágenes [2]. Se observa que el primer paso es la adquisición de las imágenes para la cual se requieren dos elementos, un sensor y un elemento digitalizador, luego de que la imagen digital ha sido obtenida, el paso siguiente es el pre procesamiento de la imagen, en el cual se mejora la apariencia de la imagen de modo que permita muchos más posibilidades de éxito en los pasos siguientes [8]. 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 dependerá de 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 suministrada obtener grandes beneficios o lograr indeterminados perjuicios.

El paso siguiente es la representación y descripción [1,4]. En el proceso de representación, se aplican diferentes algoritmos que permiten que lo seleccionado

en la segmentación, tome una forma definitiva como paso previo al análisis por parte de la computadora. 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 que se ha 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 maquina desarrolle su labor en forma automática, asignando al final de la tarea un significado a lo que es resultado del análisis.

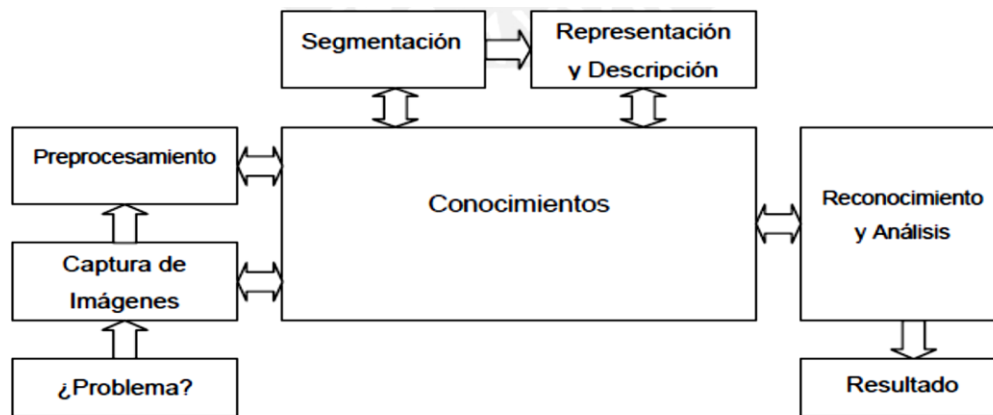


Fig. 1. Etapas para el Procesamiento Digital de Imágenes [7].

1.3.3 Potencialidades del procesamiento digital de imágenes

El interés en el estudio del procesamiento digital de imágenes se basa en dos áreas de aplicación primordiales:

- 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. De las imágenes se puede extraer información de forma conveniente para el procesamiento a realizarse mediante computadora.
- 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 restauración de imágenes debido a la degradación, de objetos irrecuperables, o de procedimientos costosos para su duplicación.
 - En el tratamiento automático de huellas digitales y el procesamiento automático de imágenes aéreas.

1.3.4 Programas profesionales para el procesamiento digital de imágenes

En la actualidad existe una gran diversidad de programas profesionales que trabajan para facilitar para el tratamiento de imagen digital en el campo de la ciencia de los materiales los cuales son muy costosos algunos ejemplos de los mismos son:

- **Software para el Análisis de Imagen Metalúrgica MIAS 4.0:** Fue elaborado por Qualitech Systems, de la India, permite la identificación de objetos en una imagen, contarlos, obtener mediciones de varias características como la longitud, anchura, área, permitiendo al usuario el ajuste de los parámetros. El software identifica las fases múltiples dentro de la microestructura. También dibuja las fases del histograma según la norma ASTM E562 y E1245. Posee un módulo para medir el tamaño de grano con la norma ASTM E112. Permite el uso de filtros definidos por el usuario para hacer plantillas para reparar los límites de granos[9].

➤ **Dewinter metalúrgico/software de la metalurgia:** Elaborado por Dewinter Optical INC, de la India. Es un programa que se establece en la forma sencilla, sin comprometer la precisión para que un operador sin experiencia pueda hacer el análisis. Los principales análisis de la metalurgia son nódulos, medición de espesor de revestimiento, la profundidad de la anchura de medición de la descarburación, el porcentaje de fase con la exhibición de color superpuestas, número y tamaño de grano por Norma ASTM E112, análisis de la porosidad, tamaño de las partículas y porcentaje de volumen con mucho hacer que el software completo. Los informes generados se pueden guardar o imprimir con imágenes, histograma, datos de superposiciones y colores diversos otra información relacionada. El precio real del software es de: 37 990.00 dólares [10].

➤ **ImageJ Procesamiento y análisis de imágenes en Java:** ImageJ fue diseñado con una arquitectura abierta que proporciona extensibilidad vía plugins Java y macros (macroinstrucciones) grabables. Se pueden desarrollar plugins de escaneo personalizado, análisis y procesamiento usando el editor incluido en ImageJ y un compilador Java. Los plugins escritos por usuarios hacen posible resolver muchos problemas de procesado y análisis de imágenes, desde de imágenes en vivo de las células en tres dimensiones, procesado de imágenes radiológicas, comparaciones de múltiples datos de sistema de imagen hasta sistemas automáticos de hematología.

Este software, puede ejecutarse en un applet en línea, como aplicación ejecutable, o en cualquier computadora con Máquina virtual Java 5 o superior. Hay también distribuciones descargables para Microsoft Windows, Mac OS, Mac OS X, Linux, y Sharp Zaurus PDA . En el caso específico de la metalografía se ha logrado utilizarlo para el conteo de granos y otros parámetros de gran importancia en muestras de metales por lo que resulta viable su uso investigativo [11].

1.4 Conclusiones parciales

1- La comprensión de los fundamentos de la metalografía cuantitativa y los adelantos existentes en el desarrollo de equipos electrónicos y de la computación han hecho de la metalografía cuantitativa una poderosa técnica en el estudio,

reduciendo el tiempo y los posibles errores en el análisis de muestras metalográficas.

2- Utilizando los microscopios ópticos metalográficos que posee el CIS y con el empleo del programa ImageJ, es posible realizar la determinación del tamaño de grano de aceros al carbono.

3- Los principales software profesionales para el procesamiento digital de imágenes, utilizados para el análisis microestructural, resultan ser comercialmente muy costosos.

4- El software libre ImageJ, que es de dominio público para el procesamiento digital imágenes, permite conocer parámetros microestructurales que utilizados correctamente, permitirían determinar propiedades mecánicas de los aceros, empleando relaciones empíricas.

Capítulo 2: Materiales y métodos de la investigación

2.1 Introducción

Como se mostró en el capítulo anterior, en la rama de la Ciencia de los Materiales es común analizar las imágenes obtenidas por microscopios ópticos metalúrgicos, con la intención de obtener datos útiles para algún fin. Este análisis metalográfico, es una herramienta muy útil en el estudio de los metales, porque permite individualizar las fases presentes, su cantidad relativa y su morfología. Dado que las fases metálicas tienen propiedades mecánicas que les son propias, la cantidad de fases presentes y su distribución determinan las propiedades mecánicas de la aleación metálica.

2.2.1 Composición química de las coladas seleccionadas de un acero 1045

La composición química de las coladas seleccionadas para el desarrollo de la investigación se muestra en la tabla 2.1, esta información se obtuvo de la Empresa Planta Mecánica de Santa Clara.

Tabla 2.1. Composición química de las coladas utilizadas en la investigación

Fuente: El autor

Coladas	Composición Química, % en peso.					
	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr
3	0,48	0,31	0,66	0,033	0,034	0,10
5	0,49	0,27	0,68	0,033	0,034	0,34
167	0,47	0,40	0,71	0,033	0,034	0,21

2.2.2 Propiedades mecánicas de las coladas seleccionadas de un acero 1045

Las propiedades mecánicas de las coladas que se seleccionaron para el desarrollo de la investigación, al igual que en el caso anterior, fueron tomadas de la Empresa Planta Mecánica de Santa Clara, según la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Propiedades mecánicas de las coladas utilizadas en la investigación

Fuente: Informe de Planta Mecánica, Villa Clara

Probetas	Propiedades Mecánicas		
	σ_B (MPa)	σ_F (MPa)	HB (kgf/mm ²)
3	656,07	464,7	180
5	652,56	458,4	176
167	640,76	414,6	165

2.3 Equipos empleados en la investigación

Los equipos empleados durante la investigación, desde la etapa de captura de la imagen, hasta el procesamiento digital de la imagen con el software ImageJ, se describen a continuación.

2.3.1 Microscopio óptico metalográfico

El microscopio óptico metalográfico utilizado en la investigación es un NEOPHOT 32, de fabricación alemana, capacidad de trabajo en campos claros y oscuros, luz polarizada, contraste de fases, aumento máximo de 2000 X.

2.3.2 Cámara fotográfica digital

La cámara digital, utilizada para la captura de las fotomicrografías, fue una de la marca Canon 630 A con las siguientes especificaciones básicas:

Tabla 2.3. Especificaciones básicas de la cámara Canon 630 A

Fuente: El autor

<i>Resolución</i>	8,00 Megapíxeles
<i>Lens</i>	4,00x zoom (35-140mm eq)
<i>Viewfinder</i>	Optical/LCD
<i>LCD Size</i>	2,5 inch
<i>Max.Aperture</i>	2,8 inch

2.3.3 Computadora

La computadora utilizada es de marca Hanel, con una, memoria RAM de 256 MB y disco duro de 80 GB.

2.4 Relación entre las propiedades mecánicas y la microestructura de los aceros hipoeutectoides en estado recocido y normalizado

Las propiedades mecánicas de los aceros hipoeutectoides dependen de manera general de varios factores como son: el tamaño de grano, inclusiones no metálicas, precipitados y la microestructura. Por otra parte si el acero hipoeutectoide está homogenizado a partir de un tratamiento de recocido o normalizado, las propiedades mecánicas del material dependerán fundamentalmente de su microestructura, por ciento de fases de ferrita (% α) y de perlita (% P) que se encuentren presentes. Avner [12].

2.4.1 Resistencia a la tracción (σ_B)

La resistencia a la tracción es la capacidad de los cuerpos para resistir las fuerzas aplicadas sin romperse, en el caso específico del trabajo se utilizaron dos ecuaciones 2.1 según Avner [12] y 2.2 del Metallurgy Series [13] que combinan el porcentaje de perlita (%P) y ferrita (% α) que se encuentran en la microestructura de los aceros hipoeutectoides homogenizados.

$$\sigma_B = \frac{40000 * (\% \alpha) + 120000 * (\% P)}{100} \quad (\text{lb/pug}^2) \quad (2.1)$$

$$\sigma_B = \frac{41000 * (\% \alpha) + 115000 * (\% P)}{100} \quad (\text{lb/pug}^2) \quad (2.2)$$

2.4.2 Correlación entre dureza y la resistencia a la tracción

Tanto la resistencia a la tracción, como la dureza son indicadores de la resistencia de un metal a la deformación plástica. Por consiguiente, estas propiedades son proporcionales y como regla general, para la mayoría de los aceros hipoeutectoides,

el valor de la dureza (HB) y la resistencia a la tracción están relacionados como se muestra en la ecuación 2.3, Askeland [14] y 2.4, Callister [15].

$$\sigma_B(\text{MPa}) = 3,45 * \text{HB} \quad (2.3)$$

$$\sigma_B(\text{PSI}) = 500 * \text{HB} \quad (2.4)$$

2.4.3 Límite de fluencia (σ_F)

El límite de fluencia (σ_F) y la resistencia a la tracción (σ_B), están en dependencia del grado de deformación suministrado en los materiales, un método empírico de buscar esta relación, puede ser tomar los valores de (σ_F) y (σ_B) de la matweb de algunos aceros al carbono y estimar la relación.

Tabla 2.4. Relación entre (σ_F) y (σ_B) de distintos aceros según la matweb para establecer un valor promedio. Fuente: El autor

ACERO	σ_B	σ_F	σ_F/σ_B
1045	625	530	0,84
1035	550	460	0,83
1020	420	350	0,83
VALOR PROMEDIO			0,83

$$\sigma_F = 0.83 * \sigma_B \quad (2.5)$$

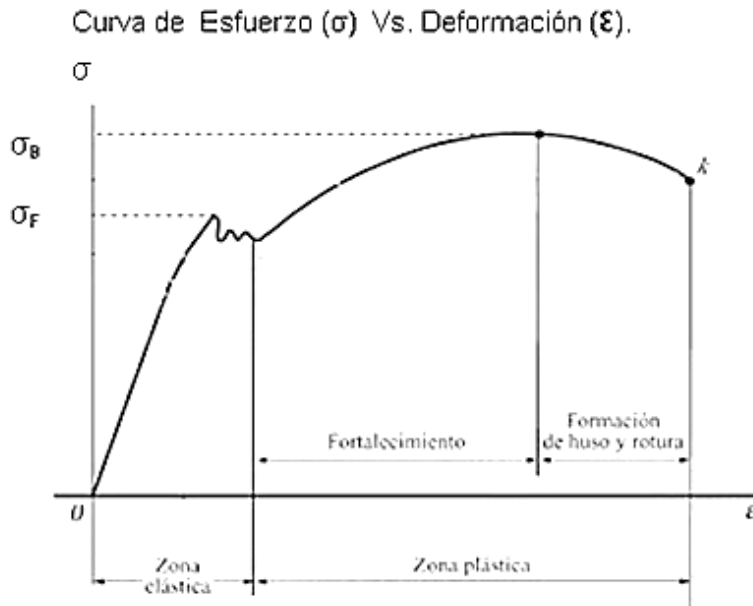


Figura 2.1. Curva típica de Esfuerzo Vs. Deformación

Fuente: Askeland [14]

2.4.4 Límite de fatiga (σ_{-1})

El límite de fatiga es el esfuerzo máximo invertido que puede ser repetido un número indefinido de veces sobre una probeta normalizada y pulimentada sometida a flexión, sin que se produzca falla o rotura, Vanegas [16].

La figura 2.2, ilustra la relación entre el límite de fatiga (σ_{-1}) y el esfuerzo último (σ_B) para diferentes aceros. La zona de sombreado oscuro corresponde a la tendencia que sigue la mayoría de los aceros, de acuerdo con los datos experimentales; se observa que para valores menores de aproximadamente 1380 MPa, entre mayor es el σ_B del acero, mayor es su límite de fatiga.

La tendencia de los datos se aproxima a las dos líneas rectas mostradas en la figura 2.2. Una línea tiene una pendiente de 0,5 y, al extrapolar, partiría desde el origen del diagrama; esto indica que el límite de fatiga es la mitad de la resistencia a la tracción (σ_B). La otra línea es horizontal y parte desde el punto (1380, 690) MPa; se asume, entonces, que para los aceros con $\sigma_B > 1380$ MPa, el límite de fatiga es aproximadamente 690 MPa.

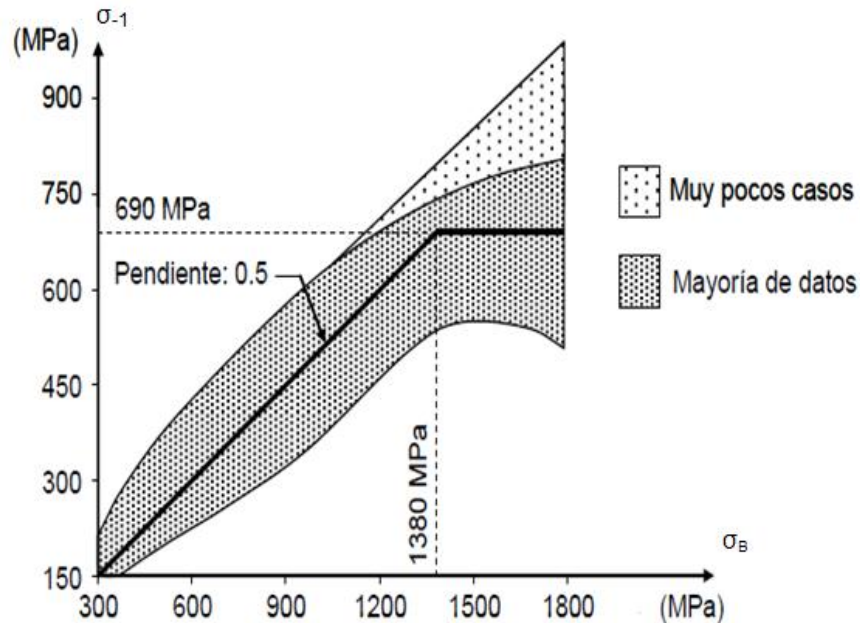


Figura 2.2. Relación entre el límite de fatiga (σ_{-1}) y la resistencia a la tracción (σ_B) de los aceros. Fuente [16].

Se puede concluir que para la mayoría de los aceros (de bajo carbono, aleados e inoxidables) se tiene que:

$$\sigma_{-1} = 0,5 * \sigma_B \quad \text{si } \sigma_B < 1380 \text{ MPa} \quad (2.6)$$

2.5 Procedimiento desarrollado para determinar el tamaño de grano y porcentaje de perlita propiedades mecánicas en los aceros al carbono hipoeutectoides

El procedimiento consta de tres etapas, la primera consiste en la determinación del porcentaje de perlita (%P) la segunda en la determinación del tamaño de grano y la tercera con base a los resultados de la primera, se estiman algunas propiedades mecánicas.

En la figura 2.3 se muestra el flujograma de trabajo utilizado en ambas etapas con una imagen de prueba, obtenida con un microscopio óptico metalográfico.

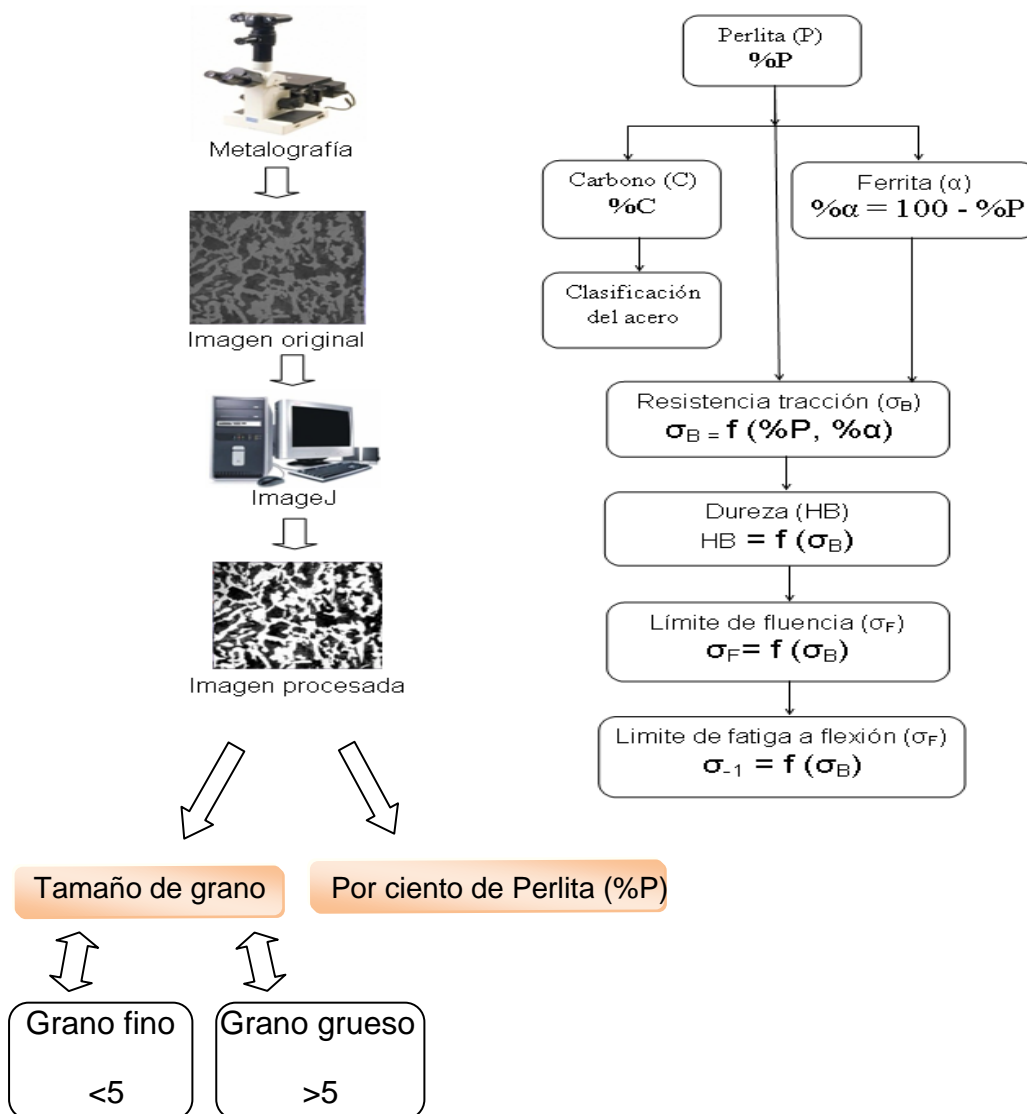


Figura 2.3. Flujograma de trabajo utilizado para determinar el tamaño de grano y el por ciento de carbono (%C) con el objetivo de determinar algunas propiedades mecánicas a partir del procesamiento digital de una imagen obtenida con el microscopio óptico metalográfico, utilizando el software ImageJ. Fuente: El autor.

2.5.1 Procedimiento para determinar el porcentaje de perlita en los aceros al carbono hipoeutectoides utilizando el software ImageJ

1.- Abrir el programa ImageJ (ver figura 2.4), haciendo doble click en el ícono de acceso directo.

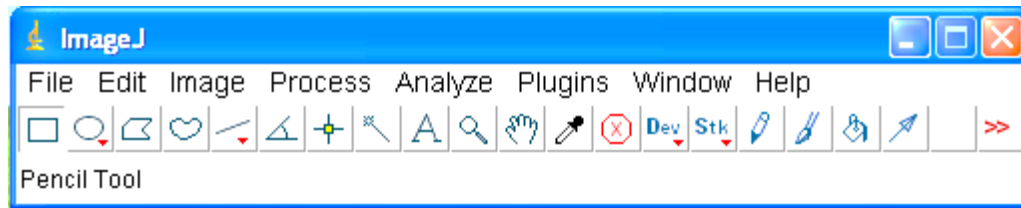


Figura 2.4. Ambiente de trabajo del software ImageJ

Fuente: El autor.

ETAPA I. Captura

2.- En la ventana desplegable “File” seleccionar “Open”, e indicamos la ruta donde se encuentra el archivo o la fotomicrografía de la escala previamente determinada, luego seleccionamos la barra de herramientas el ícono “*Selección de línea recta*” y con un click sin soltarlo trazamos sobre la foto de la escala la longitud que queramos darle.

3.- Posteriormente damos click en la barra de menú “Analyze” y seleccionamos “Set scale” y en la barra “Distance in Pixels” ponemos el valor que medimos en la foto de la escala de línea a línea, en la barra “Unit of Length” ponemos la unidad de medida utilizada (μm), y finalizamos dando click en “Global”.

4.- En la barra de herramientas damos click en el botón “Cambio de juego de herramienta” y seleccionamos “Magic montage”, a continuación saldrá en la barra de herramienta una línea en forma de escala, damos click y a continuación saldrá una ventana en donde se pondrá en la opción “Width pixels” el valor de la medición, en la parte inferior de la ventana podemos seleccionar otras opciones como color del valor de la escala, fondo y posición, para finalizar damos click en OK; es importante señalar que para que aparezca la escala hay que dar click en la línea en forma de escala en la barra de herramienta.

5.- Lugo de establecida la escala podemos empezar con la fotomicrografía de la estructura del acero, previamente capturada (ver figura 2.5)

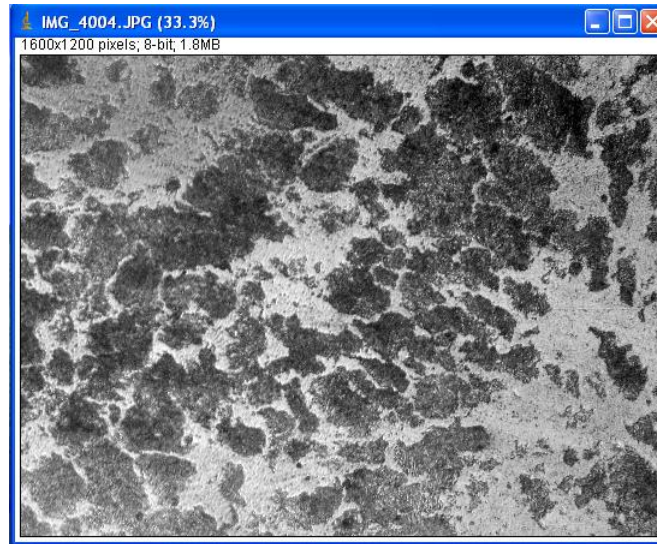
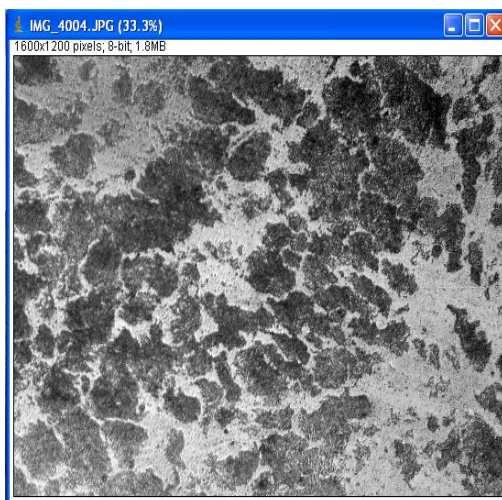


Figura 2.5. Fotomicrografía original de la estructura de un acero hipoeutectoide

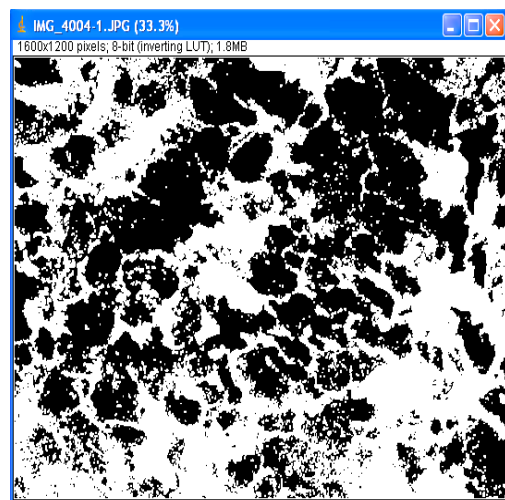
Fuente: El autor.

ETAPA II. Pre-procesamiento

6.- Seguidamente se ajusta el brillo y contraste de la foto, para ello en la ventana desplegable “Image” seleccionar “Adjust” y luego “Brightness/Contrast”, seleccionar “Auto” y luego “Apply” (ver figura 2.6).



a)



b)

Figura 2.6. a) Imagen sin pre-procesamiento b) Imagen con pre-procesamiento

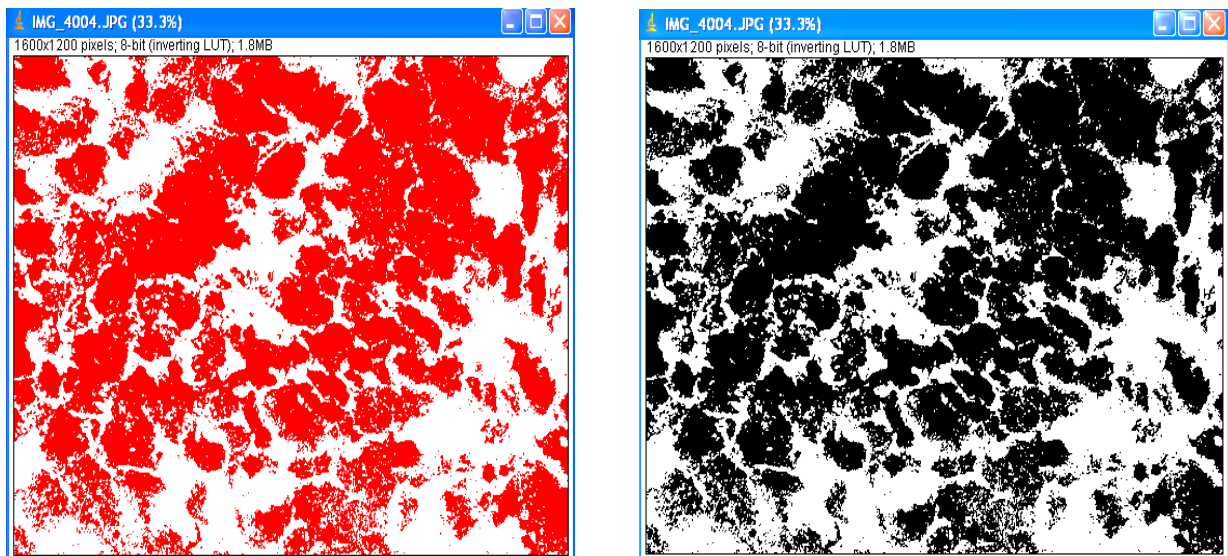
Fuente: el autor.

ETAPA III. Segmentación

7.- Habiendo ajustado el brillo y contraste, se procede a binarizar la imagen (figura 2.7). Para ello abrir la ventana desplegable “Image”, pulsar “Adjust” y luego “Threshold”, se selecciona “Auto” y luego “Apply” para aplicar.

8.- Ya con la imagen binarizada se le aplica una mejora. Para esto, en la ventana desplegable “Process” se selecciona “Binary” y “Erode” para erosionar (definir mejor los granos). Ver figura 2.8 (a).

9.- Nuevamente en la ventana desplegable “Process” se selecciona “Binary” y “Close” para rellenar los granos con zonas vacías por proceso de binarizado. Tal y como se muestra en la figura 2.8 (b).

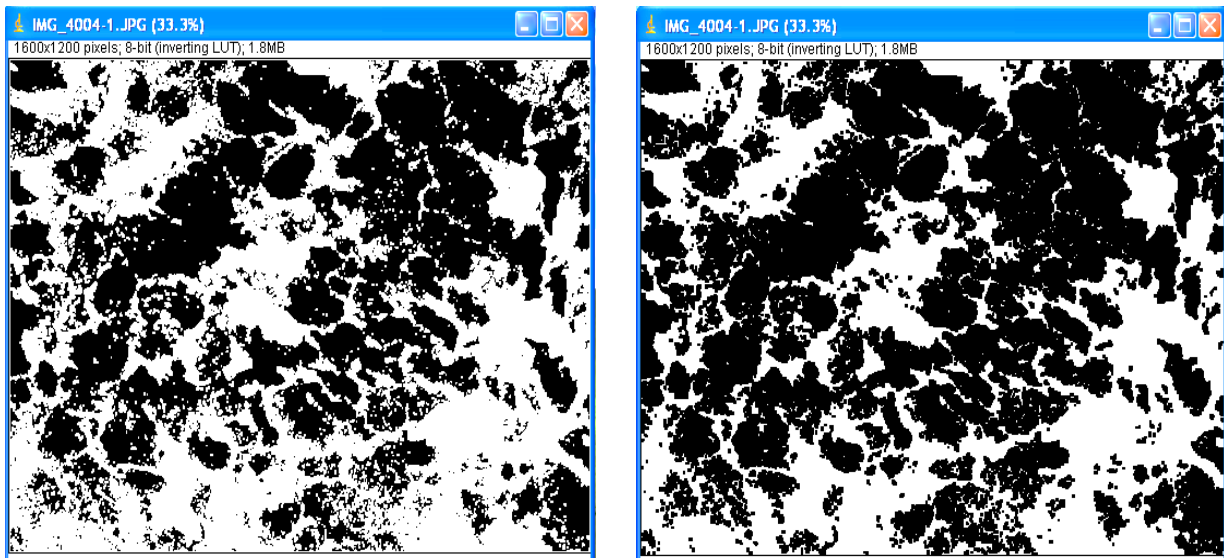


a)

b)

Figura 2.7. a) Binarizando b) Imagen binarizada

Fuente: El autor.



a)

b)

Figura 2.8. a) Imagen al aplicar “Erode” b) imagen al aplicar “Close”

Fuente: El autor.

10.- Para realizar la segmentación, se presiona la ventana desplegable “Process”, se selecciona “Binary” y luego “Watershed”. Ver figura 2.9.

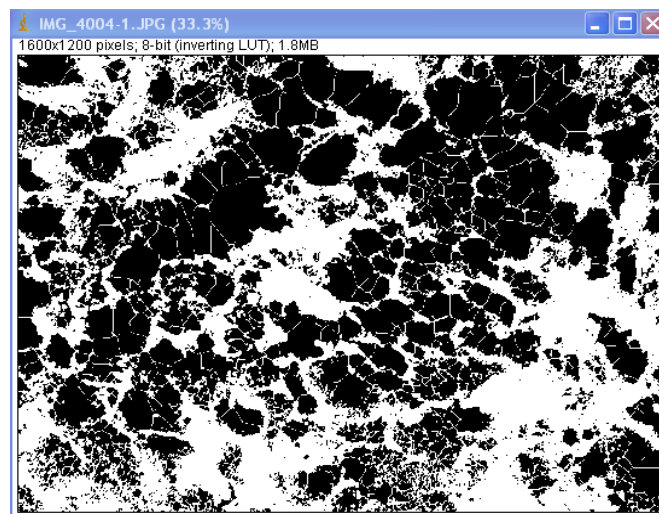


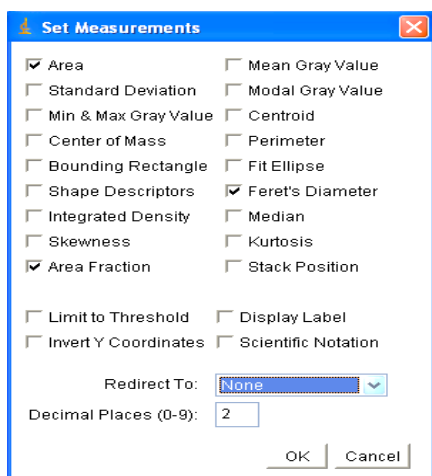
Figura 2.9. Imagen segmentada

Fuente: El autor

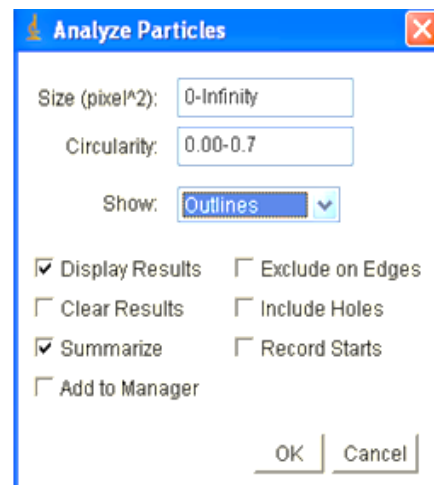
ETAPA IV. Extracción de características

11.- Para realizar la medición del área de los granos oscuros (% perlita) se establecen los parámetros correspondientes. En la ventana desplegable “Analyze” seleccionar “Set Measurements” y marcar “Área” y las demás opciones las que vienen por defecto (Redirect to: None y 2 decimales). Pulsar ok. (Ver figura 2.10 (a)).

12.- Finalmente en la ventana desplegable “Analyze”, marcar “Analyze Particles” y en el cuadro de diálogo seleccionar en “size: 90-infinito” “Circularity: 0-0,7” y “Show: Outlines” para observar los bordes de los granos contados. Igualmente se marca “Display Results” para mostrar los resultados grano a grano y “Summarize” para mostrar el sumario total o suma de las áreas correspondiente a cada grano. Pulsar ok. (Ver figura 2.10 (b)).



a)



b)

Figura. 2.10. Estableciendo parámetros de cálculo

Fuente: el autor

ETAPA V. Identificación de objeto

13. Por último queda buscar en las ventanas desplegadas los resultados finales, donde se observa el contorno de las partículas analizadas, el total de partículas evaluadas y el porcentaje de área, “Area Fraction”, correspondiente a la cantidad de perlita presente en la fotografía microestructural. (Ver figura 2.11).

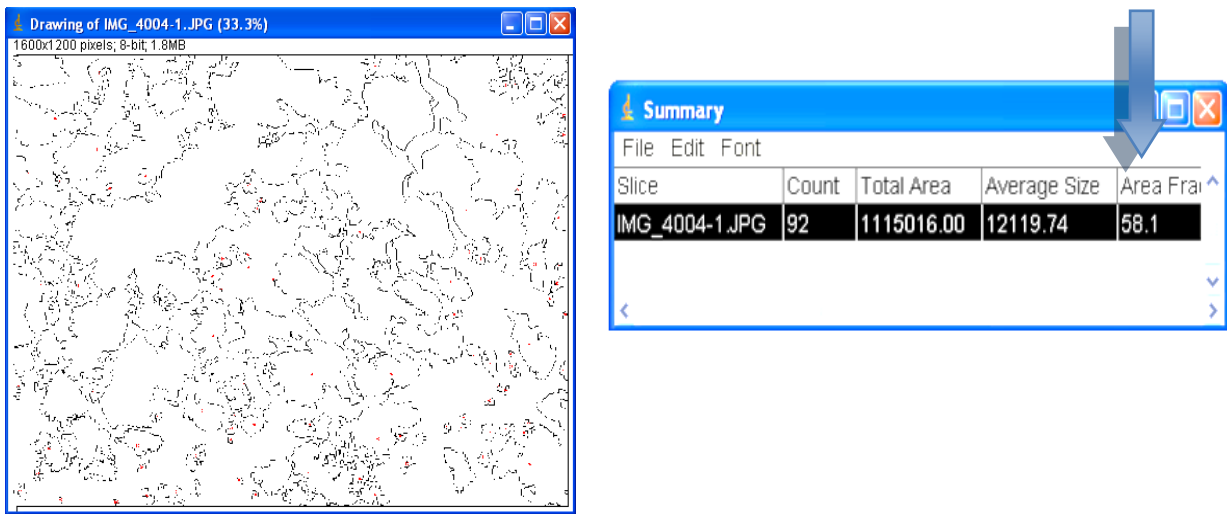


Figura 2.11. Resultado del procesamiento digital de imagen

Fuente: El autor.

2.5.2 Procedimiento para estimar el porcentaje de Carbono (%C) y las propiedades mecánicas en los aceros al carbono hipoeutectoides

➤ Determinación del porcentaje de carbono (%C).

Con la ecuación 2.7, Guliaev [4], se puede determinar el contenido de carbono (%C), para aceros no aleados, a partir del contenido de perlita (%P).

$$\%C = (\%P * 0,8) / 100 \quad (2.7)$$

El porcentaje de perlita (%P), obtenido en la ventana “Summary” del punto 13 del procedimiento descrito en el epígrafe 2.6.1, es de 55,56 % para la muestra 3 tomada como ejemplo.

%P = 55,56 (resultado del procesamiento)

$$\%C = (\%P * 0,8) / 100 = (55,56 \% * 0,8) / 100 = 0,44$$

De acuerdo al resultado obtenido se puede definir que la muestra estudiada se clasifica como un acero AISI 1045.

➤ **Determinación del contenido de ferrita (% α).**

El contenido de ferrita en un acero hipoeutectoide con tratamiento de recocido o normalizado, se puede determinar mediante la ecuación 2.8.

$$\% \alpha = 100 - \%P \quad (2.8)$$

$$\% \alpha = 100 - 55,56$$

$$\% \alpha = 44,44$$

El por ciento de ferrita para la muestra tomada como ejemplo es de 44,44.

➤ **Determinación de la resistencia a la tracción (σ_B).**

La resistencia a la tracción puede determinarse a partir de la ecuación 2.1 y 2.2, sustituyendo los valores de $\%P = 55,56$ y $\% \alpha = 44,44$. Queda lo siguiente:

Para la ecuación 2.1, $\sigma_B = 84\,448 \text{ PSI}$ (577,25 MPa)

Para la ecuación 2.2, se tiene que: $\sigma_B = 82\,114 \text{ PSI}$ (561,29 MPa)

De las dos ecuaciones, el valor obtenido con la ecuación 2.1, es el que mayor correspondencia tiene con el valor de resistencia a la tracción que se reporta en la base de datos de Planta Mecánica para el acero AISI 1045. Por lo que se tomará en cuenta para el cálculo de las demás propiedades.

➤ **Determinación de la dureza (HB).**

La dureza se determina a partir de las ecuaciones 2.3 y 2.4. Sustituyendo el valor de σ_B encontrado con la ecuación 2.1, queda lo siguiente:

Usando la ecuación 2.3, se obtiene: $HB = 167 \text{ (MPa)}$

Con la ecuación 2.4, se tiene que: $HB = 168 \text{ (PIS)}$

➤ **Determinación del límite de fluencia (σ_F).**

Para determinar límite de fluencia (σ_F), se utiliza la ecuación 2.5,

$$\sigma_F = 0,83 * 577,25 \text{ MPa} = 479,12 \text{ MPa}.$$

➤ **Determinación del límite de fatiga a flexión (σ_{-1}).**

Utilizando la ecuación 2.6, se determina el límite de fatiga a los aceros hipoeutectoides, resultando lo siguiente:

$$\sigma_{-1} = 0,5 * 577,25 \text{ MPa} = 288,63 \text{ MPa}.$$

2.6 Determinación del tamaño de grano

Para la determinación del tamaño de grano se utilizó la norma E112-96 que se encuentra en el anexo 1, la cual sirvió como plantilla base para introducir los resultados del procesamiento digital realizado con el programa ImageJ mediante el uso de la media de las áreas (μm), opción que de manera fácil se pudo encontrar siguiendo el procedimiento del epígrafe 2.6.1 con la excepción de la no utilización del comando “*Watershed*” el cual fracciona el grano y por consiguiente da un valor inexacto, luego de tener la tabla de resultados damos click derecho y seleccionamos “*Summarize*” y saldrá automáticamente en la parte inferior de la tabla un promedio de los valores por categoría como valores máximos y mínimos y sobre todo nuestro objetivo la media de las áreas.

2.7 Conclusiones Parciales

- 1- Se hace una caracterización química y de las propiedades mecánicas del acero 1045, fundido en Planta Mecánica de Villa Clara.
- 2- Se hace una recopilación de las ecuaciones empíricas, que correlacionan las propiedades mecánicas como, el límite de fluencia (σ_F), la dureza (HB), límite de fatiga a flexión (σ_{-1}), con la resistencia a la tracción (σ_B), la cual es función del porcentaje de ferrita (% α) y perlita (%P).
- 3- Se desarrolló un procedimiento de trabajo para la determinación del porcentaje de perlita (% P) y tamaño de grano en el acero 1045 en estado recocido o normalizado utilizando el software ImageJ y una secuencia de cálculo para estimar los valores de las propiedades mecánicas del mismo. Este procedimiento puede ser utilizado en aceros hipoeutectoides.
- 4- El procesamiento digital de imagen, realizado con el software ImageJ, a las fotomicrografías obtenidas con el microscopio óptico metalográfico, es similar al

procesamiento que realizan otros software comerciales, que no son de dominio público.

Capítulo 3. Análisis y discusión de los resultados

3.1. Introducción

En el capítulo anterior, se estableció una metodología de trabajo, donde, a partir de las fotomicrografías tomadas a tres probetas de un acero AISI 1045 homogenizado. Haciendo uso del software de dominio público, ImageJ, se pudo determinar el tamaño de grano, por ciento de perlita (%P) y por ciento de carbono (%C) a partir del anterior. Utilizando un conjunto de ecuaciones empíricas, donde a partir de la cantidad de perlita (%P), estimada con el software ImageJ. Se determinó la resistencia a la tracción (σ_B) de cada muestra y a partir de este valor, se determinaron otras propiedades como: dureza (HB), límite de fluencia (σ_F) y límite de fatiga bajo flexión (σ_{-1}).

3.2. Determinación del tamaño de grano

A partir del estudio de las probetas analizadas en el laboratorio se estableció el método comparativo como patrón por ser este bastante preciso y fácil de trabajar, con esta premisa es que se comienza a trabajar en el procesamiento digital de la imagen con el objetivo de establecer una validación del resultado mediante la comparación de los resultados de ambos métodos. A continuación se presentan una serie de tablas con diferentes aumentos que esbozan lo antes planteados.

Tabla 3.1. Aumento 100x para diferentes probetas y su respectivo tamaño de grano

100x		
Probetas	Por comparación	Área media del grano (μm^2)
3	8-9	504 – 251,86
5	8	504.
167	7	1008

Tabla 3.2. Aumento 200x para diferentes probetas para determinar el tamaño de grano por comparación y por el programa ImageJ

200x				
Probetas	Por comparación	Área media del grano (μm^2)	En ImageJ	Área media del grano (μm^2)
3	6	2016,01	5	4032,25
5	6	2016,01	4,5	5703,27
167	4	8064,04	3,5	11404,10

Tabla 3.3. Aumento 400x para diferentes muestras para determinar el tamaño de grano por comparación y por el programa ImageJ

400x				
Probetas	Por comparación	Área media del grano (μm^2)	En ImageJ	Área media del grano (μm^2)
3	5	4032,25	5	4032,25
5	5	4032,25	4,5	5701,76
167	3	16129	4	8064,04

Como se puede apreciar los resultados obtenidos por el procesamiento digital de la imagen para la determinación del tamaño de grano coincide con los del método por comparación, por lo que podemos afirmar que se puede utilizar el procesamiento digital, para la determinación del tamaño de grano con una buena precisión.

3.3 Determinación de los por cientos de perlita (%P) y carbono (%C)

A partir del por ciento de perlita (%P), contenido en cada una de las tres muestras analizadas del acero AISI 1045 con el software ImageJ, se obtiene el por ciento de carbono (%C) con la ecuación 2.7 y el por ciento de ferrita (% α) a partir de la ecuación 2.8.

Es importante tomar todas las medidas necesarias para que la posibilidad de errores en las medidas sea mínima, así como mitigar aquellos factores que generan la

variabilidad de los resultados. A pesar de la variación de las propiedades es conveniente especificar un valor típico, frecuentemente el valor típico se toma como el promedio de los valores experimentales. A continuación se define su ecuación 2.9.

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (3.0)$$

Donde (n) es el número de medidas y (x_i) es el valor de una medida discreta.

A veces es deseable cuantificar el grado de dispersión de los valores medidos. La medida más común de la dispersión es la desviación estándar s, la cual se determina utilizando la siguiente expresión:

$$S = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \right]^{1/2} \quad (3.1)$$

También es importante determinar el error relativo dado la necesidad de medir la exactitud con que se trabaja en dependencia del número de mediciones, dicho error se calcula según la expresión:

$$E = \frac{\bar{t} * s / \sqrt{n}}{\bar{x}} * 100 \quad (3.2)$$

Donde (\bar{t}) es la t de student para un 95%, (S) es la desviación estándar, (n) el número de mediciones y (\bar{x}) es el valor medio.

A continuación se presentan las tablas con sus respectivos por ciento de perlita (%P), y carbono (%C), el valor medio, desviación estándar y el error relativo de cada aumento.

Tabla 3.4. Resultados experimentales al determinar los por cientos de perlita (%P) y carbono (%C) con la probeta número 3 de un acero AISI 1045 para un aumento de 200X. Fuente: El autor

Probeta 3 200X		
CAMPOS	%PERLITA	%C
1	48,3	0,3864
2	55,2	0,4416
3	53,2	0,4256
4	52,5	0,42
5	54	0,432
$\bar{\Sigma}$	52,64	0,42112
S		0,02100362
E		4,755437266

Tabla 3.5. Resultados experimentales al determinar los por cientos de perlita (%P) y carbono (%C) con la probeta número 3 de un acero AISI 1045 para un aumento de 400X. Fuente: El autor

Probeta 3 400X		
CAMPOS	%PERLITA	%C
1	59,4	0,4752
2	58,8	0,4704
3	57,9	0,4632
4	57,2	0,4576
5	59,1	0,4728
$\bar{\Sigma}$	58,48	0,46784
S		0,007275163
E		1,482680545

Tabla 3.6. Resultados experimentales al determinar los por cientos de perlita (%P) y carbono (%C) con la probeta número 5 de un acero AISI 1045 para un aumento de 200X. Fuente: El autor

Probeta 5 200X		
CAMPOS	%PERLITA	%C
1	51,3	0,4104
2	50	0,4
3	55,7	0,4456
4	50,9	0,4072
5	55,3	0,4424
\bar{X}	52,64	0,42112
S		0,0212535
E		4,812016907

Tabla 3.7. Resultados experimentales al determinar los por cientos de perlita (%P) y carbono (%C) con la probeta número 5 de un acero AISI 1045 para un aumento de 400X. Fuente: El autor

Probeta 5 400X		
CAMPOS	%PERLITA	%C
1	54,2	0,4336
2	52,8	0,4224
3	50,6	0,4048
4	50,5	0,3944
5	49,3	0,3944
\bar{X}	51,48	0,40992
S		0,0174961
E		4,069520753

Tabla 3.8. Resultados experimentales al determinar los por cientos de perlita (%P) y carbono (%C) con la probeta número 167 de un acero AISI 1045 para un aumento de 200X. Fuente: El autor

Probeta 167 200X		
CAMPOS	%PERLITA	%C
1	52	0,416
2	56,5	0,452
3	51,9	0,4152
4	49,3	0,3944
5	51,4	0,4112
\bar{X}	52,22	0,41776
S		0,021040152
E		4,802022809

Tabla 3.9. Resultados experimentales al determinar los por cientos de perlita (%P) y carbono (%C) con la probeta número 167 de un acero AISI 1045 para un aumento de 400X. Fuente: El autor

Probeta 167 400X		
CAMPOS	%PERLITA	%C
1	51,9	0,4152
2	56,5	0,452
3	48,1	0,3848
4	52,5	0,42
5	56,4	0,4512
\bar{X}	53,08	0,42464
S		0,028070768
E		6,302829912

En las tablas mostradas anteriormente, se observa que, para el por ciento de carbono, el valor de la desviación estándar se ubica de manera general entre la segunda y tercera cifra decimal para la mayoría de probetas estudiadas con diferentes aumentos y el error relativo está alrededor del 5%. Esto significa que la

cantidad de campos analizados (5 campos) por cada probeta de acero AISI 1045, con el software ImageJ, es suficiente para garantizar un valor representativo.

3.3.1 Estimación de las propiedades mecánicas del aceros 1045

Los resultados obtenidos en la estimación de las propiedades mecánicas, son mostrados en la tabla 3.10, y se obtienen al aplicar la ecuación 2.1 para determinar la resistencia a la tracción (σ_B). Este último valor está en dependencia del por ciento de perlita (%P) procesado con el software ImageJ, y del por ciento de ferrita (% α), previamente calculado con la ecuación 2.8. Las demás propiedades: dureza (HB), límite de fluencia (σ_F), y límite de fatiga se determinaron con las ecuaciones 2.3, 2.5, y 2.6 respectivamente, las cuales están en dependencia del valor de la resistencia a la tracción (σ_B).

Tabla 3.10. Estimación de las propiedades mecánicas de las probetas de acero AISI 1045, a partir de las ecuaciones empíricas. Fuente: El autor.

Probetas	% C Calculado	Propiedades mecánicas estimadas			
		σ_B (MPa)	HB (kgf/mm ²)	σ_F (MPa)	σ_{-1} (MPa)
3	0,44	577,24	167	404	288,62
5	0,42	558,11	162	391	279,05
167	0,42	561,33	163	393	280,67

3.3.2 Comparación de las propiedades mecánicas del acero 1045, empleando el software ImageJ, con los valores reportados en la Empresa Planta Mecánica

Los resultados obtenidos de la comparación de las propiedades mecánicas del acero, por ambas vías, son mostrados en las tablas 3.11, 3.12, 3.13 y 3.14.

➤ **Comparación de la resistencia a la tracción (σ_B).**

En la tabla 3.11, se observa que los valores de la resistencia a la tracción (σ_B), que fueron calculados con la ecuación empírica 2.1, y los resultados obtenidos mediante ensayos destructivos en la Empresa Planta Mecánica de Villa Clara, están en un rango aceptable ya que el por ciento de carbono determinado por el programa ImageJ es inferior a los de la Empresa Planta Mecánica y esto influye grandemente en el resultado final, no obstante, el porcentaje de variación se aproximan a un 10% por lo que podemos concluir que existe cierta correlación entre los resultados.

Tabla 3.11. Comparación de la resistencia a la tracción (σ_B) calculada, utilizando los valores del programa ImageJ, con los de la Empresa Planta Mecánica. Fuente: El autor.

Probetas	Valores de resistencia a la tracción		
	ImageJ σ_B (MPa)	Planta Mecánica σ_B (MPa)	Variación %
3	577,24	656,07	12
5	558,11	652,56	14
167	561,33	640,76	12

➤ **Comparación de la dureza (HB).**

En cuanto a los resultados obtenidos para la dureza (HB), la cual se presenta en la tabla 3.12, se aprecia que la variación entre el valor calculado, con la ecuación 2.3, y el valor de la Empresa Planta Mecánica de Villa Clara, es inferior al 10%. Lo cual indica que la relación utilizada a partir de la resistencia a la tracción, tiene total correspondencia con los valores reales de dureza para cada uno de estas probetas del acero AISI 1045.

Tabla 3.12. Comparación de la dureza (HB) calculada, utilizando los valores del programa ImageJ, con los de la Empresa Planta Mecánica. Fuente: El autor.

Probetas	Valores dureza HB		
	ImageJ HB (kgf/mm ²)	Planta Mecánica HB (kgf/mm ²)	Variación %
3	167	180	7,2
5	162	176	8
167	163	165	1,1

➤ **Comparación del límite de fluencia (σ_F).**

En la tabla 3.13, se observa una correlación entre los valores calculados con la ecuación empírica 2.5, utilizada para determinar el límite de fluencia (σ_F) y los establecidos por la Empresa Planta Mecánica, observándose una variación alrededor del 10%.

Tabla 3.13. Comparación del límite de fluencia (σ_F) calculado, utilizando los valores del programa ImageJ, con los valores de la Empresa Planta Mecánica. Fuente: El autor.

Probetas	Valores límite de fluencia.		
	ImageJ σ_F (Mpa)	Planta mecánica σ_F (Mpa)	Variación %
3	479,11	464,7	3
5	463,23	458,4	10
167	465,90	414,6	11

➤ **Comparación del límite de fatiga (σ_{-1}).**

En la tabla 3.14 se muestran los resultados obtenidos al calcular el límite de fatiga, con los valores suministrados por Pisarenko [17]. Se observa que en los resultados del límite de fatiga calculado, hay una total correspondencia con los valores presentados por este autor.

Tabla 3.14. Límite de fatiga (σ_{-1}) calculado utilizando los valores del programa ImageJ, y valores tomados del manual de Pisarenko [17] para un acero AISI 1045.

Fuente: El autor.

Probeta	Valores límite de fatiga.	
	Calculado σ_{-1} (Kgf / mm ²)	Pisarenko [17] σ_{-1} (Kgf / mm ²)
3	29,5	25-34
5	28,47	25-34
167	28,64	25-34

3.4 Conclusiones parciales

- 1- Es factible la determinación del tamaño de grano del acero AISI 1045, de las tres probetas estudiadas, que menor tamaño de grano dio, fue la 167.
- 2- Se determinaron los por cientos de perlita y ferrita de las tres probetas investigada del acero AISI 1045, así como el contenido de carbono, comprobándose que el grado de correlación de los resultados obtenidos, en comparación con la base de datos Matweb, están en el rango establecido.
- 3- La determinación del por ciento de carbono se obtiene, con valores de la desviación estándar que se ubican de manera general entre la segunda y tercera cifra decimal para la mayoría de probetas estudiadas con diferentes aumentos, con un error relativo alrededor del 5%. Esto significa que la cantidad de campos analizados (5 campos) por cada probeta de del acero 1045, con el software ImageJ, es suficiente para garantizar un valor representativo.
- 4- Las propiedades mecánicas estimadas, tales como: resistencia a la tracción, dureza, límite de fluencia, y límite de fatiga, están en concordancia con los resultados reportados por la base de datos Matweb, no así la resistencia a la rotura con los datos obtenidos, por los ensayos destructivos realizados en Planta Mecánica

5- Se utilizó la relación ($\sigma_F = 0,84 * \sigma_B$), entre el límite de fluencia y la resistencia a la tracción, para el acero 1045, en correspondencia con lo reportado por la base de datos de la MatWeb.

Conclusiones Generales

1-Se propuso un esquema de trabajo de acoplamiento de la cámara fotográfica-microscopio óptico metalográfico-computadora, que permitió determinar el tamaño de grano y estimar las propiedades mecánicas y por ciento de carbono, para el acero AISI 1045 normalizado, fundido en Planta Mecánica (Villa Clara), utilizando el software ImageJ.

2-El valor del tamaño de grano estimado, para las probetas 3 y 5 fue de N⁰ 5 ASTM, y para la probeta 167 de 4, es decir, esta última presenta tamaño de grano más grande.

3-La utilización del software profesional ImageJ, para el procesamiento digital de imágenes obtenidas a través del microscopio óptico metalográfico, permitió determinar el por ciento de perlita y carbono, en el acero AISI 1045, normalizado. Los resultados se corresponden plenamente con los valores establecidos en la base de datos Matweb y están dentro del rango que se establece por norma para un acero AISI 1045.

4-La determinación del por ciento de carbono se obtiene, con valores de la desviación estándar que se ubican de manera general entre la segunda y tercera cifra decimal para la mayoría de probetas estudiadas con diferentes aumentos, con un error relativo alrededor del 5%. Esto significa que la cantidad de campos analizados (5 campos) por cada probeta de del acero 1045, con el software ImageJ, es suficiente para garantizar un valor representativo.

5- Se estimó las propiedades mecánicas, tales como: la resistencia a la tracción, la dureza y el límite de fluencia y las mismas están en concordancia con los valores reportados en Matweb, no así con los resultados reportados de Planta Mecánica.

6- Los resultados obtenidos de la estimación del límite de fatiga (σ_{-1}) a flexión en las tres probetas del acero investigado, están en correspondencia con los reportados en el Manual de Resistencia de Materiales de Pizarenko, lo cual corrobora la validez del procedimiento desarrollado en la investigación.

Recomendaciones

1- Se debe seguir trabajando en el perfeccionamiento del procesamiento de la imagen, utilizando los filtros adecuados, para disminuir los errores en la determinación del por ciento de perlita y el tamaño de grano.

Bibliografía

- [1] M. Castro y O. Fornaro, *Microscopia óptica aplicada al estudio de aleaciones metálicas*, Conicet, Universidad Nacional del Centro de la provincia de Buenos Aires: instituto de física de materiales.
- [2] M. Velandia., *Metalografía cuantitativa*, Centro de investigación en materiales (cimat), citeg, editor. 2008, Universidad Nacional Experimental de Guayana: Puerto Ordaz, Venezuela.
- [3] J. Fajardo; J. Abuchar Y J. Ureche, *Caracterización mecánica y micro-estructural del acero A131 sometido a cargas explosivas*. Scientia technica año XIII, Colombia, septiembre de 2007.
- [4] A.P. Guliaev., *Metalografía* tomo I y II, ed. Mir. 1978., moscú.
- [5] O. García, *Sistema de extracción de características microestructurales de sistemas cerámicos utilizando técnicas de procesamiento digital de imágenes*, X Congreso iberoamericano de metalurgia y materiales, u.d. cauca editor, suplemento de la revista latinoamericana de metalurgia y materiales 2009: Popayán, Colombia.
- [6] P. Benedetti, M. J. Yañez, *Filtrado de rayas de pulido en imágenes de chapas de acero mediante procesamiento digital*, jornadas Conamet, u.n.d. sur editor. 2001: avda. alem 1253. 8000 bahía blanca. Argentina.
- [7] R.Wainschenker; J. Massa,P. Tristan. *Etapas del procesamiento digital de imágenes*. guía informativa área procesamiento de señales. 2011.
- [8] A.D. Torres, *Procesamiento digital de imágenes*. Editorial perfiles educativos. 72 ed. abril 2003, Universidad Nacional Autónoma De Mexico: México D.F.
- [9] <http://www.qualitechmicroscopes.com>
- [10] <http://www.dewinterindia.com>.
- [11] <http://difusion.df.uba.ar/ConectarIgualdad/ImageJ.pdf>
- [12] S. Avner. *Introducción a la metalurgia física*. Mc Graw Hill, México 1974. 2da edición. sbn 96b-6046-01-1.

- [13] Metallurgy And Metallurgical Engineering Series “ *structure and properties of alloys*”
- [14] D. Askeland, *Ciencia e ingeniería de los materiales*, 3era edición, international Thomson editores, México 1998. isbn 0-534-93423-4.
- [15] W. Callister *introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales.*, editorial Reverté. 1999.
- [16] <http://blog.utp.edu.co/lvanegas/files/2011/08/cap5.pdf>
- [17] G. S. Pisarenko, A. P. Yakovlev, V. Matvev “manual de resistencia de materiales”, editorial Mir Moscú, 1989.

Anexo

Grain Size No. G	\bar{N}_A Grains/Unit Area		\bar{A} Average Grain Area		\bar{d} Average Diameter		$\bar{\tau}$ Mean Intercept		\bar{N}_L
	No./in. ² at 100X	No./mm ² at 1X	mm ²	μm ²	mm	μm	mm	μm	No./mm
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5	2.21
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0	3.12
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1	3.72
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3	4.42
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0	6.25
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.84
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6	17.68
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	44.9	0.0400	40.0	25.00
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8	42.04
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0	50.00
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0	100.0
10.5	724.08	11223.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4	118.9
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1	141.4
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9	168.2
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0	200.0
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2	237.8
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5	282.8
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0	336.4
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.0