

EMPLEO DEL *IMAGEJ* EN EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES DURANTE EL ESTUDIO DE MATERIALES

EMPLOYMENT OF THE *IMAGEJ* IN DIGITAL PROCESSING OF IMAGES DURING THE MATERIALS STUDYING

W. MORALES GONZÁLEZ ^{a†}, J.E. HERNÁNDEZ-RUIZ ^b, A. DUFFUS SCOTT ^c, y E.A. CRUZ CRESPO ^d

a) Departamento de Física, Facultad de Matemática-Física-Computación, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba. wmorales@uclv.cu[†]

b) Departamento de Física, Facultad de Matemática-Física-Computación, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba. jesusehr@uclv.edu.cu

c) Centro de Investigaciones de Soldadura, Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba. aduffus@uclv.edu.cu

d) Centro de Investigaciones de Soldadura, Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba. acruz@uclv.edu.cu

[†]autor para la correspondencia

Resumen: En el presente trabajo se exponen las vivencias en el empleo del *ImageJ* durante el procesamiento digital de imágenes por los profesores de la disciplina Optativa de la carrera de Licenciatura en Física de la Universidad Central de Las Villas (UCLV). Se muestra el procedimiento desarrollado usando el *ImageJ* para la determinación de los porcentajes de fases y el contenido de carbono de diferentes tipos de aceros, a partir de las micrografías de estos materiales. Asimismo, se describe cómo este mismo software es usado en las investigaciones que realizan los estudiantes y profesores de la citada carrera durante el desarrollo, estudio y caracterización de materiales.

Abstract: In the present work, the experiences in the use of the *ImageJ* during the digital images processing by the professors of the Elective discipline of the Degree in Physics of the Central University of Las Villas (UCLV) are exposed. The procedure developed using the *ImageJ* for the determination both of the phases percentage and the carbon content of different types of steels, from the micrographs of these materials is shown. Likewise, it is described how this same software is used in the research carried out by the students

and professors of the aforementioned degree during the development, study and characterization of materials.

Keywords: Physics careers, 01.85.+f; metals and alloys, 81.05.Bx; Materials testing and analysis, 81.70.-q; Digital image processing algorithms, 07.05.Pj; Material metal-base composite 81.05.Ni.

INTRODUCCIÓN

La carrera de Física se estudia en tres de las universidades cubanas, a saber: en la Universidad de la Habana, en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas (UCLV) y en la Universidad de Oriente. La carrera de Física se distingue porque la Práctica Laboral e Investigativa de los estudiantes se concreta en la disciplina Trabajo Científico, que es la disciplina integradora y constituye la columna vertebral de la carrera. Los estudiantes inician el trabajo científico en el segundo semestre del segundo año, el que culmina con el trabajo de diploma en quinto año. A esta disciplina tributan en principio las demás disciplinas de la carrera [1]. Pero, particularmente significativo resulta el aporte que realizan a esta disciplina las diferentes asignaturas del currículo optativo. En el caso de la carrera de Física de la UCLV durante su trabajo científico los estudiantes se vinculan a las líneas de investigación fundamentales con que cuenta el Departamento de Física, a saber: Ciencias Planetarias, Ciencia de Materiales y Física Médica. En el caso particular de los estudiantes vinculados a la línea Ciencia de Materiales, ellos pueden optar por cursar asignaturas que tributan a esta línea, entre las que destacan Ciencia de Materiales I y II, Técnicas de Caracterización de Materiales I y II, y otras [2]. Desde hace varios años estas asignaturas se imparten

en el Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS) de la Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial en la UCLV o en colaboración con este centro, el cual ha devenido como una de las Unidades Docentes de la carrera de Licenciatura en Física. La impartición de las citadas asignaturas se realiza por profesores-investigadores y técnicos de los laboratorios del CIS y profesores del Departamento de Física. Tanto en la impartición de estas asignaturas como en la investigación, durante el desarrollo y caracterización de materiales, se ha introducido el empleo de técnicas de Procesamiento Digital de Imágenes (PDI) con el uso del *ImageJ*.

Al conjunto de técnicas y procesos para descubrir o hacer resaltar información contenida en una imagen, usando como herramienta principal una computadora, se le conoce como PDI [3, 4].

La imagen digital se ha incorporado prácticamente a la totalidad de los equipos de microscopía electrónica y microscopía con focal y ha sustituido rápidamente a las tradicionales cámaras fotográficas de los microscopios ópticos. Las ventajas de la imagen digital, frente a la analógica, vienen dadas por las múltiples posibilidades de manipulación que ofrece. Además, pueden procesarse dichas imágenes para obtener información sobre el sistema en estudio y sus propiedades. Reconocer, contar y

medir tamaño, forma, posición o densidad de determinados objetos, es algo que, con una correcta preparación de la muestra, está al alcance de cualquier ordenador personal complementado con un software adecuado de análisis de imágenes [3, 4].

En el estudio de diferentes tipos de materiales es común analizar las imágenes obtenidas por microscopios ópticos, con la intención de obtener datos útiles para algún fin. Este análisis de las imágenes, es una herramienta muy útil en el estudio de los metales y otros materiales, debido a que permite individualizar las fases presentes, su cantidad relativa y su morfología. Dado que las diferentes fases tienen propiedades mecánicas que les son propias, la cantidad de fases presentes y su distribución determinan las propiedades mecánicas del material [5-7]. Callister, Chalmer, otros

Debido a la naturaleza de las imágenes, la extracción manual de los parámetros microestructurales implica largos tiempos de análisis, y siempre existe el sesgo debido al empleo de los criterios subjetivos del investigador, lo cual puede ocasionar impresiones por este concepto. Por ello, la necesidad de involucrar en el proceso de análisis el uso de computadoras para implementar un sistema automático de análisis, basado en el procesamiento digital de imágenes, el cual permite determinar los parámetros microestructurales de interés [8].

En la actualidad existe una gran diversidad de programas profesionales que trabajan para facilitar el tratamiento digital de imagen en el campo de la ciencia de los materiales, la medicina y otras disciplinas. Sin embargo, los *softwares* profesionales

para el tratamiento de imagen digital que existen en el campo de la ciencia de los materiales son muy costosos. Las distintas firmas comerciales ofrecen los productos en un sistema integrado de cámara para la adquisición de la imagen, microscopio para observar microestructura y el *software* para realizar el ulterior procesamiento en una computadora. De acuerdo a lo reportado por Rodríguez Rojas [8] una licencia de *software*, de PDI, para estudiar detalles de los aceros posee un costo de entre 30.000 y 40.000 dólares.

Con la aparición de los *softwares* libres se hizo posible concebir otras vías para el PDI, con la misma o similar precisión que los *softwares* existentes en el mercado para estos mismos fines. Tal es el caso del *Image J*.

En el año 2010 invitado por el Departamento de Física de la UCLV, el Dr. Sidnei Paciornik de la Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro (PUC-Río), Brasil, impartió el curso de postgrado “Análisis de Imagen y Microscopia Digital”, con la participaron de profesores e investigadores del grupo de Ciencia de los Materiales del Departamento de Física y del Centro de Investigación de Soldadura, así como estudiantes de la carrera de Física en calidad de oyentes. El propósito general de este curso fue familiarizar e introducir a los participantes en el empleo de las técnicas de análisis de las imágenes obtenidas por microscopia digital en el estudio de materiales y mostrar el empleo con este fin de diferentes *softwares* especializados. A partir de ese momento se introduce el empleo del *ImageJ* en el estudio y caracterización de los materiales que se estudian y desarrollan tanto en el CIS como

en el Departamento de Física. En el caso particular de la carrera de Física también se ha introducido en la docencia y como parte del trabajo científico de los estudiantes que investigan en la línea de Ciencia de los Materiales.

El presente trabajo tiene el propósito de mostrar las experiencias de la carrera de Física, en colaboración con el CIS, en la introducción y empleo del *ImageJ* en la docencia e investigación de sus estudiantes y profesores.

MATERIALES Y MÉTODOS

El *ImageJ*

El *ImageJ* es un software de análisis y procesamiento de imágenes, libre, gratuito y de código abierto; desarrollado en Java por Wayne Rasband del *National Institute of Health* (Instituto Nacional de Salud) en Bethesda, Maryland, EE. UU.; que se utiliza como una herramienta que facilita el procesamiento de imágenes y su interpretación [9, 10].

ImageJ fue diseñado con una arquitectura abierta que proporciona extensibilidad a través de complementos de *Java*. Los complementos de adquisición, análisis y procesamiento personalizados se pueden desarrollar utilizando el editor integrado de *ImageJ* y el compilador *Java*. Los complementos escritos por el usuario permiten resolver casi cualquier problema de procesamiento o análisis de imágenes. El código fuente está disponible gratuitamente [9].

De acuerdo con Ferreira y Rasband [9] el *ImageJ* se ejecuta, ya sea como un *applet* en línea o como una aplicación

descargable, en cualquier computadora con una máquina virtual Java 1.5 o posterior. Es multiproceso, por lo que las operaciones que requieren mucho tiempo, como la lectura de archivos de imagen, se pueden realizar en paralelo con otras operaciones. El programa admite cualquier cantidad de ventanas (imágenes) simultáneamente, limitado solo por la memoria disponible.

De acuerdo con estos mismos autores [9] entre las operaciones que pueden realizarse con el *ImageJ* se encuentran mostrar, editar, analizar, procesar, guardar, ampliar e imprimir imágenes. Todas las funciones de análisis y procesamiento están disponibles en cualquier factor de ampliación. Además, puede leer varios formatos de imagen, incluyendo imágenes sin formato; calcular estadísticas de valores de área y píxel de selecciones definidas por el usuario, medir distancias y ángulos, crear histogramas de densidad y gráficos de perfil de línea.

En el desarrollo de este trabajo se empleó el *software Fiji (Fiji Is Just ImageJ)* (ver figura 1).

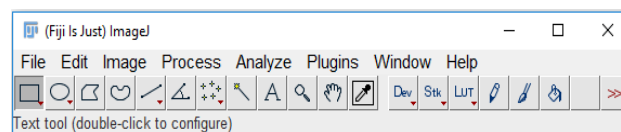


Figura 1: Ambiente de trabajo del *software Fiji (Fiji Is Just ImageJ)*.

Nótese que el ambiente de trabajo del *Image J* tiene el aspecto general similar al de la hoja de trabajo de otros *softwares* soportados o que corren sobre *Windows*, por lo cual se manipulación resulta sumamente sencilla.

El *ImageJ* también admite funciones de procesamiento de imágenes estándar, como la manipulación de contraste, la nitidez, el suavizado, la detección de bordes y el filtrado. Realiza transformaciones geométricas tales como escalado, rotación y volteos. La calibración espacial está disponible para proporcionar mediciones dimensionales del mundo real en unidades como milímetros. También está disponible la calibración de densidad o escala de grises [9].

Procedimiento general de trabajo para estudios metalográficos con el empleo del *ImageJ*

En la realización de algunas de las prácticas de laboratorio que se realizan en las asignaturas de Ciencia de Materiales y de Técnicas de Caracterización en Materiales se aplica, de una u otra forma, el procedimiento general de trabajo para estudios metalográficos con el empleo del *ImageJ*, desarrollado por Rodríguez Rojas [8].

El flujograma del procedimiento para estimar el porcentaje de carbono (%C) y algunas propiedades de los aceros, a partir de la estimación primaria del porcentaje de perlita (%P) con el empleo del *ImageJ*, desarrollado por Rodríguez Rojas [8] se presenta en la figura 2. Este procedimiento incluye el procesamiento de la micrografía de una muestra del material con el *ImageJ* (lado izquierdo de la figura 2) para estimar el porcentaje de perlita, y comprende cinco etapas, las cuales según expresan varios autores están presentes en cualquier procesamiento digital de imágenes [11,12].

Estas etapas son la captura o adquisición de la imagen, el pre-procesamiento de la

imagen, con el propósito de mejorar la imagen, la segmentación, o sea, la división de la imagen en regiones o segmentos manipulables, la extracción de las características de la imagen, i.e., el reconocimiento y la interpretación de la imagen y finalmente, la identificación de objetos, en este caso de las fases.

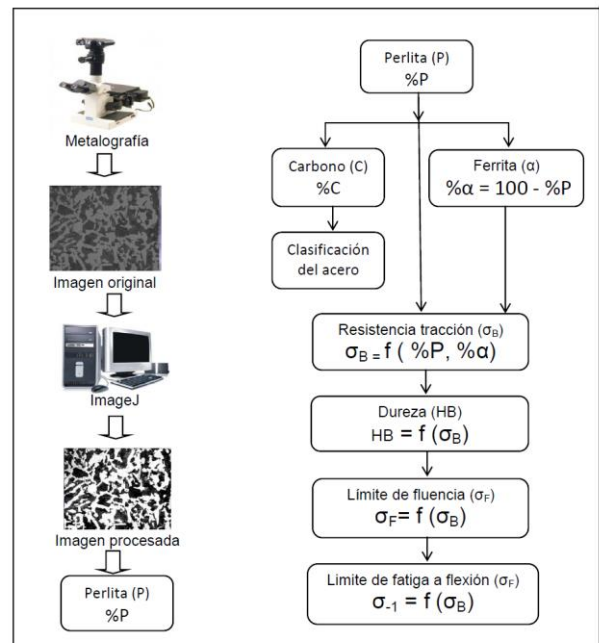


Figura 2: Flujograma de trabajo para estimar el porcentaje de carbono (%C) y algunas propiedades mecánicas, a partir de la estimación del porcentaje de perlita de un acero utilizando el software *ImageJ* [8].

Durante el desarrollo del proceso de enseñanza-aprendizaje en estas asignaturas, por lo general, se realiza una secuencia de prácticas de laboratorios, la que se inicia con la práctica de laboratorio Preparación de muestras, y después se continúan con una serie de prácticas de laboratorios que permiten hacer el estudio integral de la muestra preparada por cada estudiante, en las que se estima el

por ciento de perlita, por ejemplo a una muestra de un acero al carbono hipoeutectoide, después se halla el contenido de carbono y se miden un grupo de propiedades mecánicas, entre ellas la dureza, los límites de fluencia a la tracción y de fatiga, etc.; y se correlacionan las propiedades estimadas a partir de los porcentos de perlita y de carbono estimados con el empleo del *ImageJ* y las propiedades mecánicas medidas “directamente”. Una vez que el estudiante ha culminado su secuencia de prácticas de laboratorio, ha aprendido a usar el *ImageJ* para estimar porcentos de fases, a estimar propiedades mecánicas a partir del conocimiento de los porcentos de fase del material, a realizar ensayos de dureza, de fatiga y otros; y a correlacionar las propiedades estimadas con el *ImageJ* con las medidas “directamente”. De este modo, no solo ha adquirido los conocimientos y habilidades que se exigen en los programas de las diferentes asignaturas, sino que ha completado en buena lid un trabajo de investigación sobre un material dado, el cual, en dependencia de la calidad de los resultados, se determina si puede derivar en una ponencia para presentar en el Fórum Científico Estudiantil o en un artículo científico.

Equipamiento empleado

Los equipos empleados, desde la etapa de captura de la imagen del acero hipoeutectoide (micrografía), hasta el procesamiento digital de la imagen con el software *Fiji* (*Fiji Is Just ImageJ*), fueron un microscopio óptico metalográfico, marca ZEISS de fabricación alemana con cámara fotográfica digital incorporada, con estilo de

platina invertida y con diferentes tipos de objetivos (x5, x10, x40, x100), hasta aumento x800; una cámara fotográfica digital, marca Canon 630; y una computadora, marca Acer, con procesador Intel Core i5, memoria RAM 6 GB y disco duro de 1TB.

Previamente se realizó la Práctica de Laboratorio Preparación de Muestras, como resultado se obtuvo la probeta metalográfica a estudiar. Se trabajó con una muestra de acero de bajo contenido de carbono en estado normalizado o recocido. Esto último para garantizar la homogeneidad en la estructura y de la composición química, lo cual permitirá obtener propiedades mecánicas similares en todo el material.

Posteriormente se observó su microestructura en el microscopio óptico metalográfico y haciendo uso de la cámara digital acoplada a éste, se capturaron cinco micrografías en diferentes regiones de la muestra, las cuales se archivaron adecuadamente en un *folder* habilitado para tal fin. En todos los casos se fijó un aumento en el microscopio de x200.

Finalmente, se aplicó el *ImageJ* para estimar el porcentaje de perlita (%P) en la muestra del acero al carbono hipoeutectoide, lo cual permite con posterioridad hallar su contenido de carbono (%C), y estimar algunas de sus propiedades mecánicas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se cargó el programa *ImageJ*, en éste caso se trabajó con *Fiji* (*Fiji Is Just ImageJ*) (ver figura 1). En la ventana desplegable “*File*” se seleccionó “*Open*” y se indicó la ruta

donde se encuentran las micrográficas a analizar (archivos) de la microestructura del acero, previamente capturadas (ver figura 3), en un formato jpeg, tiff, giff, bmp, etc. y se seleccionó la que aparece en la figura 3.

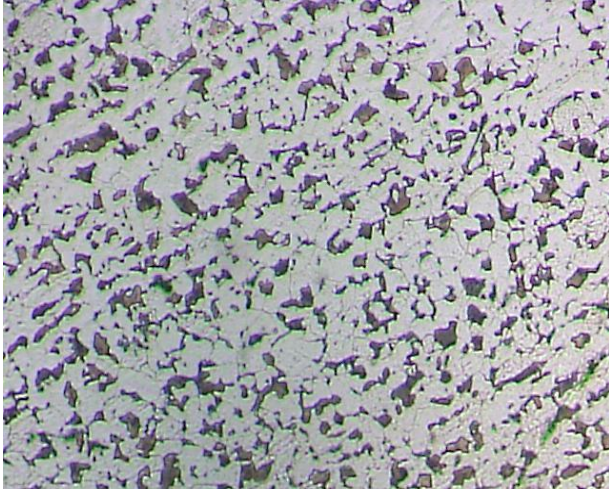


Figura 3: Micrografía original de la ZonaD200X de la muestra de acero hipoeutectoide en estudio.

Seguidamente se ajustó el brillo y contraste de la imagen, para ello en la ventana desplegable “Image” se selecciona “Adjust” y luego “Brightness/Contrast”, se selecciona “Auto” y luego “Apply” (ver figura 4b). En caso de ser necesario se puede realizar el ajuste de otros parámetros, como balance de color, tamaño de la imagen o tamaño de la ventana.

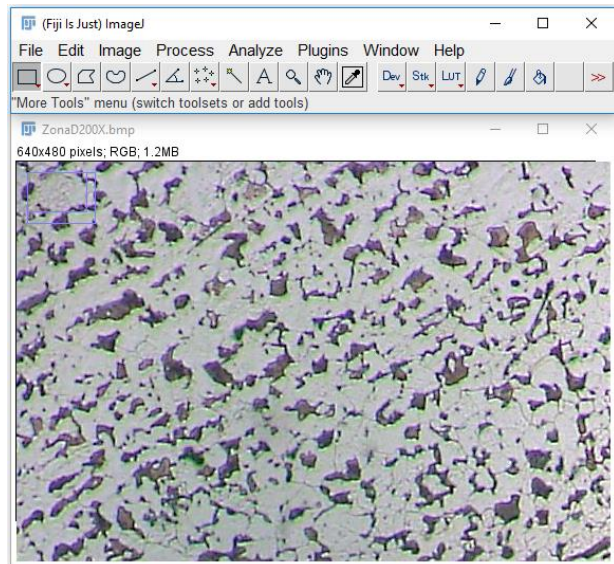


Figura 4a: Imagen mejorada sin pre-procesamiento.

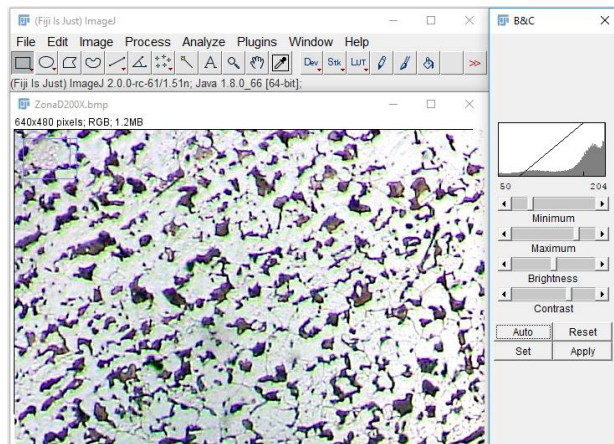


Figura 4b: Imagen con pre-procesamiento.

Habiendo ajustado el brillo y contraste, se procedió a binarizar la imagen (figura 5a y 5b). Para ello se abre la ventana desplegable “Image”, se pulsa “Adjust” y luego “Threshold”, se selecciona “Auto” y luego “Apply” para aplicar.

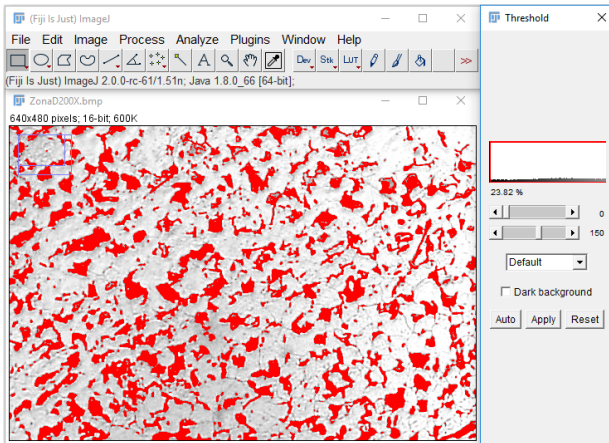


Figura 5a: Binarizando imagen.

Ya con la imagen binarizada se le realizó la mejora de la imagen. Para esto, en la ventana desplegable “Process” se seleccionó “Binary” y “Fill Holes” para rellenar los granos con zonas vacías por proceso de binarizado. Tal y como se muestra en la figura 6.

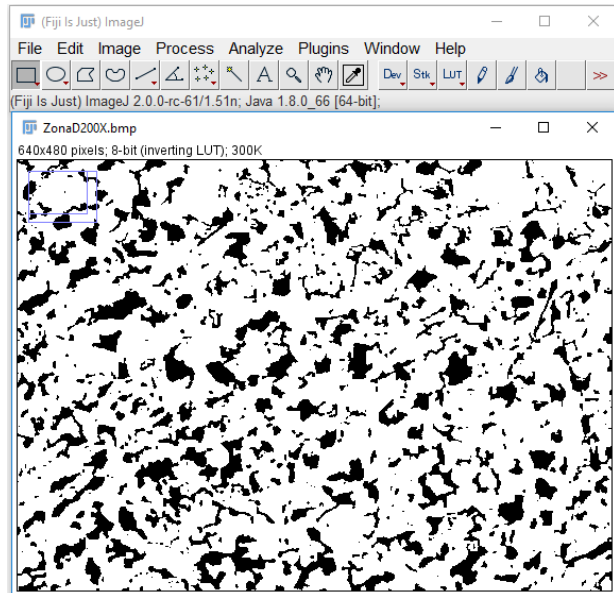


Figura 6: Imagen al aplicar “Fill Holes”.

Para realizar la estimación del área de los granos oscuros (%P) se definieron las operaciones al realizar por el software. En la ventana desplegable “Analyze” se seleccionó “Set Measurements” y marcó “Area” y las demás opciones las que vienen por defecto (*Redirect to: None* y 2 decimales) (ver figura 7a).

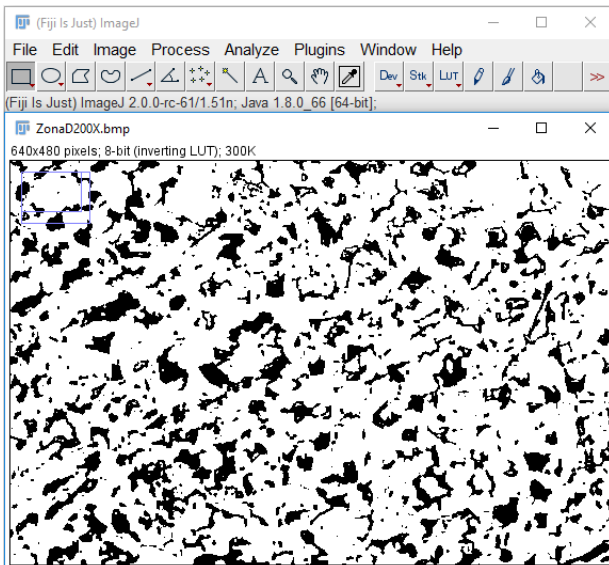


Figura 5b: Imagen binarizada.

Finalmente, en la ventana desplegable “Analyze”, seleccionó “Analyze Particles” y en el cuadro de diálogo se eligió en “size: 90-infinito” “Circularity: 0-0.9” y “Show: Outlines” para observar los bordes de los granos contados. Igualmente se marcó “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 (ver figura 7b).

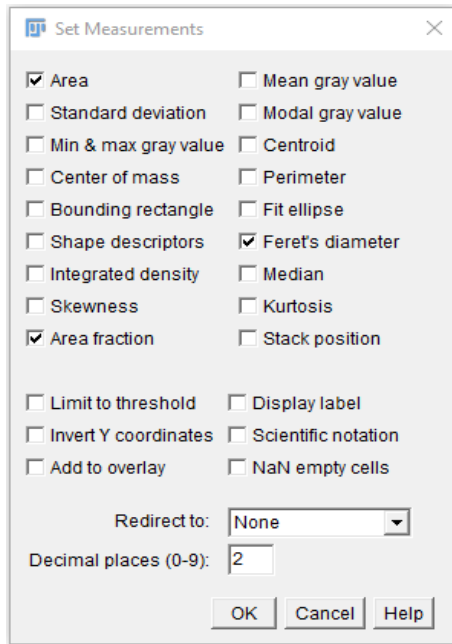


Figura 7a: Estableciendo parámetros de cálculo.

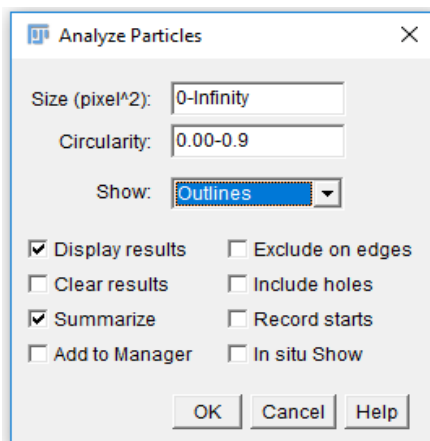


Figura 7b: Estableciendo parámetros de cálculo.

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 imagen microestructural. (ver figura 8).

Es preciso notar que en este caso no se

realizaron se aplicaron las acciones "Erode" y "Watershed" que describe Rodríguez Rojas [8] pues al realizar estos acciones se perdía determinado porcentaje de perlita. De este modo, el investigador en su interacción con el software tiene que ser conocedor del sistema en estudio y un ente activo, no se trata de ejecutar mecánicamente un procedimiento general que tiene necesariamente que ser adecuado a cada caso en estudio.

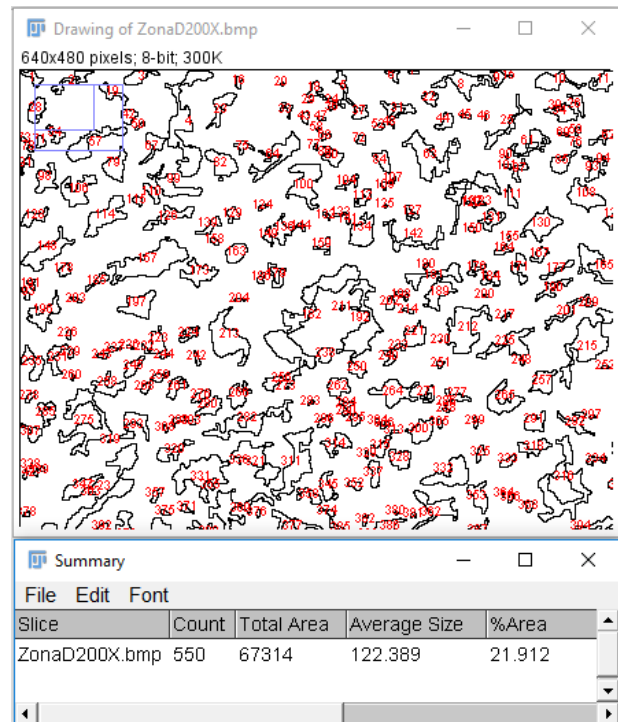


Figura 8: Resultado del procesamiento digital de imagen.

El contenido de carbono (%C), para aceros no aleados, a partir del contenido de perlita (%P) se puede determinar por la ecuación empírica [13]:

$$\%C = \frac{(\%P \cdot 0,8)}{100} \quad (1)$$

El porcentaje de perlita (%P), obtenido en la ventana "Summary", es de 21,912 %, para la fotomicrografía (ZonaD200X)

anterior tomada como ejemplo, de la muestra de acero en estudio. (ver figura 8).

$$\%P = 21,912$$

Sustituyendo en la ecuación (1) y efectuando se obtiene:

$$\%C \approx 0,175 \%$$

El procedimiento antes descrito, se vuelve a realizar, para las otras 4 micrografías, tomadas en diferentes zonas de la superficie de la muestra en estudio. Los valores obtenidos, así como los valores medios y la desviación estándar correspondientes se reportan en la Tabla I.

Tabla I		
Resultados experimentales al estimar los porcentos de perlita (%P) y de carbono (%C).		
Muestra	(% P)	(% C)
ZonaA200X	23.672	0.189
ZonaB200X	23.464	0.187
ZonaC200X	20.976	0.167
ZonaD200X	21.912	0.175
ZonaE200X	21.250	0.170
$\bar{\Sigma}$	22.254	0.178
S	0.002	0.001

La desviación estándar (**S**), se calcula por la ecuación:

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

donde x_i son los valores calculados, \bar{x} es el valor medio y n es el número de muestras (micrografías), según sea el porciento de perlita estimado o el porciento de carbono.

Los valores medios \bar{x} se obtienen a partir de la media aritmética:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}. \quad (3)$$

Un acero con un contenido de carbono (%C) de $(0,178 \pm 0.001) \%$ se puede clasificar como un *acero AISI 1020* [14].

Además del contenido de carbono (%C) del acero estudiado, también se podían haber obtenido otras propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción (σ_B), la cual es función del porciento de ferrita (% α) y perlita (%P); el límite de fluencia (σ_F), la dureza (HV), y el límite de fatiga a la flexión (σ_{-1}).

El procesamiento digital de imagen, realizado con el *ImageJ*, a las micrografías obtenidas con el microscopio óptico metalográfico, es similar al procesamiento que pudiera haberse realizado con otros *softwares* comerciales, altamente costosos.

Precisamente, el procedimiento presentado para determinar el porcentaje de perlita en los aceros al carbono hipoeutectoides, que permite hallar el contenido de carbono, entre otras propiedades mecánicas antes mencionadas, está establecido como una Práctica de Laboratorio de la Optativa Técnicas de Caracterización de Materiales II, que se imparte en el segundo semestre del cuarto año de la carrera de Licenciatura en Física, en la UCLV, permitiendo a los

estudiantes un acercamiento al *software ImageJ*, poderosa herramienta en el estudio de materiales, en correspondencia con la línea de investigación de Ciencia de los Materiales.

Por otra parte, el *ImageJ* también ha sido empleado satisfactoriamente en las investigaciones realizadas por estudiantes y profesores de la carrera de Licenciatura en Física. En la figura 9 muestran las micrografía ópticas de la estructura de un composite de aluminio reforzado con ceniza de bagazo de caña de azúcar y de la matriz sin reforzar, mejoradas empleando *el ImageJ* [15].

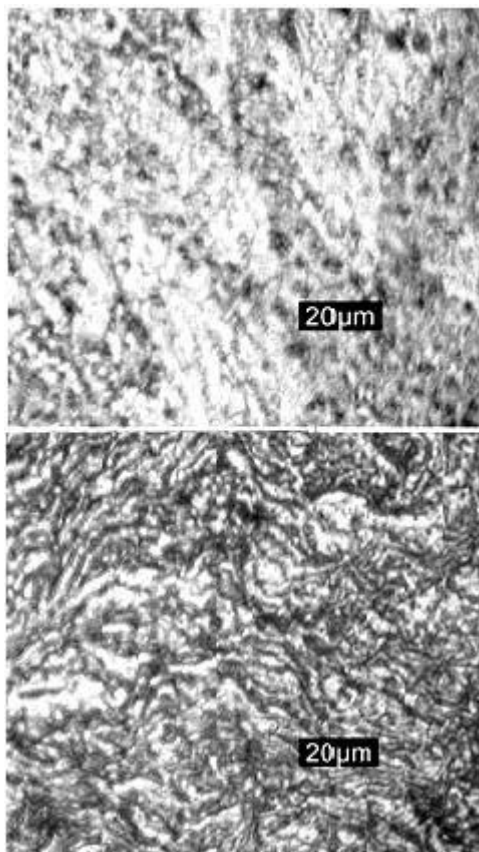


Figura 9: Micrografías ópticas del composite (arriba) y de la matriz sin reforzar (debajo) [15].

Ambas imágenes fueron procesadas

usando el *ImageJ* versión 1.43. Se determinó [15] que la fracción de área de granos correspondiente al composite y a la matriz no reforzado es de 4.9 y 6.7 por ciento respectivamente. Esto es un indicativo de que los granos del composite presentan menor radio de Feret [16] y al mismo tiempo, de acuerdo con la ecuación de Hall-Petch el composite presenta mayor dureza que la matriz sin reforzar, lo cual se debe a que durante el proceso de conformado y sinterizado del composite a temperatura de 600 °C se produce el endurecimiento del material por reducción del tamaño de partícula [17]. Esto se pudo verificar *a posteriori*, durante los ensayos de dureza, donde se determinó que la dureza del compuesto presenta un incremento porcentual de 5,67 % con respecto a la matriz sin reforzar [15].

CONCLUSIONES

Con el empleo del *ImageJ* se ha introducido una forma avanzada de análisis de la microestructura de diferentes tipos de materiales obtenidas por microscopia, ya sea óptica o electrónica, estandarizada y prácticamente desprovista del sesgo que en el análisis tradicional introduce el investigador.

El *software* libre *ImageJ* para el procesamiento digital de imágenes, de dominio público, permite conocer parámetros microestructurales que utilizados correctamente posibilita estimar propiedades mecánicas de los aceros, lo que lo hace una herramienta fuerte en la metalografía cuantitativa, la cual juega un rol importante en la Ciencia de los Materiales.

Se aplicó el procedimiento general de estudio morfológico y su relación con las propiedades de dureza de un compuesto de matriz de aluminio que emplea como aditivo ceniza de bagazo de caña de azúcar.

trabajo para estudios metalográficos con el empleo del *ImageJ*, desarrollado en el CIS, para la estimación satisfactoria del porcentaje de perlita (% *P*) y el contenido de carbono (%*C*) de un acero hipoeutectoide en estado recocido o normalizado. También se empleó el *ImageJ* en la realización del

REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Educación Superior, Comisión Nacional de Carrera de Licenciatura en Física, Plan D, 2006.
- [2] Universidad Central de Las Villas, Carrera de Licenciatura en Física, Currículo Optativo, 2012.
- [3] A. Domínguez Torres, Procesamiento digital de imágenes, Perfiles Educativos [en línea], [ISSN: 0185-2698], 1996 (abril-junio), Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=13207206> Fecha de consulta: 11 de abril de 2019.
- [4] M.J. Torres, Principios del procesamiento de imágenes digitalizadas, Editorial Valles, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela, 2003.
- [5] W.D. Callister, Materials Sciences and Engineering. An introduction, seventh edition, John Wiley & Sons, 2007.
- [6] D.R. Askeland, Ciencia e Ingeniería de los Materiales, 3ra edición, International Thomson Editores, 1998.
- [7] R.E. Smallman and R.E. Bishop, Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering, sixth edition, Butterworth-Heinemann, 1999.
- [8] O.G. Rodríguez Rojas, "Estimación de propiedades mecánicas de aceros hipoeutectoides. Utilizando técnicas de procesamiento digital de imágenes obtenidas a través de un microscopio óptico metalográfico". Tesis de maestría, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, 2012.
- [9] T. Ferreira y W. Rasband, ImageJ User Guide. Versión 1.43, 2012, Disponible en: <http://imagej.nih.gov/ij/docs/guide>. Fecha de consulta: 13 de abril de 2019.
- [10] M.D. Abramoff, P. J. Magalhaes y S.J. RAM, Image processing with ImageJ, Biophotonics International 11 (7): 36-42, (2004).
- [11] I.T. Young, J.J. Gerbrands, L.J. Van Vliet, Fundamentals of image processing, ISBN 90-75691-01-7, Printed in The Netherlands at the Delft University of Technology, 1995.
- [12] Image Processing, PDF generated using the open source mwlib toolkit. Ver: <http://code.pediapress.com/> , 2010.
- [13] A.P. Guliaev., Metalografía, tomo II, Editorial Mir, Moscú, 1978.

- [14] MatWeb Materials Properties Data, Disponible en: <http://www.matweb.com/>.
Fecha de consulta: 13 de abril de 2019.
- [15] J.E. Hernández-Ruiz, L. Pino-Rivero y E. Villar-Cociña, Composite de matriz de aluminio con ceniza de bagazo de caña de azúcar como material de refuerzo, Artículo RCF23622018A enviado a: Rev. Cub. Fis. y en proceso de revisión, 2019.
- [16] S. Al-Thyabat, N. J. Miles and T. S. Koh, Estimation of the size distribution of particles moving on a conveyor belt, Min. Eng. 20, 1 (2007).
- [17] J. R. Weertman, Hall-Petch strengthening in nanocrystalline metals, Mat. Sci. Ing.: A. 166, 1-2 (1993).