



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ

**COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES
MECÁNICAS Y MICROESTRUCTURALES DE
UN GRUPO DE ACEROS AL CARBONO
MEDIANTE UNA HERRAMIENTA
COMPUTACIONAL**

Autores: Jesús Capuzzi
C.I: 24.496.077
Luis Andrea
C.I: 26.186.078

Urb. Yuma II, calle N°3, Municipio San Diego
Teléfono (0241) 8714240 (master) – Fax: (0241) 8712394



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA INGENIERÍA MECÁNICA

**COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y
MICROESTRUCTURALES DE UN GRUPO DE ACEROS AL CARBONO
MEDIANTE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO**

Autores: Jesús Capuzzi

C.I: 24.496.077

Luis Andrea

C.I: 26.186.078

Tutor: Donato Romanello

C.I: 4.131.877

San Diego, Octubre 2019



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA INGENIERÍA MECÁNICA

ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Ingeniero Donato Romanello, portador de la cédula de identidad C.I. V-4131877, en mi carácter de tutor del Informe de Trabajo Especial de Grado presentado por los ciudadanos Capuzzi, Jesús, portador de la Cédula de Identidad C.I. V-24.496.077 y Andrea, Luis, portador de la Cédula de Identidad C.I. V-26.186.078-, titulado **“COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y MICROESTRUCTURALES PARA UN GRUPO DE ACEROS AL CARBONO MEDIANTE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL”**. Presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Mecánico, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, a 1 día del mes de octubre del año dos mil diecinueve

Ing. Donato Romanello
C.I.: V-4.131.877
Tutor Académico



EL N-991-2019-JCR (IG)

Valencia, 02 de Julio de 2019

Ciudadanos:
Jesús Capuzzi
C.I:24.496.077
Luis Andrea
C.I:26.186.078
Presente-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 01-2019 de fecha 02-07-2019 aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado **COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y MICROESTRUCTURALES DE UN GRUPO DE ACEROS AL CARBONO MEDIANTE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL** presentado por usted(es) como requisitos para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Se ratifica la designación del Ing. Donato Romanello, C.I:4.131.877 y la Ing. Alicia De Pizzella, C.I: 4.598.880 como Tutores Académico y Metodológico que los asesorarán en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente,

Prof. Luis Lara

Decano de la Facultad de Ingeniería



e.x. Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado (1).

L/te.

AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias por criarnos y apoyarnos.

A los profesores que nos enseñaron.

A Andrina y Migdalia por amarnos lo suficiente como para soportarnos durante este proceso.

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	pp.
INDICE DE FIGURAS.....	viii
INDICE DE TABLAS	ix
RESUMEN.....	xi
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO

I: EL PROBLEMA.....	2
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 Formulación del problema.....	4
1.3 Objetivos de la investigación.....	4
1.3.1 Objetivo general	4
1.3.2 Objetivos específicos.....	4
1.4 Justificación del problema.....	4
1.5 Alcance	5
II: MARCO TEÓRICO.....	6
2.1 Antecedentes.....	6
2.2 Bases teóricas	8
2.2.1 Estructura cristalina de los metales	8
2.2.2 Microestructura.....	9
2.2.3 Acero	9
2.2.4 Diagrama Hierro-Carbono	10
2.2.5 Determinación de propiedades mecánicas a través del análisis metalográfico.....	13
2.2.5.1 Norma ASTM-E112 y ASTM-E1382.....	13
2.2.5.2 Relación entre las propiedades mecánicas y las microestructuras de los aceros.....	16
2.2.5.3 Relación de Hall-Petch.....	20

2.2.6	Simulación	21
2.2.6.1	Etapas para realizar un estudio en simulación.....	21
2.2.6.2	Simulación por computadora	23
2.2.7	Procesamiento digital de imágenes.....	24
2.2.7.1	Imagen.....	24
2.2.7.2	Digitalización.....	24
2.2.7.3	Etapas para el procesamiento digital de imágenes.....	25
2.2.8	Bases de datos.....	27
2.2.9	Clasificación de las bases de datos	27
2.2.9.1	Bases de datos estáticas.....	27
2.2.9.2	Bases de datos dinámicas.....	28
2.2.9.3	Bases de datos bibliográficas.....	28
2.2.9.4	Bases de datos de texto completo.....	28
2.2.9.5	Bases de datos orientadas a objetos.....	28
2.3	Definición de términos básicos	29
III: MARCO METODOLÓGICO.....		31
3.1	Propósito de la investigación.....	31
3.2	Tipo de la investigación.....	31
3.3	Diseño de la investigación.....	32
3.4	Población y muestra	32
3.5	Fases metodológicas.....	33
IV: RESULTADOS		35
4.1	Identificación de la relación entre las propiedades mecánicas de un material y su microestructura.	35
4.2	Desarrollar algoritmos para el estudio de la metalografía de aceros y simulación de sus propiedades mecánicas.	36
4.2.1	Descripción detallada del código.....	39
4.2.1.1	Función “contador de granos” (conteo_granos).....	40
4.2.1.2	Función “norma ASTM E-112” (astm_e112).....	41

4.2.1.3 Función “relación de Hall-Petch” (relación_hall_petch).....	42
4.2.1.4 Función “almacenamiento de resultados” (guardar_resultados).....	42
4.2.1.5 Código principal.....	43
4.3 Simulación de las propiedades mecánicas de algunos aceros a partir de su microestructura.	44
4.4 Comparación de los valores obtenidos por la simulación con las propiedades mecánicas obtenidas a partir de ensayos realizados a las muestras.....	90
CONCLUSIONES	94
RECOMENDACIONES.....	96
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	152

ÍNDICE DE FIGURAS

CONTENIDO

pp.

Figura 1: Diagrama hierro-carbono (Fe-C).....	10
Figura 2: Esquema de aceros hipoeutectoides.	12
Figura 3: Esquema de aceros eutectoides.	12
Figura 4: Esquema de aceros hipereutectoides.....	13
Figura 5: Microestructura de perlita en acero 1080. Aumento 2500x.	17
Figura 6: Microestructura de acero eutectoide, esferoidita. Aumento 1000x.....	17
Figura 7: Microestructura martensítica: tipo listón (izquierda) y tipo placa (derecha).	18
Figura 8: Esquema de las etapas durante la solidificación del metal fundido; cada cuadrado pequeño representa una celda unitaria.....	19
Figura 9:	

Figura 11: Imagen segmentada y coloreada (izquierda) e imagen binarizada por umbralización (derecha).....	40
Figura 12: Bordes o límites de granos encontrados por la función "contador de granos", por medio de la superposición de los resultados. A la derecha, se puede observar una leyenda de intensidad, la cual refleja la cantidad de iteraciones.	41
Figura 13: Lista compuesta por tuplas, las cuales tienen la siguiente forma: (G, dp). Siendo "G" el tamaño de grano ASTM y "dp" el diámetro promedio de grano.	42
Figura 14: Captura del formato de impresión en el archivo de extensión “.txt”.	43
Figura 15: Formato para la presentación de resultados.	49
Figura 16: Cuadro de diálogo para ejecutar la instalación de WinPython.....	97
Figura 17: Cuadro de diálogo para la extracción del WinPython.....	98
Figura 18: Visualización del proceso de extracción de WinPython.	98
Figura 19: Carpeta extraída de la instalación de WinPython. Contiene una diversidad de aplicaciones, entre ellas, Spyder.....	99
Figura 20: Panel de control de WinPython, en donde se registra el intérprete como principal.	100
Figura 21: Vista de la aplicación "WinPython Command Prompt", la cual trabaja con el símbolo de sistema de Windows.	100
Figura 22: Vista de la ejecución del código en la aplicación de Spyder. En la mitad izquierda, se puede observar el código y, en la mitad derecha, se observa la ejecución del mismo y los resultados.	102

ÍNDICE DE TABLAS

CONTENIDO	pp.
Tabla 1: Comparación de herramientas computacionales para el análisis metalográfico.	38
Tabla 2: Resultados del análisis de imágenes metalográficas.	45

Tabla 3: Comparación del porcentaje de varianza por muestra de acuerdo con la concentración de Carbono y el tratamiento térmico.	89
---	----

ÍNDICE DE APÉNDICE

CONTENIDO	pp.
Apéndice A: Manual para la instalación del software.	95
Apéndice B: Código para el estudio metalográfico de aceros.	100
Apéndice C: Imágenes de las metalografías utilizadas.	107



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y
MICROESTRUCTURALES DE UN GRUPO DE ACEROS AL CARBONO
MEDIANTE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL**

Autores: Jesús Capuzzi, Luis Andrea

Tutor Académico: Ing. Donato Romanello

Fecha: Octubre, 2019

RESUMEN

Normalmente, el estudio de los aceros requiere llevar a cabo diversos ensayos que permitan conocer su composición química, propiedades físicas y comportamiento bajo ciertas condiciones, lo que lleva a tener las características adecuadas para una función y diseño en específico. Estos ensayos tienen procedimientos estandarizados y, para la actualidad, se han realizado infinidad de trabajos con resultados confiables y precisos, permitiendo así, desarrollar una base de datos que correlacione las propiedades de un material con su composición química. Por ello, la presente investigación tiene como objetivo principal comparar las propiedades mecánicas de aceros hipoeutectoides obtenidas a través de: 1) Ensayos experimentales de metalografía, tracción y microdureza Vickers y, 2) Procesamiento digital de imágenes de microestructuras. Dicha comparación se logró gracias a las potentes librerías científicas que ofrece el lenguaje de programación Python, el cual es de código abierto, fácil acceso y utilización; basado en la teoría del fortalecimiento del límite de grano o, mejor conocida como relación de Hall-Petch, la cual explica la relación existente entre la resistencia a la fluencia del material y el movimiento de las dislocaciones y, la norma ASTM E112 para el conteo de granos. Dando como resultado, la identificación de los límites de granos de las muestras, el diámetro promedio de los granos, el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo tracción en base al modelo matemático establecido.

Descriptores: Acero, Microestructura, Simulación, Python.

INTRODUCCIÓN

El estudio de la ciencia de materiales es quizás la rama de conocimiento más importante para cualquier ingeniero. Parte esencial del estudio de materiales es el análisis metalográfico. Proceso mediante el cual se llega a conocer la microestructura de un material, su tamaño de grano y composición, permitiendo predecir su comportamiento y propiedades mecánicas. Y, a pesar de existir diferentes métodos estandarizados para la determinación de tamaño de grano, éstos tienen su respectivo procedimiento y tiempo de determinación. Además, comúnmente, no basta con el análisis metalográfico para determinar las propiedades mecánicas de un material, por lo que éstos son sometidos a diversos ensayos para obtener información pertinente a su resistencia a tracción, dureza, resiliencia, entre otros.

En esta investigación se busca reducir el tiempo de estudio de aceros de bajo carbono para determinar sus propiedades mecánicas, haciendo uso de una herramienta de software libre que permita estudiar la metalografía de un acero, propiciando una simulación de la resistencia a la fluencia y dureza de éstos. Para esto, se contará con una base de datos que precise relaciones entre microestructuras, propiedades mecánicas de aceros y cómo los microconstituyentes de dicho acero afectan su comportamiento.

Esta es una investigación de cuatro capítulos, en el cual el Capítulo I está compuesto por el planteamiento del problema y formulación del problema, luego, objetivo general y objetivos específicos, justificación del porqué se hará esta investigación junto al alcance de esta. Un capítulo II, que describe el Marco Teórico para los antecedentes de esta investigación, además de las bases teóricas que sustentan al trabajo y términos básicos. El Capítulo III, presenta el Marco Metodológico donde se tiene el tipo de investigación, nivel de la investigación y diseño de esta, también se tiene la población y muestra junto a las técnicas e

instrumentos de recolección de datos y las fases metodológicas. Seguidamente, en el Capítulo IV se muestran resultados para cada fase de la investigación, mostrando la habilidad del software para analizar imágenes metalográficas permitiendo simular propiedades mecánicas de aceros.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

El desarrollo de la computación ha demostrado no solo ser fundamental para la tecnología, sino que, además, está estrechamente relacionado con la ciencia y la ingeniería, como es expuesto por Rojas y Martínez (2014):

La mayoría de los problemas que enfrenta la ciencia en estos días se encuentran íntimamente vinculados con el uso y la aplicación de las computadoras. Ya sea para resolver parte de algún problema (evaluación de una integral, resolución de un sistema de ecuaciones, etc.) o bien, después de tener el modelo correspondiente, construir una solución del problema lo más completa posible. Otra posibilidad en el estudio de diferentes sistemas consiste en: partiendo de ciertas hipótesis y parámetros, realizar una simulación que nos permita observar comportamientos que probablemente no podríamos ver en un laboratorio o por medio de una solución analítica. (p. 1)

Siendo así una realidad, que cada día los cálculos y simulaciones realizadas mediante herramientas computacionales se están convirtiendo en la norma entre ingenieros para resolver problemas y realizar sus funciones dentro de sus respectivos campos.

Para el ingeniero mecánico, los softwares de simulación se han vuelto una herramienta indispensable para el diseño de piezas y la comprensión del comportamiento de éstas en distintos escenarios, siendo una simulación precisa un factor importante en el éxito de un proyecto, como es planteado en un estudio de la simulación como herramienta para la mejora en el uso de recursos empresariales por Bernal y Bernal Pérez (2015):

Los procesos de simulación son una herramienta que permite promover el desarrollo tecnológico y la sustentabilidad; a través de éstos, se permite

fortalecer y generar nuevas capacidades y acciones que mejoran la eficiencia en la utilización de los recursos existentes, con una connotación de sentido social, económico y ambiental, que pueden inducir al éxito empresarial. (p. 3)

Por lo tanto, siendo la ingeniería mecánica una disciplina que abarca diversas ramas del conocimiento, se puede inferir que la necesidad de software de simulación no es cubierta por un solo programa informático. Es por esto por lo que existen diversos programas de computadora que simulan sistemas neumáticos e hidráulicos, transferencia de calor, movimiento de partículas o simulación por elementos finitos. Todos estos sumamente importantes para el desempeño industrial y la innovación, sin embargo, es la simulación de elementos finitos la que en particular ahonda en la rama de ciencia de materiales.

La importancia de la ciencia de materiales para la ingeniería radica en que “Los materiales son elementos principales en todas las ramas de la ingeniería.” (Llulluna, 2014). El estudio de los materiales se halla entre las principales ramas del conocimiento de la ingeniería mecánica, siendo el acero el material más utilizado en los proyectos mecánicos. Es por esto por lo que los aceros, particularmente los aceros al carbono han de ser apropiadamente conocidos. Para este fin, la microscopía es una herramienta de gran utilidad que permite conocer la estructura interna de los metales a través de un proceso conocido como “Análisis Metalográfico”, el cual permite “...predecir el comportamiento de los materiales en diferentes condiciones de servicio.” (Llulluna, 2014).

En base a lo anteriormente expuesto, es considerable la ventaja que tiene un ingeniero mecánico al momento de diseñar una pieza conociendo exactamente las propiedades que le brindarán distintos materiales al diseño, sin necesidad de pasar por los distintos ensayos de laboratorio que le otorgarían información sobre las propiedades mecánicas de dicho material. En lugar de ello, podría realizar sus tareas

contando con la información suministrada por un software que simule con exactitud las propiedades del material usado, siempre y cuando esta información sea verídica.

1.2 Formulación del problema

¿Cómo se puede comprobar la confiabilidad de una herramienta computacional para simular las propiedades mecánicas de aceros al carbono y su microestructura?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Comparar las propiedades mecánicas y microestructurales de un grupo de aceros al carbono mediante una herramienta computacional.

1.3.2 Objetivos específicos

Identificar la relación existente entre la microestructura de los aceros y sus propiedades mecánicas.

Interpretar los datos gráficos y estadísticos de la microestructura de algunos aceros en relación con sus propiedades mecánicas.

Desarrollar algoritmos para la predicción de las propiedades mecánicas de algunos aceros a partir de su microestructura.

Simular las propiedades mecánicas de algunos aceros a través de la herramienta computacional.

Evaluar y comparar los resultados obtenidos de la simulación con ensayos físicos realizados.

1.4 Justificación del problema

En la actualidad, los avances tecnológicos y de la ciencia marchan continuamente. Dicha marcha ha provocado un crecimiento exponencial en el conocimiento para la ingeniería, por ende, es de vital importancia realizar investigaciones y desarrollar métodos que puedan hacer más eficientes la labor de los estudiantes de ingeniería y los ingenieros.

El campo de los materiales tiene áreas innovadoras que, en conjunto con la implementación de herramientas computacionales, permite al usuario resolver problemáticas que hoy en día requieren un extenso tiempo para poder obtener el resultado deseado. Por ello, la implementación de softwares y librerías de distintas áreas de las ciencias, agilizan la obtención de propiedades mecánicas a partir de la microestructura de los materiales, sin la necesidad de hacer ensayos destructivos exhaustivos que generan pérdida de material y ocupación de tiempo que pudiese ser aprovechado en otras labores ingenieriles.

Además, presenta un avance para los estudios y análisis de la microestructura de los aceros, lo cual es una propiedad importante para la determinación y predicción de propiedades mecánicas de los mismos, dejando atrás las mencionadas técnicas destructivas, las cuales, sin ser menospreciadas, servirán de data y base para la fundamentación de los estudios a realizar.

1.5 Alcance

El proyecto planteado abarcará el estudio de un grupo de aceros, de los cuales se hayan realizados estudios de micrografía, ensayo de dureza y ensayo de tracción, para así disponer de la información brindada por dichos estudios. Se contará, entonces, con información encontrada en literatura correspondiente a la rama de materiales y trabajos de grado que cubran las propiedades mecánicas y microestructurales de aceros al carbono.

En el marco de la simulación se realizará por medio de una herramienta que permita interpretar datos pertinentes a las propiedades microestructurales y mecánicas de los aceros al carbono, así como mantener coherencia con la relación entre dichas propiedades. La simulación cubrirá aspectos mecánicos de ciencia de materiales sin pretender ahondar con profundidad en termodinámica y transferencia de calor, sin embargo, estas dos últimas disciplinas pueden llegar a ser referenciadas.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

Anteriores investigaciones han llevado al desarrollo de herramientas computacionales que facilitan el estudio de microestructuras de aceros al carbono, como es el caso del trabajo de grado realizado por Llulluna F. (2014) titulado: **“Procesamiento de imágenes mediante software libre Python para el análisis metalográfico en aceros de bajo contenido de carbono”**, para optar al título de ingeniero mecánico en la Escuela Politécnica Nacional en Quito, Ecuador. En el cual se desarrolló un software de procesamiento de imágenes para el análisis metalográfico capaz de detectar estructuras cristalinas, medir las características geométricas, clasificar regiones de distintos componentes y determinar defectos e inclusiones presentes en la microestructura.

Los resultados obtenidos mediante el análisis microestructural realizado por este software son verificables y acordes a la norma europea UNE 7-280-72 para la determinación de tamaño de grano. Además, al ser comparado con el software comercial PAX-it el porcentaje de error se halla en un rango de 0,7% y 9%, lo que indica que los resultados son aceptables.

Esta investigación aporta el haber desarrollado el software en un lenguaje de código abierto, como lo es Python, por lo que se tiene acceso al código fuente del programa, los algoritmos utilizados y la codificación del proceso de análisis metalográfico.

Así mismo, Cattaneo C. (2004), en su tesis para acceder al grado de magister en métodos numéricos y computacionales en ingeniería en la Universidad Nacional de

Santiago del Estero, Argentina, titulada: **“Evolución del tamaño de grano en aceros eléctricos de bajo carbono”**, llevó a cabo una serie de simulaciones en el software comercial MatLab utilizando el método de Monte Carlo. Utilizando resultados experimentales de análisis metalográfico, se realizaron cinco simulaciones para las familias de planos cristalinos (110) (111) (200) (211), las cuales indican un crecimiento de grano similar en cada una. Esta tesis dio por conclusión el siguiente enunciado:

La simulación provee la habilidad de describir y controlar todos los parámetros del modelo de simulación, en cada etapa del crecimiento de grano. Muchas simulaciones fueron realizadas para confirmar la validez de la rutina de simulación, y se analizaron casos específicos de crecimiento de grano, basados en información experimental obtenida en un acero tratado térmicamente (p. 54)

El aporte de esta investigación al presente trabajo de grado, son los distintos métodos matemáticos de simulación a los que hace referencia Cattaneo, pues son estos mismos métodos los utilizados por una amplia variedad de herramientas computacionales de simulación.

Por último, González L. (1997), en su trabajo de grado titulado: **“Efecto de los tratamientos térmicos de enfriamiento continuo sobre la estructura y las propiedades mecánicas en aceros al carbono hipoeutectoides”**, para optar por el título de ingeniero mecánico en la Universidad de Carabobo, Venezuela. Tuvo como objetivo mostrar la relación entre las propiedades mecánicas y las microestructuras resultantes en los aceros tratados térmicamente. El autor propuso “un esquema de tratamientos térmicos, no necesariamente ‘metalúrgicamente ortodoxos’, a aplicar en una gama de aceros al carbono, para generar un ‘mosaico’ de microestructuras y sus respectivas propiedades mecánicas asociadas”. (p. 19)

Esta investigación tuvo como resultado divergencias entre los valores de los ensayos de tracción y los ensayos de microdureza, debido a los efectos producidos

por los distintos tratamientos térmicos, en especial el temple, a los que fueron sometidos los aceros, provocando ruptura prematura en algunas de las probetas, y superficies excesivamente lisas, que impedían la sujeción de éstas en otros casos. Es por esto por lo que González (1997) concluyó que “Los resultados no se consideran confiables en su conjunto”.

Sin embargo, los resultados para los aceros sometidos a normalizado, tratamiento subcrítico en agua y en aceite, y los de estado inicial, presentan la mayor confiabilidad, ya que hubo menor divergencia entre los ensayos de tracción y microdureza, considerando éstos como resultados confiables.

De esta manera, para el presente trabajo de investigación, se utilizarán los resultados experimentales confiables obtenidos por González para la comprobación de los resultados obtenidos mediante la simulación realizada por una herramienta computacional.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Estructura cristalina de los metales

Los metales, como todos los elementos químicos, están formados por átomos de diferente radio atómico. Los tamaños de los átomos se miden en unidades de Angstrom ($A = 10^{-8}$ cm). En la metalurgia es importante tener presente los tamaños relativos de los componentes de una aleación. En materiales en estado líquido, los átomos que se encuentran en movimiento no guardan posiciones fijas. Cuando los materiales en estado líquido solidifican, el movimiento atómico se detiene y, según sea su naturaleza, los materiales pueden ser amorfos o cristalinos. En estado sólido, los átomos tienen un orden y posición definida, en tal caso se dice que tiene una estructura cristalina, es decir, forman cristales. Pero, ciertos materiales no presentan una posición definida al solidificar y su estructura es desordenada, estos materiales son conocidos como materiales amorfos.

Los metales, son elementos cristalinos cuyos átomos están dispuestos en el espacio ocupando un orden geométrico determinado y formando una red cristalina o

red espacial, la cual está constituida por celdas iguales. La menor de estas celdas se denomina celda unitaria.

2.2.2 Microestructura

La microestructura de un material (metales, polímeros, cerámicos o materiales compuestos) influye fuertemente en las propiedades físicas de éste, como lo son la resistencia, tenacidad, ductilidad, dureza, resistencia a la corrosión, comportamiento a alta o baja temperatura y resistencia al desgaste. Estas propiedades, a su vez, rigen la aplicación de estos materiales en la práctica industrial.

La influencia de una microestructura en las propiedades mecánicas y físicas de un material se rige principalmente por los diferentes defectos presentes o ausentes en la estructura. Estos defectos pueden tomar muchas formas, pero los principales son las dislocaciones. Las dislocaciones son defectos lineales que deforman la estructura cristalina ideal de los materiales, creando un impedimento en el movimiento de los planos cristalinos, es decir, otorgándole mayor resistencia a la tracción. Además de ello, para muchos materiales, pueden existir diferentes fases al mismo tiempo. Estas fases tienen diferentes propiedades y, si se manejan correctamente, pueden prevenir la fractura del material.

2.2.3 Acero

El acero es una aleación de hierro con una cantidad de carbono que puede variar entre 0,008% y 2,11% en peso de su composición, dependiendo del grado. Para algunas bibliografías, el acero puede contener una cantidad de carbono de hasta 1,2% de carbono.

Acero no es lo mismo que hierro. Y ambos materiales no deben confundirse. El hierro es un metal relativamente duro y tenaz, con diámetro atómico (dA) de 2,48 Å, con temperatura de fusión de 1.535 °C y punto de ebullición 2.740 °C., por lo que el acero conserva las características metálicas del hierro en estado puro, pero la adición de carbono y de otros elementos tanto metálicos como no metálicos mejora sus propiedades fisicoquímicas, sobre todo su resistencia.

Existen muchos tipos de acero según el/los elemento/s aleante/s que estén presentes. Cada tipo de acero permitirá diferentes aplicaciones y usos, lo que lo hace un material versátil y muy difundido en la vida moderna, donde podemos encontrarlo ampliamente.

Los dos componentes principales del acero se encuentran en abundancia en la naturaleza. El acero se puede reciclar indefinidamente sin perder sus atributos, lo que favorece su producción a gran escala. Esta variedad y disponibilidad lo hace apto para numerosos usos como la construcción de maquinaria, herramientas, edificios y obras públicas, aeronáutica, industria automotriz, instrumental médico, entre otros, contribuyendo al desarrollo tecnológico de las sociedades industrializadas, pues ningún material logra igualarlo cuando se trata de resistencia al impacto o la fatiga.

2.2.4 Diagrama Hierro-Carbono

Es un diagrama de equilibrio en el que se representa el comportamiento de la aleación de hierro y carbono en función del porcentaje de carbono contenido en la mezcla y de la temperatura, composición química y presión atmosférica. (Ver figura 1).

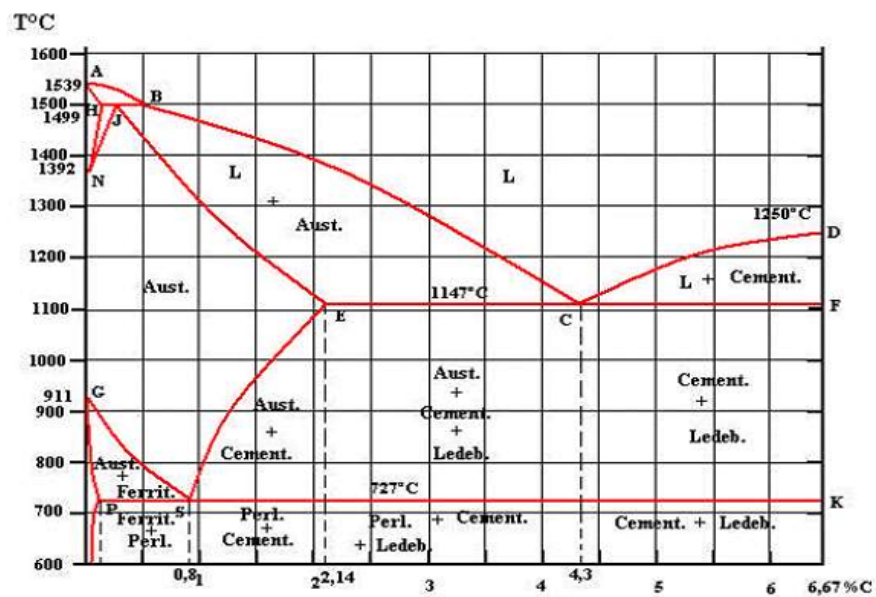


Figura 1: Diagrama hierro-carbono (Fe-C).

Fuente: Askeland, Donald R. and Phule, Pradeep P. (2004).

El acero puede tener las siguientes fases de equilibrio:

1. Ferrita (α) en átomos de hierro con estructura cristalina BCC (cúbica centrada en el cuerpo) y átomos de carbono en los sitios intersticiales. La cantidad de átomos de carbono presentes en la ferrita es pequeña. La ferrita es una fase muy suave, difícil y magnética.
2. Austenita (γ). Consiste en átomos de hierro con estructura FCC (cúbica centrada en las caras) y átomos de carbono en los sitios intersticiales. Presenta menor suavidad y ductilidad que la ferrita. Es una fase no magnética.
3. Cementita (Fe_3C). También se llama Carburo de Hierro. Es un compuesto intermetálico. Caracterizada por ser una fase muy dura y frágil.
4. Perlita. Es una fase que resulta de la reacción eutectoide del acero. La reacción eutectoide permite que la austenita en estado sólido se transforme en ferrita y cementita, ambas también en estado sólido, intercalándose entre ellas, dando una apariencia de “cebra”. Esta transformación es similar a la reacción eutéctica, por lo que la fase resultante tiene una apariencia similar al sólido eutéctico.

En función de las fases presentes, los aceros pueden clasificarse de la siguiente forma.

1. Aceros hipoeutectoides. Son aquellos que poseen menos de 0,77% de carbono. La microestructura presente en estos aceros consiste en ferrita y perlita. (Ver figura 2).

$$\% \text{ de ferrita} = \frac{0,77 - \%C}{0,77 - 0,022} \times 100 \quad (\text{ec. 1})$$

$$\% \text{ de perlita} = \frac{\%C - 0,022}{0,77 - 0,022} \times 100 \quad (\text{ec. 2})$$

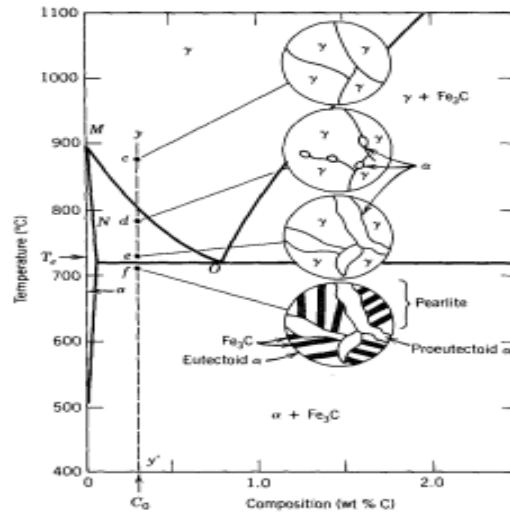


Figura 2: Esquema de aceros hipoeutectoides.

Fuente: Universidad Católica de Argentina, Escuela de Ingeniería.

2. Aceros eutectoides. Son aquellos que poseen exactamente 0,77% de carbono. Su microestructura está formada totalmente de perlita. (Ver figura 3).

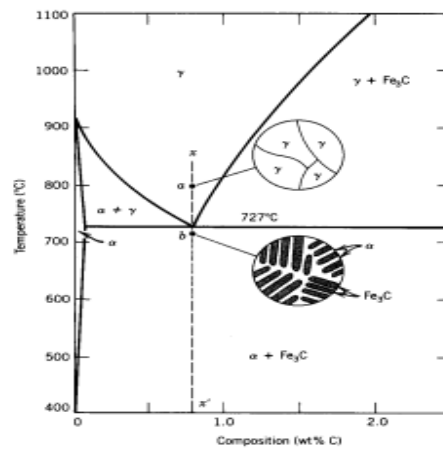


Figura 3: Esquema de aceros eutectoides.

Fuente: Universidad Católica de Argentina, Escuela de Ingeniería.

3. Aceros hipereutectoides. Son aquellos que poseen más de 0,77% de carbono. Su microestructura consiste en cementita y perlita. (Ver figura 4).

$$\% \text{ de cementita} = \frac{\%C - 0,77}{6,67 - 0,77} \times 100 \quad (\text{ec. 3})$$

$$\% \text{ de perlita} = \frac{6,67 - \%C}{6,67 - 0,77} \times 100 \quad (\text{ec. 4})$$

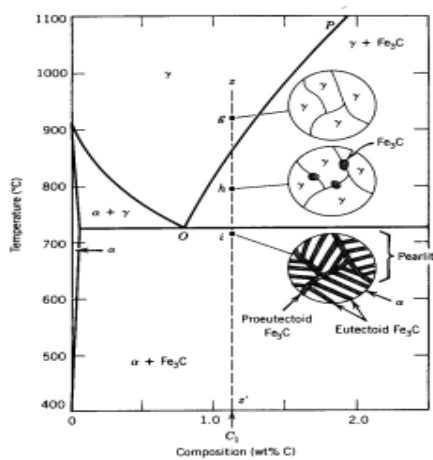


Figura 4: Esquema de aceros hipereutectoides.

Fuente: Universidad Católica de Argentina, Escuela de Ingeniería.

2.2.5 Determinación de propiedades mecánicas a través del análisis metalográfico

“El propósito de la metalurgia ingenieril es el manipular la forma, la distribución y el tamaño de grano para otorgar al material propiedades macroscópicas específicas, determinar el tratamiento térmico que debe realizarse y el diseño de nuevas aleaciones. Para el estudio de tamaño de grano se utilizan métodos estandarizados”. (Donald R. Askeland & Phulé, 2004)

2.2.5.1 Norma ASTM-E112 y ASTM-E1382

La norma que recoge los métodos y procedimientos estandarizados para la determinación del tamaño de grano es la norma ASTM-E112, en donde se han recopilado paso a paso como aplicar cada uno de ellos y, de esta manera, poder obtener un valor muy certero avalado por la ASTM (American Society for Testing and Materials).

Los métodos y procedimientos que se encuentran en la norma ASTM-E112 son:

Comparación: involucra la comparación de la estructura del grano estudiada con una serie de imágenes o plantillas graduadas de acuerdo al tamaño de grano ASTM.

Planimétrico: consiste en el conteo de los granos de la estructura estudiada dentro de un área determinada.

Intersección: implica el conteo de los granos interceptados por una línea de ensayo o el número de intersecciones de la línea con los bordes de grano.

A su vez, la norma ASTM-E1382 contiene la información necesaria para determinar el tamaño de grano promedio utilizando métodos de análisis y procesamiento de imágenes, ya sean automáticos o semiautomáticos, basados en los métodos ASTM-E112. En esta norma se toma en cuenta aspectos como la calidad de la imagen debido al ataque químico realizado, la definición de los bordes de granos y de las distintas fases en la microestructura y cuenta con una galería, en donde se aprecia en base a la definición de la imagen si esta puede ser analizada automáticamente, automáticamente con filtros y ediciones o semiautomáticamente.

Método planimétrico según la norma ASTM-E112

El método planimétrico (también llamado método de Jeffries), consiste en contar el número de granos dentro de un área determinada para estimar el índice de tamaño de grano. El procedimiento es el siguiente: ·

Obtener una metalografía de granos equiaxiales. Es decir que la forma del grano deberá ser regular en las tres dimensiones espaciales.

Inscribir un círculo, cuadrado o rectángulo de área conocida (se recomienda 5.000 mm^2 para evitar cálculos de corrección) sobre la imagen, monitor o en dónde se esté visualizando la microestructura. (Se debe utilizar una magnificación que permita contar como mínimo 50 granos dentro del área).

Contar los granos que se encuentran dentro del círculo y los que están atravesados por él.

Aplicar la siguiente ecuación:

$$N_A = f(N_a + \frac{N_i}{2}) \quad \text{ec. 5)}$$

Donde:

N_A : Es el número granos por mm^2 .

N_a : Es el número de granos presentes en el área.

N_i : Es el número de granos interceptados por el perímetro del área.

f : es el múltiplo de Jeffries que depende de los aumentos de la imagen. Una metalografía de magnificación 100X tiene un múltiplo de Jeffries igual a 2. Su cálculo se lo realiza de acuerdo con la ecuación 6.

$$f = 0,0002 \cdot M^2$$

Donde:

M : es la magnificación (100X, 500X, entre otros).

Se recomienda realizar el cálculo de N_A por lo menos en tres regiones al azar de la metalografía y utilizar el promedio para el cálculo del índice de tamaño de grano G .

$$G = (3,321928 \cdot \log \overline{N_A}) - 2,954$$

Donde:

G : Es el índice de tamaño de grano.

Es el promedio de los 3 cálculos de N_A .

Nota: El índice de tamaño de grano G es inversamente proporcional al tamaño real del grano.

2.2.5.2 Relación entre las propiedades mecánicas y las microestructuras de los aceros

Las microestructuras son las principales causantes de las propiedades mecánicas en los aceros, además de los defectos o no en la estructura cristalina de los mismos. De la cantidad, tamaño de grano, forma y ubicación depende el material para obtener las propiedades deseadas en el mismo.

Pero dichas microestructuras no se forman espontáneamente. De acuerdo con las características finales que se requieran del material se aplica un tratamiento térmico, basado en la temperatura a la que se realice, el porcentaje de carbono que contenga y el método de enfriamiento. Los tratamientos térmicos más comunes que suelen utilizarse para mejorar las propiedades mecánicas de los aceros son normalizados, temple-revenido y recocido.

Las microestructuras presentes en los aceros que son sometidos a dichos tratamientos térmicos son:

Perlita: se puede encontrar de dos formas: perlita fina y perlita gruesa. La diferencia entre las dos depende de la velocidad de enfriamiento ya que, al alcanzar la temperatura eutectoide (durante el enfriamiento) la austenita comienza a convertirse en perlita. Si esta velocidad es muy alta, se genera perlita fina (dura y resistente) mientras que, si es baja, se genera perlita gruesa (menor dureza y mayor ductilidad). Esta microestructura es una de las más comunes debido a que le da la cualidad al acero de tener una gran dureza y resistencia (cementita) y ductilidad (ferrita), teniendo características intermedias entre estos microconstituyentes. Las zonas claras de la figura 5 representan la ferrita y las oscuras la cementita.

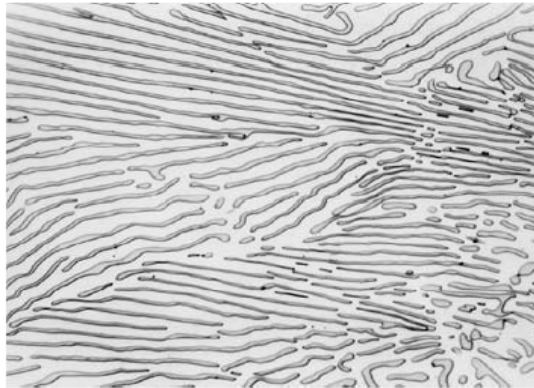


Figura 5: Microestructura de perlita en acero 1080. Aumento 2500x.

Fuente: Manufactura, Ingeniería y Tecnología-Kalpakjian y Schmid 5ta ed.

Esferoidita: las formas laminares de la cementita actúan como concentradores de esfuerzos en el material, por ello una microestructura que elimina dicho problema es la esferoidita (figura 6). Esta surge del calentamiento de la perlita a temperaturas subcríticas por un largo período de tiempo, dando como resultado que las láminas de cementita se conviertan en pequeñas esferas, las cuales son menos propensas a la concentración de esfuerzos. Esta microestructura tiene una gran ductilidad, una mínima dureza y mayor maquinabilidad.

Bainita: es una microestructura de mayor resistencia y dureza que las anteriores. Surge principalmente de un proceso llamado o temple bainítico. Su forma es muy parecida a la de la perlita, pero mucho más fina. Esta microestructura da una mayor resistencia y dureza, manteniendo ciertos niveles de ductilidad para evitar la fácil fragilización. La visualización de la bainita es muy difícil debido a su pequeño tamaño, sin embargo, su forma es muy similar

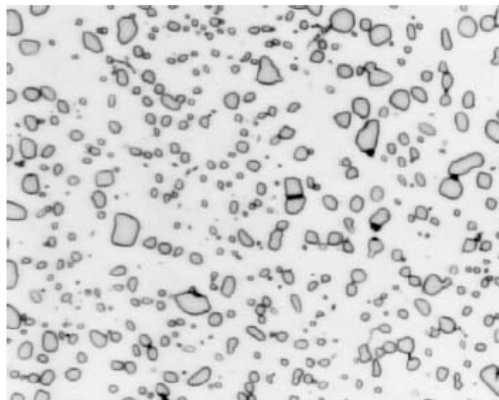


Figura 6: Microestructura de acero eutectoide, esferoidita. Aumento 1000x.

a la martensita.

Martensita: este microconstituyente surge típicamente de los aceros templados. Está formada por una solución sólida sobre saturada de carbono (cementita) en ferrita. Es muy dura y frágil, teniendo una muy baja tenacidad, por lo que su uso es limitado. Estas estructuras suelen reventarse para aliviar las tensiones y obtener el máximo provecho y equilibrio de las propiedades mecánicas para evitar la fragilización (ver figura 7).

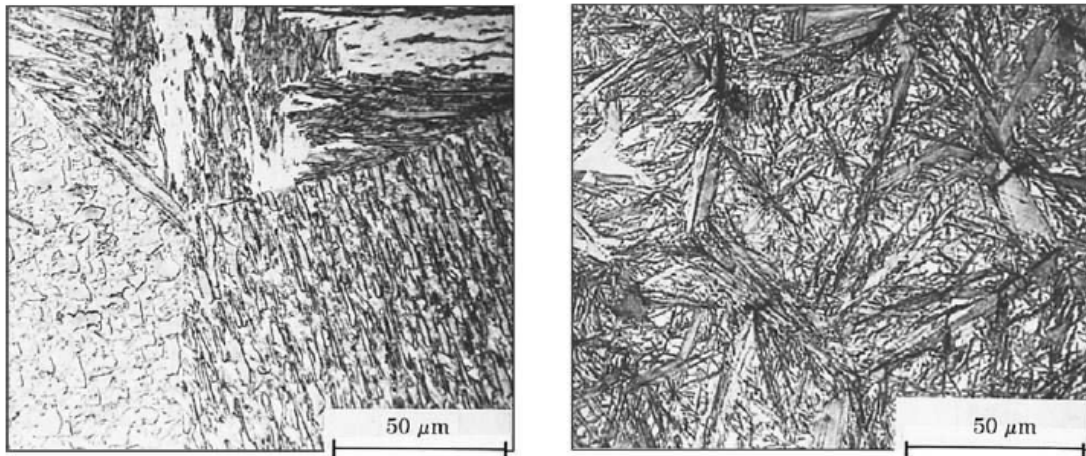


Figura 7: Microestructura martensítica: tipo listón (izquierda) y tipo placa (derecha).

Fuente: Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de los Materiales-Smith y Hashemi.

Austenita retenida: la austenita retenida generalmente no se transforma cuando en el proceso de la obtención de la martensita (temple), la temperatura de enfriamiento no es lo suficientemente baja y no toda la austenita se convierte en martensita (debido a que en la martensita no implica el proceso de difusión). Esta microestructura es muy inestable, produciendo la disminución de la dureza y resistencia a la aleación.

Sorbita y troostita: son dos microconstituyentes obtenidos de temperaturas menores a la del temple, dando como resultado una forma muy parecida a la martensita, pero más fina, la cual tiene menor dureza y resistencia, manteniendo

ciertos niveles de ductilidad y tenacidad. La sorbita es el componente de máxima resiliencia de los aceros.

La predominancia de estas microestructuras determina las características del acero a utilizar. Otro de los actores de gran importancia es el grano y los límites de granos. Los materiales metálicos, específicamente el acero, poseen una serie de cristales que se forman al azar a partir de la solidificación del metal fundido, estos cristales se le conocen comúnmente como granos. Mientras estos cristales crecen después del proceso de nucleación, empiezan a generar interferencia unos con otros, dando como resultado que en sus interfaces se formen defectos superficiales, también llamados límites de granos (ver figura 8).

El número de sitios de formación de núcleos en el material fundido y la velocidad de enfriamiento de la masa son uno de los principales factores que determinan el tamaño del grano. Una velocidad de enfriamiento rápida producirá granos finos (mayor resistencia y dureza) mientras que la velocidad de enfriamiento lento producirá granos gruesos (mayor ductilidad).

Por otro lado, el límite de grano representa imperfecciones en la estructura, las cuales interrumpen el movimiento continuo de las dislocaciones, provocando una mayor resistencia al material.

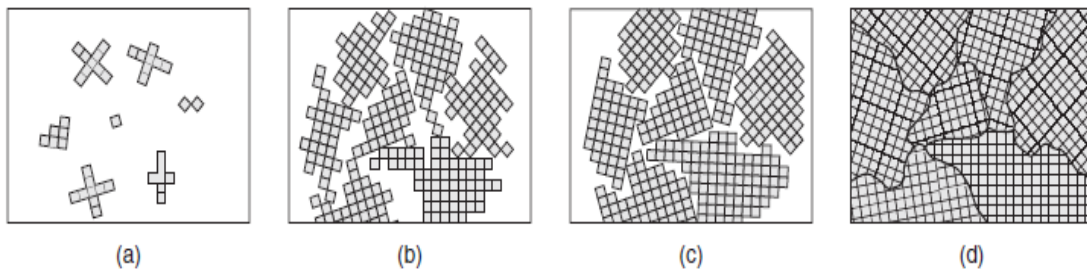


Figura 8: Esquema de las etapas durante la solidificación del metal fundido; cada cuadrado pequeño representa una celda unitaria.

Fuente: Manufactura, Ingeniería y Tecnología-Kalpakjian y Schmid 5ta ed.

En la figura 8.a se observa la nucleación al azar de los cristales, posteriormente se observa el crecimiento de los granos en las figuras 8.b y 8.c. Finalmente, se

observa cuando el metal ya está solidificado y se agrupan los cristales formando granos policristalinos y límites de granos bien marcados.

2.2.5.3 Relación de Hall-Petch

Courtney (2000), citado por Rodríguez Baracaldo et al. (2010), establece la relación entre la resistencia a la fluencia y el tamaño de granos de un material de la siguiente manera:

El tamaño de grano tiene un significativo efecto en las propiedades mecánicas de los materiales cristalinos; la reducción del tamaño de grano incrementa la resistencia del material, favoreciendo el desempeño en aplicaciones de alta exigencia mecánica. Cuando se habla de propiedades mecánicas en materiales con tamaño de grano inferior al micrómetro, denominados ultrafinos UFG (Ultra Fine Grain) y materiales con tamaño de grano inferior a 100 nm denominados nanocristalinos (NC), necesariamente se debe referir a los trabajos hechos a mediados del siglo anterior por Hall (1951) y Petch (1953), quienes de manera separada establecieron una

relación, denominada relación de Hall-Petch, está dada por la ecuación 6.

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{K}{\sqrt{D}} \quad (\text{ec. 8})$$

Donde σ_0 es una constante del material relacionada con la tensión necesaria para iniciar el movimiento de las dislocaciones (o resistencia de la red cristalina al movimiento), K es el coeficiente de endurecimiento (constante para cada material), y D es el diámetro promedio de los granos. En la figura 9 se observan valores de σ_0 y K para algunos materiales.

Courtney (2000) presenta una alternativa a la ecuación 8 “teniendo en cuenta la relación entre dureza y resistencia a la tracción, H”. La relación Hall - Petch puede expresarse en términos de dureza como”:

$$H_y = H_0 + \frac{k}{\sqrt{D}} \quad (\text{ec. 9})$$

Los granos pueden variar aproximadamente entre 100 μm (granos grandes) y 1 μm (granos pequeños). Por debajo de este valor, el tamaño de las dislocaciones se

	σ_0 (MPa)	k (MPa · m ^{1/2})
Cu	25	0.11
Ti	80	0.40
Acero dulce	70	0.74
Ni ₃ Al	300	1.70

aproxima al del grano pudiendo contenerse una o dos dislocaciones, evitándose el apilamiento. En este caso la tensión aplicada induce al deslizamiento de los bordes, resultando en una disminución de la resistencia del material.

Figura 9: materiales seleccionados.

Fuente: Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales – Smith y Hashemi (2006)

2.2.6 Simulación

En las ciencias, la simulación es el artificio contextual que referencia la investigación de una hipótesis o un conjunto de hipótesis de trabajo, utilizando modelos matemáticos, un método perfecto para la enseñanza y el aprendizaje.

Una definición más formal, formulada por R. E. Shannon (1976) es:

La simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a término experiencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias -dentro de los límites impuestos por un cierto criterio o un conjunto de ellos - para el funcionamiento del sistema.

2.2.6.1 Etapas para realizar un estudio en simulación

Definición del sistema

Consiste en estudiar el contexto del problema, identificar los objetivos del proyecto, especificar los índices de medición de la efectividad del sistema, establecer los objetivos específicos del modelamiento y definir el sistema que se va a modelar un sistema de simulación.

Formulación del modelo

Una vez definidos con exactitud los resultados que se espera obtener del estudio se definen y construye el modelo con el cual se obtendrán los resultados deseados. En la formulación del modelo es necesario definir todas las variables que forman parte de él, sus relaciones lógicas y los diagramas de flujo que describan en forma completa el modelo.

Colección de datos

Es importante que se definan con claridad y exactitud los datos que el modelo va a requerir para producir los resultados deseados.

Implementación del modelo en la computadora

Con el modelo definido, el siguiente paso es decidir qué lenguaje de programación (como C++, C#, Java, Python, MATLAB etc.) o qué paquete de software se va a utilizar para procesar el modelo en la computadora y obtener los resultados deseados.

Verificación

El proceso de verificación consiste en comprobar que el modelo simulado cumple con los requisitos de diseño para los que se elaboró. Se trata de evaluar que el modelo se comporta de acuerdo con su diseño.

Validación del sistema

A través de esta etapa se valoran las diferencias entre el funcionamiento del simulador y el sistema real que se está tratando de simular. Las formas más comunes de validar un modelo son:

- La opinión de expertos sobre los resultados de la simulación.
- La exactitud con que se predicen datos históricos.
- La exactitud en la predicción del futuro.
- La comprobación de falla del modelo de simulación al utilizar datos que hacen fallar al sistema real.
- La aceptación y confianza en el modelo de la persona que hará uso de los resultados que arroje el experimento de simulación.

Experimentación

La experimentación con el modelo se realiza después que este haya sido validado. La experimentación consiste en comprobar los datos generados como deseados y en realizar un análisis de sensibilidad de los índices requeridos.

Interpretación

En esta etapa del estudio, se interpretan los resultados que arroja la simulación y con base a esto se toma una decisión. Es obvio que los resultados que se obtienen de un estudio de simulación colaboran a soportar decisiones del tipo semiestructurado.

Documentación

Dos tipos de documentación son requeridos para hacer un mejor uso del modelo de simulación. La primera se refiere a la documentación del tipo técnico y la segunda se refiere al manual del usuario, con el cual se facilita la interacción y el uso del modelo desarrollado.

2.2.6.2 Simulación por computadora

Es un intento de modelar situaciones de la vida real por medio de un programa de computadora, lo que requiere ser estudiado para ver cómo es que trabaja el sistema. Ya sea por cambio de variables, quizás predicciones hechas acerca del comportamiento del sistema.

La simulación por computadora se ha convertido en una parte útil del modelado de muchos sistemas naturales en física, química y biología, y sistemas humanos como la economía y las ciencias sociales (sociología computacional), así como en dirigir para ganar la penetración (profundidad) su comportamiento cambiará cada simulación según el conjunto de parámetros iniciales supuestos por el entorno. Las simulaciones por computadora son a menudo consideradas seres humanos fuera de un “loop” de simulación.

Tradicionalmente, el modelado formal de sistemas ha sido a través de un modelo matemático, que intenta encontrar soluciones analíticas a problemas que permiten la predicción del comportamiento de un sistema de un conjunto de parámetros y condiciones iniciales. La simulación por computadora es frecuentemente usada como un accesorio para, o sustitución de, sistemas de modelado para los cuales las soluciones analíticas de forma cerrada simple no son posibles. Ahí se encuentran muchos tipos diferentes de simulación por computadora, la característica común que todas ellas comparten es el intento por generar una muestra de escenarios representativos para un modelo en que una enumeración completa de todos los estados posibles sería prohibitiva o imposible. Varios paquetes de software existen

para modelar por computadora, como Vensim, Stella o Powerim, y así la simulación se hace sin gran esfuerzo.

2.2.7 Procesamiento digital de imágenes

El procesamiento digital de imágenes es una disciplina que se ha desarrollado desde la década de los sesenta, inicialmente por la NASA (National Aeronautics and Space Administration), buscando aplicar algoritmos sobre una imagen para reconocer datos implícitos, lo cual permite resaltar, patrones de la microestructura de materiales. Con el avance de los microprocesadores, como DSP (Digital Signal Processor), de bajo costo; se impulsó el procesamiento de imágenes con altas tasas de eficiencia. En la actualidad dispone de programas dedicados exclusivamente para el procesamiento de imágenes, la gran mayoría, sin embargo, no de código abierto, lo que restringe su uso.

2.2.7.1 Imagen

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, las 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.

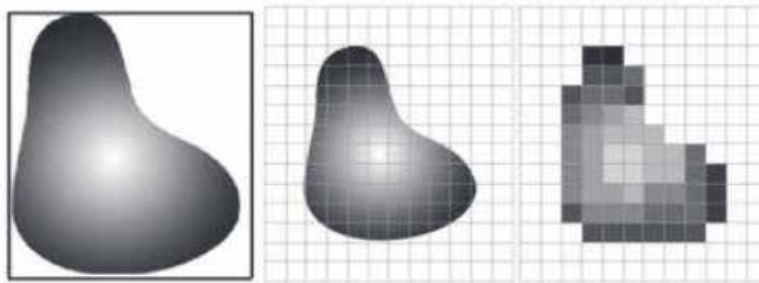
Para que una imagen pueda ser tratada por el ordenador, es preciso someter la función $f(x,y)$ a un proceso de discretización (extraer de un conjunto infinito de puntos una cantidad finita, de manera que aumentando el número de puntos, el conjunto finito tienda a ser continuo), tanto en las coordenadas como en la intensidad, a este proceso se le denomina digitalización.

2.2.7.2 Digitalización

La digitalización consiste en la descomposición de la imagen en una matriz de $M \times N$, donde cada uno tiene un valor proporcional a su nivel de gris, figura 10. Este valor puede ser cualquiera dentro de un rango continuo, es preciso dividir dicho rango

en una serie de k intervalos, de forma que el nivel de gris de cada punto sea asignado a uno de los valores que representa dicho intervalo. Los modernos sistemas de proceso digital de imágenes suelen trabajar con 256 niveles de gris.

Cada elemento en que se divide la imagen recibe el nombre de "píxel" (picture element). El número de niveles de gris y las dimensiones de la matriz (número de filas por número de columnas) condicionan la capacidad de resolución de la imagen digital. Las dimensiones de las imágenes digitales varían en función de las



capacidades del sistema empleado. Por lo general se utiliza un octeto para almacenar cada píxel, por lo que las intensidades de las imágenes se cuantifican en 256 niveles (8 bits). Según estos tamaños, una imagen digital con 256 niveles de gris y una dimensión de 256 x 256 píxeles, ocupa 64 KB de memoria. La misma imagen con una dimensión de 512 x 512 píxeles ocupa 256 KB y si se trata de una imagen de 1024 x 1024 ocupa 1 MB de memoria.

Figura 10: Digitalización de un objeto.

Fuente: Etapas del procesamiento digital de imágenes - R. Wainschenker; J. Massa, P. Tristan

El procesamiento de imágenes es aplicado cuando resulta necesario modificar una imagen para mejorar su apariencia y para destacar algún aspecto de la información que se encuentra contenida.

2.2.7.3 Etapas para el procesamiento digital de imágenes

Estas etapas son una constante para todo software de procesamiento de imágenes, y su aplicación varía en función del producto deseado, en este caso el análisis

metalográfico para la determinación del tamaño de grano, resistencia a la fluencia y a la tracción en aceros de bajo contenido de carbono.

Captura de imagen

Proceso, en el cual, se trata de convertir un objeto o una imagen digital, para ser procesada por una computadora. Las características de la imagen a capturar dependen del tipo de aplicación. Para el presente trabajo, la captura se realiza por medio del escaneo de imágenes tomadas con microscopio metalográfico, con una magnificación de 400x, manipulando la nitidez de la imagen para observar la forma y tipo de grano en la muestra.

Preprocesamiento

Es un conjunto de técnicas de filtrado de imágenes que se aplican a los píxeles de una imagen digital para optimizarla, mejora las características de enfatizar cierta información, por medio de operaciones matemática como: Transformada Rápida de Fourier (FFT) para eliminar ruidos, dispersiones gaussianas para facilitar la dispersión, convolución para suavizar contornos y desconvolución para disminuir empañamientos.

Las principales técnicas de filtrado son:

Eliminación de ruido: eliminar los píxeles cuyo nivel de intensidad es muy diferente al de sus vecinos.

Suavizar la imagen: reducir las variaciones de intensidad entre píxeles vecinos.

Detectar bordes: detectar los píxeles donde se produce un cambio brusco en la función intensidad.

Realzar bordes: destacar los bordes que se localizan en una imagen.

Segmentación

Divide la imagen en regiones o segmentos manipulables en escala de grises, por ejemplo, las regiones que tienen niveles de grises similares son un segmento, en cambio si existen cambios bruscos en el nivel de gris se crea otro segmento, detectando las fronteras o bordes de la imagen. En el procesamiento de imágenes una

de las tareas con mayor dificultad es la segmentación, ya que de ésta depende la interpretación de resultados.

Extracción de características

Es un proceso de descripción o reconocimiento de los elementos encontrados en la segmentación, para obtener información a partir de dichos elementos con características particulares, tales como: sus características geométricas, tamaño, forma, etc., y para diferenciarlas de otras que también son parte del conjunto. En esta etapa se extraen las características apropiadas para la identificación de los objetos deseados.

Identificación de objetos

Es un proceso de reconocimiento o interpretación automatizado. En donde las características de la imagen (etapas antes desarrolladas) son comparadas con una base de datos o algoritmos de toma de decisiones, diseñados para ejecutar la tarea final del procesamiento de imágenes, que en este caso es el conteo de regiones o granos de la muestra y porcentajes de ferrita y perlita.

2.2.8 Bases de datos

Una base de datos es un conjunto de datos pertenecientes a un mismo contexto y almacenados sistemáticamente para su posterior uso. Actualmente, y debido al desarrollo tecnológico de campos como la informática y la electrónica, la mayoría de las bases de datos están en formato digital, siendo este un componente electrónico, por tanto se ha desarrollado y se ofrece un amplio rango de soluciones al problema del almacenamiento de datos.

2.2.9 Clasificación de las bases de datos

2.2.9.1 Bases de datos estáticas

Son bases de datos únicamente de lectura, utilizadas principalmente para almacenar datos históricos que posteriormente se pueden utilizar para estudiar el

comportamiento de un conjunto de datos a través del tiempo, realizar proyecciones, tomar decisiones y realizar análisis de datos para inteligencia empresarial.

2.2.9.2 Bases de datos dinámicas

Son bases de datos donde la información almacenada se modifica con el tiempo, permitiendo operaciones como actualización, borrado y edición de datos, además de las operaciones fundamentales de consulta. Un ejemplo, puede ser la base de datos utilizada en un sistema de información de un supermercado.

2.2.9.3 Bases de datos bibliográficas

Solo contienen una subrogante (representante) de la fuente primaria, que permite localizarla. Un registro típico de una base de datos bibliográfica contiene información sobre el autor, fecha de publicación, editorial, título, edición, de una determinada publicación, etc. Puede contener un resumen o extracto de la publicación original, pero nunca el texto completo, porque si no, estaríamos en presencia de una base de datos a texto completo. Como su nombre lo indica, el contenido son cifras o números. Por ejemplo, una colección de resultados de análisis de laboratorio, entre otras.

2.2.9.4 Bases de datos de texto completo

Almacenan las fuentes primarias, como, por ejemplo, todo el contenido de todas las ediciones de una colección de revistas científicas.

2.2.9.5 Bases de datos orientadas a objetos

Este modelo, bastante reciente, y propio de los modelos informáticos orientados a objetos, trata de almacenar en la base de datos los objetos completos (estado y comportamiento).

Una base de datos orientada a objetos es una base de datos que incorpora todos los conceptos importantes del paradigma de objetos:

Encapsulación: propiedad que permite ocultar la información al resto de los objetos, impidiendo así accesos incorrectos o conflictos.

Herencia: propiedad a través de la cual los objetos heredan comportamiento dentro de una jerarquía de clases.

Polimorfismo: propiedad de una operación mediante la cual puede ser aplicada a distintos tipos de objetos.

En bases de datos orientadas a objetos, los usuarios pueden definir operaciones sobre los datos como parte de la definición de la base de datos. Una operación (llamada función) se especifica en dos partes. La interfaz (o signatura) de una operación incluye el nombre de la operación y los tipos de datos de sus argumentos (o parámetros). La implementación (o método) de la operación se especifica separadamente y puede modificarse sin afectar la interfaz. Los programas de aplicación de los usuarios pueden operar sobre los datos invocando a dichas operaciones a través de sus nombres y argumentos, sea cual sea la forma en la que se han implementado. Esto podría denominarse independencia entre programas y operaciones.

2.3 Definición de términos básicos

Dureza: grado de resistencia que opone un material a ser rayado o penetrado por otro.

Fluencia: deformación irrecuperable, a partir de la cual sólo se recuperará la parte de su deformación correspondiente a su deformación elástica, quedando una deformación irreversible.

Hipoeutectoide: aceros que tienen un contenido en carbono inferior al correspondiente a la composición eutectoide (0,77% de C)

Metalografía: disciplina que estudia microscópicamente las características estructurales de un metal o una aleación.

Microestructura: estructura a muy pequeña escala de un material, definida como la estructura de una superficie preparada de material como se revela por un microscopio con un aumento de más de 25x.

Modelo de simulación: instrumento que permite imitar el comportamiento de un sistema real mediante un artificio físico o matemático.

Simulación: acto que consiste en imitar o fingir que se está realizando una acción cuando en realidad no se está llevando a cabo.

Tratamiento térmico: es un proceso que consiste en el calentamiento y enfriamiento controlado de un metal en su estado sólido para cambiar sus propiedades físicas.

Normalizado: tratamiento térmico que tiene como objetivo dejar a un material en un estado “normal”, es decir, con ausencia de tensiones internas y con una distribución uniforme del carbono.

Temple: tratamiento térmico que tiene como finalidad aumentar la dureza y resistencia del material. Para ello, se calienta el acero a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior (900-950 °C) y luego se enfría rápidamente en un medio como agua, aceite, entre otros.

Revenido: es un tratamiento térmico aplicado a los aceros después del templado, para disminuir ligeramente los efectos del temple, conservando parte de la dureza y aumentar la tenacidad. Este disminuye las tensiones provocadas por el temple y equilibra un poco las propiedades mecánicas.

Recocido: es un tratamiento térmico en donde se calienta el acero hasta la temperatura de austenización (800-925 °C) seguido de un enfriamiento lento. Con este tratamiento se logra aumentar la elasticidad, mientras que disminuye la dureza.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Propósito de la investigación

El marco metodológico es la descripción de los métodos y mecanismos que se aplicarán para enfrentar la problemática de la investigación.

Según Finol y Camacho (2008, p. 60) el marco metodológico está referido a “como se realiza la investigación, muestra el tipo y el diseño de la investigación, población, muestra, técnicas e instrumentos para la recolección de datos, validez y confiabilidad y las técnicas para el análisis de datos”.

De acuerdo con dicha definición, en el presente capítulo se presentará la descripción de la metodología utilizada en la investigación, formada por los siguientes tópicos: alcance de la investigación, diseño de la investigación, nivel de la investigación, sus fases y la descripción de cada una de ellas para el desarrollo de la investigación. La finalidad de la investigación es resolver el problema planteado, por ende, es de carácter aplicada, en donde específicamente se busca estudiar los resultados obtenidos de la predicción de las propiedades mecánicas y microestructura de los aceros mediante una simulación computacional y a su vez, evaluar su confiabilidad con base en resultados experimentales.

3.2 Tipo de la investigación

Las distintas propiedades mecánicas a predecir en los aceros a estudiar están relacionadas con distintas características que puedan presentarse en la microestructura de estos, debido al tratamiento térmico al cual fueron sometidos, al porcentaje de carbono y demás aleantes que posea, el tamaño de grano, defectos, entre otros, los

cuales provocan que la presente investigación tenga un alcance descriptivo y correlacional.

Según Hernández, Fernández y Baptista (2010, p. 81), las investigaciones de alcance descriptivo “buscan especificar las propiedades, las características y los perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis”. Y, de la misma fuente (Hernández, 2010; p. 82) la investigación de alcance correlacional “tiene como finalidad conocer la relación o grado de asociación que exista entre dos o más conceptos, categorías o variables en un contexto en particular”.

3.3 Diseño de la investigación

Según Tamayo y Tamayo (2003, p. 108), “el diseño también es un planteamiento de una serie de actividades sucesivas y organizadas que pueden adaptarse a las particularidades de cada investigación y que nos indican los pasos y pruebas a efectuar y las técnicas a utilizar para recolectar y analizar los datos”.

De acuerdo con esta definición y a la naturaleza de los datos a utilizar para la realización del presente proyecto de investigación, el mismo tendrá un diseño del tipo bibliográfico ya que, según Tamayo y Tamayo (2003, p. 109) una investigación de diseño bibliográfico es “cuando recurrimos a la utilización de datos secundarios, es decir, aquellos que han sido obtenidos por otros y nos llegan elaborados y procesados de acuerdo con los fines de quienes inicialmente los elaboran y manejan”.

Entre los datos bibliográficos más importantes para la investigación se encuentran las imágenes experimentales tomadas en laboratorios de la microestructura de los aceros, las cuales al ser analizadas permiten la predicción de sus propiedades mecánicas y, a la vez, su posterior análisis.

3.4 Población y muestra

Según Palella Santa y Martins Feliberto (2012, p.105) “la población de una investigación es el conjunto de unidades de las que se desea obtener información

sobre las que se van a generar conclusiones. La población puede ser definida como el conjunto finito o infinito de elementos, personas, o cosas pertinentes a una investigación que generalmente suele ser inaccesible” y afirma que la muestra es “la escogencia de una parte representativa de una población cuyas características reproduce de la manera más exacta posible” (p. 106). En este caso se definió como población el acero al carbono y como muestra se tiene la familia de aceros al carbono hipoeutectoides o de bajo contenido de carbono.

3.5 Fases metodológicas

Fase I: Identificar e interpretar la relación existente entre la microestructura de los aceros y sus propiedades mecánicas.

En la primera fase de trabajo de investigación se plantea como objetivo recopilar los documentos que contengan la información sobre los microconstituyentes presentes en los aceros, analizarlos e identificarlos correctamente, con el fin de conocer su relación intrínseca con las propiedades mecánicas de los mismos. Para esto se toma como base de datos una recopilación de trabajos de grado relacionados con el análisis metalográfico cuantitativo y los estudios de la influencia del porcentaje de microconstituyentes sobre las propiedades mecánicas, así como también múltiples bases teóricas obtenidas por medio de diversos medios como lo son: revistas, papers, publicaciones, entre otros. Posterior a esto, se interpretan las ecuaciones y relaciones obtenidas del estudio, con el fin de cuantificar los resultados en gráficas y tablas de propiedades.

Fase II: Desarrollar algoritmos para el estudio de la metalografía de aceros y simulación de sus propiedades mecánicas.

En la segunda fase de trabajo, se tomará en consideración los distintos lenguajes de programación presentes en la actualidad para seleccionar de acuerdo con su disponibilidad, dificultad y accesibilidad la herramienta más adecuada a la resolución de las distintas ecuaciones y relaciones planteadas, con el fin de garantizar resultados precisos y de fácil comprensión para su ejecución. Además, se considerará las

facilidades que el lenguaje pueda ofrecer, como librerías, la importancia de estas, código abierto para el avance más fluido del diseño del código, entre otras.

Una vez seleccionado el lenguaje de programación a utilizar, se procede al desarrollo de código o algoritmos para la obtención de las propiedades mecánicas de los aceros a partir del análisis de imágenes de su microestructura, en donde se toman en cuenta criterios estadísticos y las distintas ecuaciones y relaciones adquiridas en la Fase I.

Fase III: Simular las propiedades mecánicas de algunos aceros a partir de su microestructura.

Posterior al desarrollo o diseño del código para la simulación de las propiedades mecánicas, se procede a su ejecución, utilizando las imágenes de microestructuras recopiladas en la bibliografía. Para ello, se deben realizar distintas pruebas del código simulando una gran variedad de aceros hipoeutectoides, dando como resultado una vasta colección de gráficas, valores y parámetros con el fin de analizarse y comprobarse.

Fase IV: Comparar los valores obtenidos por la simulación con las propiedades mecánicas obtenidas a partir de ensayos realizados a las muestras.

En la cuarta y última fase de trabajo, se comparan los resultados obtenidos por el software con los valores reales presentados en la bibliografía, los cuales fueron obtenidos mediante ensayos de tracción y dureza. Posterior a la comparación, se analiza el porqué de los resultados obtenidos y los distintos factores que hayan podido contribuir a variaciones con los resultados reales, discutiendo las posibilidades de aumentar la precisión del software aproximándose a sus condiciones ideales.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

En este capítulo se desarrollan las fases de la investigación planteadas anteriormente, con la finalidad de cumplir con el objetivo general de la misma, el cual consiste en comparar las propiedades mecánicas y microestructurales de un grupo de aceros de bajo carbono mediante una herramienta computacional.

4.1 Identificación de la relación entre las propiedades mecánicas de un material y su microestructura.

Para este trabajo se buscó algún método o fórmula que relacionase la microestructura del acero con su resistencia a la tracción o alguna otra propiedad. Esta investigación dio como resultado la relación de Hall-Petch (ecuación 8), una fórmula empírica de casi 70 años que relaciona el diámetro promedio de los granos de un material con su límite de fluencia. Además, la figura 9 presenta los factores necesarios para poder aplicar la ecuación de Hall-Petch a distintos materiales, entre ellos el acero dulce (Mild Steel). Sin embargo, se debe tomar en cuenta que las muestras escogidas para este trabajo de investigación no solo son de acero dulce, solo ocho de 40 microestructuras a ser estudiadas entran en esta clasificación.

Además, hay que resaltar que no todas las microestructuras son iguales y no pueden ser tratadas de la misma manera. La martensita, en particular, es un caso de

microestructura en el cual no se presentan granos equiaxiales. Esto significa que no puede hablarse de diámetro de grano, sino de ancho y longitud de grano, puesto que la forma de esta microestructura es de agujas.

A pesar de esto, la ecuación de Hall-Petch, por su sencillez, permite estudiar distintos materiales sin prestar atención a sus microconstituyentes, lo que la hace una valiosa herramienta para el estudio realizado. A pesar de ello, al no contar con un criterio que establezca parámetros de acuerdo con la microestructura del material, se pueden presentar errores en la simulación.

4.2 Desarrollar algoritmos para el estudio de la metalografía de aceros y simulación de sus propiedades mecánicas.

Para el desarrollo de código que permita estudiar las microestructuras de los materiales, primero se ha de escoger la herramienta adecuada. Lo inicialmente planteado fue escoger entre un software ya establecido o un lenguaje de programación que permitiera diseñar el software. La tabla 1 muestra las opciones exploradas junto con los criterios tomados para la toma de decisión.

De las distintas opciones presentadas, se optó por trabajar con el lenguaje de programación Python, puesto que éste brinda la facilidad de trabajar con bibliotecas desarrolladas por otros usuarios permitiendo elaborar un software que opere a la medida con las necesidades de la investigación. Además, en comparación con el resto de los lenguajes de programación presentados, es el más sencillo de aprender a utilizar, ya que, presenta una sintaxis sumamente sencilla mientras que C++ y Java requieren más estudio y adaptación para poder manejarlos apropiadamente.

En cuanto a los softwares ya disponibles como Image J y PAX-It, presentan debilidades en cuanto a la simulación de propiedades mecánicas del material. Por un lado, Image J se creó pensando en estudios médicos, no metalúrgicos, por lo que las herramientas que presenta no satisfacen las necesidades para este trabajo. PAX-It es

un programa de alta calidad, pero requiere de un microscopio para operar y, al ser una opción comercial a la que no se tiene acceso, se descartó como una opción viable.

Una vez seleccionada la herramienta a utilizar, se procedió a desarrollar el código. Para esto se acudió a una serie de módulos de Python que en conjunto permiten a una computadora visualizar una imagen, analizar distintos aspectos de ésta y realizar cálculos en base a la data obtenida del análisis. Entre los módulos utilizados destaca un método desarrollado, a partir de Scikit-image, por Emmanuelle Gouillart, denominado “segmentación de bajo contraste”. Este método consiste en dividir una imagen compuesta por objetos similares separados por límites de bajo contraste en segmentos.

Tabla 1: Comparación de herramientas computacionales para el análisis metalográfico.

Fuente: Andrea L. y Capuzzi J.

Herramienta	Accesibilidad	Facilidad de uso	Puede realizar la tarea requerida	Requiere equipo especial
Image J	Software de código abierto de fácil acceso.	Relativamente sencillo, con una interfaz poco amigable	Destinado al análisis microscópico, no específicamente de metalografía.	No
PAX-It	Software comercial.	Interfaz amigable, uso sencillo.	Puede realizar un efectivo análisis de microestructuras.	Sí
C++	Lenguaje de programación de libre acceso.	Lenguaje avanzado.	Puede desarrollarse software desde cero.	No
Python	Lenguaje de programación de libre acceso.	Está destinado para principiantes por lo que es fácil de usar.	Posee bibliotecas creadas por usuarios que permiten desarrollar el software necesitado con facilidad.	No
Java	Lenguaje de programación de libre acceso.	Lenguaje intermedio/avanzado	Se puede desarrollar una aplicación que cumpla con los requerimientos	No

Los módulos de Python que han de ser descargados para el funcionamiento del software se explican en el apéndice A, junto con una guía paso a paso para iniciar el programa. El funcionamiento del software puede separarse a groso modo en dos partes: primero el preprocesamiento de la imagen, el cual se logra gracias a las funciones desarrolladas por Emmanuelle Guillard. Luego, simulación de determinación de tamaño de granos y propiedades mecánicas por medio de la metodología ASTM E-112, factor de Jeffries y la relación de Hall-Petch.

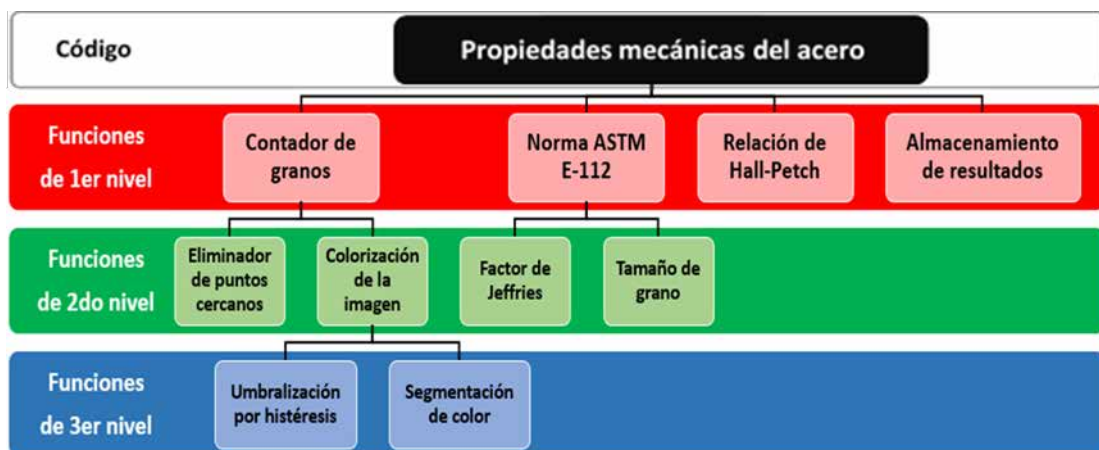
Para el análisis de la imagen metalográfica se siguen una serie de pasos explicados por Guillard. Primero, la imagen debe ser limpiada de todo ruido, ya que

los otros procesos son mucho más fáciles de llevar a cabo en una imagen limpia, además, se evita que el software analice ruido en lugar de verdaderos elementos de la imagen. En los resultados que aporta el software esto se expresa como “Imagen suavizada”.

Acto seguido, se utiliza un algoritmo de segmentación, en el caso de este trabajo se utilizó un algoritmo denominado “Random Walker”, el cual opera creando caminos aleatorios a partir de la difusividad de la imagen. Y, el método de segmentación automática, que utiliza píxeles aleatorios de la imagen para aprovechar los “límites naturales” que se hayan dentro de la imagen, y que, en este caso, serán los límites de grano hallados por el algoritmo de Random Walker.

4.2.1 Descripción detallada del código

El código escrito presenta varias funciones, las cuales permiten lograr los objetivos anteriormente mencionados y conocer las propiedades de las microestructuras estudiadas. Para describir las funciones, se utilizará la siguiente



Esquema 1: Jerarquía de las funciones del código.

Fuente: Andrea L. y Capuzzi J.

jerarquía: código principal y funciones de primer, segundo y tercer nivel (ver esquema 1).

4.2.1.1 Función “contador de granos” (conteo_granos)

Esta función es la principal del código, ya que realiza el conteo de los granos presentes en la microestructura, los señala y permite la visualización de los límites o bordes de grano. Está compuesta por funciones de 2do y de 3er nivel, las cuales son: “eliminador de puntos cercanos” (elimina puntos generados aleatoriamente por la segmentación Random Walker que estén muy cercanos unos de otros y así, evitar que sean confundidos como bordes de granos) y “colorización de la imagen” (función que permite identificar los límites de granos en la imagen gracias al algoritmo de “Random Walker”, también realiza una umbralización binaria, es decir, de negros y blancos y, la posterior coloración de cada segmento).

Lo más importante de la función “contador de granos”, son las iteraciones. Ya que, como su nombre lo dice, la segmentación por medio del algoritmo de Random Walker es aleatoria, con una sola ejecución de este no es suficiente para encontrar todos los límites de granos, por ello es necesario de una cantidad de iteraciones para encontrarlos, superponiendo cada resultado sobre otro y plasmando los límites de granos en una especie de mapa de elevación con vista de planta.

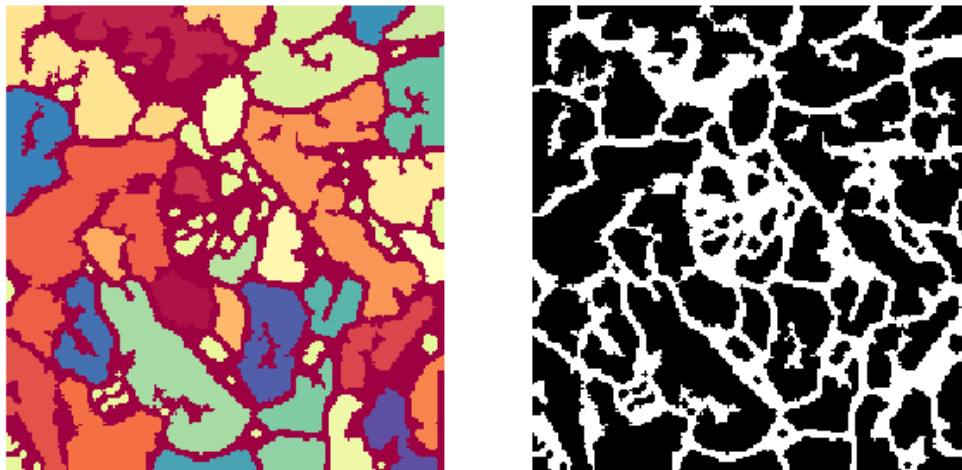


Figura 11: Imagen segmentada y coloreada (izquierda) e imagen binarizada por umbralización (derecha).

Fuente: Andrea L. y Capuzzi J.

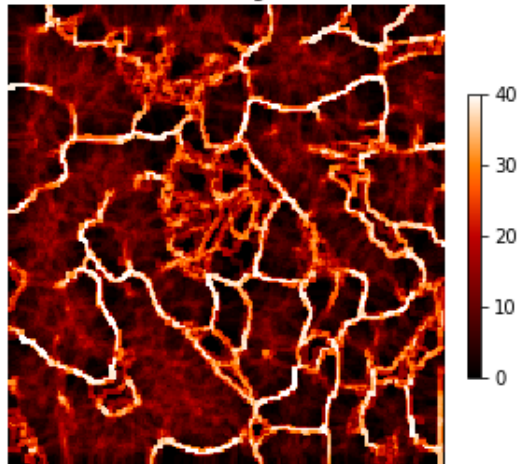


Figura 12: Bordes o límites de granos encontrados por la función "contador de granos", por medio de la superposición de los resultados. A la derecha, se puede observar una leyenda de intensidad, la cual refleja la cantidad de iteraciones.

Fuente: Andrea L. y Capuzzi J.

Por último, la función tiene como argumentos: la imagen original a analizar (`im_original`), una lista que contiene las imágenes a imprimir (`images`) y el número de iteraciones que se van a utilizar (`n_real`, por defecto tiene un valor de 15).

4.2.1.2 Función "norma ASTM E-112" (`astm_e112`)

La norma ASTM E-112 contiene distintos métodos para conocer el diámetro promedio de los granos y su conteo, sin embargo, la presente función solo presenta el método planimétrico o de Jeffries. A su vez, recoge las funciones "factor de Jeffries" (para calcular el factor de Jeffries) y "tamaño de grano" (para calcular el tamaño de granos en función de los granos contados por la función "contador de granos").

La presente función calcula el tamaño de grano ASTM (G), para así, poder obtener de una lista (figura 13), el diámetro de grano promedio de la microestructura estudiada.

```

astm_112 = [(0, 0.3592), (0.5, 0.3021), (1, 0.254), (1.5, 0.2136), (2, 0.1796),
            (2.5, 0.151), (3, 0.127), (3.5, 0.1068), (4, 0.0898), (4.5, 0.0755),
            (5, 0.0635), (5.5, 0.0534), (6, 0.0449), (6.5, 0.0378), (7, 0.0318),
            (7.5, 0.0267), (8, 0.0225), (8.5, 0.0189), (9, 0.0159), (9.5, 0.0133),
            (10, 0.0112), (10.5, 0.0094), (11, 0.0079), (11.5, 0.0067), (12, 0.0056),
            (12.5, 0.0047), (13, 0.004), (13.5, 0.0033), (14, 0.0028)]

```

Figura 13: Lista compuesta por tuplas, las cuales tienen la siguiente forma: (G, dp). Siendo "G" el tamaño de grano ASTM y "dp" el diámetro promedio de grano.

Fuente: Andrea L. y Capuzzi J.

Si es necesario, el código está en la capacidad de interpolar linealmente entre dos valores de la lista "astm_e112" y, si el tamaño de grano ASTM es menor a 0, "G" tomará el valor de 0.5080 mm, como lo estipula la norma.

La función tiene como argumentos: la cantidad de granos aparentes contados por la función "contador de granos" (cant_granos), el aumento de la imagen y la lista de tamaño de granos y diámetros promedios ASTM.

4.2.1.3 Función "relación de Hall-Petch" (relación_hall_petch)

Es una función sencilla que contiene la relación de Hall-Petch para calcular el esfuerzo de fluencia (S_y) y, por medio de este, calcular el esfuerzo de tracción (el cual es aproximadamente $S_y/0.7$).

Tiene como argumentos el diámetro promedio de grano (dado por la función "norma ASTM E-112") y las constantes de Hall-Petch almacenadas en una tupla de tipo (So, Ky).

4.2.1.4 Función "almacenamiento de resultados" (guardar_resultados)

```
Muestra de acero analizada: 1010 BCW
El esfuerzo de tracción es ( $\sigma$ ): 532.4785494460295 MPa
El esfuerzo de fluencia es ( $\sigma_y$ ): 372.73498461222067 MPa
El conteo de granos aparentes es: [924, 765, 955]
El promedio de granos aparentes es ( $N_a$ ): 881.3333333333334
El diámetro promedio del grano es de: 5.975004215277475  $\mu\text{m}$ 
El tiempo de ejecución es de: 110.37542978127797 min
```

Figura 14: Captura del formato de impresión en el archivo de extensión “.txt”.

Fuente: Andrea L. y Capuzzi J.

Esta función permite guardar los resultados del procedimiento en un archivo “.txt”, mostrando los resultados bajo el formato descrito en la figura 14. Los argumentos de la presente función son: nombre de la imagen (name), tulpita que contiene los resultados arrojados por la función “relación de Hall-Petch” (σ ; (S_u , S_y)), número de granos aparentes (na), número de granos aparentes promedio (na_prom), diámetro promedio de grano (d_grano) y, la acción a realizar (“w” por defecto, del inglés “write”, “escribir” en español).

4.2.1.5 Código principal

Acopla todas las funciones anteriormente mencionadas, realizándose el conteo de granos aparentes tres veces (como lo recomienda la norma ASTM E-112) y, utilizando el promedio para proceder a calcular el diámetro promedio, la resistencia a la fluencia y a la tracción.

A su vez, imprime en la interfaz 6 imágenes: la imagen original, la imagen sin ruido y en escala de grises, los límites de granos con iteraciones, los límites de granos en blanco y negro, y dos imágenes segmentadas: una coloreada sobre la imagen original y otra donde se pueden observar solo los colores.

Automáticamente, el código crea una carpeta en la carpeta donde se ejecuta, con el nombre de la muestra analizada en donde se guarda el archivo de texto con los resultados y estas 6 imágenes mencionadas.

Por último, se muestra en pantalla el tiempo de ejecución del procesamiento en minutos.

4.3 Simulación de las propiedades mecánicas de algunos aceros a partir de su microestructura.

Una vez completada la fase de desarrollo, se procedió a simular la totalidad de las muestras disponibles para esta investigación. Las muestras en cuestión son un grupo de aceros al carbono hipoeutectoides o de bajo contenido de carbono estudiados previamente por Luis Felipe González Jaén, los cuales son acero AISI 1010, 1023, 1045, 1060 y 1075. Estos aceros se encuentran sin tratar (EI), sometidos a normalizado (NOR), temple en agua (TW) y en aceite (TO), enfriado desde temperatura intercrítica en agua (ECW) y en aceite (ECO), y, enfriado desde una temperatura menor a la crítica inferior en agua (BCW) y en aceite (BCO). Información detallada con respecto a los tratamientos térmicos a los que fueron sometidas las muestras se encuentra en el formato presentado en la figura 15. Además, se cuenta con un análisis del resultado obtenido por medio del software con respecto a la segmentación de la imagen metalográfica y el cálculo de esfuerzo a la tracción a partir de la ecuación de Hall-Petch.

Para cada muestra se tomó en consideración el valor de la resistencia a la tracción obtenido a partir de un ensayo de tracción, y la resistencia a la tracción equivalente según su microdureza a modo de valor teórico. Estos valores sirvieron de comparación para el resultado de resistencia a la tracción proporcionado por el software. Además, se tiene un valor de porcentaje de varianza, el cual muestra la diferencia porcentual existente entre el valor real y el valor simulado, observando que varianzas similares no necesariamente representan una diferencia neta similar. A continuación, se presenta la tabla 2, la cual contiene los resultados del análisis computacional realizado a cada muestra.

Muestra	Cantidad de granos en la imagen	Diámetro de granos (µm)	(exp)(MPa)	(Vickers)(MPa)	Max (sim)(MPa)	Varianza (%)
1010 EI	572.67	7.40	411.99	448.00	488.56	18.59
1010 NOR	674.60	6.83	371.66	590.45	504.38	35.71
1010 TW	657.00	6.92	736.43	855.00	501.69	31.88
1010 TO	627.33	7.08	522.78	647.00	497.13	4.91
1010 ECW	448.33	8.33	516.73	558.60	466.13	9.79
1010 ECO	530.00	7.67	467.81	558.60	481.71	2.97
1010 BCW	500.00	7.87	446.19	506.00	476.79	6.86
1010 BCO	428.33	8.53	478.88	483.00	461.87	3.55
1023 EI	577.00	7.37	599.74	653.00	489.25	18.42
1023 NOR	584.00	7.33	542.94	663.00	490.36	9.68
1023 TW	831.66	6.16	1287.19	1,585.00	525.97	59.14
1023 TO	745.33	6.51	784.33	1,431.00	514.42	34.41
1023 ECW	677.00	6.82	1,094.23	1,271.00	504.73	53.87
1023 ECO	646.67	6.98	1,162.94	1,052.00	500.10	57.00
1023 BCW	788.33	6.32	738.94	950.00	520.21	29.60
1023 BCO	747.67	6.49	551.78	626.00	514.74	6.71
1045 EI	628.00	7.08	777.52	824.00	542.71	30.20
1045 NOR	655.33	6.93	729.26	797.00	545.38	25.21
1045 TW	803.67	6.27	403.11	1,879.00	558.63	38.58
1045 TO	883.67	5.97	1,388.00	1,693.00	565.33	59.27

1045 ECW	909.33	5.88	314.35	1,235.00	567.46	80.52
1045 ECO	699.00	6.71	1,079.03	1,151.00	549.60	49.07
1045 BCW	644.67	6.99	671.32	1,007.00	544.34	18.92
1045 BCO	715.67	6.64	679.74	856.00	551.07	18.93
1060 EI	884.00	5.97	972.88	905.00	589.77	39.38
1060 NOR	768.00	6.41	895.95	913.00	584.19	34.80
1060 TW	999.00	5.58	N/A	1,879.00	595.09	N/A
1060 TO	769.67	6.41	1,523.66	1,846.00	584.27	61.65
1060 ECW	823.33	6.19	N/A	1,853.00	586.87	N/A
1060 ECO	722.67	6.60	1,135.36	1,879.00	581.95	48.74
1060 BCW	774.33	6.39	793.17	1,150.00	584.50	26.31
1060 BCO	954.33	5.72	767.78	912.00	593.08	22.75
1075 EI	952.67	5.73	1,108.58	1,039.00	593.00	46.51
1075 NOR	682.67	6.79	1,010.80	1,068.00	579.86	42.63
1075 TW	853.67	6.08	N/A	2,440.00	588.32	N/A
1075 TO	878.33	5.99	N/A	2,243.00	589.50	N/A
1075 ECW	915.33	5.85	N/A	2,261.00	591.25	N/A
1075 ECO	879.00	5.98	N/A	2,210.00	589.53	N/A
1075 BCW	681.00	6.80	N/A	1,442.00	579.77	N/A
1075 BCO	758.00	6.45	886.14	1,113.00	583.70	34.13

Tabla 2: Resultados del análisis de imágenes metalográficas.

Fuente: Andrea L. y Capuzzi J.

Como se puede apreciar, algunos de los resultados son favorables, puesto que se aproximan a menos de 5% del valor experimental. Pero, por otro lado, se tienen varianzas de más de 50% en algunos casos, y, a medida que aumenta el porcentaje de Carbono en las muestras, se aprecia una mayor incidencia en estas diferencias altas entre los valores.

A continuación, se presentan las muestras utilizadas junto con los resultados obtenidos mediante ensayos y por medio de la simulación realizada por el software. Los resultados son presentados en el formato estipulado en la figura 15.



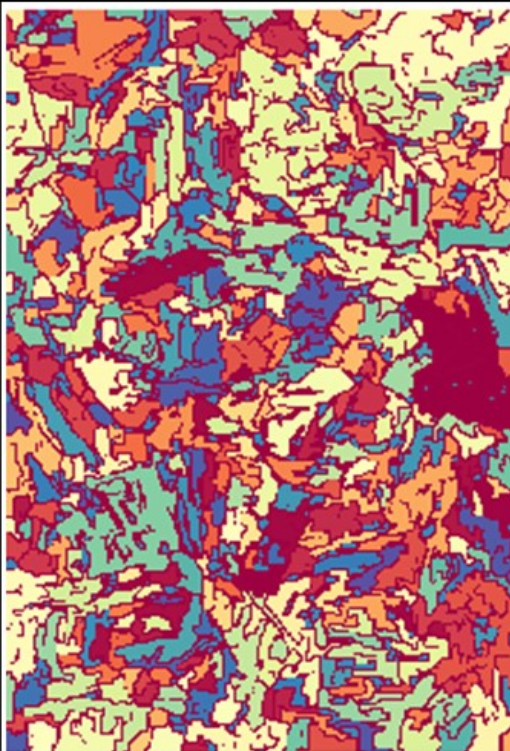

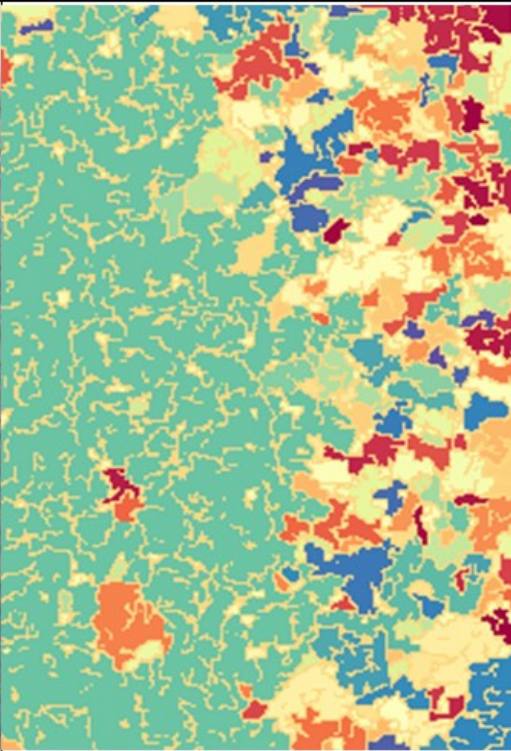
MUESTRA:	Código de la muestra utilizada  10xx AAA
Tratamiento térmico:	Características del proceso:
Tratamiento térmico al que fue sometida la muestra	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento del microscopio • Granos aparentes (Na) calculados por el software • Diámetro de grano promedio (μm)
Comentarios:	Resistencia a la tracción:
Comentarios relacionados con las microestructuras presentes y los resultados obtenidos a partir del software	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia calculada a partir de microdureza Vickers • Resultados de ensayo de tracción • Valor simulado por el software
IMÁGEN ORIGINAL DE LA MICROESTRUCTURA	IMÁGEN SEGMENTADA DE LA MICROESTRUCTURA


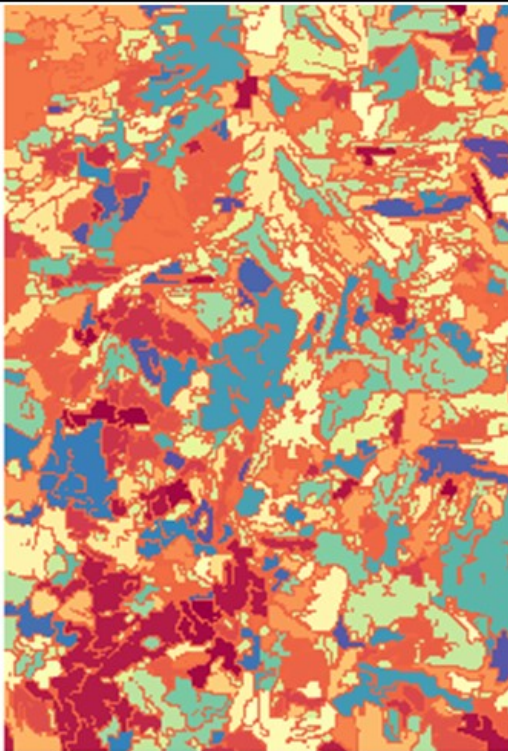
Figura 15: Formato para la presentación de resultados.

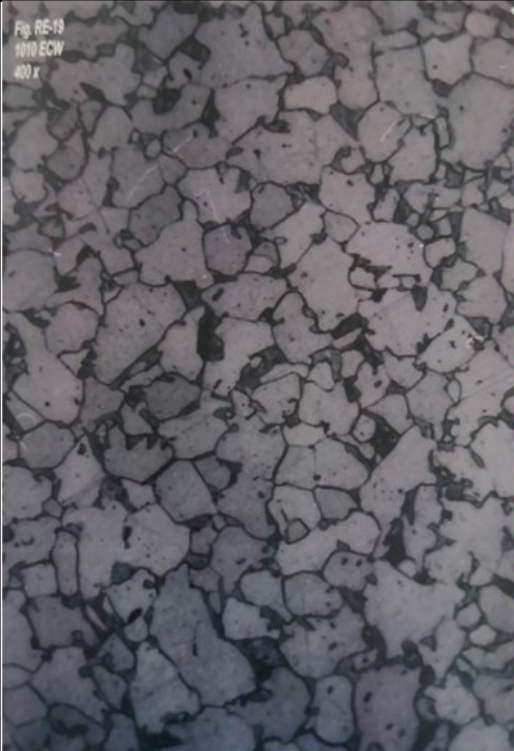
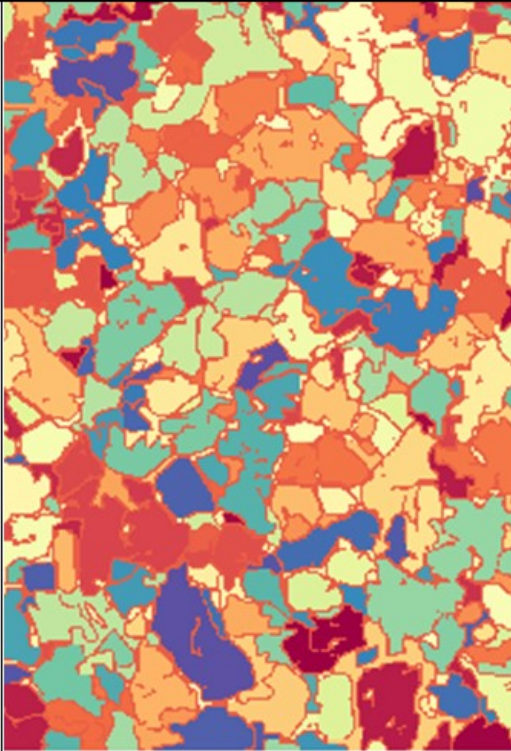
Fuente: Andrea L. y Capuzzi J.


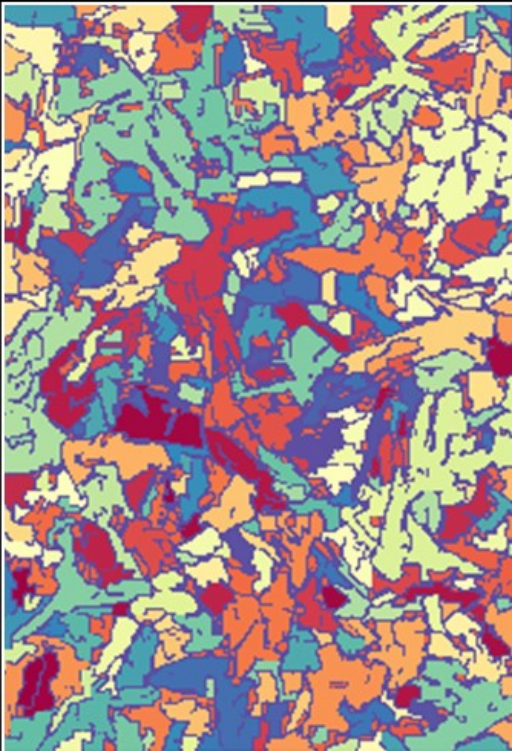
MUESTRA:		1010 EI
Tratamiento térmico:		Características del proceso:
Sin tratar.		<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 572.67 • Diámetro de grano (μm): 7,40
Comentarios:		Resistencia a la tracción:
Granos de perlita sobre matriz de ferrita. El software identificó cada zona de la imagen. La variación de la resistencia puede deberse a la orientación vertical de los granos.		<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 448.00 MPa • Ensayo: 411.99 MPa • Software: 488.56 MPa
		

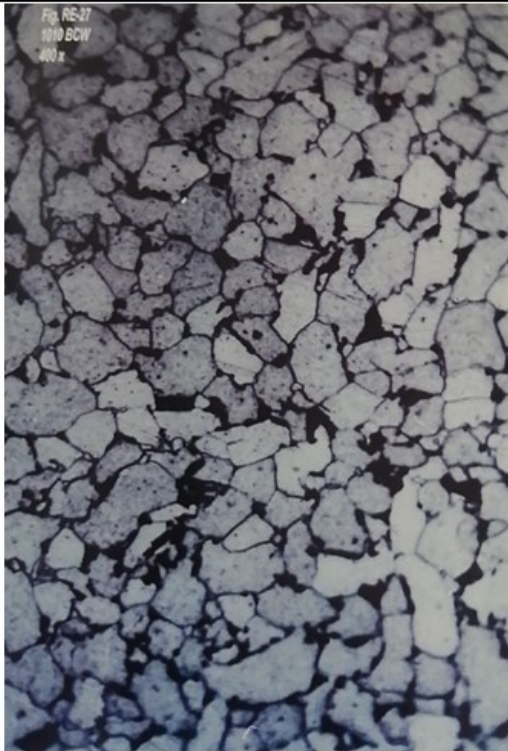
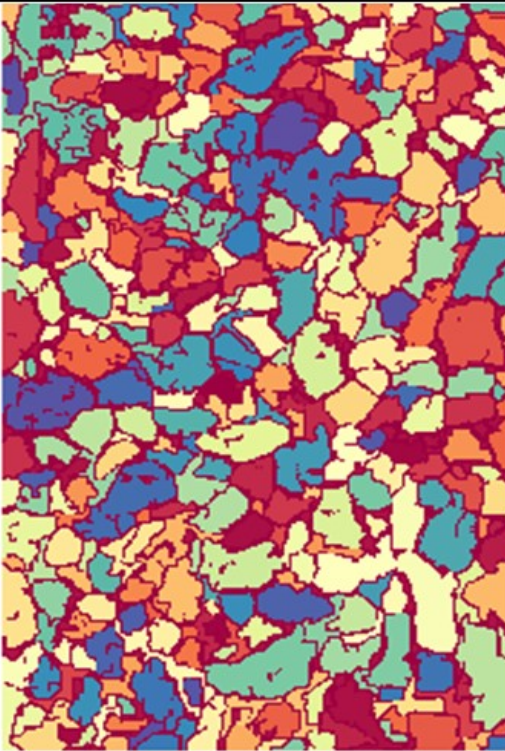
MUESTRA:		1010 NOR	
Tratamiento térmico:		Características del proceso:	
Normalizado. Calentado a 927 °C y enfriado en aire "quieto" a 27 °C.		<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 674.60 • Diámetro de grano (µm): 6,83 	
Comentarios:		Resistencia a la tracción:	
Estructura ferrítica de placas laterales (Widmanstatten), perlita laminar y perlita en bloque. El software identificó varios sectores, sin embargo no son claros granos.		<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 590.45 MPa • Ensayo: 371.66 MPa • Software: 504.38 MPa 	
			



MUESTRA:		1010 TW
Tratamiento térmico:	Características del proceso:	
Temple en agua. Calentado a 927 °C y enfriado en agua a 21 °C.	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 657.00 • Diámetro de grano (µm): 6,92 	
Comentarios:	Resistencia a la tracción:	
Austenita y granos de ferrita libre. Las manchas negras son óxido, deben corresponder a la ferrita. Debido a lo fino de la microestructura, no se pudo identificar debidamente.	<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 855.00 MPa • Ensayo: 736.43 MPa • Software: 501.69 MPa 	
		


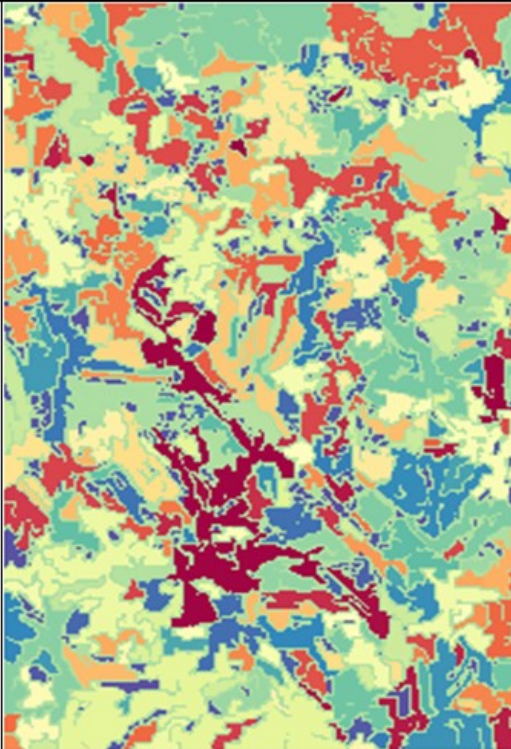
MUESTRA:		1010 TO
Tratamiento térmico:	Características del proceso:	
Temple en aceite. Calentado a 927 °C y enfriado en aceite a 27 °C.	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 627.33 • Diámetro de grano (µm): 7,08 	
Comentarios:	Resistencia a la tracción:	
Ferrita libre, perlita en forma de bloque, posible bainita y martensita. A pesar de la forma desordenada de la microestructura, se pudieron identificar zonas claves.	<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 647.00 MPa • Ensayo: 522.78 MPa • Software: 497.13 MPa 	
		

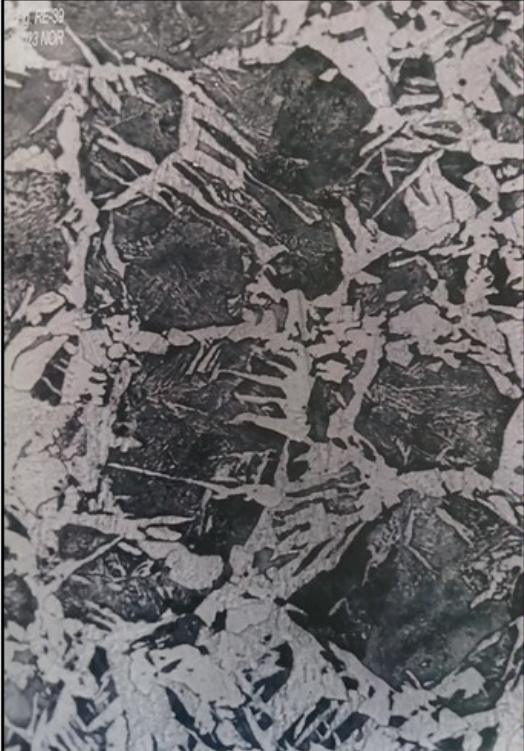
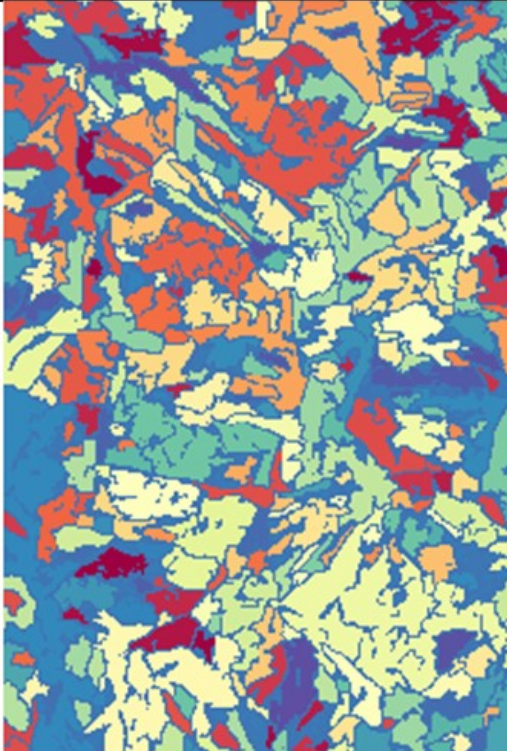
MUESTRA:		1010 ECW
Tratamiento térmico:		Características del proceso:
Enfriamiento en agua, desde una temperatura de 790 °C y el agua a 21 °C.		<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 448.33 • Diámetro de grano (µm): 8,33
Comentarios:		Resistencia a la tracción:
Microestructura ferrítica, con granos de perlita en bloque, cementita en los bordes de grano. Se observa como la segmentación fue casi perfecta, dando un buen resultado.		<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 558,60 MPa • Ensayo: 516.73 MPa • Software: 466.13 MPa
 <p>Fig. RE-19 1010 ECW 400 x</p>		


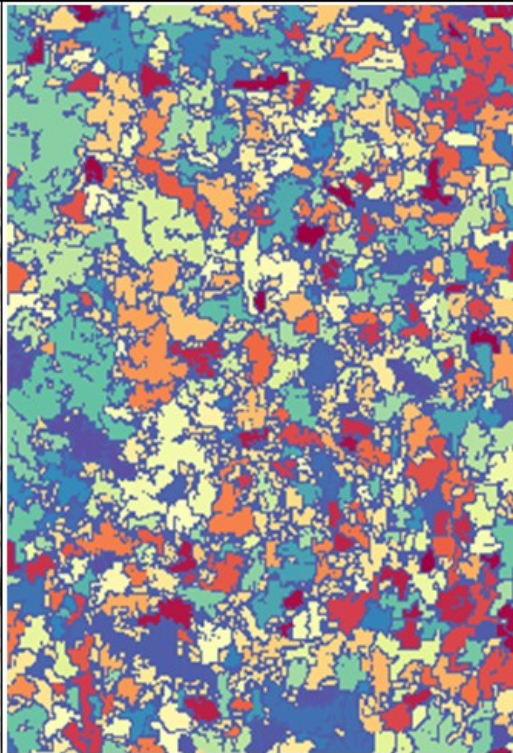
MUESTRA:		1010 ECO
Tratamiento térmico:	Características del proceso:	
Enfriamiento en aceite, desde una temperatura de 790 °C y el aceite a 27 °C.	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 530.00 • Diámetro de grano (µm): 7,67 	
Comentarios:	Resistencia a la tracción:	
Estructura ferrítica de placas laterales (Widmanstatten), posible sorbita y bainita. El software identificó claramente la mayoría de las zonas debido a los límites bien definidos.	<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 558.60 MPa • Ensayo: 467.81 MPa • Software: 481.71 MPa 	
		


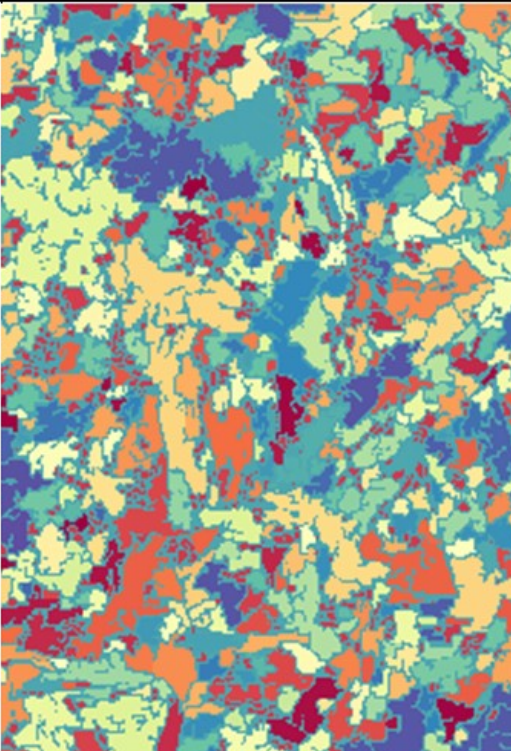
MUESTRA:		1010 BCW	
Tratamiento térmico:		Características del proceso:	
Enfriamiento en agua a 21 °C, desde una temperatura de 700 °C.		<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 500.00 • Diámetro de grano (µm): 7,87 	
Comentarios:		Resistencia a la tracción:	
Estructura ferrítica, granos dispersos de perlita (tamaño menor), matriz de perlita y cementita. Estructura similar a la dada por el 1010 ECW. Se observa una buena segmentación.		<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 506.00 MPa • Ensayo: 446.19 MPa • Software: 476.79 MPa 	
			


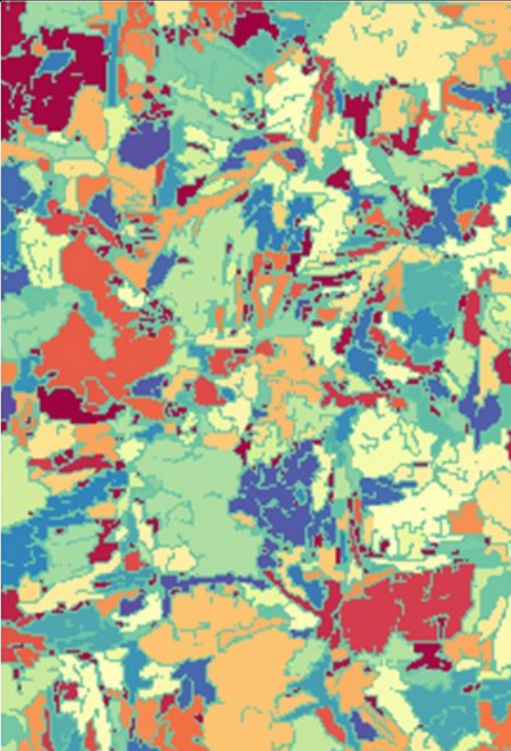
MUESTRA:		1010 BCO	
Tratamiento térmico:		Características del proceso:	
Enfriamiento en aceite a 27 °C, desde una temperatura de 700 °C.		<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 428.33 • Diámetro de grano (µm): 8,53 	
Comentarios:		Resistencia a la tracción:	
Estructura ferrítica, granos dispersos de perlita globular. Cementita en los bordes de grano. El esfuerzo que dio el software es bastante prometedor y se observan claramente los granos.		<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 483.00 MPa • Ensayo: 478.88 MPa • Software: 461.87 MPa 	
			


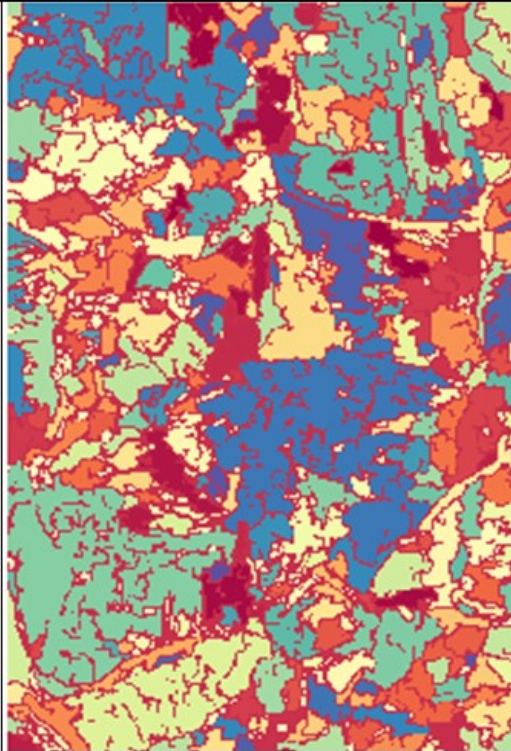
MUESTRA:		1023 EI
Tratamiento térmico:	Características del proceso:	
Sin tratar.	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 577.00 • Diámetro de grano (μm): 7,37 	
Comentarios:	Resistencia a la tracción:	
Estructura ferrítico-perlítica, ferrita Widmanstatten, perlita laminar y trazas de sorbita. Debido a lo fino de la microestructura, no se consigue una segmentación de buena calidad.	<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 653.00 MPa • Ensayo: 599.74 MPa • Software: 489.25 MPa 	
		


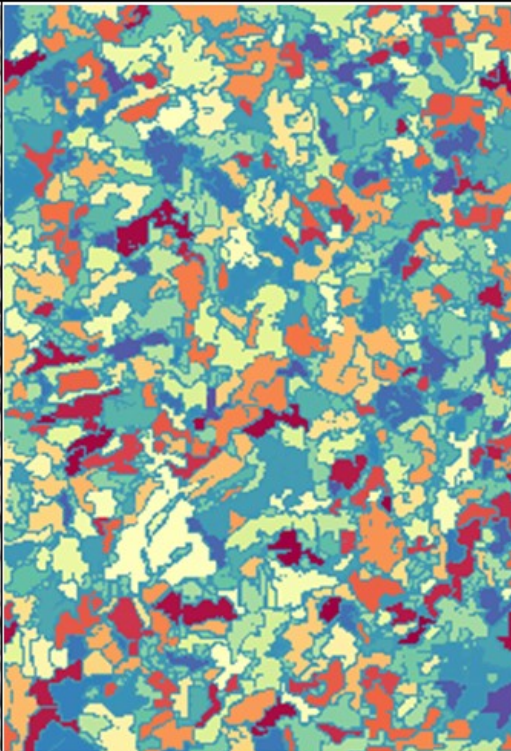
MUESTRA:		1023 NOR	
Tratamiento térmico:		Características del proceso:	
Normalizado. Calentado a 894 °C y enfriado en aire "quieto".		<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 584.00 • Diámetro de grano (µm): 7,33 	
Comentarios:		Resistencia a la tracción:	
Matriz de ferrita Widmanstatten, perlita laminar y tipo bloque. Se nota que el software encontró "exceso" de granos. Esto es debido a las láminas y forma de perlita y ferrita.		<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 663.00 MPa • Ensayo: 542.94 MPa • Software: 490.36 MPa 	
			

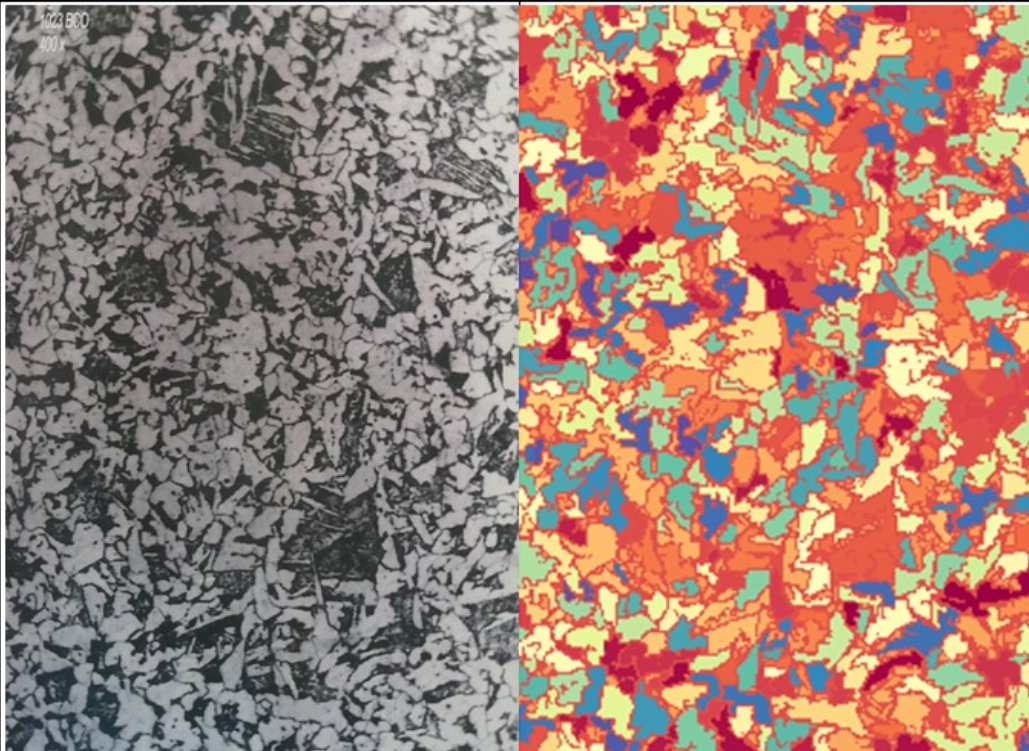
MUESTRA:		1023 TW	
Tratamiento térmico:		Características del proceso:	
Temple en agua. Calentado a 700 °C y enfriado en agua.		<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 831.66 • Diámetro de grano (µm): 6,16 	
Comentarios:		Resistencia a la tracción:	
Martensita y granos de ferrita libre. Como se ha dicho anteriormente, la martensita es una microestructura muy fina, por ende se observa una segmentación limitada.		<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 1,585.00 MPa • Ensayo: 1,287.19 MPa • Software: 525.97 MPa 	
			

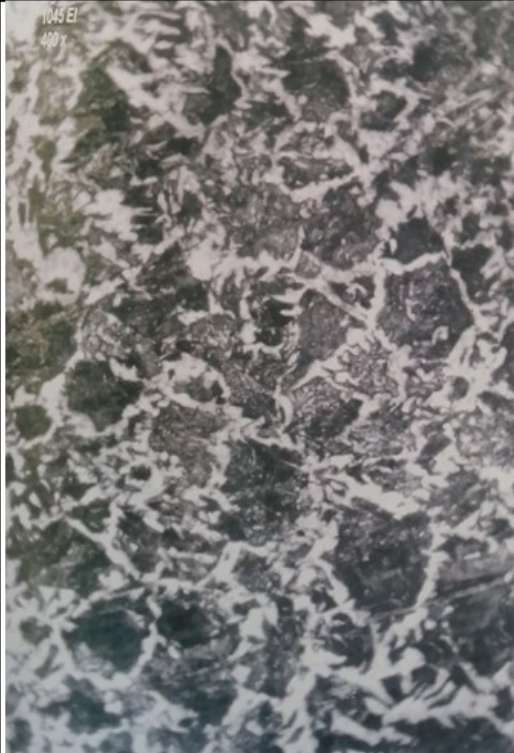
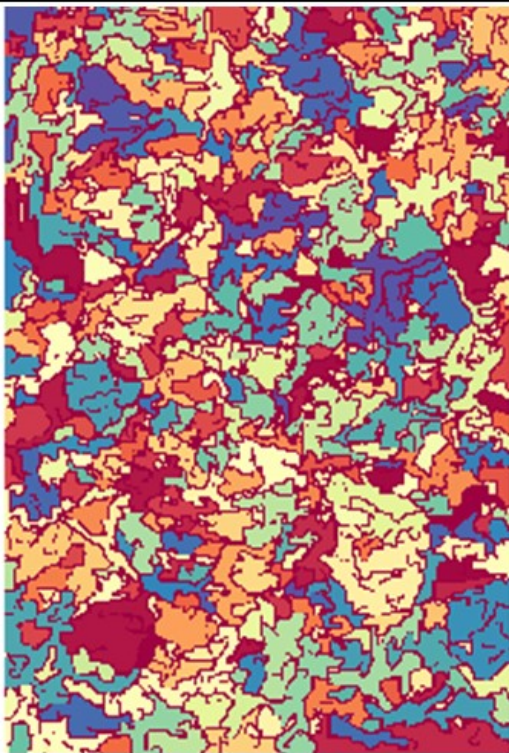
MUESTRA:		1023 TO	
Tratamiento térmico:		Características del proceso:	
Temple en aceite. Calentado a 894 °C y enfriado en aceite a 27 °C.		<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 745.33 • Diámetro de grano (µm): 6,51 	
Comentarios:		Resistencia a la tracción:	
Estructura martensítica, nódulos de troostita. También se observa estructura de bainita y ferrita libre. Se observa como el software identificó los cambios de gris.		<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 1,431.00 MPa • Ensayo: 784.33 MPa • Software: 514.42 MPa 	
			


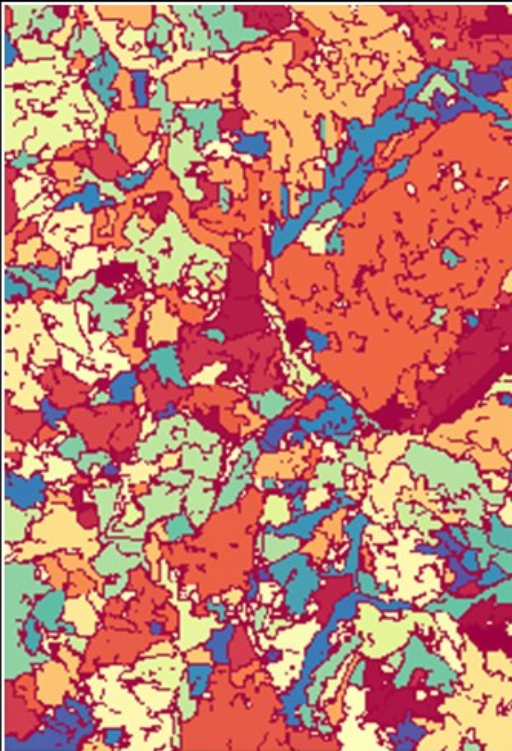
MUESTRA:		1023 ECW	
Tratamiento térmico:		Características del proceso:	
Enfriamiento en agua, desde una temperatura de 790 °C y el agua a 21 °C.		<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 677.00 • Diámetro de grano (µm): 6,82 	
Comentarios:		Resistencia a la tracción:	
Matriz ferrítica Widmanstatten, granos de austenita, troostita y perlita. Debido a las distintas microestructuras presentes, la segmentación es "excesiva".		<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 1,271.00 MPa • Ensayo: 1,094.23 MPa • Software: 504.73 MPa 	
 <p>Fig. RE-51 1023 ECW 400x</p>			


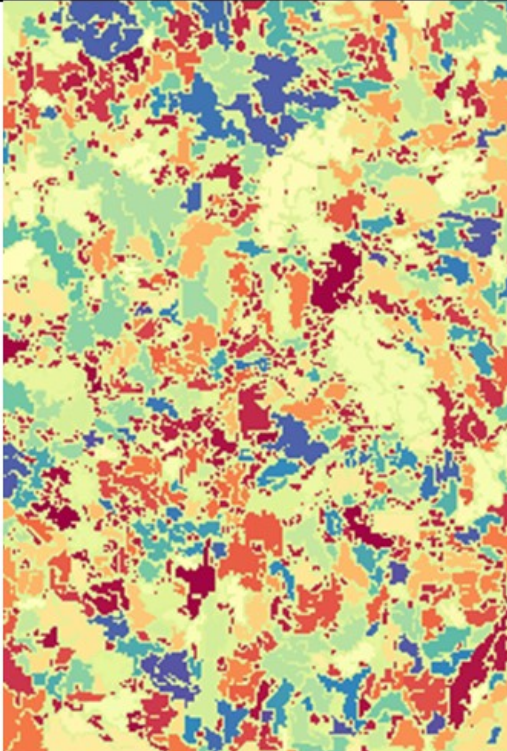
MUESTRA:		1023 ECO	
Tratamiento térmico:		Características del proceso:	
Enfriamiento en aceite, desde una temperatura de 790 °C y el aceite a 27 °C.		<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 646.67 • Diámetro de grano (µm): 6,98 	
Comentarios:		Resistencia a la tracción:	
Estructura parcialmente martensítica, granos de perlita en bloque rodeados de una matriz ferrítica. Troostita y ferrita Widmanstatten. A pesar de la diversidad, mejora la segmentación.		<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 1,052.00 MPa • Ensayo: 1,162.94 MPa • Software: 500.10 MPa 	
			


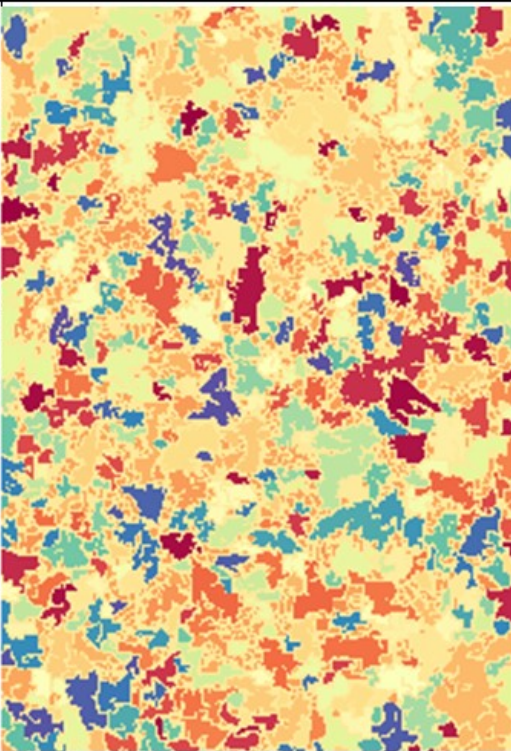
MUESTRA:		1023 BCW	
Tratamiento térmico:		Características del proceso:	
Enfriamiento en agua a 21 °C, desde una temperatura de 700 °C.		<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 788.33 • Diámetro de grano (µm): 6,32 	
Comentarios:		Resistencia a la tracción:	
Estructura ferrítico-perlítica, granos de perlita y ferrita uniformes de tamaño. Estructura Widmanstatten. Se logró una buena segmentación debido a la "claridad" de la imagen.		<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 950.00 MPa • Ensayo: 738.94 MPa • Software: 520.21 MPa 	
			

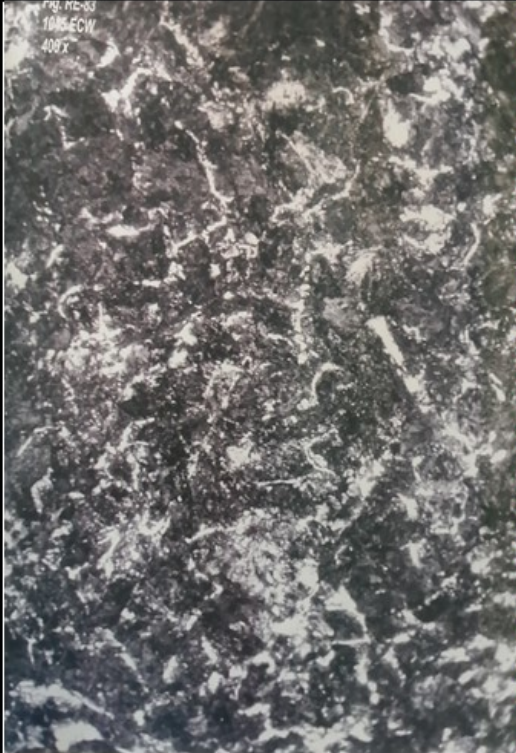
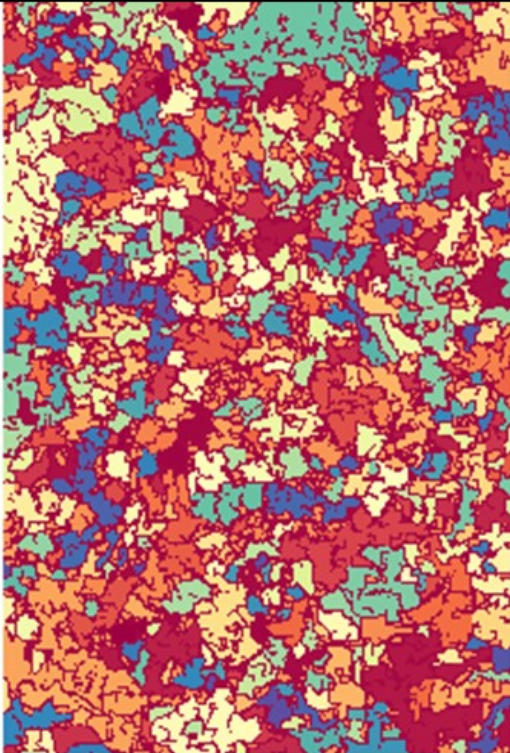
MUESTRA:		1023 BCO
Tratamiento térmico:	Características del proceso:	
Enfriamiento en aceite a 27 °C, desde una temperatura de 700 °C.	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 747.67 • Diámetro de grano (µm): 6,49 	
Comentarios:	Resistencia a la tracción:	
Estructura ferrítica, cementita en los bordes de grano y granos de perlita globular dispersos. Se observa una segmentación adecuada, en especial con los granos de perlita ("negros").	<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 626.00 MPa • Ensayo: 551.78 MPa • Software: 514.74 MPa 	
		


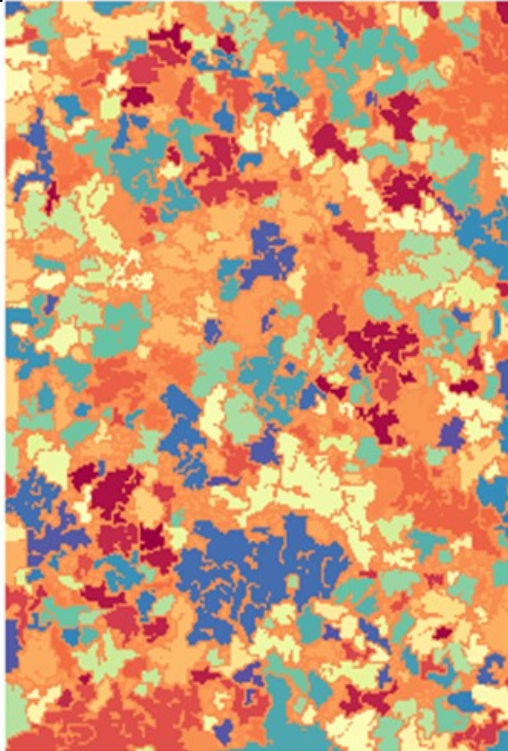
MUESTRA:		1045 EI
Tratamiento térmico:	Características del proceso:	
Sin tratar.	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 628.00 • Diámetro de grano (μm): 7,08 	
Comentarios:	Resistencia a la tracción:	
Perlita sobre matriz ferrítica. Se observa perlita laminar y ferrita Widmanstatten. Se nota claramente una segmentación "excesiva" debido a la variación de grises en la imagen.	<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 824.00 MPa • Ensayo: 777.52 MPa • Software: 542.71 MPa 	
		


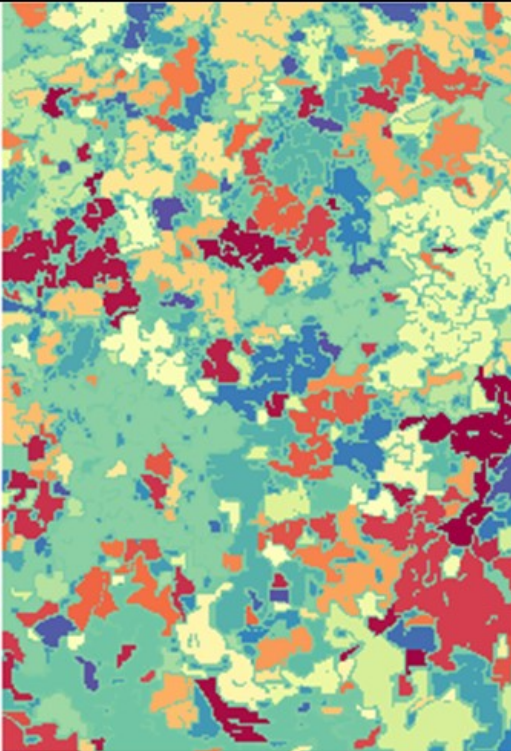
MUESTRA:		1045 NOR	
Tratamiento térmico:		Características del proceso:	
Normalizado. Calentado a 843 °C y enfriado en aire "quieto".		<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 655.33 • Diámetro de grano (µm): 6,93 	
Comentarios:		Resistencia a la tracción:	
Perlita y sorbita (más oscura) sobre matriz de ferrita. Se observa una segmentación parcial, donde algunos elementos corresponden a los reales y otros parecen "excesivos".		<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 797.00 MPa • Ensayo: 729.26 MPa • Software: 545.38 MPa 	
			


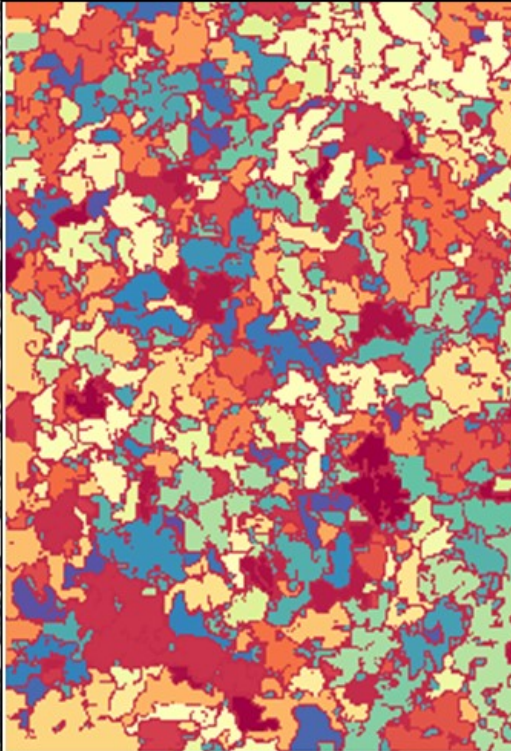
MUESTRA:		1045 TW
Tratamiento térmico:	Características del proceso:	
Temple en agua. Calentado a 843 °C y enfriado en agua a 21 °C.	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 803.67 • Diámetro de grano (µm): 6,27 	
Comentarios:	Resistencia a la tracción:	
Martensita. El software no estuvo en la capacidad de detectar las típicas "agujas" que presenta la martensita, sin embargo, la segmentación se pudo realizar con calidad "aceptable".	<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 1,879.00 MPa • Ensayo: 403.11 MPa • Software: 558.63 MPa 	
		


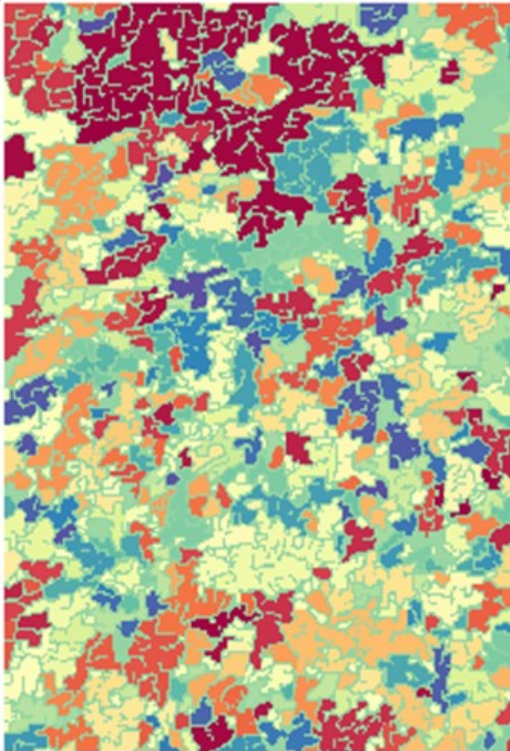
MUESTRA:		1045 TO
Tratamiento térmico:	Características del proceso:	
Temple en aceite. Calentado a 843 °C y enfriado en aceite a 27 °C.	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 883.67 • Diámetro de grano (µm): 5,97 	
Comentarios:	Resistencia a la tracción:	
Martensita con zonas dispersas de sorbita. El software identificó con claridad la sorbita, sin embargo, por lo fino de la martensita, esta no pudo ser detectada adecuadamente.	<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 1,693.00 MPa • Ensayo: 1,388.00 MPa • Software: 565.33 MPa 	
		


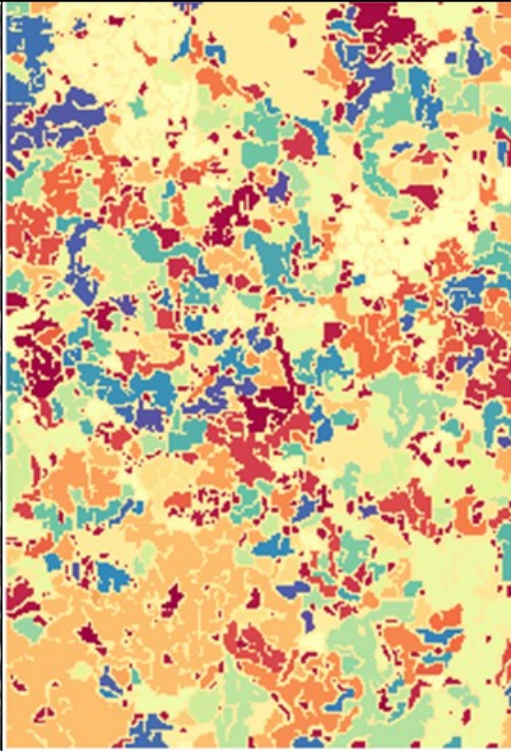
MUESTRA:		1045 ECW	
Tratamiento térmico:		Características del proceso:	
Enfriamiento en agua, desde una temperatura de 750 °C y el agua a 21 °C.		<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 909.33 • Diámetro de grano (µm): 5.88 	
Comentarios:		Resistencia a la tracción:	
Perlita y ferrita libre. Debido a la inexistencia de un grano bien definido, el código distingue solo entre los cambios de tonalidad, dando un resultado parcial.		<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 1,235.00 MPa • Ensayo: 314.35 MPa • Software: 567.46 MPa 	
			


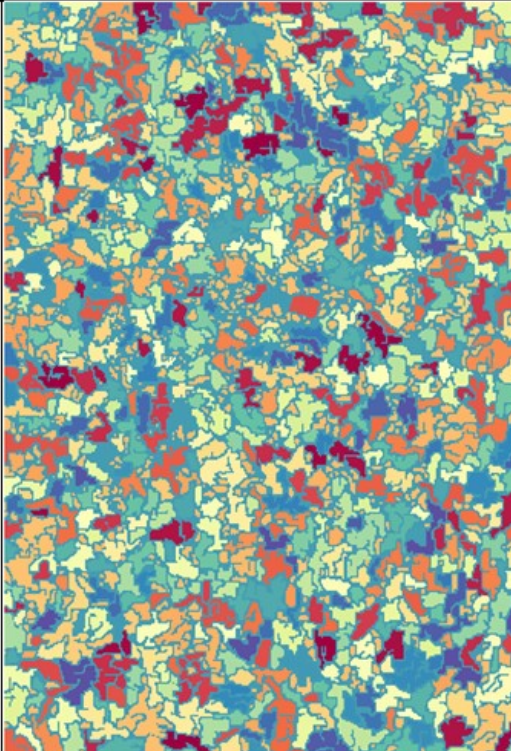
MUESTRA:		1045 ECO	
Tratamiento térmico:		Características del proceso:	
Enfriamiento en aceite, desde una temperatura de 790 °C y el aceite a 27 °C.		<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 699.00 • Diámetro de grano (µm): 6.71 	
Comentarios:		Resistencia a la tracción:	
Perlita de varios tipos, nódulos de troostita y zonas de ferrita libre. Se observa una buena identificación de la arborescencia y límites de la microestructura.		<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 1,151.00 MPa • Ensayo: 1,079.03 MPa • Software: 549.60 MPa 	
			


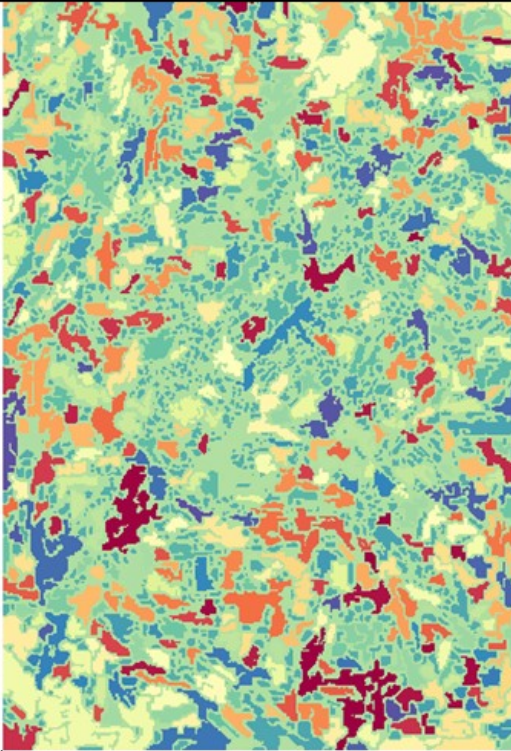
MUESTRA:		1045 BCW	
Tratamiento térmico:		Características del proceso:	
Enfriamiento en agua a 21 °C, desde una temperatura de 700 °C.		<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 644.67 • Diámetro de grano (µm): 6.99 	
Comentarios:		Resistencia a la tracción:	
Estructura ferrítico-perlítica. Mayor proporción de perlita. Perlita tipo bloque. Se puede apreciar una buena segmentación de la microestructura y el resultado de resistencia lo afirma.		<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 1,007.00 MPa • Ensayo: 671.32 MPa • Software: 544.34 MPa 	
			


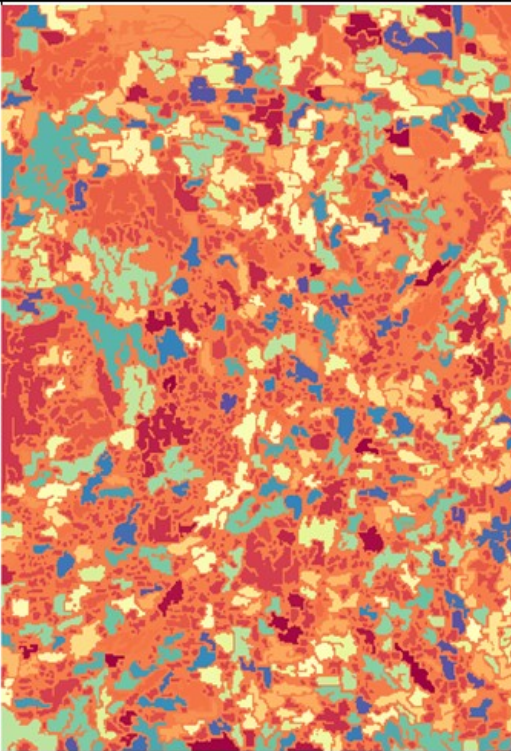
MUESTRA:		1045 BCO
Tratamiento térmico:	Características del proceso:	
Enfriamiento en aceite a 27 °C, desde una temperatura de 700 °C.	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 715.67 • Diámetro de grano (µm): 6.64 	
Comentarios:	Resistencia a la tracción:	
Estructura ferrítica-perlítica. Igual o mayor proporción de ferrita. Como se nota, existe una segmentación. Sin embargo, granos se pudieron haber unido con otros en el proceso.	<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 856.00 MPa • Ensayo: 679.74 MPa • Software: 551.07 MPa 	
		


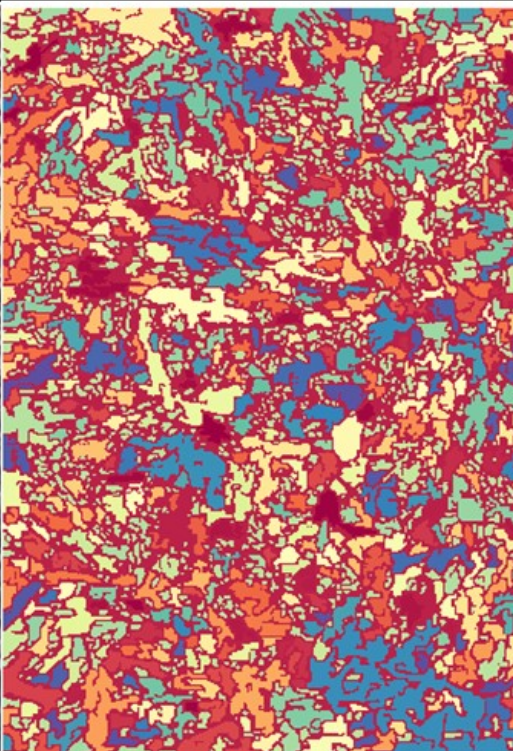
MUESTRA:		1060 EI
Tratamiento térmico:		Características del proceso:
Sin tratar.		<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 884.00 • Diámetro de grano (μm): 5.97
Comentarios:		Resistencia a la tracción:
<p>Pelita en forma laminar y de bloque. Ferrita libre. Se observa una orientación horizontal de los granos. No sé aprecian bien los granos en ninguna de las dos imágenes.</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 905.00 MPa • Ensayo: 972.88 MPa • Software: 589.77 MPa
 <p>Fig. RE-99 1060 EI 400 x</p>		


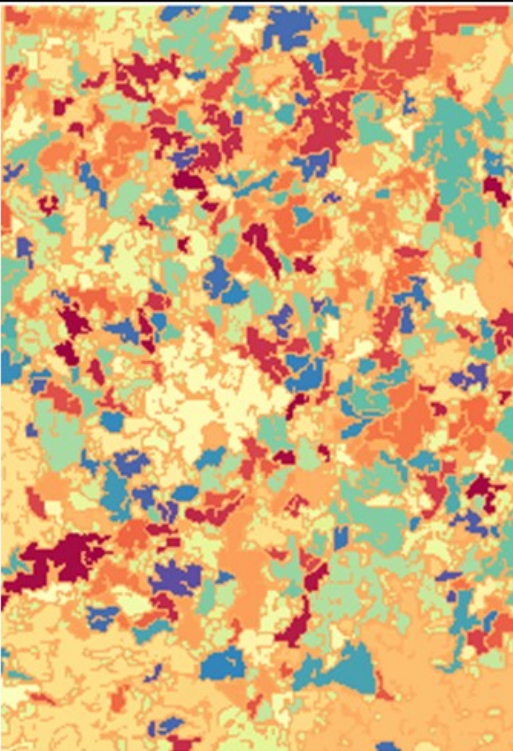
MUESTRA:		1060 NOR	
Tratamiento térmico:		Características del proceso:	
Normalizado. Calentado a 790 °C y enfriado en aire "quieto".		<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 768.00 • Diámetro de grano (µm): 6.41 	
Comentarios:		Resistencia a la tracción:	
Perlita sobre matriz ferrítica. Algunos granos de sorbita. Se puede apreciar que la falta de definición de los límites en la imagen real, impidió una buena segmentación.		<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 913.00 MPa • Ensayo: 895.95 MPa • Software: 584.19 MPa 	
			


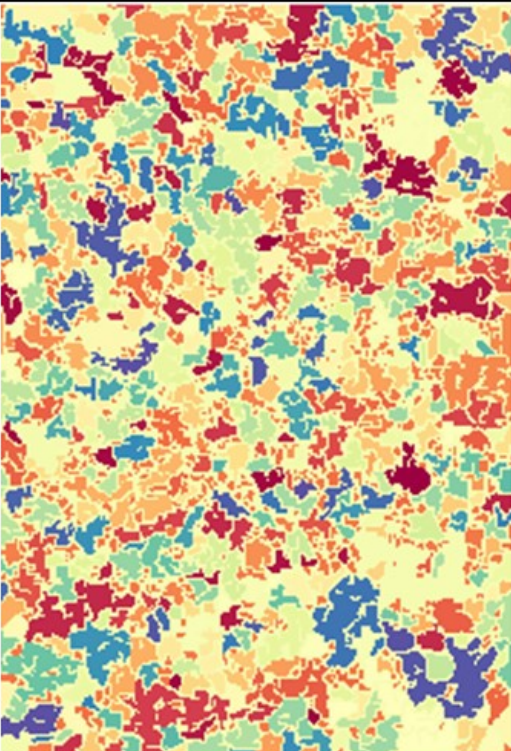
MUESTRA:		1060TW	
Tratamiento térmico:		Características del proceso:	
Temple en agua. Calentado a 790 °C y enfriado en agua a 21 °C.		<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 999.00 • Diámetro de grano (µm): 5.58 	
Comentarios:		Resistencia a la tracción:	
Martensita. Lo fino de la microestructura martensítica impide una segmentación adecuada. Sin embargo, se nota un apetecible esfuerzo del software.		<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 1,879.00 MPa • Ensayo: N/A • Software: 595.09 MPa 	
			


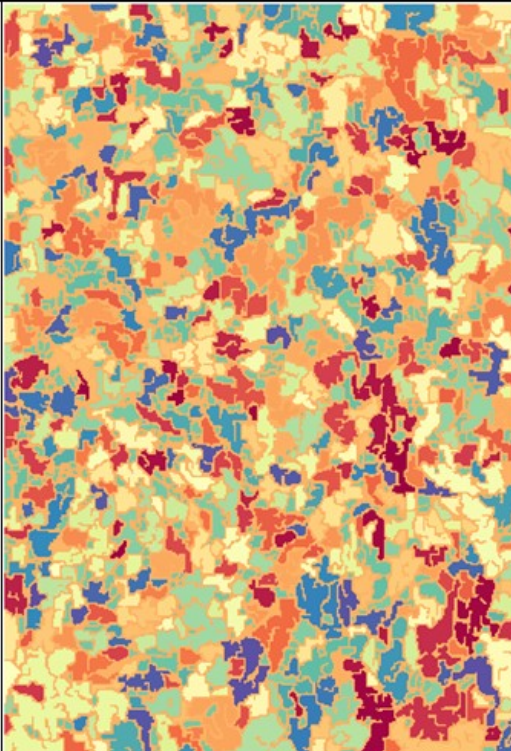
MUESTRA:		1060TO	
Tratamiento térmico:		Características del proceso:	
Temple en aceite. Calentado a 790 °C y enfriado en aceite a 27 °C.		<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 769.67 • Diámetro de grano (µm): 6.41 	
Comentarios:		Resistencia a la tracción:	
Martensita y nódulos de troostita en el borde de grano. Se aprecia una notable facilidad al segmentar los nódulos de troostita, conservando su forma.		<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 1,846.00 MPa • Ensayo: 1,523.66 MPa • Software: 584.27 MPa 	
			


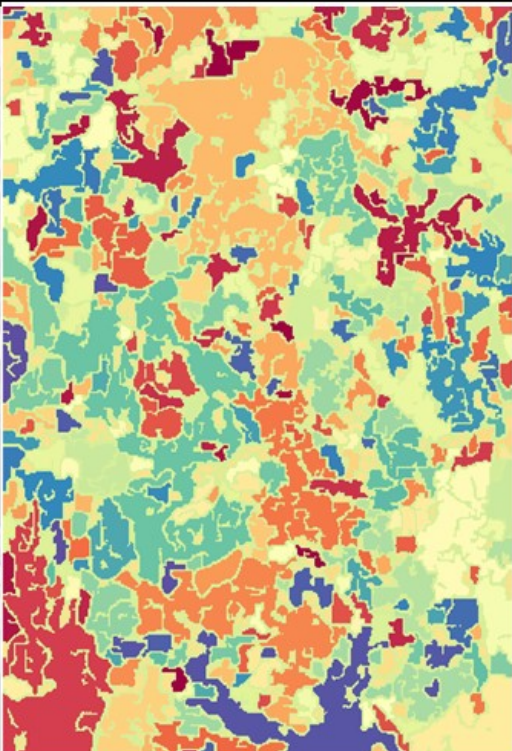
MUESTRA:		1060 ECW	
Tratamiento térmico:		Características del proceso:	
Enfriamiento en agua, desde una temperatura de 730 °C y el agua a 21 °C.		<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 823.33 • Diámetro de grano (µm): 6.19 	
Comentarios:		Resistencia a la tracción:	
Martensita. Ferrita libre y troostita. Se observa una segmentación muy desordenada, en donde pocos elementos corresponden a la imagen original.		<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 1,853.00 MPa • Ensayo: N/A • Software: 586.87 MPa 	
			


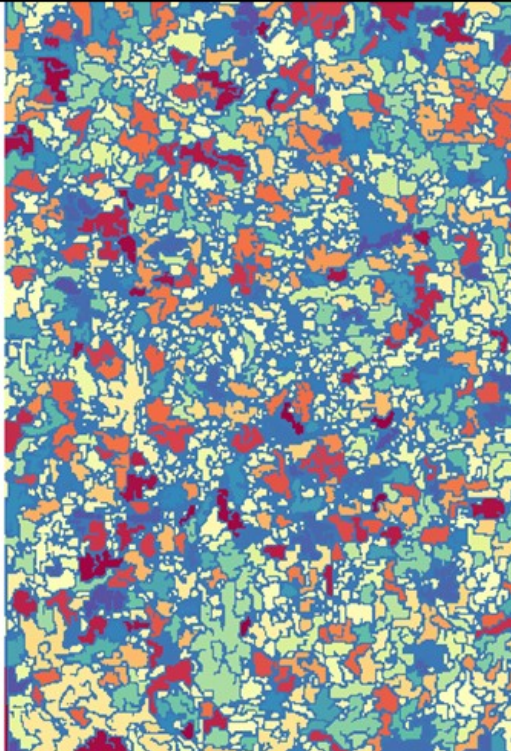
MUESTRA:		1060 ECO
Tratamiento térmico:	Características del proceso:	
Enfriamiento en aceite, desde una temperatura de 790 °C y el aceite a 27 °C.	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 722.67 • Diámetro de grano (µm): 6.60 	
Comentarios:	Resistencia a la tracción:	
Martensita, proveniente de austenización parcial. Nódulos de troostita y ferrita libre. Se pueden identificar pocos elementos con la imagen original.	<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 1,879.00 MPa • Ensayo: 1,135.36 MPa • Software: 581.95 MPa 	
		



MUESTRA:		1060 BCW	
Tratamiento térmico:		Características del proceso:	
Enfriamiento en agua, desde una temperatura de 680 °C.		<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 774.33 • Diámetro de grano (µm): 6.39 	
Comentarios:		Resistencia a la tracción:	
Estructura ferrítico-perlítica. Ferrita en menor proporción. Se aprecia una buena segmentación pero la falta de bordes de grano bien marcados impiden un buen conteo.		<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 1,150.00 MPa • Ensayo: 793.17 MPa • Software: 584.50 MPa 	
			


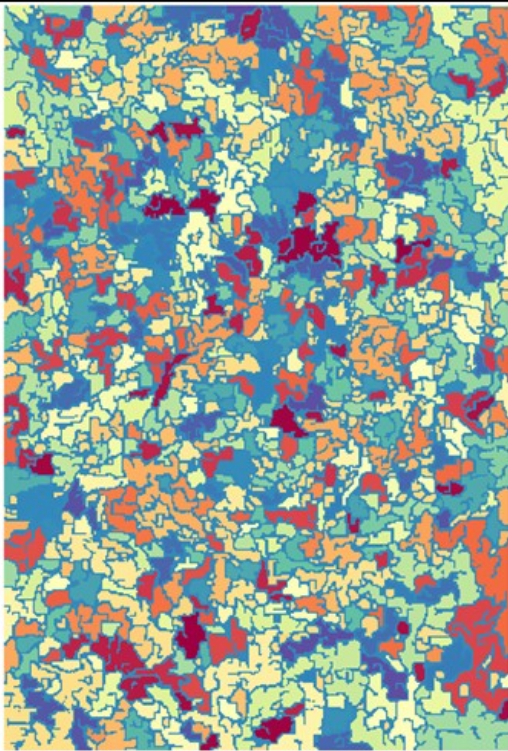
MUESTRA:		1060 BCO
Tratamiento térmico:	Características del proceso:	
Enfriamiento en aceite a 27 °C, desde una temperatura de 680 °C.	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 954.33 • Diámetro de grano (µm): 5.72 	
Comentarios:	Resistencia a la tracción:	
Estructura ferrítica-perlítica. Perlita en todas sus formas. Debido a la complejidad de los granos, se detectan zonas solo por el cambio de tono de gris y zonas blancas.	<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 912.00 MPa • Ensayo: 767.78 MPa • Software: 593.08 MPa 	
		


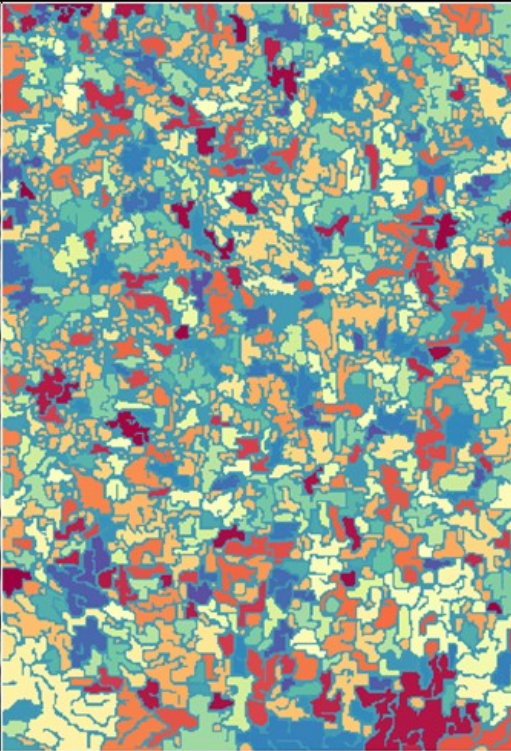
MUESTRA:		1075 EI
Tratamiento térmico:	Características del proceso:	
Sin tratar.	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 952.67 • Diámetro de grano (μm): 5.73 	
Comentarios:	Resistencia a la tracción:	
Estructura perlítica. Perlita laminar y en bloque. Ferrita libre y sorbita. Segmentación parcial de la microestructura. Se destaca la detección de perlita y sorbita.	<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 1,039.00 MPa • Ensayo: 1,108.58 MPa • Software: 593.00 MPa 	
		


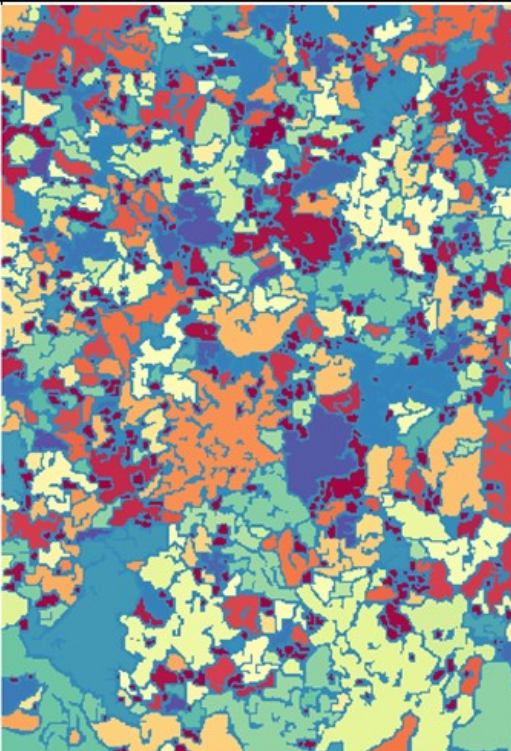
MUESTRA:		1075 NOR	
Tratamiento térmico:		Características del proceso:	
Normalizado. Calentado a 783 °C y enfriado en aire "quieto".		<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 682.67 • Diámetro de grano (µm): 6.79 	
Comentarios:		Resistencia a la tracción:	
Perlita y ferrita. Mas que granos, se destacan zonas "escamadas" o en formas de capas, correspondiente a las colmenas de perlita en su mayoría.		<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 1,068.00 MPa • Ensayo: 1,010.80 MPa • Software: 579.86 MPa 	
			


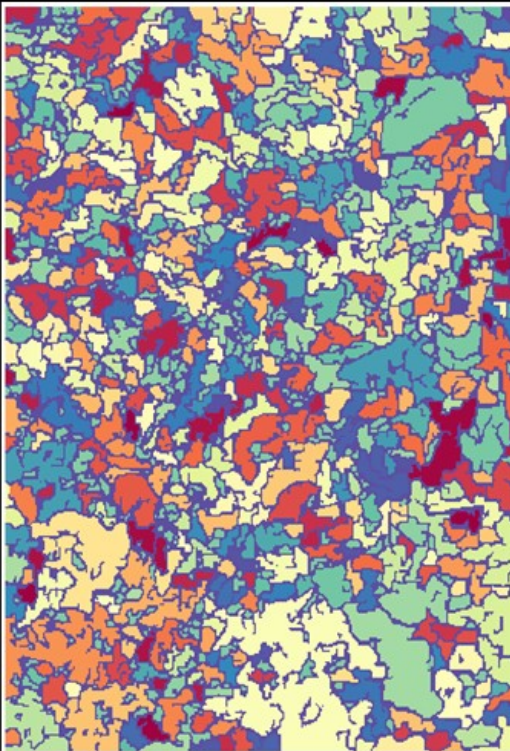
MUESTRA:		1075 TW
Tratamiento térmico:	Características del proceso:	
Temple en agua. Calentado a 783 °C y enfriado en agua.	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 853.67 • Diámetro de grano (µm): 6.08 	
Comentarios:	Resistencia a la tracción:	
Martensita. Se destaca la segmentación de la microestructura a pesa de la dificultad para detectarla, encontrando granos de muy pequeño tamaño.	<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 2,440.00 MPa • Ensayo: N/A • Software: 588.32 MPa 	
		

MUESTRA:		1075T0	
Tratamiento térmico:		Características del proceso:	
Temple en aceite. Calentado a 783 °C y enfriado en aceite a 27 °C.		<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 878.33 • Diámetro de grano (µm): 5.99 	
Comentarios:		Resistencia a la tracción:	
Martensita y granos de troostita. De igual manera, se destaca la detección de martensita parcialmente y una excelente segmentación de la troostita.		<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 2,243.00 MPa • Ensayo: N/A • Software: 589.50 MPa 	
 <p>Fig. RE-143 1075 T0 400x</p>			

MUESTRA:		1075 ECW
Tratamiento térmico:	Características del proceso:	
Enfriamiento en agua, desde una temperatura de 730 °C y el agua a 21 °C.	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 915.33 • Diámetro de grano (µm): 5.85 	
Comentarios:	Resistencia a la tracción:	
Martensita. Ferrita libre. Una segmentación “ambigua”, en donde el resultado parece no coincidir con la imagen original.	<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 2,261.00 MPa • Ensayo: N/A • Software: 591.25 MPa 	
		

MUESTRA:		1075 ECO	
Tratamiento térmico:		Características del proceso:	
Enfriamiento en aceite, desde una temperatura de 730 °C y el aceite a 27 °C.		<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 879.00 • Diámetro de grano (µm): 5.98 	
Comentarios:		Resistencia a la tracción:	
Martensita. Ferrita libre y troostita. Se realizó una detección muy acertada de la troostita, parcialmente de la ferrita y, en algunas zonas, una segmentación pobre de martensita.		<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 2,210.00 MPa • Ensayo: N/A • Software: 589.53 MPa 	
			

MUESTRA:		1075 BCW	
Tratamiento térmico:		Características del proceso:	
Enfriamiento en agua a 21 °C, desde una temperatura de 640 °C.		<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 681.00 • Diámetro de grano (µm): 6.80 	
Comentarios:		Resistencia a la tracción:	
Perlita laminar y en forma de bloques, granos de ferrita. Posible sorbita y/o troostita. Una buena segmentación de la imagen. Se enfatiza la detección de granos pequeños.		<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 1,442.00 MPa • Ensayo: N/A • Software: 579.77 MPa 	
			

MUESTRA:		1075 BCO
Tratamiento térmico:	Características del proceso:	
Enfriamiento en aceite a 27 °C, desde una temperatura de 640 °C.	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento: 400x • Granos aparentes (Na): 758.00 • Diámetro de grano (µm): 6.45 	
Comentarios:	Resistencia a la tracción:	
Perlita laminar, en forma de bloques y algunas, globulares. Granos de ferrita y posible sorbita y/o troostita. Segmentación parcializada con granos "escamados".	<ul style="list-style-type: none"> • Vickers: 1,113.00 MPa • Ensayo: 886.14 MPa • Software: 583.70 MPa 	
		

En base a los resultados anteriormente presentados, se observa que el software tiene dificultades para analizar ciertas microestructuras, exhibiendo una segmentación imprecisa de la imagen estudiada. Se aprecia que este es el caso común en presencia de martensita y sorbita, mas, sin embargo, de ser capaz de delinear ciertas figuras importantes presentes en la microestructura, la varianza tiende a no ser tan elevada para metalografías que cuentan con estas estructuras complejas. Tal es el caso de la muestra 1010 TO, que, a pesar de presentar martensita, también cuenta con ferrita libre que el software pudo delinear con precisión dando una varianza favorable.

Se considera, entonces, que el software, bajo ciertas condiciones, arroja resultados cercanos a la realidad del material. El paso siguiente para el desarrollo de esta herramienta es identificar dichas condiciones y mejorar el programa en función de ello.

4.4 Comparación de los valores obtenidos por la simulación con las propiedades mecánicas obtenidas a partir de ensayos realizados a las muestras

Existe un cúmulo de factores que aportan a la precisión de los resultados simulados. Empezando por la complejidad de las imágenes, ya que, a medida que el acero es aleado con mayores concentraciones de carbono (% C), comienzan a presentarse estructuras con una morfología más compleja. Con relación a esto, al someter la aleación a tratamientos térmicos, se observan estructuras como martensita, troostita, bainita y estructuras ferríticas complicadas.

En base a lo anteriormente mencionado, se contempla el hecho de que el software no identifica cuál es la microestructura que está analizando, por ende, el mismo no está en capacidad de realizar ajustes de acuerdo con la muestra estudiada. Sin embargo, al no tener esta cualidad es capaz de estudiar cualquier micrografía que se le presente sin tener que realizar demasiadas operaciones.

A pesar de que los factores mencionados anteriormente provocan una desviación del valor simulado respecto al real, algunos de los resultados más favorables corresponden precisamente a aceros con estructuras complejas y granos no equiaxiales. Con la intención de comprender por qué algunos resultados presentan altos porcentajes de variación, al parecer, independientemente de la microestructura; se presenta la tabla 3, en la cual se compara únicamente la varianza para cada material con respecto al tratamiento térmico al que fue sometido.

	EI	NOR	TW	TO	ECW	ECO	BCW	BCO
1010	18.59	35.71	31.88	4.91	9.79	2.97	6.86	3.55
1023	18.42	9.68	59.14	34.41	53.87	57.00	29.60	6.71
1045	30.20	25.21	38.58	59.27	80.52	49.07	18.92	18.93
1060	39.38	34.80	N/A	61.65	N/A	48.74	26.31	22.75
1075	46.51	42.63	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	34.13

Tabla 3: Comparación del porcentaje de varianza por muestra de acuerdo con la concentración de Carbono y el tratamiento térmico.

Fuente Andrea L. y Capuzzi J.

Observando la tabla 3 a simple vista, se infiere lo siguiente:

El software solo obtuvo resultados favorables (menor a 5%) para el acero 1010.

En términos generales, el porcentaje de variación de resultados obtenidos mediante simulación con respecto a los valores reales se hace mayor a medida que aumenta la concentración de carbono en la aleación.

El tratamiento BCO aportó las menores varianzas para cada acero, excepto para el acero 1010 que presentó una varianza aún menor para el tratamiento ECO.

Al tomar en cuenta estas observaciones junto con las imágenes segmentadas para cada muestra, se tiene una evidente relación entre la facilidad con la que el software analiza una imagen y la claridad con la que los granos están delineados en dicha

imagen. Esto sin menospreciar el efecto que tiene la complejidad de la microestructura en el proceso de segmentación, ya que, se observa constantemente que la función de Random Walker no logra delimitar correctamente las estructuras martensíticas, las cuales son las más complejas.

Luego de analizar las propiedades del material que afectan al análisis de imágenes, se contempla la posibilidad de que existen factores involucrados al desarrollo del software que influyen en los resultados obtenidos.

Primero, los factores de Hall-Petch utilizados corresponden a acero dulce (utilizado para muestras 1010, 1023 y 1045) y a AISI 1060 (utilizado para muestras 1060 y 1075). Afectando, quizás considerablemente, los cálculos de esfuerzo, puesto que las muestras 1023, 1045 y 1075 no cuentan con apropiada representación al ser estudiadas con la ecuación de Hall-Petch.

El segundo factor a considerar es la relación de 0,7 utilizada para calcular el esfuerzo de tracción de los materiales estudiados. Puesto que la ecuación de Hall-Petch permite conocer el esfuerzo de fluencia, mas no el esfuerzo de tracción, se utilizó este factor que es válido para algunas condiciones de diseño. Sin embargo, para este estudio no necesariamente se cumple para algunas o todas las muestras utilizadas.

Otro factor a considerar más allá de las propiedades de los materiales son las propiedades de las imágenes. Se trabajó con fotografías tomadas al trabajo de grado realizado por Luis Felipe González Jaén debido a no tener acceso a una versión digital de éste. Por esto, las imágenes están “adulteradas” por la cámara utilizada para capturarlas. Las fotografías en cuestión manejan aproximadamente 1200x1600 pixeles (las mismas están presentes en el apéndice C), lo que las clasifica como imágenes de alta resolución. Se hicieron pruebas con distintos valores para la cantidad de pixeles por imagen, y esto demostró que no necesariamente se quiere una imagen de mayor calidad.

Al probar con imágenes de 2500x3500 pixeles, el análisis tomaba cerca de cinco horas y al haber tantos pixeles la función de Random Walker no logra ubicar figuras

dentro de la imagen, debido a que básicamente las líneas se hacen más grandes y el programa comienza a analizar un elemento pequeño, que antes se eliminaba como ruido, como un elemento normal.

El caso opuesto, también presenta dificultades para el programa. Si se reduce la definición de la imagen a 500x600 píxeles, por ejemplo, ocurre lo contrario al caso anterior y el software comienza a eliminar elementos que pueden ser importantes como si fuese ruido de la imagen.

Habiendo mencionado esto, se observó que el software tiene un alto potencial a pesar de las dificultades presentes para el análisis de algunas imágenes. Sin embargo, esto es común en un programa en sus etapas iniciales. Se puede, entonces, comentar algunas herramientas para obtener resultados aún mejores en el futuro:

Machine Learning: se mencionó que el software no está en capacidad de distinguir entre una microestructura y otra, simplemente delimita los límites entre granos. Pero, si se presenta a una base de datos extensa, con la cual se pueda clasificar distintas microestructuras y hacer que el software comprenda esta clasificación, entonces podría crearse un algoritmo que adapte los cálculos a la estructura que se esté estudiando.

Utilizar un método de análisis de imágenes más poderoso: existen varios métodos para el análisis de imágenes por computadora, en el presente trabajo solo se muestra uno. A un modo un tanto especulativo, utilizando un código que permita analizar a mayor profundidad las imágenes permitiría mejorar el proceso presentado. Sin embargo, este código debe ser conseguido/desarrollado.

CONCLUSIONES

Luego de haber cumplido con las fases de la investigación, las cuales fueron planteadas para llevar a cabo el presente trabajo de grado que tiene por objetivo general “Comparar las propiedades mecánicas y microestructurales de un grupo de aceros al carbono mediante una herramienta computacional”, debido a que se notó la ventaja que brindan las herramientas de simulación a los ingenieros en infinidad de labores, esto junto con el reconocimiento de la ciencia de materiales como pilar fundamental de todas las ramas de la ingeniería, motivo por el cual se procede a realizar un estudio documental para conocer la relación entre microestructuras de aceros y sus propiedades mecánicas, siendo esta relación la ecuación de Hall-Petch. Luego se procede al uso de un software desarrollado en Python con la capacidad de estudiar imágenes de microestructuras presentando un análisis de éstas junto con un resumen que incluye la información calculada por el programa. Es así, como se presentan las siguientes conclusiones:

La ecuación de Hall-Petch brinda resultados confiables con los diámetros de grano utilizados, mas no se cuenta con una base de datos para las constantes propias de cada material que necesita esta relación, provocando que algunos de los resultados presenten varianzas significativas con respecto a los resultados de ensayos de tracción.

El software desarrollado a partir de bibliotecas del lenguaje de programación Python demostró ser efectivo para el análisis de imágenes

de microestructuras, teniendo, además, un gran potencial para desarrollar una herramienta de calidad para el análisis metalográfico.

A partir de los resultados obtenidos se comprobó que, al cumplirse las condiciones de una adecuada delimitación entre granos, una adecuada resolución de imagen y una microestructura no demasiado compleja, se puede simular un análisis metalográfico a partir de una herramienta computacional.

Con respecto a los valores simulados de esfuerzo a la tracción, se observa una correlación entre la complejidad de las microestructuras estudiadas y la varianza obtenida a partir de los valores simulados y los resultados reales derivados del ensayo de tracción.

RECOMENDACIONES

Para la comparación de propiedades mecánicas y microestructurales de aceros al carbono se tienen las siguientes recomendaciones:

Continuar con el estudio de materiales para desarrollar una amplia base de datos dónde se tengan las propiedades mecánicas del material y una imagen de la microestructura de este.

Preparar probetas de materiales adecuadamente para el análisis digitalizado, para que el estudio arroje los resultados más precisos posibles.

Continuar con el desarrollo de software de análisis de imágenes para metalografía, aplicando recursos de aprendizaje automático para identificar granos a pesar de las discontinuidades en la intensidad de color dentro de los mismos.

Probar el software desarrollado con otros materiales de ingeniería con el fin de observar el comportamiento de estos materiales según la simulación.

Expandir el presente trabajo incorporando principios de termodinámica, transferencia de calor y metalografía más profunda, llegando a simular el movimiento de las dislocaciones, influyendo en el software y en el análisis de resultados.

Utilizar imágenes digitales obtenidas directamente de un microscopio electrónico, para así evitar la compresión y expansión de éstas, permitiendo al software analizar la imagen con mayor certeza.

Comparar la precisión del software desarrollado con un software comercial de alta confiabilidad como lo es PAX-it.

Incorporar al software herramientas de machine learning, un código para análisis de imágenes de mayor capacidad y una interfaz gráfica, con el fin de aportar un análisis a un nivel más alto junto con una interfaz amigable para el usuario.

APÉNDICE

Apéndice A

Manual para la instalación del software

1) Instalación de WinPython:

Descargar WinPython desde el siguiente link:
<https://winpython.github.io>

Ejecutar el archivo “.exe” descargado en una ubicación segura (preferiblemente como administrador).

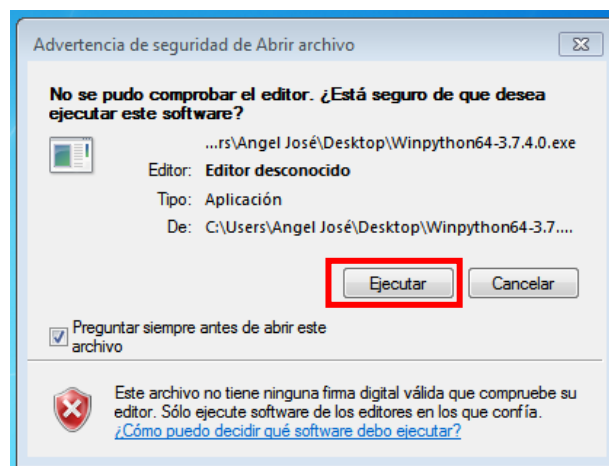


Figura 16: Cuadro de diálogo para ejecutar la instalación de WinPython.

Extraer el contenido comprimido de la aplicación.

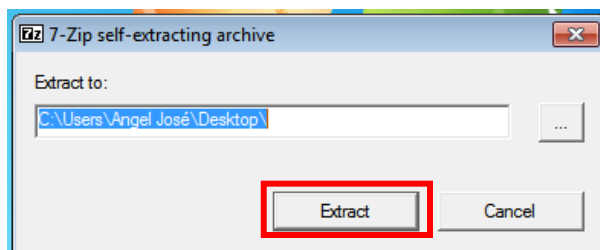


Figura 17: Cuadro de diálogo para la extracción del WinPython.

Se mostrará una nueva ventana en donde se puede observar el progreso de la extracción de la aplicación.

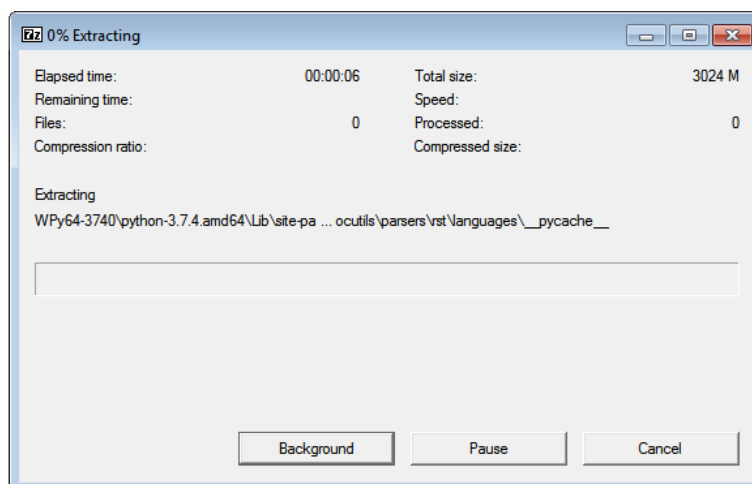


Figura 18: Visualización del proceso de extracción de WinPython.

Después de completado el proceso de extracción, se encontrará una carpeta en la ubicación donde se ejecutó el archivo “.exe” de WinPython. Dicha carpeta contiene una serie de complementos para el producto principal: Python y Spyder.

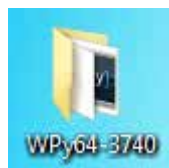


Figura 19: Carpeta extraída de la instalación de WinPython. Contiene una diversidad de aplicaciones, entre ellas, Spyder.

Para registrar el Python de WinPython como el principal, se debe ir a la carpeta recién creada y abrir la aplicación “WinPython Control Panel”. En dicha carpeta, en la parte superior, presionará el menú “Advanced”, y registrará el producto seleccionando la opción “Register distribution”. A su vez, esta acción agregará la carpeta y sus aplicaciones al menú de inicio de Windows.

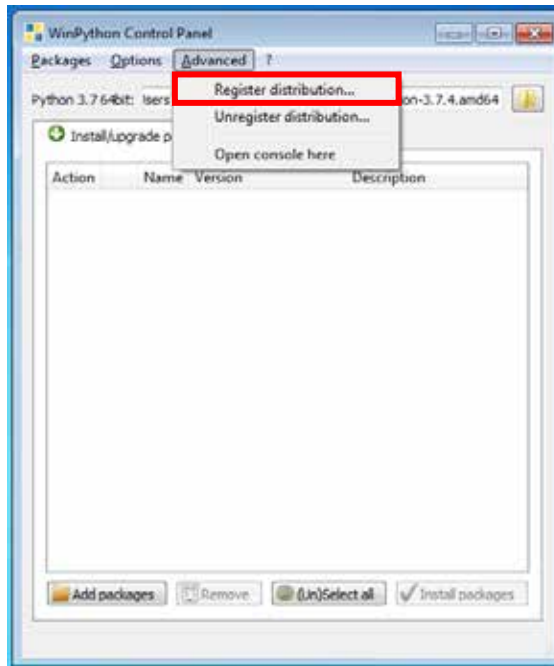


Figura 20: Panel de control de WinPython, en donde se registra el intérprete como principal.

2) Instalación de librerías necesarias

Entrar a la aplicación “WinPython Command Prompt”, la cual se encuentra en la carpeta de WinPython.

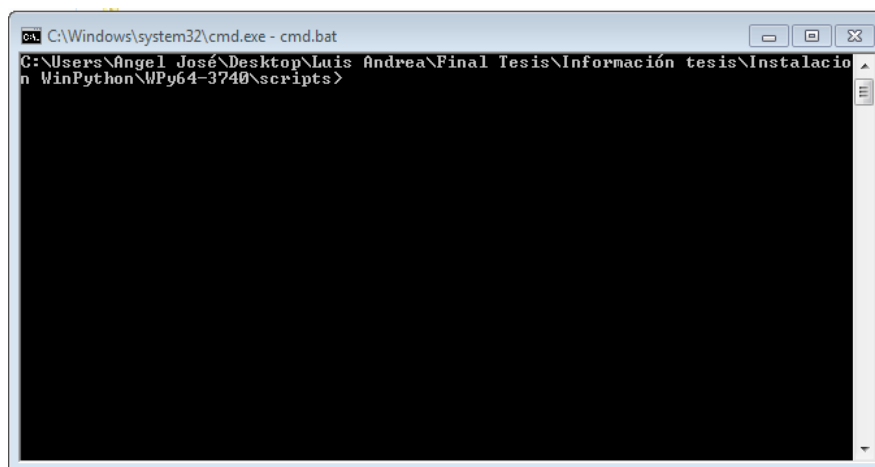


Figura 21: Vista de la aplicación "WinPython Command Prompt", la cual trabaja con el símbolo de sistema de Windows.

Para instalar cualquier librería, se va a usar el método de “pip”. Se utilizará la función “install” del método mencionado, usando la siguiente nomenclatura: “pip install nombre_librería”. Una a una, se van a instalar las siguientes librerías:

Skimage o scikit-image

Numpy

Matplotlib

Sklearn

PyAMG

Scipy

Playsound

Pandas

Muchas de estas librerías requieren de otras librerías para su utilización, pero estas se instalan automáticamente con el comando “pip”. Sin embargo, PyAMG está diseñada con Cython (híbrido entre lenguaje C y Python), lo que requiere la instalación de Visual Studios Build Tools v14.0 o mayor.

3) Previo a la ejecución del código de simulación de propiedades mecánicas

Copiar la carpeta que contiene el código y pegarla en la ubicación más deseable.

La carpeta va a contener: el código a ejecutar, una carpeta llamada “Microestructuras”, una carpeta llamada “Resultados” y un archivo de texto llamado “Constantes de Hall-Petch”. En la carpeta “Microestructuras” el usuario debe guardar las imágenes a utilizar con un nombre que las identifique. En el archivo “Constantes de Hall-Petch”, el usuario tiene la capacidad de agregar las constantes deseadas bajo el siguiente formato: identificación, So, Ky. Si la

identificación es un número (ejemplo: 1060), incluir las comillas al agregarlo (“1060”).

Cabe destacar que las imágenes deben tener área de aproximadamente 5.000 mm² (de acuerdo con la norma ASTM), es decir, el microscopio debe captar un área de 5.000 mm² o en su defecto, cortar la imagen.

Posterior a la ejecución del software, podrá encontrar una carpeta en la carpeta “Resultados” en donde tendrá los resultados numéricos en un archivo de texto y 6 imágenes obtenidas del proceso.

4) Tutorial de uso del código de simulación de propiedades mecánicas

Abrir el archivo de extensión “.py” con el programa Spyder.

Clickear la tecla “F5” para ejecutar el programa.

Seguir las indicaciones del software.

¡Listo!

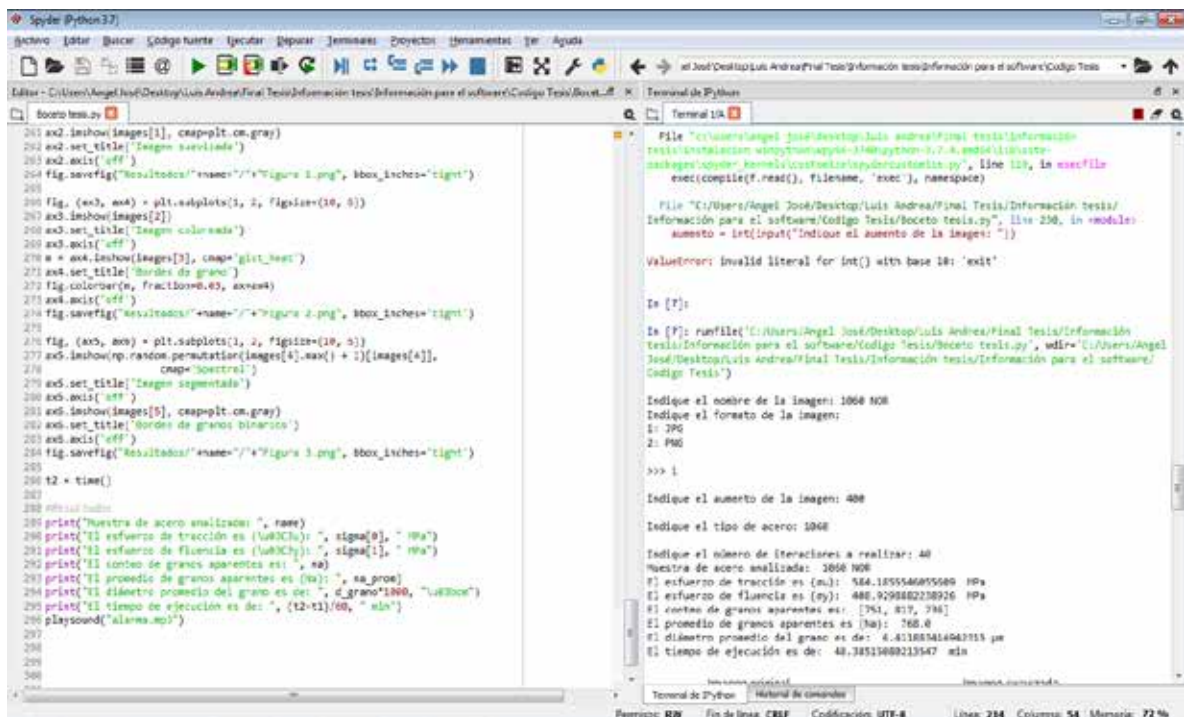


Figura 22: Vista de la ejecución del código en la aplicación de Spyder. En la mitad izquierda, se puede observar el código y, en la mitad derecha, se observa la ejecución del mismo y los resultados.

Apéndice B

Código para el estudio metalográfico de aceros

Apéndice C

Imágenes de las metalografías utilizadas







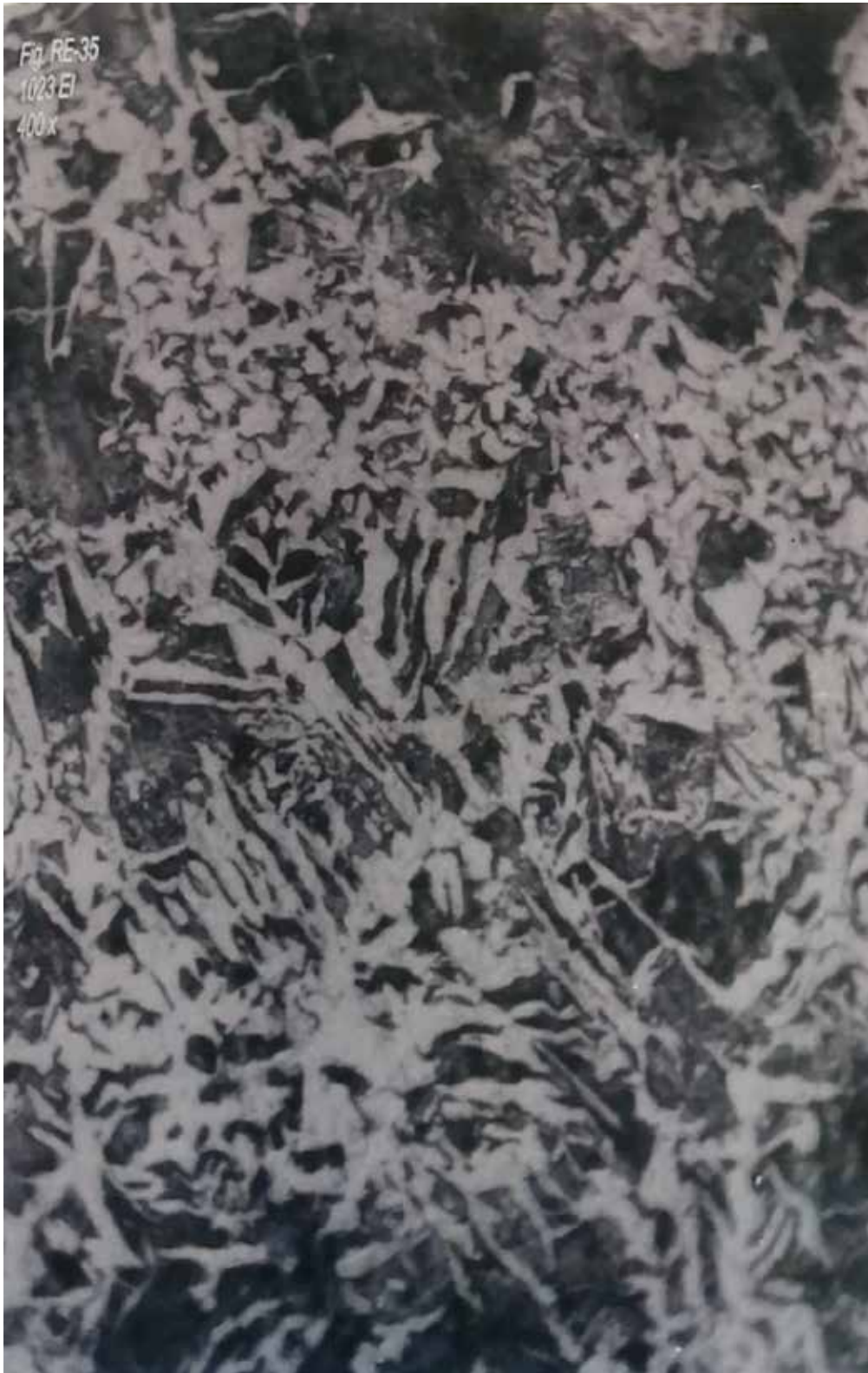
















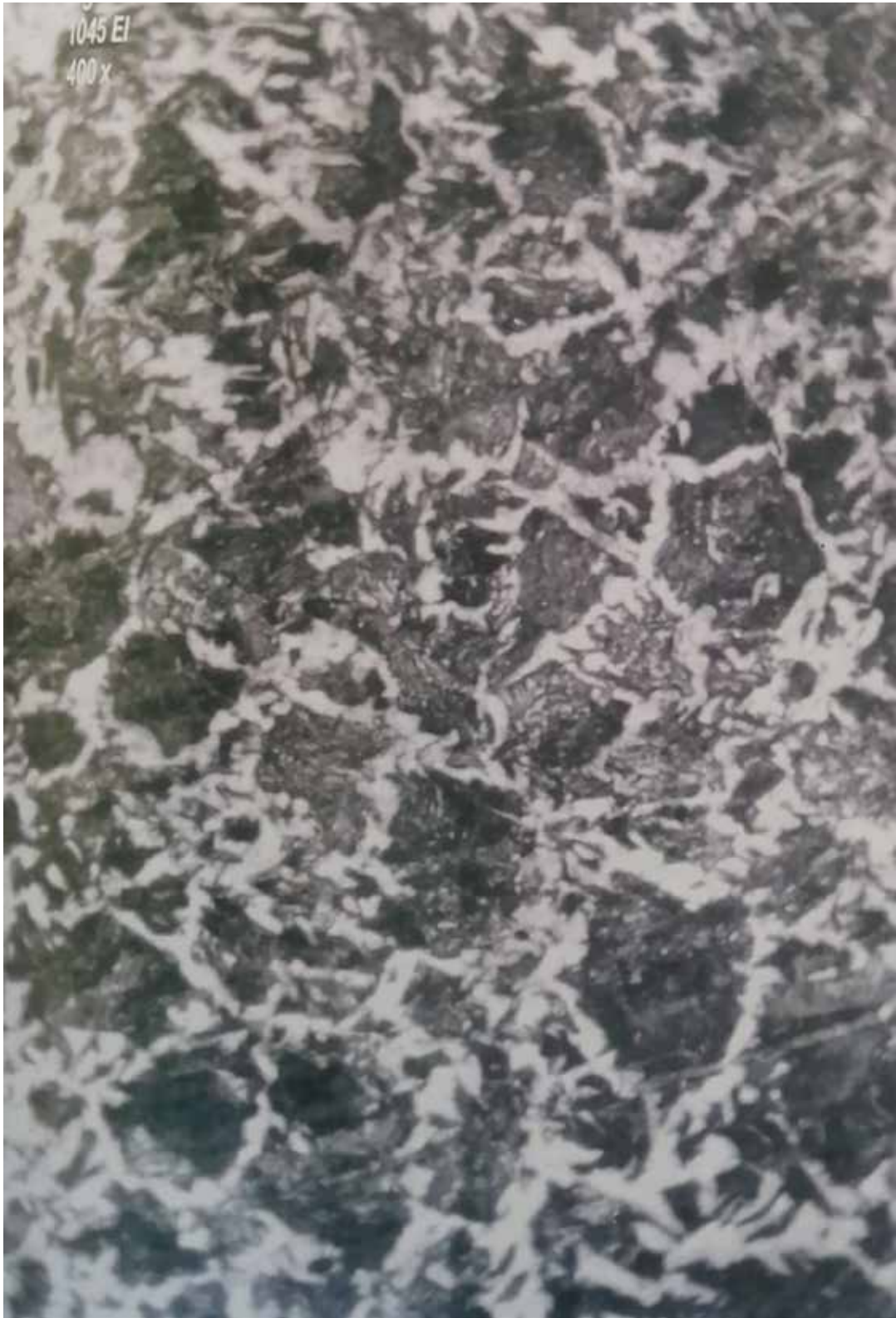


































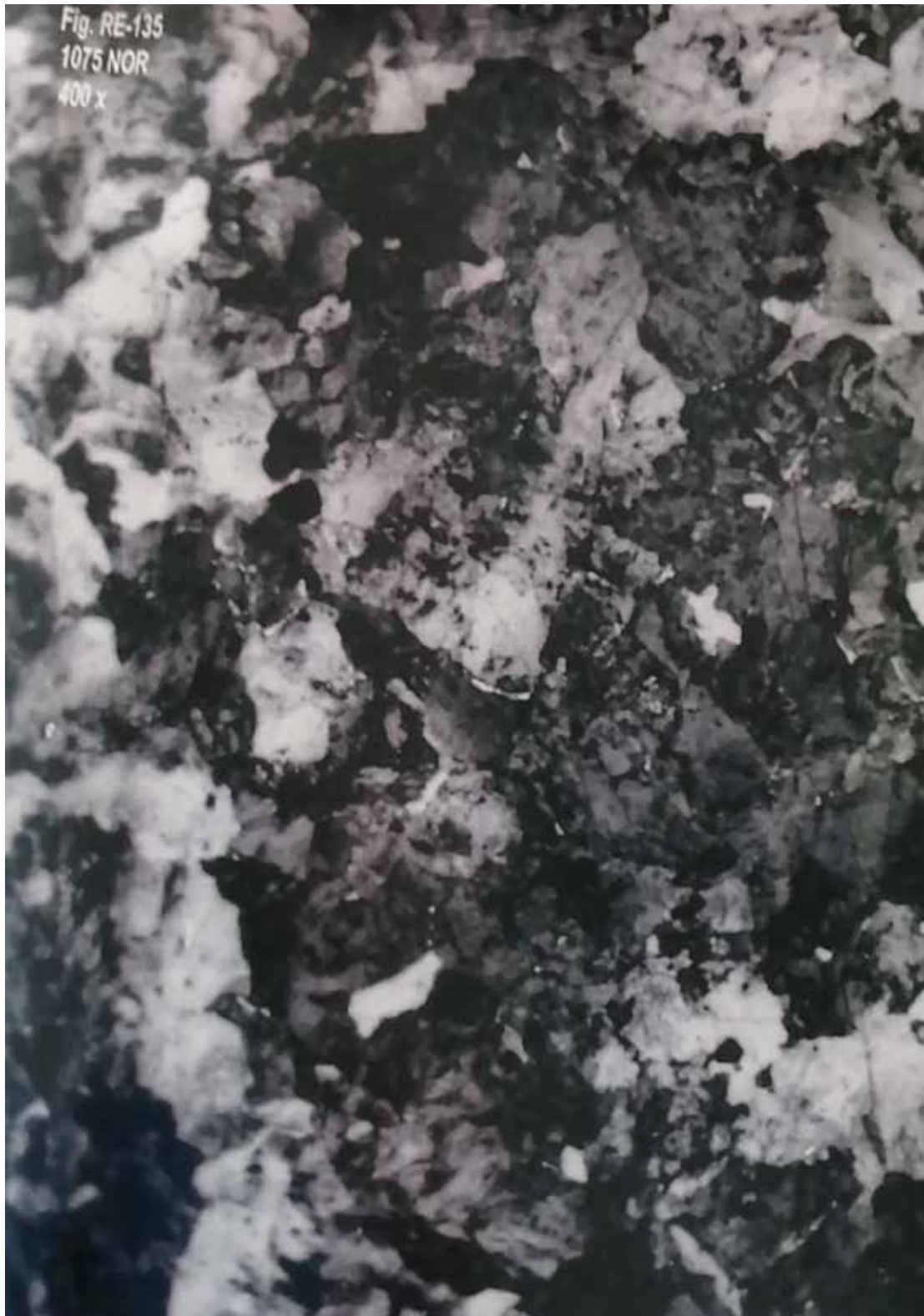
























REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Norma ASTM E3-11. **Guía estándar para la preparación de especímenes metalográficos.** (2017). Estados Unidos de América.
- Norma ASTM E-112. **Método estándar para la determinación del tamaño de grano.** (2013). Estados Unidos de América.
- Norma ASTM E-1382. **Método estándar para la determinación del tamaño de grano promedio utilizando análisis de imágenes automático y semiautomático.** (2015). Estados Unidos de América.
- Norma UNE 7-280-72. **Determinación del tamaño de grano en aceros.** (1972). España.
- Bernal J. y Bernal Pérez M. (2015). **La simulación como herramienta para la mejora en el uso de recursos empresariales. Caso pruebas destructivas de calidad.** Revista Ciencia y Tecnología. México.
- Cattaneo C. (2004). **Evolución del tamaño de grano en aceros eléctricos de bajo carbono.** Trabajo de postgrado. Universidad Nacional de Santiago del Estero. Argentina.
- Finol M. y Camacho H. (2008). **El proceso de investigación científica.** Editorial: Libro de Texto.
- Galán J., Izquierdo L., Izquierdo S., Santos J., del Olmo R., López-Paredes A. y Edmonds B. (2009). **Errors and artefacts in agent-based modelling.** Journal of Artificial Societies and Social Simulation.
- González F. y Sousa W. (2018). **Análisis de efectos que influyen en una junta soldada de acero aisi 1010 con electrodo revestido empleando el método de elementos finitos.** Trabajo de grado. Universidad José Antonio Páez. Venezuela.
- González L. (1997). **Efecto de los tratamientos térmicos de enfriamiento continuo sobre la estructura y las propiedades mecánicas en aceros al carbono hipoeutectoides.** Trabajo de grado. Universidad de Carabobo. Venezuela.

- Hernandez H., Fernandez C. y Baptista P. (2010). **Metodología de la investigación**.
Editorial: McGraw Hill.
- Kalpakjian S. y Schmid S. (2008). **Manufactura, Ingeniería y Tecnología**.
Editorial: Prentice Hall
- Llanos D. (2007). **Fundamentos de informática y programación en C**. Editorial:
Paraninfo.
- Llulluna F. (2014). **Procesamiento de imágenes mediante software libre Python para el análisis metalográfico en aceros de bajo contenido de carbono**.
Trabajo de grado. Escuela Politécnica Nacional. Ecuador.
- Palella S. y Martins F. (2012). **Metodología de la investigación cuantitativa**
Editorial: FEDUPEL
- Rodríguez R., Cabrera J. y Benito J. (2011). **Estudio de la relación Hall-Petch en aceros (0,6%) submicrométricos**. Publicación Ingeniería e Investigación.
- Rojas J. y Martínez R. (2014). **Mecánica 3d: Python y el algoritmo de Verlet**.
Universidad Autónoma de Puebla. Revista Mexicana de Física. México.
- Shanon R. y Johannes J. (1976). **System simulation: The art and science**. IEEE
Transactions on systems, man, and cybernetics.
- Smith W. y Hashemi J. (2006). **Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de los Materiales**. Editorial: McGraw Hill
- Tamayo M. (2003). **El proceso de la investigación científica**. Editorial: Limusa S.A.