



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIOPÁEZ

**SIMULACIÓN NUMÉRICA
COMPUTACIONAL DE LA
RECRISTALIZACIÓN EN ACEROS AISI
1010 (TREFILADO).**

Autores: Abarca Beiker
Díaz Humberto

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 DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**SIMULACION NUMÉRICA COMPUTACIONAL DE LA
RECRISTALIZACIÓN EN ACEROS AISI 1010 (TREFILADO)**

Proyecto de Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de

INGENIERO MECÁNICO

Autores: Abarca Beiker

C.I. 22511461

Díaz Humberto

C.I. 22556019

Tutor: Ing. Donato Romanello

San Diego, Septiembre de 2019



FI-N -003-2019-3CR (TG)

Valencia, 03 de diciembre de 2019

Ciudadanos:
Abarca R. Beiker O.
22.511.461
Díaz R. Humberto J.
22.556.019
Presente-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 02-2019 de fecha 05-09-2019 aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado **SIMULACIÓN NUMÉRICA COMPUTACIONAL DE LA RECRISTALIZACIÓN EN ACEROS AISI 1010(TREFILADO)** presentado por usted (es) como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Se ratifica la designación del Ing. Donato Romanello C.I:4.131.877 como Tutor Académico que los asesorara en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente,

Prof. Luis Lira
Decano de la Facultad de Ingeniería

c.c. Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado (1).

L/a.a.



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

ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Ingeniero Donato Romanello, portador de la cédula de identidad N° V- 4.131.877, en mi carácter de tutor del Trabajo Especial de Grado presentado por los ciudadanos, Díaz R. Humberto J., portadora de la Cédula de Identidad N° V-22.556.019 y Abarca R. Beiker O., portador de la cedula de identidad N° V-22.511.561, titulado **SIMULACION NUMERICA COMPUTACIONAL DE LA RESCRISTALIZACION DE LOS ACERO AISI 1010 (TREFILADO)**. 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 los 27 días del mes de Febrero del año dos mil veinte.

Ing. Donato Romanello

C.I.: V- 4.131.877



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

San Diego, Febrero 2020

ACTA DE REVISIÓN DEL PROYECTO TRABAJO DE GRADO

Quienes suscriben esta Acta, dejan constancia que el proyecto trabajo de grado: **SIMULACION NUMERICA COMPUTACIONAL DE LA RESCRISTALIZACION DE LOS ACERO AISI 1010 (TREFILADO)** ha sido revisado y, cumpliendo con los requisitos exigidos para su aprobación, recomiendan su tramitación ante el organismo académico correspondiente.

Ing. Donato Romanello
Tutor Académico


Firma 20/02/20.
Fecha

Ing. Alicia Pizzella
Tutor Metodológico


Firma 20-2-20
Fecha

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, mis agradecimientos serán para Dios por permitirme alcanzar esta meta que tanto había anhelado, también por el amor recibido y la dedicación con la que cada día se preocupaban mis padres por mi avance y desarrollo en esta tesis, de verdad es simplemente único y se refleja en la vida de un hijo. Debo mencionar y agradecer también a aquellos amigos y familiares que siempre me dieron aliento a lo largo de este viaje, agradezco enormemente a nuestro tutor académico Ing. Donato Romanello por todo su apoyo, sabiduría y sobre todo paciencia en la ejecución de este proyecto, además aquellos profesores que por vocación y amor a la buena educación hicieron de mí una persona más culta, al Ing. Guillermo Valecillo cuyos conocimientos en el área del diseño de simulaciones fueron vitales para que el trabajo llegara a los mejores niveles, no puedo dejar de mencionar a mi amiga y colega Giovanna Pisellini por su total colaboración en todo momento, orientándonos formidablemente en aspectos de redacción y metodológicos. Para finalizar no hay mejor manera de ejecutar un proyecto con éxito si no se cuenta con el mejor equipo, para mí fue un honor trabajar con mi compañero de tesis Humberto Díaz cuya disciplina combinada con una elevada ética de trabajo hizo que nuestra investigación llegara a los mejores niveles de excelencia. Sin más que decir

Quiero agradecer a Dios en primer lugar por permitirme alcanzar esta meta, a mis padres por su confianza y apoyo incondicional a lo largo de mi carrera, por darme fuerzas y enseñarme a nunca rendirme, a mis hermanos por ser ese motor impulsor y ser mi ejemplo a seguir. Agradecer a nuestro tutor académico Ing. Donato Romanello por todo el apoyo, sabiduría y por siempre impulsarnos a alcanzar la excelencia y exigirnos para demostrarnos de lo capaces que somos, debo agradecer al Ing. Guillermo Valecillo por su aporte y asesoría en cuanto al área de simulación, no puedo pasar por alto a mi amiga, compañera y colega Giovanna Pisellini por siempre estar para nosotros en todo momento, por su ayuda incondicional y brindarnos todo su apoyo en momentos críticos, para finalizar no puedo dejar de agradecer a mi compañero Beiker Abarca por su compromiso, ética de trabajo y nunca rendirse antes de alcanzar la culminación de este proyecto sin el nada de esto hubiese sido posible, para mí fue un honor tener un compañero, colega y amigo como el, sin nada más que decir

Gracias a todos....

DEDICATORIA

Queremos dedicar esta investigación a nuestros padres y familiares ya que sin ellos no hubiese sido posible realizarla, y es una pequeña forma de corresponder a todo el esfuerzo y apoyo que nos han brindado para poder alcanzar esta meta y también el esfuerzo que han hecho a lo largo de la carrera para que nosotros hayamos podido seguir estudiando, para nosotros esto es invaluable dado a lo difícil que se ha vuelto hoy en día alcanzar una carrera universitaria es por eso que dedicamos esta investigación a ustedes que son lo más importante para nosotros.

ÍNDICE

CONTENIDO

Pp.

ÍNDICE DE FIGURA.....	x
ÍNDICE DE CUADRO	xi
RESUMEN INFORMATIVO	xii
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO

I EL PROBLEMA.....	2
1.1 Planteamiento del Problema	2
1.2 Formulación del Problema.....	5
1.3 Objetivos de la Investigación	5
1.3.1 Objetivo General	5
1.3.2 Objetivos Específicos	5
1.4 Justificación de la Investigación.....	5
1.5 Alcance.....	6
1.6 Limitaciones	7
II MARCO TEÓRICO	8
2.1. Antecedentes.....	8
2.2. Bases Teóricas	10
2.2.1 Deformación de una Material.....	11
2.2.2 Generalidades del Acero.	11

2.2.3 Clasificación de los Aceros al Carbono.	12
2.2.4 Aplicaciones del Acero de Bajo Carbono.	13
2.2.5 Aceros según las normas AISI-SAE	14
2.2.6 Proceso de Trefilado	16
2.2.7 Tratamiento Térmico	18
2.2.8 Crecimiento durante la recristalización	28
2.2.10 Modelo de Avrami	29
2.2.11 Aplicación del modelo de Avrami	31
2.2.12 Simulación del proceso de recristalización	32
2.2.13 Método de Montecarlo	32
2.2.14 Polígono de Voronoi	37
2.2.15 Modelación Numérica	38
2.2.16 Microsoft Excel	39
2.3 Definición de Términos	40
III MARCO METODOLÓGICO	43
3.1 Tipo de investigación	43
3.2 Diseño de la Investigación	43
3.3 Nivel de la investigación	45
3.4 Población y Muestra.....	45
3.5 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	45
3.6. Fases Metodológicas	46
IV RESULTADOS	49

4.1 Propuesta de los modelos físicos de la recuperación, nucleación y crecimiento de grano del fenómeno de recristalización en aceros AISI 1010.	49
4.2 Utilizar el programa de simulación incorporando los modelos propuestos con la herramienta Montecarlo que permita observar con mayor precisión el fenómeno de recristalización en los aceros AISI 1010	47
4.2.1 Nucleación de los granos	47
4.2.2 Crecimiento de los granos	57
4.3 Comparación de la data real con la proveniente de la simulación numérico computacional modeladas por polígonos de Voronoi.	¡Error!
Marcador no definido.	
CONCLUSIONES	63
RECOMENDACIONES	65
REFERENCIAS.....	61
ANEXOS	63
APENDICES.....	68

ÍNDICE DE FIGURA

FIGURA	Pp
1 Estructura de la nomenclatura AISI-SA.....	13
2 Aleantes principales según AISI-SAE.....	14
3 Estructura de la nomenclatura AISI-SAE para un acero 1040.....	14
4 Curva de variación de la ductilidad para distintos materiales.....	17

5	Fase de tratamiento térmico.....	18
6	Tabla de módulo de cizalla de distintos materiales	24
7	Módulo del vector del Burgers.....	25
8	Estado deformado de un material.....	27
9	Curva típica de recristalización isotérmica.....	29
10	Simulación del Método de Monte Carlo.....	33
11	Algoritmo para el crecimiento de grano de otros estudios.....	34
12	Algoritmo para recristalización de otros estudios.....	35
13	Teselación de Voronoi de un conjunto de puntos aleatorio sobre el plano	36
14	Distribución de energía para la mínima deformación	50
15	Distribución de energía para la máxima deformación	53
16	Curva porcentaje de recristalización en función del tiempo para T=480°C.....	54
17	Curva porcentaje de recristalización en función del tiempo para T=650°C.....	55
18	Representación de los granos a una alta deformación	56
19	Representación de los granos a una baja deformación	57

ÍNDICE DE CUADRO

CUADRO	Pp
1 Aplicaciones del Método de Monte Carlo.....	30
2 Cronograma de actividades.....	48



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

SIMULACIÓN NUMÉRICA COMPUTACIONAL DE LA RECRISTALIZACIÓN EN ACEROS AISI 1010 (TREFILADO)

Autor: Abarca Beiker y Díaz Humberto

Tutor: Ing. Donato Romanello

Fecha: Septiembre 2019

RESUMEN INFORMATIVO

En la actualidad el uso de los aceros de bajo carbono AISI 1010 ha sido de los más comunes, económicos y amplios que se emplean en la industria. Poseen excelente ductilidad, permitiendo que se utilice en la fabricación de muchos objetos desde el más común hasta el más sofisticado. Sin embargo, en revisiones bibliográficas, no hay modelos básicos que permitan simular numéricamente el proceso de recristalización en aceros de bajo carbono que incluya las etapas de recuperación, nucleación y crecimiento del grano en función de la orientación cristalográfica, de la energía almacenada, posición del grano y de las fronteras de grano que involucren los mecanismos de crecimiento de subgrano y el mecanismo de nucleación del grano. Es por ello que se desea realizar una simulación computacional de la recristalización de los aceros AISI 1010. Metodológicamente será una

investigación tipo proyecto factible, sustentada en un diseño de campo y documental y un nivel descriptivo.

Descriptores: Simulación, trefilado, recristalización

INTRODUCCIÓN

Los aceros de bajo carbono AISI 1010 deben poseer las mejores propiedades para que puedan cumplir con todas las exigencias a las que son sometidos, ya sea en los procesos de conformado para la obtención de una pieza final o la presencia de los esfuerzos combinados que se presentan cada cierto tiempo reduciendo la vida útil por efectos de la fatiga en un elemento puesto en funcionamiento. Es por ello que se debe hacer un estudio previo y exhaustivo en lo referente al análisis microestructural, siendo este la base para la obtención de una buena pieza metálica. Así mismo existe un proceso de recristalización el cual le otorgara al material las propiedades mecánicas características de este tipo de aceros. Es por ello que la presente investigación pretende hacer una simulación numérica computacional de la recristalización en aceros AISI 1010 (trefilado).

La investigación está estructurada en cuatro capítulos, los cuales son: Capítulo I donde se plantea el problema, los objetivos generales y específicos, la justificación y el alcance. El capítulo II, donde se presentan los antecedentes, las bases teóricas y la definición de términos. El capítulo III con la metodología de la investigación, que conforma el tipo, diseño, nivel, población y muestra, técnicas e instrumentos de recolección de datos y las fases metodológicas, y por último el capítulo IV que se refiere a los recursos, humanos, materiales, institucionales y el tiempo.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del Problema

En la actualidad el uso de los aceros de bajo carbono AISI 1010 ha sido de los más comunes, económicos y amplios que se emplean en la industria. Poseen excelente ductilidad, permitiendo que se utilice en la fabricación de muchos objetos desde el más común hasta el más sofisticado.

Así mismo, debido que poseen excelentes propiedades mecánicas, tienen muchas aplicaciones ya que con estos se pueden fabricar alambres, barras, soporte de los circuitos integrados, clavos, bulones, remaches, clips de oficinas, también es utilizado como acero estructural en la fabricación de tuberías, en la producción de estructuras metálicas soldadas ya que posee excelente soldabilidad y se aplica también como acero de construcción de maquinarias así como la mayoría de componentes móviles que en ellas coexisten y que se utilizan en toda la industria.

Dichos aceros deben poseer las mejores propiedades para que puedan cumplir con todas las exigencias a las que son sometidos, ya sea en los procesos de conformado para la obtención de una pieza final o la presencia de los esfuerzos combinados que se presentan cada cierto tiempo reduciendo la vida útil por efectos de la fatiga en un elemento puesto en funcionamiento. Es por ello que se debe hacer un estudio previo y exhaustivo en lo referente al análisis microestructural, siendo este la base para la obtención de una buena pieza metálica. A partir de aquí es cuando se introduce un concepto clave conocido

como proceso de recristalización el cual le otorgara al material las propiedades mecánicas características de este tipo de aceros.

Cuando un metal previamente deformado en frío es recocido a una temperatura suficientemente elevada (temperatura de recristalización), surge la aparición de nuevos granos en su microestructura, estos tendrán idéntica composición y estructura reticular que los antiguos granos no deformados. Para poder entender dicho fenómeno con facilidad es necesario el uso de herramientas de modelación que sean capaces de simular el proceso de recristalización tomando en cuenta sus tres etapas que son: recuperación, nucleación y crecimiento del grano. En la actualidad existen pocos modelos, que apoyados en las teorías principales mediante las cuales se explica el proceso de recristalización, puedan simularlo exitosamente de manera aleatoria tomando en cuenta su dependencia con la orientación cristalográfica, energía almacenada, posición del grano y sus fronteras permitiendo así modelar de manera realista el proceso.

Es importante mencionar además que no existen estudios definitivos y concretos sobre los mecanismos ya sea nucleación orientada o crecimiento orientado de formación de fibras de recristalización en los aceros. Experimentalmente, no es fácil dar con el hallazgo de evidencias extensivas de estos dos mecanismos.

De acuerdo a revisiones bibliográficas, no hay modelos básicos que permitan simular numéricamente el proceso de recristalización en aceros de bajo carbono que incluya las etapas de recuperación, nucleación y crecimiento del grano en función de la orientación cristalográfica, de la energía almacenada, posición del grano y de las fronteras de grano que involucren los mecanismos de crecimiento de subgrano y el mecanismo de nucleación de grano.

La no utilización de técnicas de simulación digital aplicada al análisis microestructural en muestras de aceros de bajo carbono, trae como consecuencia una alta dependencia de expertos, la necesidad de aplicar ensayos destructivos, y el uso de equipos y máquinas costosas. Para la industria tener que invertir mucho más tiempo y dinero en la obtención de su materia prima les generaría

problemas, es por ello que la utilización de herramientas de simulación se vuelve vital.

1.2 Formulación del Problema

¿Cómo se pueden obtener resultados del proceso de recristalización en aceros AISI 1010 más precisos y con la menor inversión de tiempo posible?

1.3 Objetivos de la Investigación

1.3.1 Objetivo General

Simular por medio de una herramienta numérica computacional el fenómeno de recristalización en aceros AISI 1010 (trefilado).

1.3.2 Objetivos Específicos

- 1- Proponer los modelos de la recuperación, nucleación y crecimiento de grano del fenómeno de recristalización en aceros AISI 1010.
- 2- Utilizar el programa de simulación incorporando los modelos propuestos con la herramienta Montecarlo que permita observar con mayor precisión el fenómeno de recristalización en los aceros AISI 1010
- 3- Comparar la data real con la proveniente de la simulación numérico computacional modeladas por polígonos de Voronoi.

1.4 Justificación de la Investigación

Es importante conocer el comportamiento del fenómeno de recristalización en los aceros AISI 1010, ya que es uno de los materiales más utilizados en la fabricación de elementos que requieran una mejora en cuanto a ductilidad, como lo son alambres, clips de oficina, barra y tuberías los cuales son muy utilizados en la industria.

En la actualidad los métodos tradicionales para la observación del fenómeno de recristalización no están a la vanguardia de procesos que impliquen el uso de herramientas de simulación computarizada. En cambio, el uso del método de Monte Carlo y los polígonos de Voronoi combinados con Excel como entorno de desarrollo, proporcionaran una excelente y eficaz manera de observación del fenómeno de recristalización. Con la utilización de esta herramienta se busca reducir el número de ensayos físicos ejecutados de manera tradicional, impactando significativamente en cuanto a beneficios económicos a las industrias, ya que a través de estas simulaciones se pueden obtener valores más precisos y una representación gráfica más detallada del fenómeno de recristalización.

Esto a su vez trae grandes beneficios en el ámbito estructural del material ya que este debe cumplir rigurosamente con las exigencias a las que será sometido ya sea al momento de su fabricación como posteriormente al momento de su funcionamiento. En cuanto a lo académico, podemos mencionar que, gracias a los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera universitaria, surgió la capacidad de poder estudiar el fenómeno de la recristalización a través de la simulación numérica computacional.

Con respecto a lo técnico, la implementación de la simulación numérica computacional sirve para facilitar el diseño de elementos que requieren las propiedades que otorga el fenómeno de recristalización. Esto le suministra una vital ayuda al profesional y cualquier industria que trabaje con proceso conformado ya sea en trefilado o laminación, para tener un punto de partida y saber hasta dónde se puede deformar el material sin que haya una fractura o falla que pueda afectar el proceso de manufactura.

En el ámbito metodológico esta investigación puede servir de base para futuras investigaciones relacionadas con el tema, específicamente al estudio del fenómeno de recristalización mediante la simulación numérica computacional.

1.5 Alcance

Para este estudio se trabajará únicamente con aceros AISI 1010 en condición de recocido durante un proceso de trefilado, donde simularemos por medio del método de Monte Carlo y la representación gráfica por polígono de Voronoi utilizando la herramienta Excel como entorno de desarrollo.

1.6 Limitaciones

Para que la simulación computarizada se ejecute de manera adecuada es necesario tener un ordenador o computadora que cumpla con las características en cuanto a capacidad para que se ejecute el programa sin que afecte el resultado. El material en estudio debe ser correctamente tratado en el proceso de recocido para que la data obtenida sea lo más precisa posible.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Dentro de esta perspectiva, toda investigación debe basarse en teorías y estudios anteriores o en su defecto en situaciones ocurridas anteriormente que generan consecuencias a partir de las cuales se puede dar paso a nuevos estudios. El marco teórico es integrar el tema de la investigación con las teorías, enfoques teóricos, estudios y antecedentes en general que se refieren al problema de investigación. En tal sentido el marco teórico según Tamayo y T. Mario (2010) lo define como la teoría del problema “respaldo que se pone al problema”. El marco teórico nos ayuda a precisar y a organizar los elementos contenidos en la descripción del problema, de tal forma que puedan ser manejados y convertidos en acciones concretas.

2.1. Antecedentes

Inicialmente, Salas Adriana (2001) en su investigación titulada **Simulación por elemento finito del comportamiento plástico de un acero de bajo carbono galvanizado** empleando el paquete comercial ABACUS CAE para crear un modelo bidimensional que simule las pruebas de tensión uniaxial presentes en el material, para optar al título de maestro en ciencias de la ingeniería mecánica con especialidad en materiales. Tesis presentada ante la Universidad Autónoma de Nuevo León. En dicho trabajo se pudo evaluar a través del mencionado entorno de modelación los campos de esfuerzo y deformación

de este, también utilizo dos modelos o ensayos, uno de acuerdo a una malla de 2mm X 2mm, la cual fue dibujada en una de las caras de las muestras, y el otro de acuerdo a la forma, tamaño y distribución de los granos del recubrimiento de zinc. Es decir, primeramente se realizaron ensayos físicos con probetas y sus resultados fueron comparados con la simulación computacional. Dicha investigación es de gran aporte ya que su contenido relacionado con los ensayos físicos y sus resultados nos sirven como apoyo teórico y comparativo con nuestro trabajo a medida que avancemos.

Por otra parte Villareal Oscar (2002) ha estudiado el fenómeno de la **recristalización en cintas de acero laminado en frío 1006 en hornos de recocido tipo campana**, involucrando la influencia que tiene el tiempo y la temperatura sobre el crecimiento del grano, dureza, propiedades mecánicas y la relación de aspecto de grano para una cinta de acero SAE 1006 laminada en frío aplicando un proceso de recocido a tres rangos de temperatura 630°C, 670°C y 710°C, así como el efecto de una zona de precalentamiento antes de efectuar el proceso de recocido a 400°C por una hora. Observo entonces que el crecimiento del grano se ve afectado principalmente por la temperatura del proceso y tiempos muy prolongados, así como la relación de aspecto que está más influenciada por el tiempo de proceso, dichos factores son de gran importancia para determinar el avance de recristalización del acero. Investigación realizada en la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Siguiendo con la propuesta con respecto a estudios de modelado De Cock Tommy (2008) realizó una investigación en donde **estudio y modelizo el proceso de recristalización estática de aceros ferríticos laminados en frío**, presentada ante la universidad complutense de Madrid en donde vale la pena remarcar el buen uso que se dio a las leyes de la recristalización las cuales se basan en una serie de requerimientos para que se pueda producir la recristalización y que tiene fácil explicación si se le considera un proceso de

nucleación y crecimiento controlado por la activación térmica y cuya fuerza motriz es la energía almacenada en forma de dislocaciones, estos requerimientos también toman en cuenta parámetros del material importantes del proceso como son el grado de deformación, velocidad de deformación, la orientación de los granos y su textura, tamaño de grano inicial, condiciones del recocido, influencia de elementos en solución sólida entre otros, haciendo uso además del modelo teórico de Avrami que explica la cinética de recristalización en metales analizando todo proceso de transformación basado en la nucleación y el crecimiento por medio de un grupo de ecuaciones matemáticas.

Por último, Montaña Ixchel (2010) en su tesis doctoral titulada: **“Simulación de la recristalización en aceros BCC”**, presentada ante el Instituto politécnico nacional de México, pudo desarrollar un programa capaz de simular cualquier condición de simulación para la recristalización obteniendo buenos resultados, comprobando así que de acuerdo a la evolución microestructural de las micrografía simuladas el mecanismo predominante es el de migración de frontera de grano inducido por esfuerzo el cual puede ser observados en las estructuras bcc

2.2.1 Deformación de una Material.

Según Mangonon (2010) “La deformación plástica es el proceso de dar una forma específica a un material”, es uno de los procedimientos tecnológicos más importantes en la producción de numerosos artículos de consumo tales como automóviles y electrodomésticos. El proceso de deformación involucra el flujo y la redistribución del material por medio de esfuerzos, haciendo que el material sufra cambios en la microestructura, su estructura cristalográfica y sus propiedades mecánicas.

Industrialmente, el proceso de conformado ya sea laminado, extruido o conformado de un material es comúnmente llamado trabajado. Cuando un material se deforma plásticamente tiende a hacerse más duro, pero la intensidad de endurecimiento disminuye conforme la temperatura aumenta. Al deformar un material a una temperatura alta, dos efectos opuestos tienen lugar al mismo tiempo: uno de endurecimiento debido a la deformación plástica y otro de reblandecimiento debido a la recristalización.

2.2.2 Generalidades del Acero.

El acero es básicamente una aleación o combinación de hierro y carbono (Alrededor de 0,05 % hasta menos de un 2 %). Por lo tanto, el material metálico más importante para la industria es el acero al carbono. El carbono es el elemento principal que modifica las características mecánicas del acero, cuanto mayor es el porcentaje de carbono mayores serán la resistencia y la dureza del acero, pero también será más frágil y menos dúctil.

El acero al carbono es una aleación de composición química compleja. Además de hierro, hay en él muchos elementos cuya presencia se debe a los procesos de su producción (manganeso y silicio), a la dificultad de excluirlas

totalmente del metal (azufre, fósforo, oxígeno, nitrógeno e hidrógeno) o a circunstancias casuales (cromo, níquel, cobre y otros).

Los aceros al carbono pueden utilizarse con éxito si la resistencia y otros requerimientos mecánicos no son demasiado severos. Estos aceros tienen un costo relativamente bajo, el acero combina la resistencia y la posibilidad de ser tratado, lo que se presta para fabricaciones mediante muchos métodos. Además, sus propiedades pueden ser manejadas de acuerdo a las necesidades específicas mediante tratamientos con calor, trabajo mecánico o mediante aleaciones.

2.2.3 Clasificación de los Aceros al Carbono.

Aceros altos en carbono.

Los aceros altos en carbono contienen entre 0,60 % y 1,4 % C y son más duros, resistentes y aún menos dúctiles que los otros aceros al carbono. Casi siempre se utilizan en la condición templada y revenida, en la cual son especialmente resistentes al desgaste y capaces de adquirir la forma de herramienta de corte. Las herramientas y las matrices se fabrican con aceros aleados altos en carbono que contienen, generalmente, cromo, vanadio, tungsteno y molibdeno, estos elementos de aleación se combinan con el carbono para formar carburos muy duros resistentes al desgaste.

Aceros medios en carbono

Los aceros medios en carbono tienen porcentajes en carbono comprendidos entre 0,25 % y 0,6 %. Estos aceros pueden ser tratados térmicamente mediante austenización, temple y revenido para mejorar sus propiedades mecánicas. Se suelen utilizar en la condición de revenidos, con microestructura de martensita revenida. Se trata de aceros de baja templabilidad, solo tratables en piezas de delgada sección y velocidades de temple muy rápidas. Las adiciones de cromo, níquel y molibdeno mejoran la capacidad de estas aleaciones para ser tratados térmicamente, generando así gran variedad de combinaciones resistencia-

ductilidad. Estos aceros tratados térmicamente son más resistentes que los aceros bajos en carbono, pero menos dúctiles y tenaces.

Aceros bajos en carbono

La mayor parte de todo el acero fabricado es bajo en carbono. Este tipo de acero contiene menos del 0,25 % C, no responde al tratamiento térmico para formar martensita y es endurecible por acritud. La microestructura consiste en ferrita y perlita. Como consecuencia, estos aceros son relativamente blandos y poco resistentes, pero con extraordinaria ductilidad y tenacidad; además son de fácil mecanizado, soldables y baratos. Estos aceros suelen tener un límite elástico de 275 MPa, una resistencia a la tracción comprendida entre 415 MPa y 550 MPa y una ductilidad del 25 %.

2.2.4 Aplicaciones del Acero de Bajo Carbono.

Dentro de las aplicaciones para el que es usado el acero de bajo carbono (0.15 %C Máx.) se encuentra en la producción de alambres de acero. Para la realización del alambre con aceros al carbono o de aleaciones se utiliza la designación del Instituto Americano del Hierro y el acero (AISI) o el de la Sociedad Norteamericana de Ingenieros Automotores (SAE). Estos alambres de acuerdo a las cualidades buscadas, pueden ser producidos por laminación en frío o en caliente, trefilado, extrusión, forja en frío o en caliente, tratamiento térmico y carburación para la producción de una variedad de productos entre los cuales se encuentra el refuerzo estructural de edificaciones.

Aunque normalmente el alambre de acero es desarrollado con una sección transversal redonda, también puede ser desarrollado en otras formas de acuerdo a los requerimientos. Luego de la sección transversal circular, las formas más comunes son cuadrado, hexagonal, octogonal, oval, triangular y adicionalmente a estas formas simétricas, también se desarrolla en formas irregulares o extrañas para propósitos específicos.

Los aceros de bajo carbono están clasificados en cuatro diferentes grupos, de acuerdo con el sistema de designación AISI:

Serie 1000, las cuales son aceros de bajo carbono conteniendo un máximo de 1.00% de manganeso.

Serie 1100, son aceros al carbono resultados.

Serie 1200, son resultados y refosforizados.

Serie 1500, las cuales son de alto manganeso (arriba de 1.65) y son no resultados.

2.2.5 Aceros según las normas AISI-SAE

La clasificación es la distinción precisa de cada tipo, grado o clase de acero que viene dado por un número, un nombre o una combinación de caracteres alfanuméricos que denominan o designan un acero en específico. Dentro de la industria esta clasificación tiene vital importancia porque nos permite conocer las cualidades, propiedades y posibles aplicaciones de un acero determinado.

Esta norma recibe su nombre por las organizaciones que la crearon, es decir, el Instituto Americano del Hierro y el Acero, y la Sociedad de Ingenieros Automotores (AISI y SAE, por sus siglas en inglés). En esta nomenclatura los aceros se clasifican empleando cuatro dígitos. (Ver figura 1)

El primero corresponde a la aleación principal, seguida de un dígito que indica una modificación a ésta y los dos últimos que representan el porcentaje de carbono.

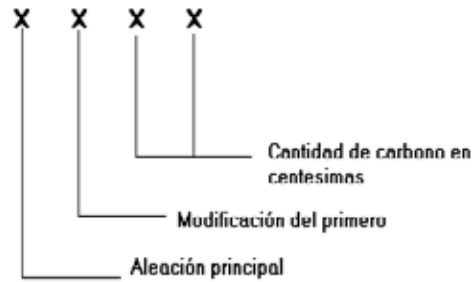


Figura 1. Estructura de la nomenclatura AISI-SAE.

Fuente <https://ingemecanica.com>

Aunque existen diferentes tipos de aleaciones principales, la norma AISI-SAE designa nueve grandes tipos, identificados con un dígito del 1 al 9, tal como se muestra en la figura 2.

Designación SAE	Aleación Principal
1XXX	Carbono
2XXX	Níquel
3XXX	Níquel-Cromo
4XXX	Molibdeno
5XXX	Cromo
6XXX	Cromo-Vanadio
7XXX	Tungsteno-Cobalto
8XXX	Níquel-Cromo-Molibdeno
9XXX	Manganeso-Silicio

Figura 2. Aleantes principales según AISI-SAE.

Fuente. <https://ingemecanica.com>

Entonces, suponiendo que se tiene un acero SAE 1040, se puede deducir la composición de dicho material quedando como se muestra en la figura 3.

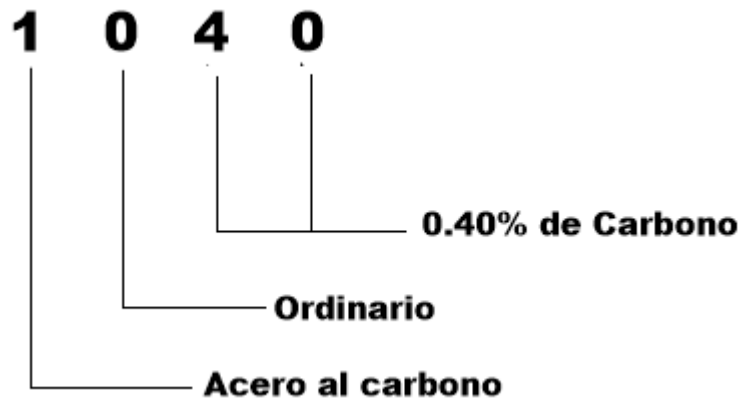


Figura 3. Estructura de la nomenclatura AISI-SAE para un acero 1040

Fuente <https://ingemecanica.com>

2.2.6 Proceso de Trefilado

El trefilado en frío consiste en el estirado del material de partida a través de aberturas cónicas de menor sección, las denominadas hileras o trefilas, con el objetivo de reducir su sección. El material inicial suele ser alambrón. El alambrón es un producto metálico que se obtiene por un proceso de laminación en caliente gracias a un tren especialmente diseñado para este efecto, conocido como tren de laminación de acero, el alambrón tiene sección circular u ovalada que varía entre los 5 mm y 30 mm de diámetro exterior, el cual suele estar enrollado en bobinas de cientos de metros.

El origen del alambroón está en el proceso de colado y subsecuentemente de la Palanquilla allí formada, la cual es precalentada en un horno, usualmente a gas, que la calienta luego es pasada por varios rodillos que giran en sentidos inversos y que, aparte de esta condición de rotación ejercen una presión perpendicular al eje del alambroón, hasta obtener su forma y dimensión final. Cuanto menor es la sección que se desea obtener mayor será el número de cilindros requeridos, es importante recalcar además, que este proceso de conformado se realiza con el metal caliente, para de esta manera disminuir los esfuerzos y la energía mecánica requerida para conformarlo, sin embargo su temperatura es cuidadosamente controlada ya que un excesivo calor determinaría una adherencia a los rodillos así como un eventual deterioro de los mismos, usualmente estos rodillos son elaborados en aceros aleados con cromo níquel y molibdeno y son conformados por colado, como es evidente, suelen estar adecuadamente refrigerados por su interior.

Además del conformado anteriormente descrito es necesario controlar las condiciones de enfriamiento para que el alambroón de acero sea dúctil ya que un enfriamiento rápido puede provocar un endurecimiento irregular que se traduce en fragilidad del producto. La composición del alambroón de acero puede variar según la aplicación y el proceso utilizado, pero suele ser corriente encontrarlo con contenidos de carbón de alrededor de 0,8 %, proporciones de otros elementos como el fósforo del 0,48 %, Manganeso del 0,30 % entre otros.

Los pasos que se siguen en el proceso de trefilado del alambre son:

Pre-tratamiento del alambroón (descascarillado mecánico, decapado)

Estirado (trefilado).

Tratamiento térmico (recocido continuo/discontinuo, temple, patenting, temple en aceite).

Acabado (revestimiento superficial).

El endurecimiento por deformación en frío, es el fenómeno por medio del cual un metal dúctil se vuelve más duro y resistente a medida que es deformado

plásticamente, debido a que la deformación se da a una temperatura “fría” relativa a la temperatura de fusión absoluta del metal.

Esta variación de resistencia se mide en función del porcentaje de deformación en frío, el cual se define de la siguiente forma:

$$\% \text{ Deformación en frío} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100 \quad (\text{Ec.1})$$

Donde:

A_0 Es el área transversal antes de la deformación.

A_f Es el área transversal después de la deformación.

Es importante mencionar que la resistencia del material varía según sus características propias (Ver Figura 4) y aumenta con el porcentaje de trabajo en frío, sin embargo la ductilidad del material disminuye.

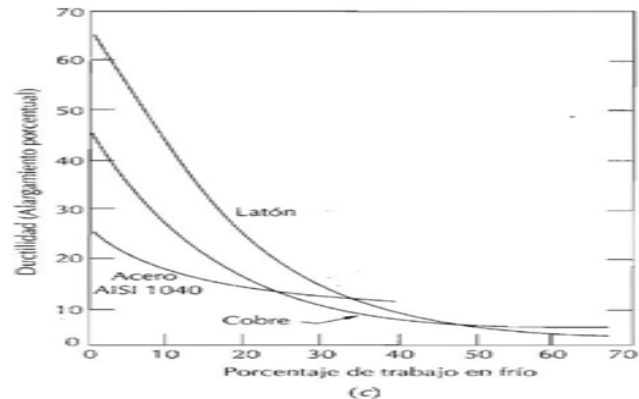


Figura 4. Curva de variación de la ductilidad para distintos materiales.

Fuente Speich y M. Fisher (1966)

2.2.7 Tratamiento Térmico

El tratamiento térmico es la operación de calentamiento y enfriamiento de un metal en su estado sólido para cambiar sus propiedades físicas. Con el tratamiento térmico adecuado se pueden reducir los esfuerzos internos, el tamaño del grano, incrementar la tenacidad o producir una superficie dura con

un interior dúctil. En general, un tratamiento térmico consiste en calentar el acero hasta una cierta temperatura; mantenerlo a esa temperatura durante un tiempo determinado y luego enfriarlo, a la velocidad conveniente. Los tratamientos térmicos pueden dividirse en dos grandes grupos:

Tratamientos sin cambio de composición, es decir, aquellos en cuyo tratamiento no varían los componentes.

Tratamientos con cambio de composición, los que añaden nuevos elementos a sus propios componentes o cambian la proporción de los existentes. De aquí que se llamen con más propiedad Tratamientos Termoquímicos.

2.2.7.1 Etapas del Tratamiento Térmico:

1. **Calentamiento:** Para lograr un incremento uniforme en la temperatura de la pieza se puede realizar, calentando muy lentamente la muestra o realizar un calentamiento escalonado donde se establece una temperatura intermedia, que se encuentre antes de la zona de transformación, hasta llegar a la temperatura establecida. (ver figura 5)
2. **Mantenimiento a temperatura:** Su fin es la completa transformación del constituyente estructural de partida.
3. **Enfriamiento:** Es la etapa decisiva en la mayoría de los tratamientos. Este enfriamiento tiene que ser rigurosamente controlado en función del tipo de tratamiento que se realice.

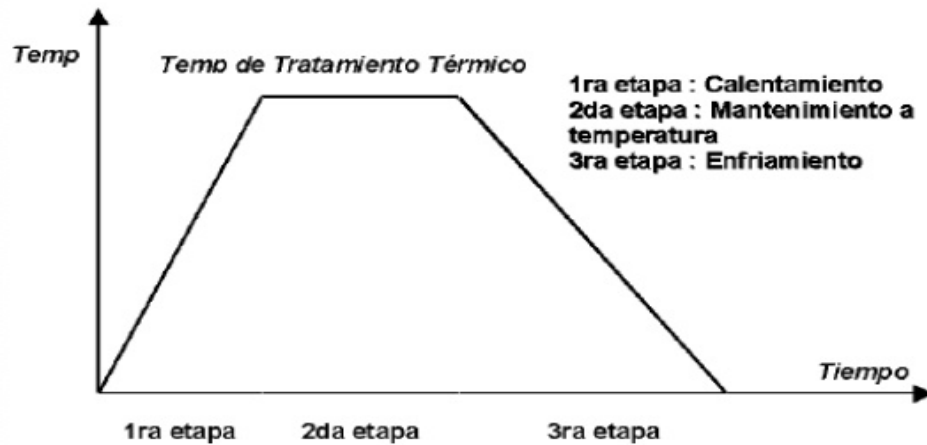


Figura 5. Fases del tratamiento térmico.

Fuente Sydney Avner (1988)

Dentro de los tratamientos térmicos aplicados al alambre de acero se encuentra el de alivio de tensiones, recocido, normalizado, patentado y temple en aceite. Todos estos tratamientos térmicos en materiales ferrosos involucran temperatura y tiempo para proveer tres etapas: recuperación, recristalización y crecimiento de grano.

2.2.7.2 Recocido

Se presentan cuatro formas:

Recocido de regeneración: Cuando después de la forja o laminación se desea mecanizar en las mejores condiciones posibles los aceros con porcentajes de carbono variables de 0,35 % a 0,60 %.

Recocido de ablandamiento: En algunos casos en que interesa disminuir la dureza de los aceros al carbono.

Recocidos contra acritud: Se emplea para aceros de bajo contenido en carbono (inferior a 0,30 %) que han sufrido un fuerte trabajo en frío por laminado o estirado y en los que la dureza ha aumentado por deformación de los cristales, habiéndose disminuido al mismo tiempo la ductilidad y el alargamiento hasta límites tan bajos que no se puede seguir el proceso mecánico de transformación en frío porque se rompe el acero.

Recocido globular: En algunos casos excepcionales en que se interesa que los aceros queden con estructuras globulares debe calentarse durante largo tiempo el acero a temperaturas entre 700 °C a 740 °C y luego enfriar lentamente. De esta forma el material tiene una extraordinaria ductilidad. Adicionalmente es importante mencionar que, para aceros de bajo contenido de carbono, se recomienda enfriar al aire (normalizado) en sustitución del enfriamiento dentro del horno (normalmente utilizado en el recocido) debido a que no existe diferencia entre las propiedades mecánicas luego del tratamiento y resulta más productivo.

2.2.7.3 Recuperación

La recuperación es la primera etapa del proceso de recocido. Por una parte, con mayor temperatura se produce el alivio de esfuerzos internos causados por el trabajo en frío (tensiones residuales), por otra parte, se producen cambios microestructurales que se detallan más adelante.

La recuperación comprende una serie de fenómenos que ocurren a temperaturas más bien bajas, con respecto a la temperatura de fusión del material, entre los que se pueden destacar:

Aniquilación de defectos puntuales

Polinización

Caída de la resistividad eléctrica

La aniquilación de defectos puntuales consiste en la difusión, mediante la adición de calor, de las vacancias hacia las dislocaciones y bordes del grano, así

se logra disminuir su cantidad hasta el número de equilibrio a la temperatura correspondiente.

La polinización consiste en la readecuación de un cristal flexionado para la cual este se descompone en cierto número de pequeños segmentos cristalinos con leves diferencias de orientación íntimamente ligados, logrando que las dislocaciones se redispongan en una configuración de menor energía, formando subgranos y bordes de grano de ángulo pequeño.

La caída de la resistividad eléctrica se ve afectada por las vacancias, cuyo campo de deformaciones interfiere con el flujo de los electrones, consiguiendo de esta manera aumentar su conductividad eléctrica.

2.2.7.4 Recristalización

Si un metal previamente deformado en frío es recocido a una temperatura suficientemente alta, (temperatura de recristalización) aparecen nuevos cristales en la microestructura, los que tienen idéntica composición y estructura reticular que los antiguos granos no deformados. Estos nuevos cristales surgen en zonas con alta densidad de dislocaciones. La etapa de recristalización es un proceso de transformación por nucleación y crecimiento, se produce de manera heterogénea cuando hay superficies disponibles. La nucleación de nuevos granos puede ocurrir por coalescencia de subgranos o por apilamiento.

La fuerza impulsora de la recristalización proviene de la energía almacenada del trabajo en frío después de la recuperación. Durante la formación de los nuevos granos, desaparece el efecto de la deformación en frío (trefilado) ya que disminuye la energía interna inducida durante la deformación, esto explica la disminución de la resistencia a la cedencia, dureza del material y la ganancia en ductilidad.

El proceso de recristalización permite controlar el tamaño de grano y las propiedades mecánicas del material. El tamaño de grano de la estructura recristalizada depende del grado de reducción de deformación en frío (trefilado),

del tiempo de permanencia y de la temperatura de recocido y de la composición del material.

El tamaño de grano recristalizado depende de la deformación acumulada en el material, cuanto mayor es la deformación más pequeña es el tamaño del grano recristalizado. La influencia de la deformación sobre la nucleación es mayor que sobre el crecimiento de grano. Por lo tanto, en un material más deformado se nuclearán más granos nuevos por unidad de volumen y el tamaño del grano final será más pequeño.

Los factores importantes a la hora de estudiar la recristalización son:

El grado de deformación. La cantidad de deformación almacenada en el material determina no solamente la energía disponible para el inicio de la recristalización, sino también el tipo de nucleación y los lugares donde nuclean los nuevos granos.

El tamaño de grano inicial. Hay varios efectos que condicionan que la recristalización sea más rápida en los materiales con un reducido tamaño de grano.

Los elementos en solución sólida. La influencia de los elementos en solución sólida (Mn, P, Si, entre otros) sobre la migración de las fronteras de grano es importante y un pequeño aumento de las impurezas en solución sólida puede reducir la movilidad en varios ordenes de magnitud como lo explica (Dimitrov et al 1978).

Las partículas de segunda fase. Los precipitados en las aleaciones juegan un papel muy importante, tanto en el proceso de la nucleación como durante el crecimiento del grano recristalizado. El tamaño de las partículas, y en menor medida su distribución, determinan si estas inducen a la nucleación o si, al contrario, pueden llegar a inhibir la migración de fronteras de grano por pinzamiento de las mismas. Numerosos estudios (Humphreys y Hatherly 2004) han demostrado que

la estimulación de la nucleación por las partículas de segunda fase ocurre cuando las precipitaciones son de gran tamaño, mientras que el pinzamiento de las fronteras (conocidas como el efecto de Zener) es un efecto de las partículas pequeñas.

Requisitos de la Recristalización

- a) Se necesita una deformación mínima para iniciar el proceso de recristalización.

La deformación debe ser suficiente para proveer de núcleos para la recristalización y de proveer la fuerza motriz necesaria de sustentar su crecimiento.

- b) La temperatura a la cual ocurre la recristalización disminuye con el incremento de la deformación.

La energía almacenada, la cual provee de la fuerza motriz para la recristalización, se incrementa con de la deformación.

- c) El tamaño del grano recristalizado depende de la cantidad de deformación, siendo éste pequeño para grandes cantidades de deformación.

El número de núcleos o la velocidad de nucleación se ven más afectados por el esfuerzo que por la velocidad de crecimiento. Por lo que, altos grados de esfuerzo pueden proveer más núcleos por unidad de volumen y un tamaño de grano final más pequeño.

- d) Para una cantidad de deformación dada, la temperatura de recristalización podría incrementarse debido a:

1. Un tamaño de grano inicialmente grande. Las fronteras de grano son sitios favorables para la nucleación. Por lo tanto, tamaños de granos iniciales grandes proveerán pocos sitios de nucleación, la velocidad de nucleación será lenta y la recristalización será más lenta u ocurrirá a temperaturas altas.

2. Una alta temperatura de deformación. A altas temperaturas de deformación, ocurre una mayor recuperación durante la deformación y la energía almacenada es más baja que para un esfuerzo similar a una temperatura más baja.

La recrystalización se divide en dos etapas importantes que son la nucleación de los nuevos granos formados y el crecimiento de estos nuevos granos que remplazaran a la matriz deformada.

2.2.7.5 Nucleación durante la recrystalización

Según Humphreys (2004), las nucleaciones de la recrystalización surgen en zonas o núcleos con una densidad de dislocaciones muy baja. Estas zonas pueden crecer rápidamente en la matriz deformada si comparten con ella una frontera de alta movilidad. La fuerza motriz encargada de promover el crecimiento de estos núcleos proviene de los gradientes de la energía almacenada H presentes entre ellos y la matriz deformada.

(Ec.2)

Siendo a , una constante geométrica (~ 0.5), G el módulo de cizallamiento del material, b el módulo del vector de el gradiente de densidad de dislocaciones entre el núcleo y la matriz deformada.

Módulo de cizallamiento (G): es una constante elástica que caracteriza el cambio de forma que experimenta un material elástico (lineal e isotrópico) cuando se aplican esfuerzos cortantes, para un material elástico lineal e isotrópico, el módulo de cizallamiento es una constante con un mismo valor para todas las direcciones del espacio. En materiales anisótropos se pueden definir varios módulos de elasticidad transversal y en los materiales elástico no lineales dicho modulo no es una constante, sino que es una función dependiente del grado de deformación. (Ver figura 6)

Metal	Módulo de cizalla G en 10^9 N/m^2
Cobre estirado en frío	48.0
Aluminio	25.0-26.0
Acero al carbono	8
Acero aleado	80.0
Cinc laminado	31.0
Latón estirado en frío	34.0-36.0
Latón naval laminado	36.0
Bronce de aluminio	41.0
Titanio	44.0
Níquel	79.0
Plata	30.3

Figura 6: Tabla módulo de cizalla de distintos materiales

Fuente: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/solido/cizalla/cizalla.html>

Modulo del vector de Burgers (b):

El vector de Burgers determina la dirección y la magnitud del desplazamiento atómico elemental que sufre el cristal cuando la dislocación se mueve en su plano de deslizamiento. (Ver figura 7)

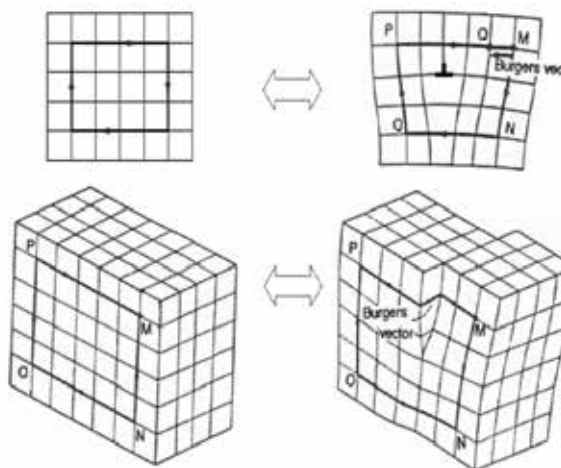


Figura 7: Modulo del vector de Burgers

Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Vector_de_Burgers

La dependencia con el cuadrado de b tiene dos importantes consecuencias. La primera es que, cuanto menor sea b , menor será la energía, de ahí que el vector de burgers se orientara preferentemente según direcciones de máxima compacidad, a lo largo de las cuales los átomos se encontraran más próximos. La segunda es que, si una dislocación tuviese un valor de b excesivamente elevado, rápidamente se dividiría en varias dislocaciones con valores de b menores. La forma en la que se produce esta división ha de cumplir estrictamente las reglas de la suma vectorial. Puesto que cada dislocación lleva asociada una energía adicional por unidad de longitud, la dislocación tendera siempre a tener la longitud más corta posible para minimizar esta energía.

Se define como el número de líneas de dislocaciones que penetran en una sección escogida al azar (líneas/cm²). Estas están formadas por las dislocaciones que se agregan por el estiramiento, más la que se forman por la reducción de área. Para materiales policristalinos recocidos, la densidad típica es alrededor de (líneas/cm²) mientras que el mismo material con una fuerte deformación plástica contiene (líneas/cm²).

Por otra parte Humphreys (2004), asegura que en la mayoría de los casos, la formación del núcleo de recristalización ocurre por la migración de las fronteras de subgranos lo cual conduce a la formación de zonas libres de dislocaciones. Para que un núcleo formado crezca, su radio medio RGM debe superar cierto valor crítico R_C , el cual se define a partir del gradiente de energía H y de la energía superficial de la frontera núcleo-matriz E_b .

(Ec.3)

2.2.8 Crecimiento durante la recristalización

Según Humphreys (2004), para que un núcleo/grano recristalizado crezca de forma efectiva, debe estar rodeado de fronteras de alta movilidad y tener asociados gradientes de energía almacenada favorables para su expansión. La velocidad de crecimiento media de un grano GM se puede estimar a partir de la relación:

$$GM = Mb \left(\frac{H}{R} - \frac{2\sigma}{RGM} \right) \quad (\text{Ec.4})$$

Siendo Mb, la movilidad intrínseca de la frontera núcleo-matriz. En los instantes iniciales del crecimiento, la fuerza motriz debida a los gradientes de energía almacenada H compite con la fuerza retardatriz debida a la energía superficial de la interface grano matriz, la cual está determinada por la curvatura de R de esta interface y su energía específica σ .

2.2.8.1 Crecimiento normal de grano

Durante la etapa de crecimiento de la recristalización y una vez completada esta, los granos pueden crecer consumiendo la matriz deformada u otros granos recristalizados. Una vez que la microestructura es completamente denominada por granos relativamente libres de dislocaciones, comienza la etapa de crecimiento normal de granos. En esta etapa, la fuerza motriz proviene de la disminución de la energía asociada a las fronteras de granos.

El crecimiento normal de granos reduce aún más la energía libre del material debido a que: (1) homogeneiza y aumenta el tamaño promedio de grano, (2) disminuye el radio de curvatura de las fronteras y (3) produce configuraciones topológicas de mínima energía.

2.2.8.2 Crecimiento anormal del grano

El crecimiento normal de granos se puede inhibir bajo determinadas condiciones, como cuando sólo una componente domina la textura del material. Puede ocurrir entonces el crecimiento exagerado de ciertos granos de forma selectiva. De este modo, el material reduce su energía libre debido a que los granos con tamaño muy superior al tamaño promedio de grano del material reducen el número de fronteras en el mismo y, consecuentemente, su energía libre.

En la figura 8, se muestra los estados de un material deformado y sometido a un tratamiento térmico de recocido. (Ver figura 8)

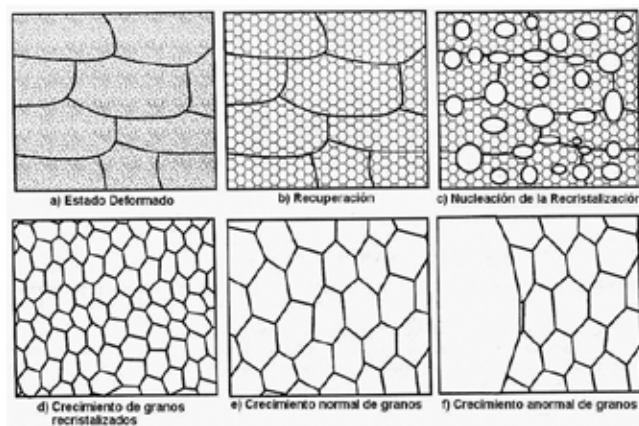


Figura 8. Estado deformado de un material.

Fuente. Tommy de cock, 2009

2.2.10 Modelo de Avrami

Según W.A.Jhonson y R.F Mehl (1939), la recrystalización consiste básicamente en la nucleación de granos libres de defectos en el material deformado y el crecimiento subsiguiente hasta que el material está completamente ocupado por granos recrystalizados. La cinética de este proceso se puede describir mediante el modelo de Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov (JMAK). En este modelo se asume que los núcleos se forman con una velocidad

N y que van consumiendo la matriz deformada con una velocidad G. En el caso general se puede describir la evolución de la fracción de la siguiente manera:

(Ec. 5)

Donde n es el coeficiente de Avrami, t el tiempo de recocido y es una constante que incluye ambas velocidades N y G. Una característica fundamental de este modelo es la hipótesis de que los nuevos granos nucleen de forma aleatoria en el material y que el crecimiento no dependa del tiempo. Como se verá en el siguiente capítulo no siempre se cumplen esas condiciones.

Por otra parte A.N Kolmogorov (1937), el estudio de la cinética del proceso de recristalización se realiza frecuentemente a través de las curvas de Avrami, que son una representación gráfica de la evolución según la ecuación

— (Ec.6)

Deberá de ser una recta cuya pendiente es igual a n. Algunos casos interesantes de este coeficiente n merecen una atención especial. Si la velocidad de nucleación se considera constante y el crecimiento tiene lugar en las tres dimensiones del espacio, la ecuación (IV) dará $n = 4$. Si se considera que la nucleación ocurre en los primeros instantes de la recristalización y que luego la velocidad de nucleación disminuye rápidamente, se llega a un valor de n igual a 3. Este último modelo es conocido como saturación de lugares de nucleación.

Si el crecimiento se reduce a dos dimensiones (p.ej. recristalización en una lámina fina) o es limitado a una sola dimensión (p.ej. en un alambre fino) los valores de n se reducen a 2 y 1, respectivamente, sin cambiar el razonamiento fundamental de este modelo. (Ver figura 9)

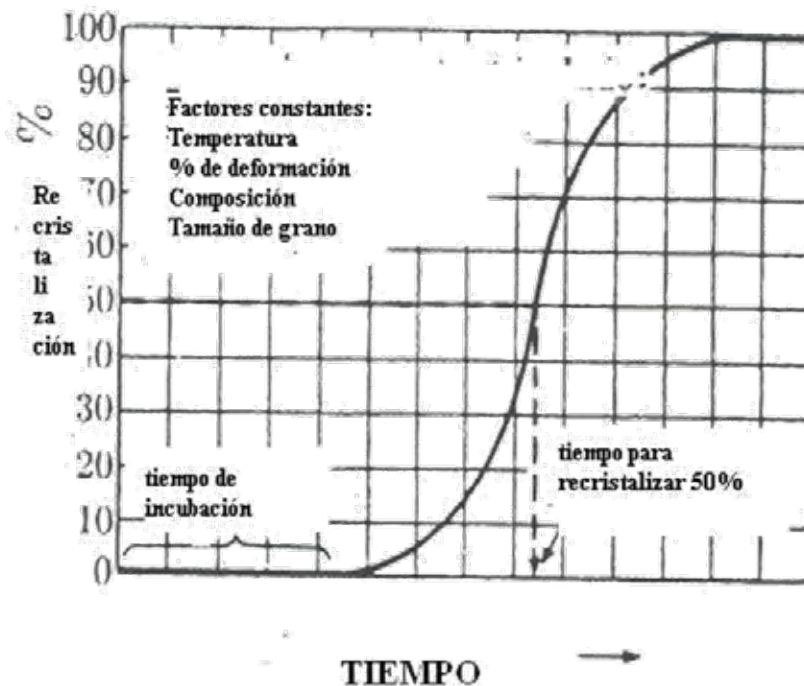


Figura 9 Curva típica de recristalización isotérmica
 Modelo de Avrami
 Fuente: Humphreys (2004)

2.2.11 Aplicación del modelo de Avrami

El modelo JMAK, también llamado modelo de Avrami, incluye una familia de ecuaciones que se pueden aplicar a cualquier donde no existe una diferencia química entre . Es un modelo que se ha utilizado con éxito en un gran número de procesos y es el modelo estándar para modelizar de forma sencilla la recristalización. Sin embargo, existe una discrepancia entre los valores teóricos del coeficiente de Avrami n , y los resultados experimentales. La mayoría de los autores que estudiaron la recristalización mediante este modelo indicó que n no llega al valor de 4 y que generalmente se encuentra alrededor de la unidad. En el caso de los aceros bajos en carbono se ha obtenido un valor de $n = 0,68$ y la energía de activación Q entorno a $277 \text{ kJ}=\text{mol}$. Estos

valores son muy similares a los obtenidos por Monsalve para el caso de un acero extra bajo en carbono (ELC).

Los motivos de estas desviaciones pueden ser varios: compensación del solapamiento entre granos (impingement) inadecuado, deformación heterogénea, efecto ralentizador de la restauración, etc. De estas observaciones se puede concluir que el modelo JMAK es demasiado sencillo para la modelización cuantitativa de un proceso altamente complejo como la recristalización y que en muchos casos sobrevalora la cinética de esta transformación.

2.2.12 Simulación del proceso de recristalización

Existen actualmente diferentes modelos y algoritmos de cómputo para simular la evolución de la microestructura durante la recristalización. Estos modelos suelen clasificarse en directos y estadísticos.

Los métodos directos son los modelos de Monte Carlo, Autómata Celular, Elemento Finito y Vértices. Estos modelos parten de estructuras celulares que describen la matriz deformada de partida a través de la orientación y la energía almacenada de cada sitio.

Los métodos estadísticos son los modelos de Campo de Fase, Dinámica Molecular y los que utilizan la ley de Kolmogorov-Johnson-Melh-Avrami (JMAK). Estos modelos son utilizados para predecir de manera estadística, la evolución microestructural durante la recristalización.

2.2.13 Método de Montecarlo

El método de Montecarlo da solución a una gran variedad de problemas matemáticos haciendo experimentos con muestreos estadísticos en una computadora. El método es aplicable a cualquier tipo de problema ya sea estocástico o determinístico.

Generalmente en estadística los modelos aleatorios se utilizan para simular fenómenos que poseen algún componente aleatorio. Pero en el método de Monte Carlo, por otro lado, el objeto de la investigación es el en si el objeto mismo, un suceso aleatorio o pseudo-aleatorio se usa para estudiar el modelo. A veces la aplicación del método de Monte Carlo se usa para analizar problemas que no tienen un componente aleatorio explícito; en estos casos un parámetro determinista del problema se expresa como una distribución aleatoria y se simula dicha distribución.

La simulación de Monte Carlo también se utiliza para resolver integrales que no se pueden resolver por métodos analíticos, para solucionar estas integrales se usaron números aleatorios. Posteriormente se utilizó para cualquier esquema que emplee números aleatorios, usando variables aleatorias con distribuciones de probabilidad conocidas, el cual es usado para resolver ciertos problemas estocásticos y determinísticos, donde el tiempo no juega un papel importante. Algunas de las aplicaciones de este tipo de simulación son mostradas en el cuadro 1.

Cuadro 1. Aplicaciones del Método de Monte Carlo

1. Criptografía	2. Programas de computadora
3. Cromo dinámica cuántica	4. Radio terapia contra el cáncer
5. Densidad de Flujo de tráfico	6. Sistema de colas
7. Diseño de reactores nucleares	8. Sistemas de Inventario P y Q.
9. Física de los materiales	10. Valoración de cartera de valores.
11. Ecología	

Fuente: Ixchel (2010)

El método de Monte Carlo es una herramienta de investigación y planteamiento; básicamente es una técnica de muestreo artificial, empleada para operar numéricamente sistemas complejos que con tengan componentes aleatorios o determinísticos, manteniendo tanto la entrada como la salida en

cierto grado de incertidumbre. Este tipo de simulaciones fue desarrollado por Anderson (1986) para simular el crecimiento de grano en dos o tres dimensiones. Además, ha sido utilizado para estudiar la recristalización, crecimiento anormal de grano y la recristalización dinámica.

En general, el método de Monte Carlo (MC) es una metodología estadística, la cual usa números aleatorios para elegir una muestra representativa de un conjunto extremadamente grande de posibles eventos. De hecho, esta técnica proporciona un medio para evaluar integrales multidimensionales que no es posible resolver por procedimientos analíticos comúnmente usados.

Cuando se utiliza para simular la recristalización, la microestructura es dividida en un número discreto de puntos o sitios los cuales representan el centro de áreas pequeñas de material y estos puntos son acomodados en una red triangular de hexágonos en los cuales la microestructura es considerada como homogénea. A los sitios se les asigna cierta orientación y cada grano puede comprender 1 o más sitios. Las fronteras de grano se definen a través de las diferencias entre las orientaciones de sitios vecinos. Esto permite que existan diferentes tipos de fronteras. La energía y la movilidad de la frontera son simuladas en función de la desorientación que existe entre el punto y sus vecinos más cercanos.

En el caso del crecimiento de grano, el modelo se corre seleccionando un sitio al azar y reorientándolo a una de las orientaciones de los 6 sitios adyacentes. La energía del nuevo estado es entonces determinada. Si el cambio de energía

E) es mayor o igual a cero entonces E es menor de cero, entonces la reorientación es aceptada con una probabilidad $\exp(-E/kBT)$. La unidad de tiempo en la simulación es un paso de Monte Carlo. Esta unidad representa los N intentos de transiciones, donde N es el número de sitios en el modelo.

En la figura 10 se muestra una microestructura típica de simulación de crecimiento de grano por el método de Monte Carlo. (Ver figura 10)

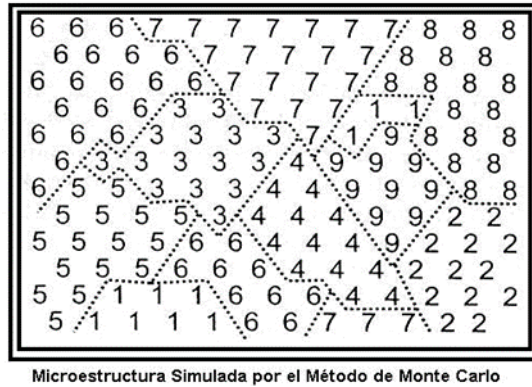


Figura 10. Simulación del Método de Monte Carlo.

Fuente: Ixchel (2010)

El método de Monte Carlo es el modelo más utilizado debido a que presenta los mejores resultados para la simulación de texturas de recristalización. En este modelo es posible cuantificar el efecto de la distribución no homogénea de la energía almacenada y de las orientaciones en la matriz deformada. La distribución inicial de las orientaciones (Q) y la energía almacenada (H) en la microestructura de partida se puede modelar a partir de una simulación por elemento finito de la matriz deformada. De manera directa, la distribución de H y Q se pueden determinar a partir de las mediciones de EBSD.

Por ejemplo, para la modelación del crecimiento de subgranos durante la recristalización, los investigadores Ranhakrishnan, Sarma y Zacharia simularon la cinética de la microestructura y la evolución de la textura durante la recristalización estática de un material laminado en frío y recocido. La finalidad de este trabajo era cuantificar los efectos de la distribución no homogénea de la energía almacenada y los gradientes de orientación presentes en una microestructura laminada en frío en la recuperación del material mediante el mecanismo de crecimiento de subgranos. El modelo de nucleación se basa en el crecimiento de subgrano en un gradiente de orientación. Esto asume que cada

sitio de Monte Carlo tiene una subestructura inicial caracterizada mediante el tamaño promedio del subgrano D_0 , y una desorientación media entre los subgranos.

En la figura 11, se muestra el algoritmo utilizado por Ranhakrishnan para la simulación de la recristalización. (Ver figura 11)

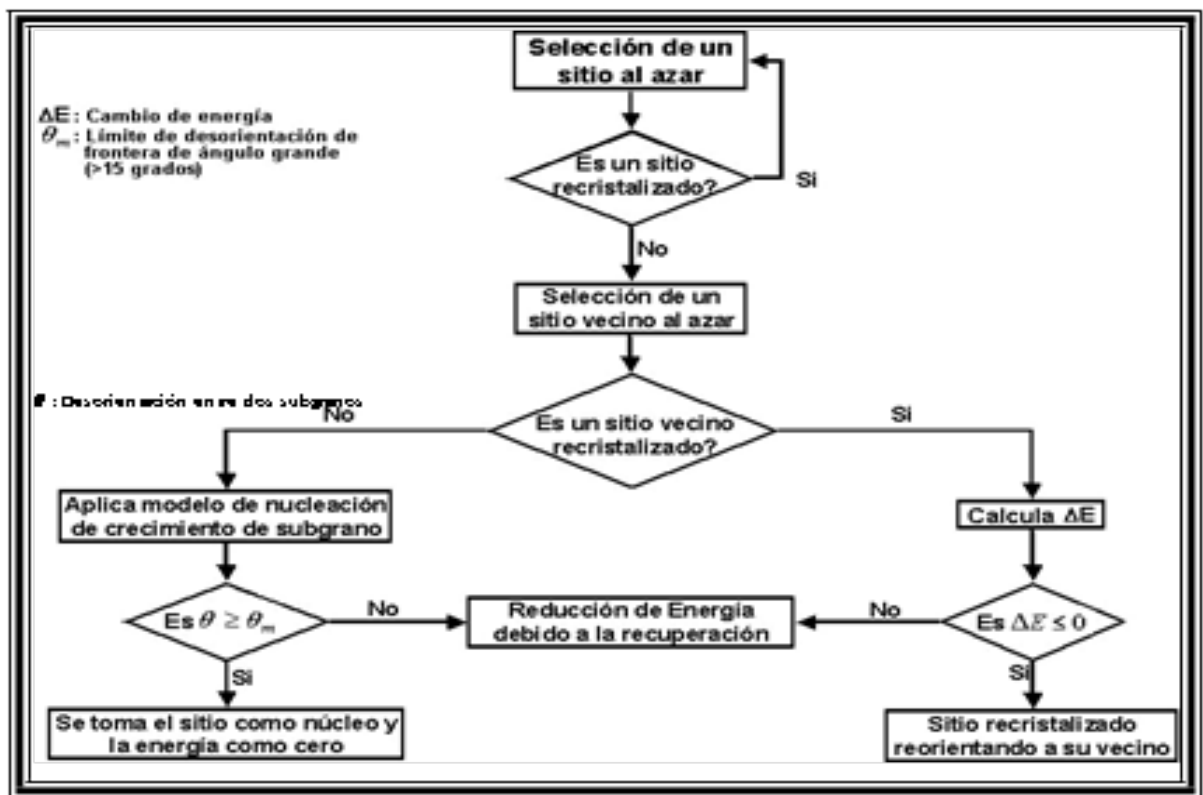


Figura 11: Algoritmo para el crecimiento de grano.
Fuente Ixchel (2010)

Además de poder modelar el crecimiento de subgranos, con el método de Monte Carlo es posible modelar las etapas del proceso de recristalización. Caleyó, Baudin y Penelle investigaron el desarrollo de la textura de cubo en una aleación Fe-50%Ni en la recristalización y crecimiento normal de granos mediante las orientaciones obtenidas por Microscopía de Imagen Orientacional

(OIMTM) y mediciones por rayos X de las texturas globales. Estos autores utilizaron estos datos experimentales obtenidos por OIM y Rayos X, como datos de entrada en un modelo de Monte Carlo, con la finalidad de obtener información de las primeras etapas de la recristalización.

De acuerdo a sus resultados, concluyeron que el primer mecanismo responsable del desarrollo de la textura de cubo durante el crecimiento de grano es la migración preferencial de las fronteras de ángulo grande ligadas a los granos cúbicos.

El algoritmo utilizado por en este trabajo se puede observar en la figura. (Ver figura 12).

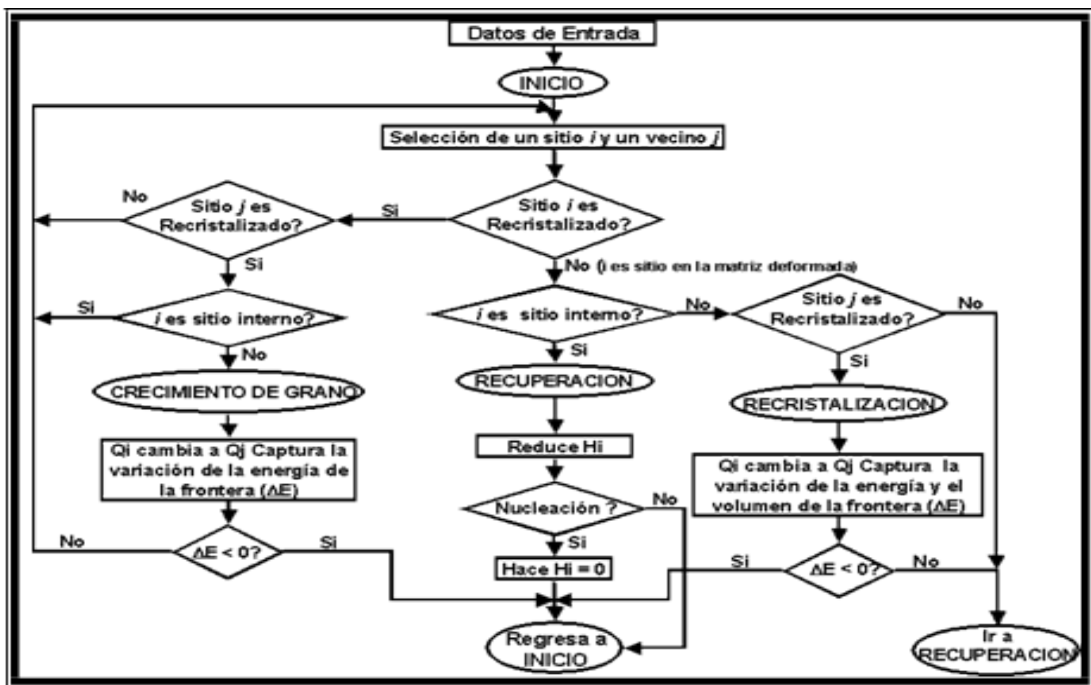


Figura 12: Algoritmo para la recristalización.

Fuente: Ixchel (2010)

2.2.14 Polígono de Voronoi

Los Polígonos de Voronoi son una construcción geométrica que permite construir una partición T del plano euclídeo. Deben su nombre al Alfred H. Thiessen y también fueron estudiados por Georgy Voronoi y Gustav Lejeune

Dirichlet. En la figura 13 se muestra un diagrama de polígonos de Voronoi, en el cual se muestra el punto central de cada polígono y a partir de esos puntos se hace la triangulación para formar los polígonos. (Ver figura 13)



Figura 13: Teselación de Voronoi de un conjunto de Puntos aleatorios sobre el plano.
Fuente: Ixchel (2010)

Debido a que la estructura de un material policristalino es compuesto de un gran número de granos, sus propiedades y cualidades son determinadas no solo por sus características individuales si no por la conectividad e interacción entre ellos. Muchos tipos de modelos han sido usados para simular microestructuras, entre los cuales los diagramas de Voronoi han sido ampliamente utilizados y estudiados por Meijering y Kumar y asociados. Los diagramas de Voronoi son compuestos de un arreglo de convexos llenando en espacio y sin la sobre posición de poliedros, los cuales pueden ser usados para representar los granos de un material policristalino.

2.2.15 Modelación Numérica

Para dar cumplimiento al objetivo principal de esta investigación ha sido necesario el planteamiento de una metodología que tome en cuenta la formación de microestructuras de metales a través de un modelo metalúrgico, la proposición de modelos físicos de los mecanismos presentes en la

recristalización y su posterior incorporación a un modelo que simule el proceso de recristalización. Así como la validación de los resultados obtenidos por el modelo propuesto con microestructuras reales de metales recristalizados.

El diagrama de bloques de la figura 12 presenta la metodología propuesta y los aspectos más importantes a considerar en cada etapa de la investigación.

2.2.16 Microsoft Excel

Excel es un programa que forma parte de la suite ofimática Microsoft Office, un software de hojas de cálculo empleado esencialmente en tareas matemáticas y financieras. Sirve para realizar todo tipo de cálculos numéricos o matemáticos. Permite elaborar tablas que incluyan cálculos matemáticos, resueltos mediante operadores matemáticos o automáticamente mediante fórmulas llamadas funciones que se pueden configurar manualmente. Además de permitir la visualización de los datos, por ejemplo, a través de diferentes tipos de gráficos. La finalidad de estos puede ser diferente según las necesidades del usuario y las posibilidades que permite este software de cálculo son extremadamente amplias. Se pueden llegar a realizar desde simples sumas a integrales, pasando por la creación de gráficos, la generación de informes o la organización de información no numérica.

De hecho, aunque en origen estaba diseñado para satisfacer las necesidades del ámbito administrativo y contable, sus funciones se han extendido a diferentes campos, incluyendo el de las bases de datos. Por eso es posible llevar múltiples registros y controles de particularidades que no tengan que ver en ningún momento con cálculos y se compongan esencialmente de texto.

Con Microsoft Excel podemos llevar a cabo las siguientes tareas:

Elaborar tablas de consulta de información.

Crear gráficos a partir de datos numéricos introducidos en la hoja de cálculo.

Resolver operaciones matemáticas sencillas.
Eleva números a potencias.
Hacer calendarios especializados.
Hacer facturas.
Diseñar todo tipo de horarios.
Generar informes contables.
Elaborar presupuestos detallados.
Editar hojas de cálculo de programas similares.
Llevar una libreta de direcciones.
Llevar un registro de clientes, usuarios, empleados... o cualquier otro en el que se funcione mediante líneas y columnas.
Crear calendarios varios.
Llevar la contabilidad de una empresa, un comercio o incluso un hogar.
Gracias a sus características es utilizado en el ámbito de la empresa, pero también en entornos domésticos para llevar contabilidad básica, ya que ofrece un sencillo acceso a sus funciones más elementales y cualquiera con un mínimo interés por el software puede hacer uso de ella.

Al igual que el resto de programas que conforman el paquete Office, Microsoft Excel se ha convertido en un estándar de facto pese a su licencia comercial y, por tanto, no ser gratis. No en vano, otros paquetes ofimáticos tradicionales o en la nube como OpenOffice, LibreOffice o Google Docs, cuentan con aplicaciones de hojas de cálculo que han desarrollado para ser totalmente compatibles con el software de Microsoft, siendo en gran medida idénticas en muchas de sus funciones. Porque el lenguaje que emplea se ha convertido prácticamente en el estándar, siendo el conocimiento y la documentación abundante en Internet.

2.3 Definición de Términos

Acero AISI 1010: Es un acero al carbono simple con un contenido de carbono del 0.10%. Este acero tiene una resistencia relativamente baja, pero se puede enfriar y templear para aumentar la resistencia, su composición química está comprendida de la siguiente manera: Hierro (Fe) 99.18-99.62%, Manganeso (Mn) 0.30-

0.080- 0.13%. Posee una densidad de 7.87 g/cm³.

Método de Monte Carlo: En la simulación de Monte Carlo se agrupan una serie de procedimientos que analizan distribuciones de variables aleatorias usando simulación de números aleatorios.

Modelo de Avrami: Es un modelo que mide a través de una familia de ecuaciones la cinética (velocidad) con que ocurre el proceso de recristalización, describiendo así la evolución de dicho fenómeno en el tiempo durante el recocido.

Nucleación: La nucleación, es un proceso heterogéneo que tiene lugar preferentemente en los sitios como las bandas de deformación, fronteras de granos y uniones triples de fronteras de granos deformados.

Polígono de Voronoi: Los polígonos de Voronoi son uno de los métodos de interpolación más simples, basado en la distancia euclidiana, siendo especialmente apropiada cuando los datos son cualitativos. Se crean al unir los puntos entre sí, trazando las mediatrices de los segmentos de unión. Las intersecciones de estas mediatrices determinan una serie de polígonos en un espacio bidimensional alrededor de un conjunto de puntos de control, de manera que el perímetro de los polígonos generados sea equidistante a los puntos vecinos y designando su área de influencia.

Recocido: El objeto de este tratamiento es ablandar el acero, homogenizar su estructura y composición química y aumentar su ductilidad.

Recristalización: La recristalización es la formación de un nuevo conjunto de granos equiaxiales libres de deformación que tienen baja densidad de dislocaciones, lo cual es una característica de la condición del material antes de

ser deformado. La fuerza motriz para producir esta nueva estructura de granos es la diferencia en energía interna entre el material deformado y el no deformado. Los nuevos granos se forman como núcleos muy pequeños y crecen hasta que reemplazan completamente al material deformado, proceso en el cual tiene lugar la difusión de corto alcance. También, durante la recristalización, las propiedades mecánicas que fueron modificadas durante el proceso de trabajo en frío son restauradas a sus valores previos a la deformación, es decir, el metal se hace más blando, menos resistente y más dúctil.

Temperatura de recristalización corresponde a la temperatura aproximada a la que un material altamente trabajado en frío se recristaliza por completo en un tiempo determinado.

Trefilado: Se entiende por trefilar a la operación de conformación en frío consistente en la reducción de sección de un alambre o varilla haciéndolo pasar a través de un orificio cónico practicado en una herramienta llamada hilera o dado.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

Arias (2012), explica que el marco metodológico “es el cómo se realizará el estudio para responder al problema planteado” (p.110). La metodología del proyecto incluye el tipo, diseño y nivel de la investigación, las técnicas de recolección y análisis de datos y los instrumentos que serán utilizados para llevar a cabo la indagación.

3.1 Tipo de investigación

La investigación se ubicará en la modalidad proyecto factible debido a que propondrá conocer el comportamiento del fenómeno de recristalización en los aceros AISI 1010, ya que es uno de los materiales más utilizados en la fabricación. Según el Manual de Tesis de grado de Especialización y Maestría y tesis doctorales de la Universidad Pedagógica Experimental Libertador (2014), esta modalidad investigativa “consiste en la investigación, elaboración y desarrollo de una propuesta viable o modelo de tipo práctico, satisfaciendo los requerimientos y necesidades de organizaciones o grupos sociales” (p.32).

3.2 Diseño de la Investigación

El diseño de la investigación, según Balestrini (2006), se define como “el plan global de investigación que integra de un modo coherente y adecuadamente correcto técnicas de recogida de datos a utilizar, intenta dar de una manera clara y no ambigua respuestas a las preguntas planteadas en el mismo” (p.131). En este caso, se ubicó el estudio en un diseño de investigación de campo.

La investigación de campo, explica Arias (2012), “es aquella que consiste en la recolección de datos directamente de los sujetos investigados, o de la realidad donde ocurren los hechos, sin manipular o controlar variable alguna, el

investigador obtiene la información pero no altera las condiciones existentes” (p.31), Se recolectarán los datos directamente de ensayos realizados.

3.3 Nivel de la investigación

La investigación en curso tiene un nivel descriptivo, esta es definida por Arias (2012), “consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno, individuo o grupo, con el fin de establecer su estructura o comportamiento. Los resultados de la investigación se ubican en un nivel intermedio en cuanto a la profundidad de los conocimientos” (p.24)

3.4 Población y Muestra

Arias (2012) define la población como “la población es el conjunto de seres que poseen las características o evento a estudiar”. La población estará conformada por los aceros AISI 1010, a los que se les va aplicar el proceso de trefilado.

3.5 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Una técnica, Sabino (2004) explican que “es una forma particular para aplicar un método y está referida a los procedimientos empleados para la recolección y tratamiento de datos. Representa los medios auxiliares con que cuenta un investigador para desarrollar el estudio con un fin específico “(p.82). Se utilizarán como técnicas para recolectar los datos, la observación directa, la revisión documental. A continuación se definen cada una de ellas:

Revisión documental

Sobre la revisión documental, Arias (2012), sostiene que “consiste en el análisis e interpretación de la información recolectada “(p.31). Este proceso se centra en la revisión de documentos sobre el tema tratado y el posterior análisis del contenido de los mismos para presentarlos datos mediante cuadros y gráficos.

Observación directa

Según Sabino (2004) la técnica de observación directa “es aquella en la cual el investigador puede observar y recoger mediante su propia observación información, determinar las faltas o causas que originan un evento”. Se observará el área de almacén y el proceso que se desarrolla en el mismo.

Instrumentos

En cuanto a los instrumentos, se utilizará la ficha de observación los cuadros resumen para registrar la información. La ficha de observación, a criterio de Sabino (2004) se utiliza en la investigación para registrar las notas sobre las observaciones realizadas en las visitas y el diagnóstico, en él se refleja lo experimentado por el investigador en su contacto con la realidad” (p.16). Además se utilizarán cuadros resumen para registrar los datos y equipos tecnológicos como la cámara fotográfica y la grabadora.

3.6. Fases Metodológicas

Fase I. Proponer los modelos físicos de la recuperación, nucleación y crecimiento de grano del fenómeno de recristalización en aceros AISI 1010.

En la fase I, se describe el proceso de recuperación el cual consiste en la activación térmica del proceso de recocido después de la deformación en frío (trefilado), el siguiente paso es la recuperación del material. En esta etapa hay cambios en las propiedades mecánicas del mismo, de hecho, en los aceros al carbono puede inclusive observarse un aumento en la resistencia mecánica debido al envejecimiento por deformación.

El término recuperación, se origina debido a que algunos de los materiales recuperan sus propiedades físicas. Durante la etapa de recuperación, la conductividad eléctrica y la densidad aumentan hasta los valores del material en la condición de recocido.

Esto da paso a la nucleación la cual es vital para para el proceso de recristalización que ocurre mientras la activación térmica va aumentando, los

sitios preferenciales de nucleación de los nuevos granos son las regiones más deformadas, como: bordes de grano, planos de deslizamiento y zonas de alta energía como precipitados de segunda fase y, también, entorno a inclusiones no metálicas. Si el núcleo se forma rápidamente y crece con lentitud, se formarán muchos cristales antes de que se complete el proceso de recristalización, es decir el tamaño final del grano será pequeño.

Como etapa final tenemos el crecimiento del grano a medida que la energía de activación térmica aumenta, este inicia cuando la primera recristalización está completa. Se caracteriza por un gradual decremento en la resistencia del material del incremento en el tamaño de grano. Aunque la fuerza de empuje para la recuperación y recristalización es la energía almacenada del trabajo en frío, la fuerza de empuje para el crecimiento de grano es la minimización de la energía interfacial de las fronteras del grano, cuando el crecimiento del grano ocurre uniformemente en todos los granos esto es llamado crecimiento de grano normal

Fase II. Utilizar el programa de simulación incorporando los modelos propuestos con la herramienta Monte Carlo que permita observar con mayor precisión el fenómeno de recristalización en los aceros AISI 1010

En esta fase se procederá a realizar simulaciones por la herramienta Excel, que por medio de un lenguaje de programación propio facilitara la obtención de los resultados mediante cálculos matemáticos, entre sus prestaciones básicas se hallan la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos y la creación de interfaces de usuario (GUI), luego de proporcionar los parámetros necesarios, se procederá a establecer las variables aleatorias haciendo uso de la herramienta Montecarlo

Fase III. Comparar la data real con la proveniente de la simulación numérico computacional modeladas por polígonos de Voronoi.

Con los datos obtenidos gráficamente mediante la simulación se hará un análisis comparativo con resultados dados por ensayos, donde se observó la microestructura real de un acero AISI 1010; tomando en cuenta que los

polígonos de Voronoi son de los métodos de interpolación más simples, basado en la distancia euclidiana; además es una forma representativa de los granos que a su vez el color de los polígonos simboliza la energía que posee cada uno.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1 Propuesta de los modelos físicos de la recuperación, nucleación y crecimiento de grano del fenómeno de recrystalización en aceros AISI 1010.

Recuperación de los granos durante la recrystalización

Al momento de realizar la propuesta de los modelos físicos de la recuperación de los granos, se tomó en consideración que durante este proceso el material, luego de ser sometido a trefilado ocurriendo así, la deformación de los granos y posteriormente someterlo al tratamiento térmico de recocido, cumpliendo con sus características propias logró la restitución parcial de sus propiedades mecánicas.

Nucleación durante la recrystalización

La fuerza motriz encargada de promover el crecimiento de los núcleos recrystalizados proviene de los gradientes de la energía almacenada H presentes entre ellos y la matriz deformada, esta fue modelada mediante la siguiente ecuación:

(Ec.1)

Donde:

: Gradiente de energía almacenada

Constante geométrica dependiente de la estructura cristalográfica

Módulo de cizallamiento del material

Modulo del vector de Burger

Gradiente de densidad de dislocación

Tabla1: Datos ingresados en la ecuación de gradiente de energía

Variable	Valor
Constante geométrica dependiente de la estructura cristalográfica	
Módulo de cizallamiento del material	8GPa
Modulo del vector de Burger b	0,286nm
Gradiente de densidad de dislocación	—

Fuente: Abarca B, Díaz H (2020)

La ecuación de gradiente de energía fue necesaria para la obtención del radio medio de los granos, el cual se define a partir del gradiente de energía almacenada ρ y de la energía superficial de la frontera núcleo-matriz σ , donde r es obtenido por la siguiente ecuación.

$$r = \frac{2\sigma}{\rho G b} \quad (\text{Ec.7})$$

Donde:

Energía superficial de la frontera núcleo-matriz σ

Módulo de Young G

Deformación del material b

La deformación del material se obtuvo haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$\epsilon = \frac{\Delta A}{A_0} \quad (\text{Ec.8})$$

Donde

Ra: Reducción de área

Siendo A_0

$$A_0 = \frac{A_f}{1 - \epsilon} \quad (\text{Ec.9})$$

Con los datos obtenidos haciendo uso de las ecuaciones anteriores se obtuvo el valor del radio medio

$$\text{---} \quad \text{(Ec.10)}$$

Se debe tomar en consideración que, para garantizar el crecimiento del núcleo formado, el valor de radio medio debe superar el valor del radio crítico

Crecimiento durante la recristalización

La velocidad de crecimiento media de un grano se pudo estimar a partir de la relación.

$$\text{---} \quad \text{(Ec.11)}$$

Esta depende de variables como la movilidad la cual fue estimada entre 0 y 1, el gradiente de energía, el radio medio obtenida anteriormente y la energía de borde de grano.

Una vez generado los núcleos, con su cantidad de energía asociada, se determinó el porcentaje de recristalización en función del tiempo, mediante la ecuación de Avrami

$$\text{(Ec.6)}$$

Para encontrar las constantes k y n la forma lineal de la ecuación de Avrami es la siguiente:

$$\text{---} \quad \text{(Ec.7)}$$

$$\text{(Ec.12)}$$

Para la misma deformación y los valores que arroja la simulación de los modelos propuestos del fenómeno de recristalización y la herramienta de monte Carlo se obtuvo la siguiente distribución que viene dada por tres variables que interactúan entre si por medio de una función parametrizada, estas variables

crecimiento del grano G_M y la movilidad del grano M_b , donde se puede apreciar un conjunto de cuadrados con diferentes áreas y con una escala de color verde hasta blanco, el tamaño de los cuadrados significa la cantidad de energía almacenada en donde un área más amplia se traduce a mayor cantidad de energía por ende los cuadrados con un área más pequeña significan menor energía almacenada.

Por otra parte, tenemos el significado de la escala de colores en donde un tono de verde más oscuro nos indica una mayor velocidad de crecimiento del grano, este va degradándose hacia el color blanco que se traduce en una baja velocidad de crecimiento, por último, se tienen los números dentro de los cuadrados que nos indican la movilidad de ese grano, (Ver figura 15).

Fuente: Abarca B. Díaz H. (2020)



Figura 17: Distribución de energía, velocidad de crecimiento, movilidad para la máxima deformación

Fuente: Abarca B. Díaz H. (2020)

Se pudo observar en las figuras 14 y 16 que para un porcentaje de recristalización dado la energía almacenada es variable, arrojando como tendencia que, a mayor porcentaje de recristalización, se tiene una velocidad de crecimiento más alta ya que esto está asociado a una mayor cantidad de energía almacenada, y es representado por los puntos de color verde. Por otra parte, los puntos de color azul representan la cantidad de energía almacenada que depende del gradiente de densidad de dislocación el cual se genera por la aleatoriedad de la herramienta de monte Carlo, con la que viene dada su distribución en las gráficas.

En las figuras 15 y 17 se obtuvo una representación gráfica de la distribución de energía, velocidad de crecimiento y la movilidad, Estos resultados proporcionan una forma nueva y dinámica de observar lo que ocurre antes de obtener los granos ya recristalizados en su totalidad, lo cual se traduce

Representación gráfica de los datos anteriores, (ver figura 19).

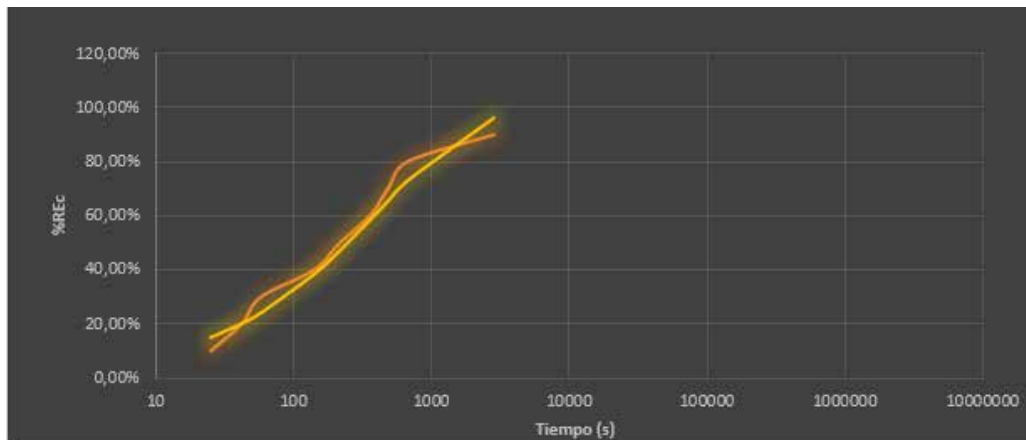


Figura 19: Porcentaje de recristalización dependiente del tiempo
Fuente: Abarca B. Díaz H. (2020)

Se pudo observar que en la figura 19 que para una fracción recristalizada de 100% el tiempo es mucho menor que el obtenido en la figura 18 para la misma fracción recristalizada, esto viene dado por la temperatura a la que se le aplicó el tratamiento térmico demostrando que para el mismo porcentaje de deformación la recristalización ocurre más rápido a mayor temperatura de recocido.

4.3 Comparación de la data real con la proveniente de la simulación numérico computacional modeladas por polígonos de Voronoi.

Para realizar la comparación de la data real con la proveniente de la simulación se realizó un algoritmo matemático, el cual interpreto la data proporcionada por los modelos de nucleación y crecimiento del grano, donde las variables que utiliza el algoritmo para generar los puntos necesarios en la obtención de medio).

A continuación, se pudo observar la microestructura obtenida con los polígonos de Voronoi a una reducción de diámetro de 6,3mm a 4,76mm para una deformación de 43% que es la mínima deformación del presente estudio.

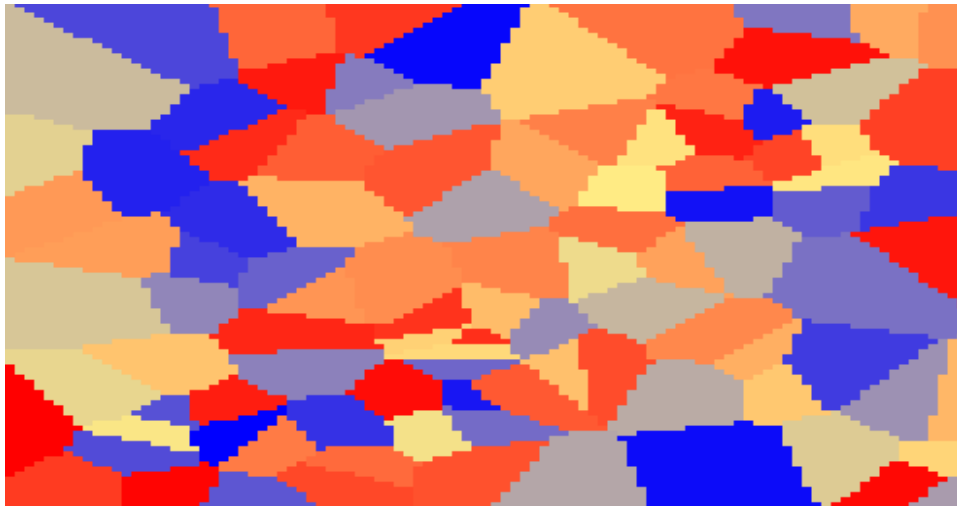
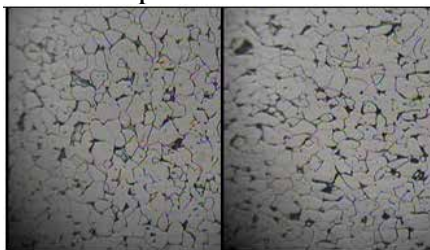


Figura 20: Polígonos de voroni para una reducción 6,3 a 4,76
Fuente: Abarca B. Díaz H. (2020)

Microestructura real obtenida para la mínima deformación

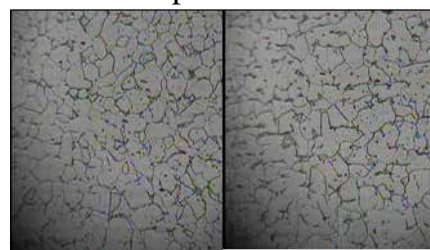
Temperatura 440°C



6.30

4.76

Temperatura 540°



6.30

4.76

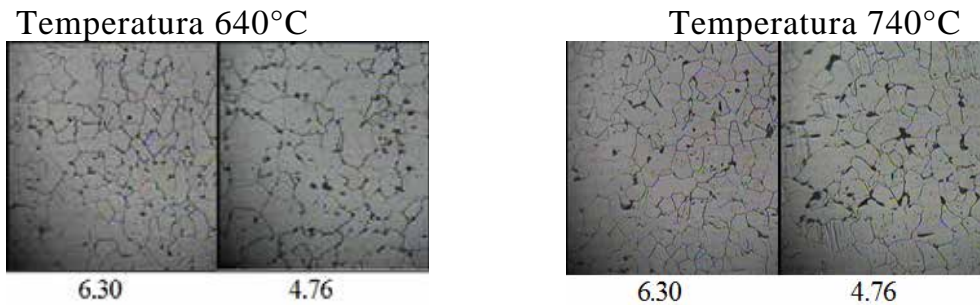


Figura 21: microestructura real para una deformación de 6.3mm a 4.76mm
 Fuente: Universidad de Carabobo. (2018)

Se pudo observar en la figura 20 y 21 como se distribuye la microestructura del acero antes de producirse la recristalización donde se aprecian los granos próximos a nuclear y posteriormente pasar al crecimiento de los mismos, además se pudo realizar la comparación con las microestructuras reales luego de ser tratadas a las diferentes temperaturas de estudio para determinar la distribución de los granos después de recristalizar.

También se observó la microestructura obtenida con los polígonos de Voronoi a una reducción de diámetro de 6,3mm a 2,38mm para una deformación de 86% que es la máxima deformación del presente estudio.

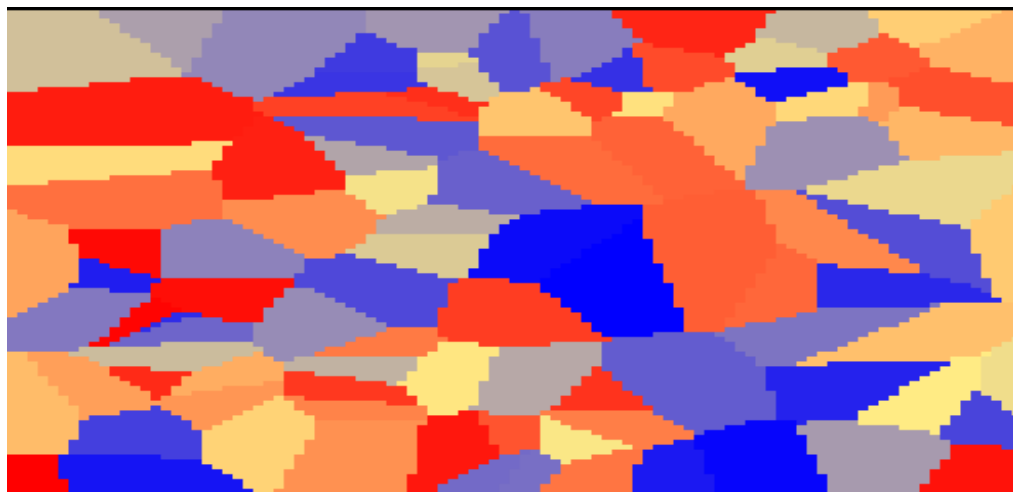


Figura 22: Poligonos de voroni para una reducción 6,3 a 2,38
 Fuente Abarca B. Díaz H. (2020)

Microestructura real obtenida para la máxima deformación

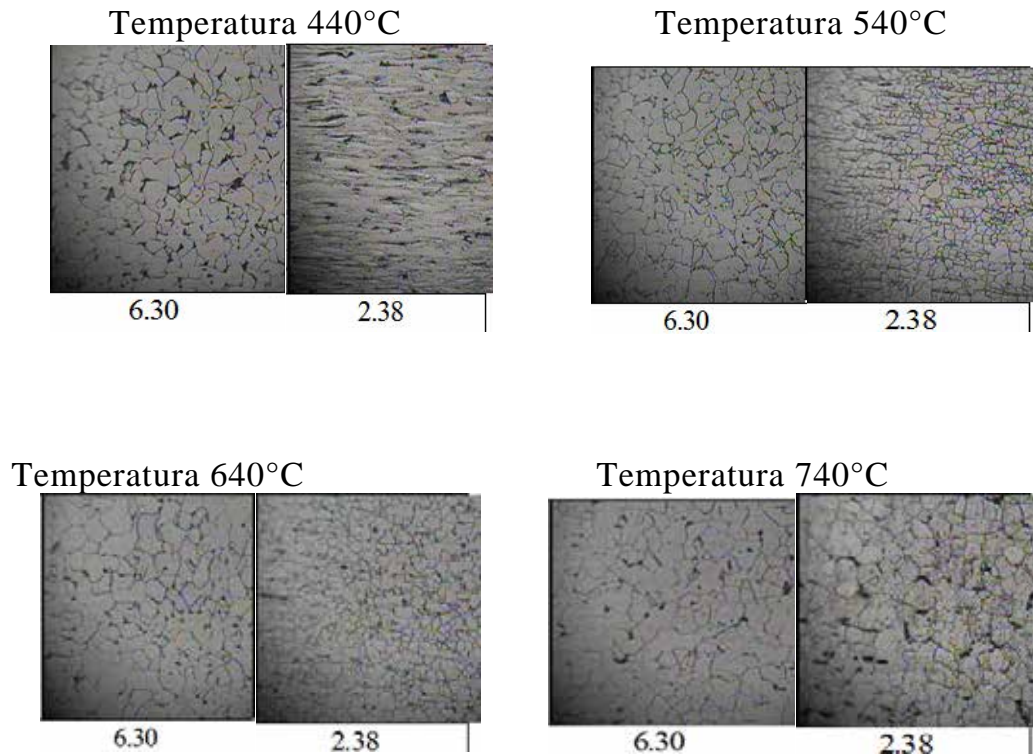


Figura 23: microestructura real para una deformación de 6.3mm a 2.38mm
Fuente: Universidad de Carabobo. (2018)

De igual manera se pudo observar como en la figura 22 y 23 la microestructura obtenida por la simulación es comparable con la data real de las microestructuras a diferentes temperaturas, en donde los polígonos de voronoi nos proporcionaron información sobre cuales granos almacenaban mas energía y estaban mas propensos a nuclear después del tratamiento térmico, en donde el color rojo se traduce en una mayor energía de nucleación, el color amarillo son zonas de media energía mientras que los tonos de azules son zonas de baja energía de nucleación.

CONCLUSIONES

Se realizó un estudio de la simulación de la recrystalización en aceros AISI 1010 basado en el modelo de Monte Carlo y los Polígonos de Voronoi, donde se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- 1- Las hojas de cálculo realizadas son capaces de simular cualquier condición de simulación para la recrystalización obteniendo datos significativos de acuerdo a la investigación.
- 2- Los resultados obtenidos con los modelos matemáticos que se utilizaron para la simulación, destacan la importancia que tiene la interacción de las variables asociadas con las fases del fenómeno de recrystalización.
- 3- Se observó con los resultados obtenidos que la simulación arroja un incremento de energía conforme aumenta el grado de deformación, expresando así de esta manera cuales granos están más próximos a la etapa de nucleación.
- 4- Se pudo demostrar que, para un mismo porcentaje de deformación, la fracción recrystalizada en función del tiempo, varía drásticamente a diferente temperatura, es decir que, para un mismo grado de deformación, el porcentaje de recrystalización se puede acelerar elevando la temperatura.
- 5- Haciendo uso de la simulación del fenómeno de recrystalización en un acero AISI 1010, se determinó la cantidad de energía de nucleación acumulada en los diferentes granos de la microestructura del material estudiado.

- 6- Se pudo concluir que los resultados obtenidos en las figuras 15 y 17 donde se muestra la distribución de energía, la velocidad de nucleación y la movilidad representa un aporte nuevo e innovador de observar el fenómeno de recristalización en unas de sus fases mas importantes como lo son la nucleación y el crecimiento del grano dando una mejor interpretación de la distribución de energía en los granos, de cuales nuclearan con una mayor velocidad y también determinar su movilidad.
- 7- El crecimiento de grano de las microestructuras simuladas sigue una cinética parabólica, dicha cinética depende de las condiciones de simulación dada por la ecuación de Avrami.

RECOMENDACIONES

1. Para próximos estudios basados en el análisis del comportamiento del fenómeno de recristalización, se recomienda usar los modelos matemáticos utilizados en esta investigación para diferentes materiales; haciendo uso de las propiedades físicas del material en estudio.
2. Siguiendo los parámetros de esta investigación, se puede hacer uso de otro sistema de simulación que represente el comportamiento dinámico del fenómeno de la recristalización.
3. Con los datos obtenidos de las gráficas de fracción recristalizadas vs tiempo, se invita a dar uso con fines académicos para la demostración de cuál es el porcentaje de recristalización para un tiempo estimado, tomando en cuenta la temperatura a la que se le realizará el tratamiento térmico, luego de ocurrida la deformación del material.
4. Es recomendable el uso de esta herramienta de simulación en el área industrial, específicamente aquellas que manejen procesos de conformados como trefilado y laminación, donde conocer a profundidad lo que ocurre en la microestructura del material proporciona un mejor resultado en las propiedades mecánicas deseadas, reduciendo de esta manera la pérdida de material en ensayos físicos.

REFERENCIAS

- Arias, Fidas (2006). **Proyecto de Investigación: Introducción a la Metodología**. Edición N° 5. Caracas: Editorial Episteme
- Askeland D.R. (1998). **Ciencia e Ingeniería de los materiales**.
- Callister JR, W. (1997). **Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales**
- Carvajal L. (2013) **Metodología de la Investigación**.
- F. J. Humphreys, **Recrystallization and related annealing phenomena** Chap. 3, 12, Edit. Elsevier, 2004
- Guanipa Victor ((2011) **Selección de Materiales de Ingeniería**. Segunda edición Departamento de Publicaciones de Ingeniería. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo. Venezuela
- G.R. Speich y R.M.Fisher: **Recryst., Grain Growth and Textures**, ASM, Metals Park Ohio (1966), 563.
- H. Hu: (1963).**Recovery and Recrystallization of Steels**, AIME Ed., Interscience, New York
- <http://aceroparalaconstruccion.wordpress.com/2008/08/06/alambreon-de>
http://www.infoacero.cl/acero/que_es.htm (julio - 2010)
- K. Magee, K. Mukunthan y E.B. Hawbolt: **Recrystallisation '90**. Ed. T. Chandra. **The Minerals, Metals & Materials Society** (1990), 393-398.
- Kucher A. (1989). **Tecnología de los Metales**. Editorial Mir. Moscú, Rusia.
Acero/ (Julio – 2010)
- Mangonon (2010)
- Manual de Trabajo de Grado de Maestrías y Tesis Doctorales** (2016). Editorial Universidad Pedagógica Experimental Libertador (UPEL).
- P. Gordon, en W.M. Mieller (ed.): **Energetics in Metallurgical Phenomena**, Vol.1, Gordon and Breach (1965), 205-240.

P.L. Mangonon, **Ciencia de materiales** Cap. 1, Edit. Prentice Hall

Smith, W.F. (1998). **Fundamentos de la ciencia e ingeniería** Editores. Madrid, España.

Sabino, C. (2004) El **proceso de la investigación** Disponible en:
http://paginas.ufm.edu/sabino/ingles/book/proceso_investigacion.pdf
[Consulta: Julio, 23, 2018]

<https://www.malavida.com/es/soft/microsoft-excel/q/para-que-sirve-excel.html#gref>

ANEXOS

ANEXOS

A. Tabla de ensayos de tracción realizados a los especímenes de alambre trabajado en frío y recocido a diferentes temperaturas.

Material: Alambre SIDOR, 0.10% de carbono.

El tiempo de recocido para todos los casos fue de una hora, tiempo para que ocurra la recristalización del material, según la definición de “temperatura de recristalización”.

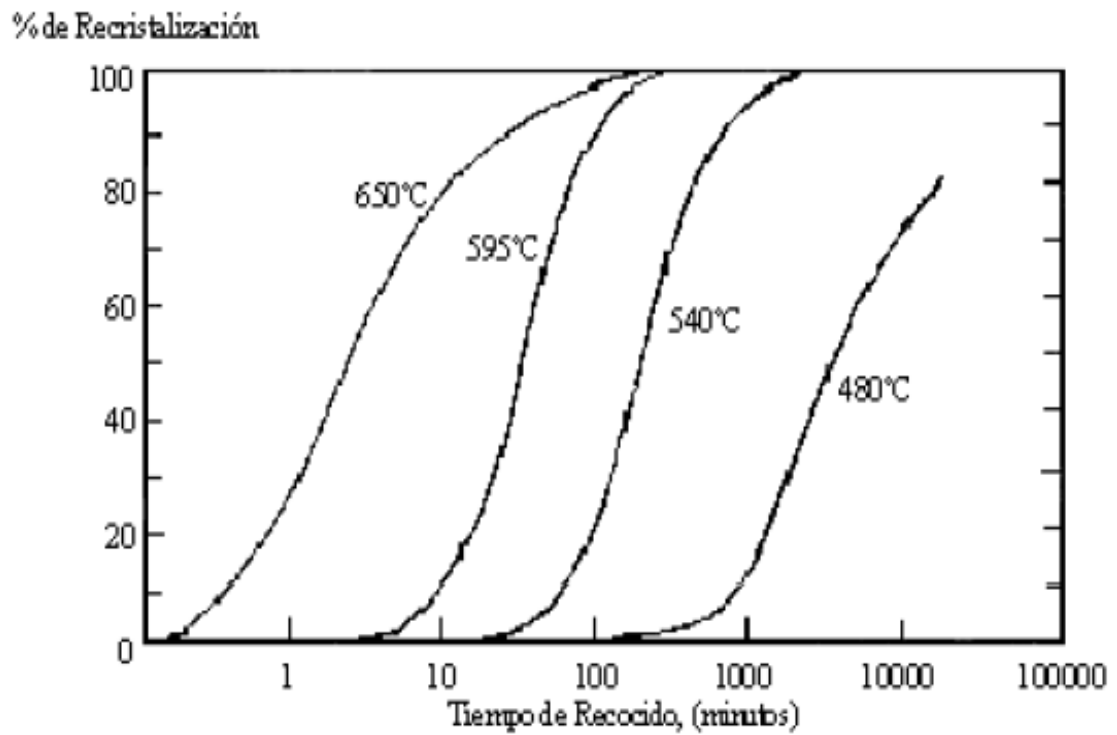
DIAMETRO (mm)	CONDICION	Cm (Kg)	Cf (Kg)	(mm)
6.3	Laminado en caliente	1270	950	27
6.3	L.C + Rec. 440 °C	1250	940	24
6.3	L.C + Rec. 540°C	1240	930	26
6.3	L.C + Rec. 640 °C	1233	960	26.4
6.3	L.C + Rec. 740°C	1166	880	26
6.3	L.C + Rec. 1100 °C	1200	740	22
4.76	Trefilado	1000	860	8
4.76	Tref. + Rec. 440 °C	960	850	9

4.76	Tref. + Rec. 540°C	1017	900	11
4.76	Tref. + Rec. 640 °C	700	500	24
4.76	Tref. + Rec. 740°C	616	410	26
4.76	Tref. + Rec. 1100 °C	695	420	22
3.97	Trefilado	780	725	7
3.97	Tref. + Rec. 440 °C	760	716	9
3.97	Tref. + Rec. 540°C	740	700	10
3.97	Tref. + Rec. 640 °C	460	360	28
3.97	Tref. + Rec. 740°C	450	335	28
3.97	Tref. + Rec. 1100 °C	450	285	14
3.17	Trefilado	570	530	5
3.17	Tref. + Rec. 440 °C	535	510	8
3.17	Tref. + Rec. 540°C	515	495	9
3.17	Tref. + Rec. 640 °C	330	270	29
3.17	Tref. + Rec. 740°C	290	225	30
3.17	Tref. + Rec. 1100 °C	310	220	23
2.38	Trefilado	343	320	4
2.38	Tref. + Rec. 440 °C	323	318	2.5

2.38	Tref. + Rec. 540°C	305	303	1.8
2.38	Tref. + Rec. 640 °C	173	140	25
2.38	Tref. + Rec. 740°C	160	127	30
2.38	Tref. + Rec. 1100 °C	185	124	13.5

Fuente: Laboratorio de materiales y procesos de fabricacion
De la universidad de Carabobo.

B. Grafica de fracción recristalizada para aceros AISI 1010 a las temperaturas de 480°, 540°, 595° y 650°.

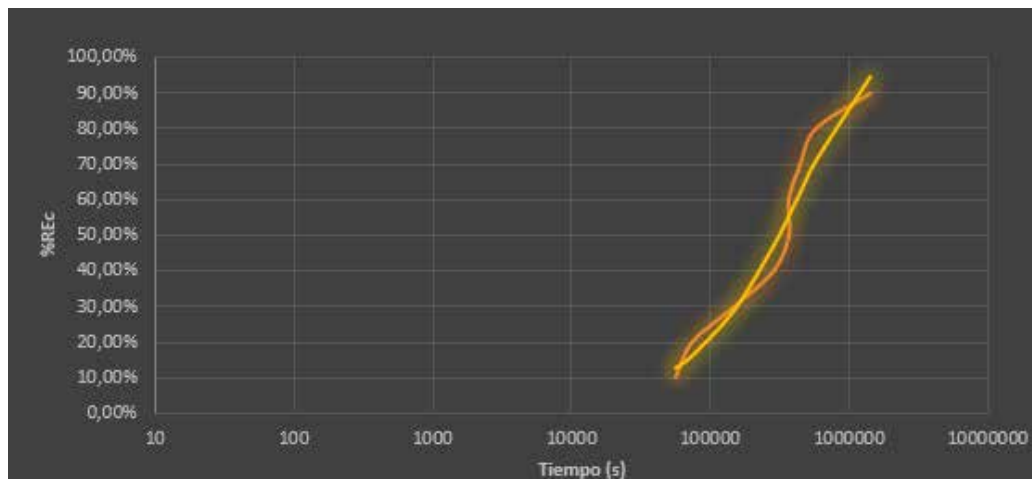


APENDICES

A. Resultados de curva de Avrami a 480°C, para observar fracción recristalizada vs tiempo.



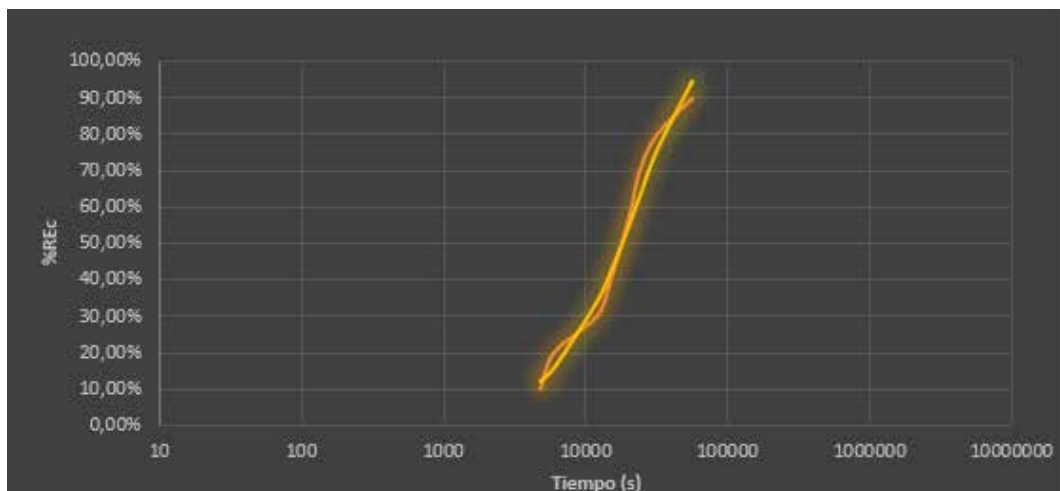
Grafica de fraccion recristalizada vs el tiempo para una temperatura de 480°C.



B. Resultados de curva de avrami a 540°C, para observar fracción recristalizada vs tiempo.



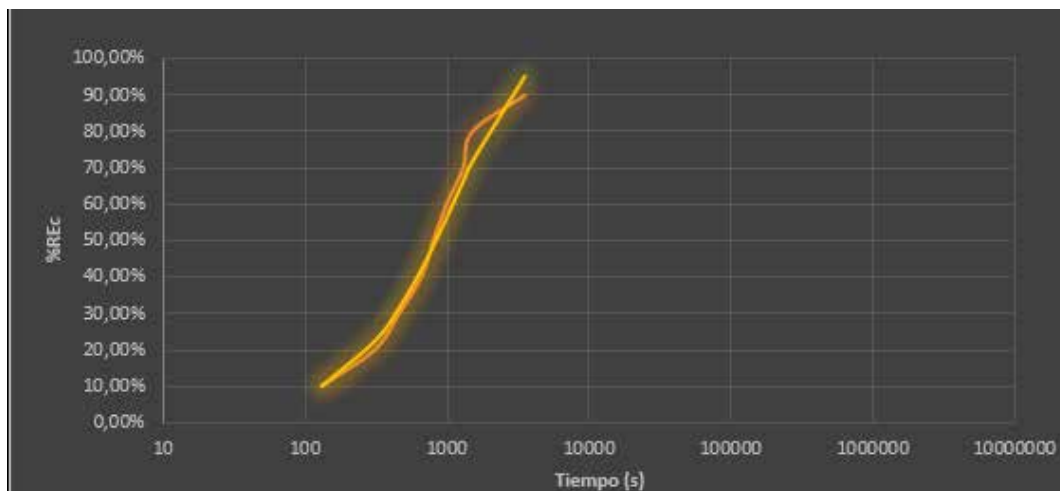
Grafica de fraccion recristalizada vs el tiempo para una temperatura de 540°C.



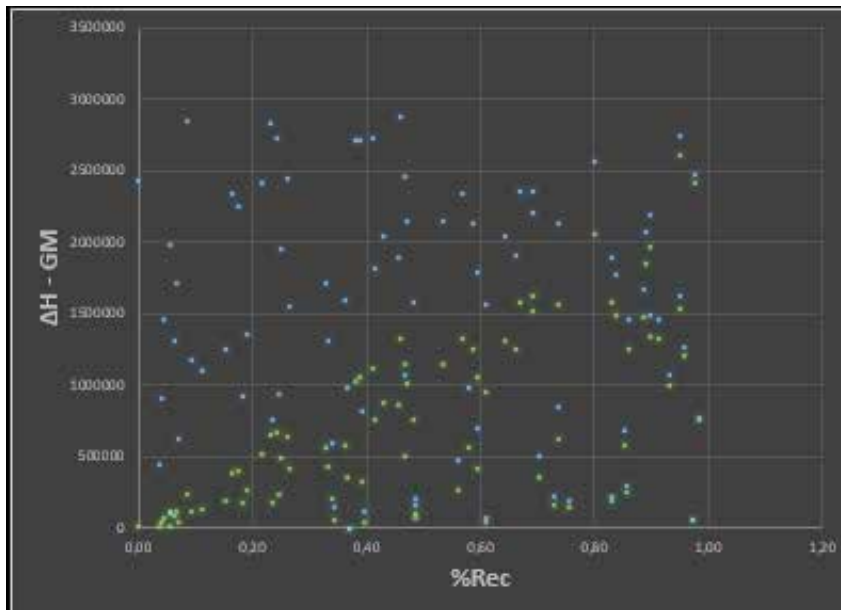
C. Resultados de curva de avrami a 640°C, para observar fracción recristalizada vs tiempo.



Grafica de fraccion recristalizada vs el tiempo para una temperatura de 640°C.



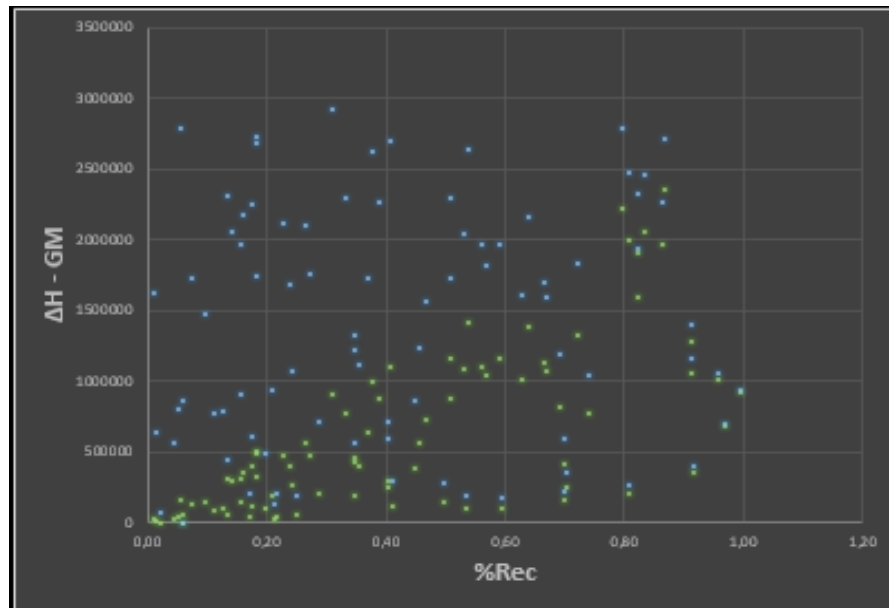
D. Resultados obtenidos con la herramienta de monte Carlo para una reducción de 6,3 a 3,97 mm teniendo así una deformación 60%.



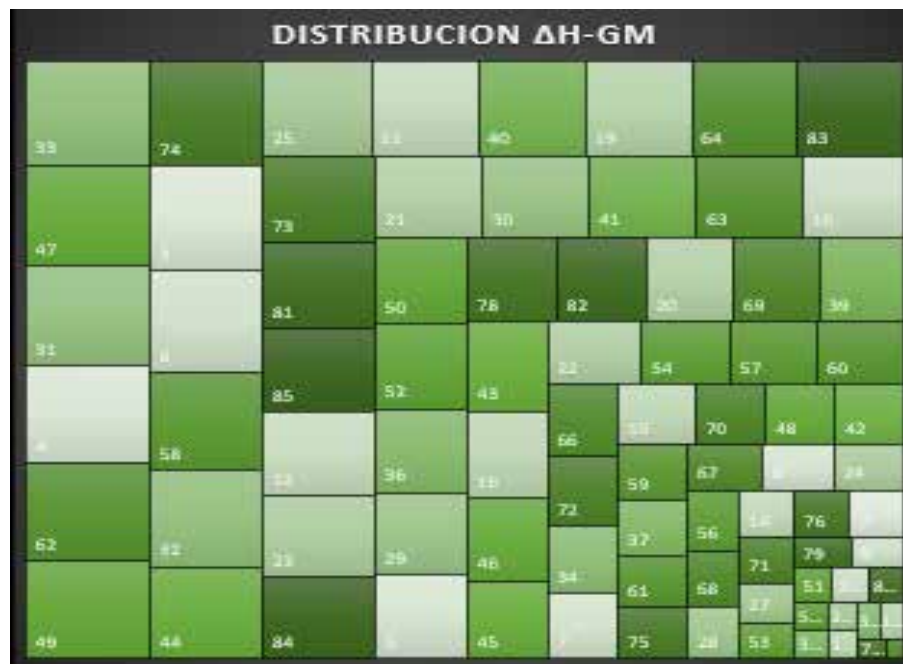
Distribucion de energia acumulada, velocidad de crecimiento y movilidad para una reduccion de 6,3 a 3,97mm.



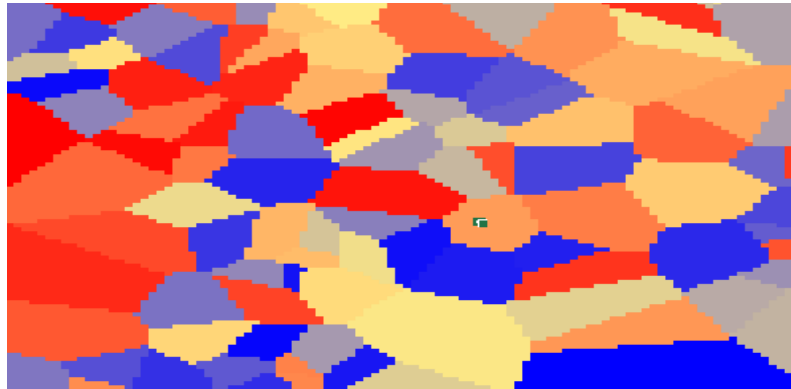
E. Resultados obtenidos con la herramienta de monte Carlo para una reducción de 6,3 a 3,17 mm teniendo así una deformación 75%.



Distribucion de energia acumulada, velocidad de crecimiento y movilidad para una reduccion de 6,3 a 3,17mm.

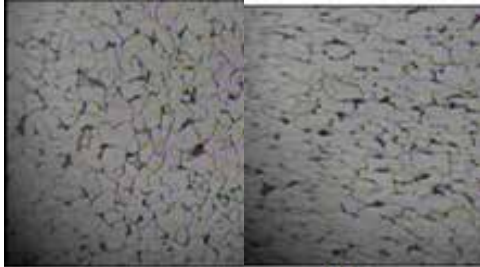


F. Poligono de voronoi para una reduccion de 6,3mm a 3,97mm (60%)



Microestructura real obtenida para un 60% de deformacion

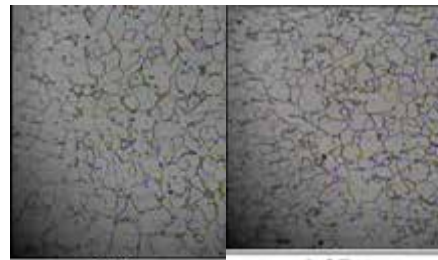
Temperatura 440°C



6.30

3.97

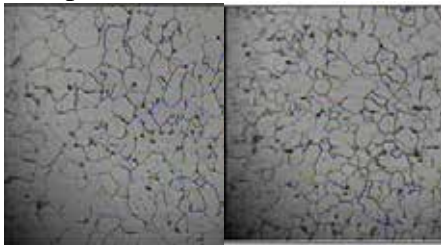
Temperatura 540°C



6.30

3.97

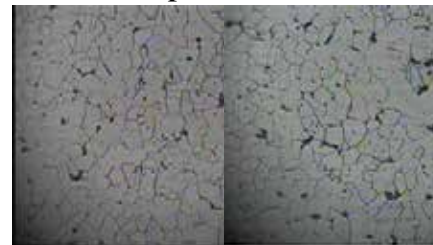
Temperatura 640°C



6.30

3.97

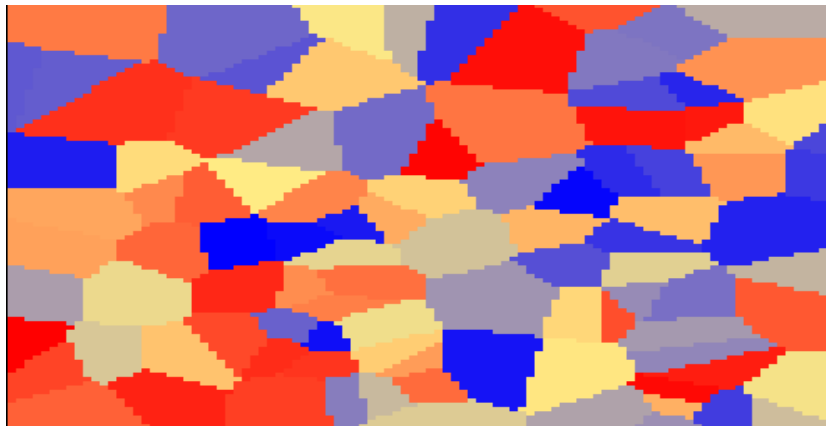
Temperatura 740°C



6.30

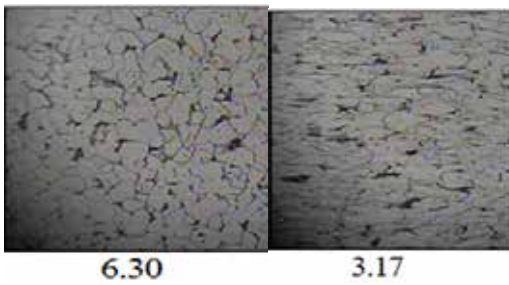
3.97

Poligono de voronoi para reducción de 6,3mm a 3,17mm (75%)

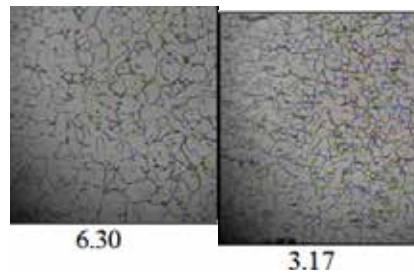


Microestructura real obtenida para un 75% de deformación

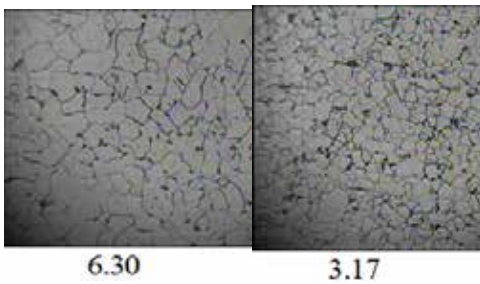
Temperatura 440°C



Temperatura 540°C



Temperatura 640°C



Temperatura 740°C

