

CIATEQ, A. C. Centro de Tecnología Avanzada
Dirección de Posgrado



*Efectos del recocido subcrítico en la dureza y tamaño de
grano del acero AISI 12L14*

TESIS QUE PRESENTA

Ing. Dante Jesús Cajero Medina
Asesor: Dr. José Martín Melchor Leal

Para obtener el grado de

Maestro en
Manufactura Avanzada

Aguascalientes, Ags.
mayo, 2022

CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR



Aguascalientes, Ags., 20 de Abril de 2022.

Mtro. Geovany González Carlos
Coordinador Académico de Posgrado
CIATEQ, A.C.

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del Ingeniero Dante Jesús Cajero Medina, una vez revisado su Proyecto Terminal de tesis, titulado "Efectos del recocido subcrítico en la dureza y tamaño de grano del acero AISI 12L14" **autorizo** que el citado trabajo sea presentado por el alumno para su revisión, con el fin de alcanzar el grado de **Maestro en Manufactura Avanzada**.

Sin otro particular por el momento, agradezco la atención prestada.



Doctor, José Martín Melchor Leal
Asesor Académico



Doctor, José Martín Melchor Leal
Asesor en Planta

CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR

San Luis Potosí, San Luis Potosí, 03 de mayo del 2022.

Mtro. Geovany González Carlos
Coordinador Académico
CIATEQ, A.C.

Por medio de la presente me dirijo a usted en calidad de Revisor del proyecto terminal del alumno Dante Jesús Cajero Medina, cuyo título es:

**“Efectos del recocido subcrítico en la dureza y tamaño de grano del acero
AISI 12L14”**

Después de haberlo leído, corregido e intercambiado información con el alumno, y realizado los cambios que le fueron sugeridos, puede ser autorizada su impresión, a fin de que se inicien los trámites correspondientes para su defensa.

Sin otro particular por el momento, y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta en beneficio del estudiante y la Institución, agradezco la atención prestada.

Atentamente,


Dr. Hugo Arceos Gutiérrez

F31b Revisión: 01-Mar-2021

DEDICATORIA

A mi padre y a mi madre, que me enseñaron que la educación es la base para un mejor futuro.

A mi esposa, por todo su amor, cariño, apoyo y comprensión durante este largo y difícil camino.

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor, el Dr. José Martín Melchor Leal, por su paciencia y dedicación en esta invaluable labor de asesoría que me brindo, por los valiosos consejos en el ámbito profesional y personal.

A la empresa donde laboro, Sensata Technologies, por la oportunidad y el apoyo a su personal para que pueda desarrollarse y que contribuya a construir un mejor futuro para todos.

A mis profesores y personal administrativo, por darme la oportunidad de aprender y formarme en esta institución.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo y confianza que me brindo al otorgarme una beca.

* * *

RESUMEN

La motivación de esta investigación tiene como objetivo evaluar el efecto del recocido subcrítico sobre el tamaño de grano y la dureza en el acero AISI 12L14.

En este estudio, especímenes maquinados, usados en la industria automotriz, fabricados con barras de acero con bajo contenido de carbono y roladas en frío con una reducción del 10%, se trataron térmicamente a diferentes temperaturas por debajo de la temperatura de transformación de Perlita a Austenita (A_{c1}).

El tamaño de grano promedio se midió de acuerdo con el método de intercepción lineal de Heyn en la ASTM E112. La dureza se midió en la escala Vickers según la ASTM E384.

Se encontró que la dureza disminuye y el tamaño de grano aumenta en función de la temperatura de recocido subcrítico. Los resultados muestran una caída importante en la dureza a partir de la temperatura de recocido de 550°C. Esta reducción se debe a la recristalización de los granos, que aumentan su tamaño con el incremento de la temperatura de recocido. Así mismo, fue analizada la distribución del tamaño de grano en los diferentes grupos de prueba mediante histogramas de frecuencia.

Con base en la relación de Hall-Petch, los datos de dureza y tamaño de grano obtenidos en el estudio, fue propuesta una ecuación que predice la dureza del acero en cuestión, a partir del tamaño de grano. La confiabilidad del modelo propuesto fue evaluada por valores estadísticos como: R^2 , error absoluto medio(EAM) y la raíz del error cuadrático medio(RECM).

Palabras clave: Ingeniería y tecnología, Tecnología de materiales, Propiedades de los materiales, AISI 12L14, Relación Hall-Petch, Dureza.

ABSTRACT

The motivation of this work aims to evaluate the effect of subcritical annealing on the grain size and hardness of AISI 12L14 steel.

In this study, machined specimens, used in the automotive industry, made from cold-rolled, low-carbon steel bars with a 10% reduction, were heat-treated at different temperatures below the transformation temperature of pearlite to austenite (A_{c1}).

The average grain size was measured according to the Heyn linear intercept method in ASTM E112. Hardness was measured on the Vickers scale according to ASTM E384.

It was found that hardness decreases and grain size increases as a function of subcritical annealing temperature. The results show a significant drop in hardness from the annealing temperature of 550°C. This reduction is due to the recrystallization of the grains, which increase in size as a function of the annealing temperature. Likewise, the grain size distribution in the different test groups was analyzed using frequency histograms.

Based on the Hall-Petch relationship, the hardness and grain size data obtained in the study, allows to propose an equation that predicts the hardness of the studied steel, from the grain size data. The reliability of the proposed model was evaluated by statistical values such as: R^2 , mean absolute error (MAE) and root mean square error (RMSE).

Keywords: Engineering and technology, Materials technology, Materials properties, AISI 12L14, Hall-Petch relationship, Hardness.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xi
GLOSARIO	xii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	2
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	2
1.3. JUSTIFICACIÓN	3
1.4. OBJETIVOS.....	3
1.4.1. Objetivo general.....	3
1.4.2. Objetivos específicos	4
1.5. HIPÓTESIS.....	4
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. HIERRO	5
2.2 DIAGRAMA HIERRO CARBONO	8
2.3 ESTRUCTURA METALOGRÁFICA	12
2.4 EFECTOS DE LAS ALEACIONES CON OTROS ELEMENTOS.....	14
2.5 TRABAJO O ROLADO EN FRÍO	15
2.6 TRATAMIENTO TÉRMICO	18
2.6.1 Recocido.....	18
2.7 CLASIFICACIÓN DEL ACERO	23
2.8 NOMENCLATURAS PARA NOMBRAR EL ACERO	24
2.9 ACERO AISI 12L14	26
3. PROCEDIMIENTO.....	27
3.1. ESPECÍMENES	27
3.2. GRUPOS Y FLUJO DE LA PRUEBA	29
3.2.1 Recocido subcrítico	30
3.3 MEDICIÓN DUREZA.....	33
3.4 MEDICIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO PROMEDIO.....	34

4. RESULTADOS	36
4.1 DUREZA	36
4.2 TAMAÑO DE GRANO.....	38
4.3 TAMAÑO DE GRANO VS DUREZA	42
CONCLUSIONES	46
RECOMENDACIONES	47
APORTACIÓN DE LA TESIS.....	48
APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS.....	49
REFERENCIAS	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ferrita con estructura cubica centrada en el cuerpo.	5
Figura 2. Austenita con estructura cúbica centrado en las caras.	6
Figura 3. Fases del hierro puro a distintas temperaturas.	7
Figura 4. Diagrama de fase hierro-carbono.	9
Figura 5. Porción del diagrama hierro-carbono correspondiente al acero.	10
Figura 6. Solubilidad del carbono en hierro alpha.	11
Figura 7. Microestructura de ferrita.	12
Figura 8. Microestructura de cementita.	13
Figura 9. Microestructura de perlita.	13
Figura 10. Tipos de defectos en un retículo monocristalino.	16
Figura 11. Dislocación de una estructura atómica.	16
Figura 12. Efecto del trabajo en frío en las propiedades mecánicas del acero.	17
Figura 13. Esquema de procesamiento termo-mecánico del acero.	17
Figura 14. Temperatura de recristalización en función del tiempo de reposo.	21
Figura 15. Efecto del trabajo en frío en la temperatura de recristalización.	21
Figura 16. Evolución de la microestructura durante el tratamiento térmico.	22
Figura 17. Fases y efectos en las propiedades mecánicas del acero durante el recocido subcrítico.	22
Figura 18. Clasificación del acero según composición química.	24
Figura 19. Tipos de acero según clasificación AISI-SAE.	26
Figura 20. Espécimen usado en el estudio.	28
Figura 21. Esquema de proceso de maquinado en Hydromat.	28
Figura 22. Esquema de procesamiento termo-mecánico.	29
Figura 23. Perfil de tratamiento térmico	31
Figura 25. Temperatura de reposo para: a) grupo B, b) grupo C, c) grupo D y d) grupo E.	32
Figura 24. Acomodo de especímenes en el horno.	33
Figura 26. Espécimen maquinado usado en el estudio.	33
Figura 27. A) Vista superior B) Vista lateral C) Zona de medición del tamaño de grano.	34

Figura 28. Evolución de la dureza promedio en función de la temperatura de recocido subcrítico. 37

Figura 29. Diagrama de caja para las mediciones de dureza. 38

Figura 30. Evolución del tamaño de grano promedio en función de la temperatura de recocido subcrítico..... 39

Figura 31. Micrografías que muestran la microestructura de los especímenes procesados en el experimento: A) Sin tratamiento térmico, B) 260°C, C) 550°C, D) 600°C y E) 650°C. 40

Figura 32. Distribución del tamaño de grano: a) sin tratamiento térmico, b) con recocido subcrítico. 41

Figura 33. Evolución de la dureza y tamaño de grano en función de la temperatura de recocido subcrítico..... 42

Figura 34. Relación de Hall-Petch: Tamaño de grano vs dureza. 43

Figura 35. Comparación entre los valores obtenidos experimentalmente y mediante el modelo Hall-Petch desarrollado. 45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Arreglo atómico del hierro a distintas temperaturas.	8
Tabla 2. Rangos de temperatura para el trabajo del metal.....	15
Tabla 3. Composición química del acero AISI 12L14 según ASTM A519.	26
Tabla 4. Composición química de los especímenes de acero AISI 12L14.	27
Tabla 5. Resumen de temperaturas de recocido subcrítico.....	29
Tabla 6. Tiempo de reposo mínimo sugerido por AMS 2759/1D.....	31
Tabla 7. Tamaño de grano según ASTM E112.....	35
Tabla 8. Resumen de mediciones de dureza.	36
Tabla 9. Resumen de mediciones de tamaño de grano.	39
Tabla 10. Valores estadísticos calculados para el modelo desarrollado.....	44
Tabla 11. Comparación de dureza experimental y calculada.	44

GLOSARIO

Acero al carbono: Acero combinado con diferentes cantidades de carbono, no se especifica una cantidad mínima de cualquier elemento de aleación.

Aleación: materia con propiedades metálicas y se compone de 2 o más elementos químicos.

Corrosión: Reacción que puede formarse de manera química o electroquímica entre un material, generalmente metálico, y su entorno, esto produce el deterioro del material y sus propiedades.

Ductilidad: Habilidad de un material a ser doblado, formado o estirado sin romperse.

Dureza: Resistencia de un metal a la deformación plástica, usualmente por hendidura. Sin embargo, el termino también se puede referir a la resistencia a ser rayado, cortado o erosionado. Se mide a través de pruebas de hendidura como lo son Brinell, Rockwell y Vickers.

Elasticidad: Propiedad de un material para deformarse ante la tensión y recuperar su forma original y dimensiones una vez que la tensión ha sido liberada.

Elemento de aleación: Un elemento químico que es añadido a un metal para cambiar sus propiedades.

Ferrita: Solución sólida de un elemento o más, en hierro cúbico centrado en el cuerpo.

Maquinabilidad: Determina la aceptabilidad de una pieza de trabajo para ser mecanizada por una herramienta.

Microdureza: La dureza de un material determinada por presionar con un indentador Vickers o Knoop en la superficie del material bajo una carga muy ligera, usualmente la hendidura es tan pequeña que tiene que ser medida con un microscopio.

Microestructura: Estructura microscópica de un espécimen de metal seccionado y pulido, revelada por la observación desde un microscopio.

Propiedades mecánicas: Las propiedades de un material que revela su comportamiento elástico y no elástico cuando alguna fuerza es aplicada. De este modo indica su idoneidad para aplicaciones mecánicas.

Trabajo o rolado en frío: Se deforma plásticamente bajo condiciones controladas de temperatura y tasa de deformación. Se trabaja por debajo de la temperatura de recristalización, usualmente a temperatura ambiente.

1. INTRODUCCIÓN

Debido a sus propiedades, el hierro es el más importante de los elementos metálicos. Es usado como elemento principal para crear todo tipo de aleaciones, lo que lo hace el material de ingeniería más usado e importante de nuestros tiempos (Prabhudev, 1988).

Las propiedades del hierro y acero están relacionadas a su composición química, procesamiento y la microestructura resultante, esta correlación se conoce desde principios del siglo 20 (Davis, 1998). Para ciertos tipos de hierro y acero, la mayoría de sus propiedades dependen de la microestructura, a estas propiedades se les llama que son sensibles a la estructura, por ejemplo; dureza, fuerza de fluencia, ductilidad, entre otros (Martínez-de-Guerenu, Díaz-Fuentes, & Gutiérrez, 2004). La relación entre el esfuerzo de fluencia o dureza y el tamaño de grano es expresada por la ecuación de Hall-Petch:

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}} \quad \text{ó} \quad H = H_0 + \frac{k}{\sqrt{d}}$$

Ecuación 1. Ecuación de Hall-Petch.

Donde σ_y es el límite elástico, H es la dureza, d es el tamaño de grano y σ_0 , H_0 y k son constantes independientes del tamaño de grano; σ_0 , H_0 son el estrés de fricción y la dureza de fricción respectivamente, mientras que k es la pendiente de la relación Hall-Petch (Bhansali, Keche, Gogte, & Chopra, 2020). A lo largo del tiempo, muchos investigadores han demostrado la efectividad de la relación de Hall-Petch (Song, Yeon, & Na, 2019), (Yoshida, y otros, 2019), (Hurley, Muddle, & Hodgson, 2001), (Mabuchi, Hasegawa, & Ishikawa, 1999). M.Y. Liu et al. han estudiado la relación de Hall-Petch para un acero al carbono que fue roloado a diferentes temperaturas y porcentajes de reducción, observaron que a medida que aumenta el tamaño de grano promedio, disminuye la dureza (Liu, y otros, 2003).

Hasta el momento se han realizado numerosos trabajos para estudiar el efecto de la microestructura resultante en las propiedades mecánicas de los aceros de bajo contenido en carbono tras realizar tratamientos térmicos a diferentes temperaturas

(Tian, Xu, Liang, & Yuan, 2017), (Buszko, Krella, Marchewicz, & Gajowiec, 2021), (Kotan, Saber, Koch, & Scattergood, 2012), (Poyraz & Ögel, 2020). Martínez-de-Guerenu et al (Martínez-de-Guerenu, Díaz-Fuentes, & Gutiérrez, 2004) encontraron que en aceros con bajo contenido de carbono altamente deformados (84 %) por rolado en frío, las temperaturas de recocido iguales o inferiores a 500 °C, incluso después de un largo tiempo de reposo de aproximadamente 13.6 horas, no producen ningún cambio significativo en la dureza de los especímenes. Sin embargo, para el recocido realizado a 600 °C, luego de 10 segundos de reposo, se observa una importante disminución de la dureza, la cual es resultado del proceso de recristalización.

En este documento se estudia la evolución del tamaño de grano promedio y la dureza del acero bajo en carbono AISI 12L14 como consecuencia del tratamiento térmico de recocido subcrítico a 4 temperaturas distintas (260, 550, 600 y 650 °C) por debajo de la temperatura crítica A_{c1} (725.3 °C).

1.1. ANTECEDENTES

El acero AISI 12L14 el cual será investigado en el presente trabajo es usado en diferentes productos producidos dentro de la planta de Sensata Technologies de México, sin embargo, desde el año de 2017 se ha tenido problemas de desperdicio en una de las operaciones debido a la aparición de grietas debido a que la dureza del material no es la adecuada, con el paso de tiempo y gracias a diferentes investigaciones y contramedidas que se han implementado, como tratamiento térmico el cual ayuda a remover el estrés residual (Buszko, Krella, Marchewicz, & Gajowiec, 2021), se ha reducido la cantidad de desperdicio, sin embargo, el problema no ha sido eliminado por completo.

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

A pesar de que el acero AISI 12L14 es ampliamente usado en productos de la industria automotriz, es muy común tener problemas de grietas en los procesos

finales para la fabricación de productos, ya que no se conoce con certeza a que temperatura se logra alcanzar la fase de recristalización, debido a que en gran medida esta temperatura varía dependiendo varios factores como el procesamiento previo y composición química, por lo tanto, los tratamientos térmicos no son realizados con los parámetros correctos de temperatura y duración. Cuando se alcanza la recristalización en un tratamiento térmico, la dureza del metal disminuye y la ductilidad aumenta, por lo que el material es menos propenso a presentar grietas.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Es necesario conocer el efecto de la temperatura del tratamiento térmico de recocido subcrítico en la dureza y tamaño de grano para poder elegir un perfil térmico adecuado, en el cual, la fase de recristalización sea alcanzada y así los granos deformados durante el proceso de rolado en frío sean reemplazados por nuevos granos libres de deformación. Con esto, se busca tener un valor de dureza y tamaño de grano en el acero AISI 12L14 el cual sea favorable a los procesos realizados en la transformación del material y las grietas ya no aparezcan.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Conocer los cambios en la dureza y tamaño de grano en el acero AISI 12L14 al realizarle tratamientos térmicos de recocido subcrítico a diferentes temperaturas por debajo de la temperatura crítica Ac_1 .

1.4.2. Objetivos específicos

1. Obtener los valores de dureza y tamaño de grano de las muestras obtenidas de los distintos grupos.
2. Comparar y analizar los datos obtenidos a partir de las pruebas.
3. Desarrollar un modelo que ayude a predecir la dureza del acero a partir del tamaño de grano.

1.5. HIPÓTESIS

¿Es posible reducir la dureza y aumentar el tamaño de grano en el acero AISI 12L14 debido al recocido subcrítico?

2. MARCO TEÓRICO

2.1. HIERRO

El hierro es un metal alotrópico, lo que significa que puede existir en más de una estructura cristalina dependiendo principalmente de la temperatura y la presión a la cual es sometido. Su gran abundancia en la corteza terrestre lo convierte en uno de los metales más utilizados, aunque rara vez se encuentra en estado puro, sino más bien combinado con otros elementos en forma de óxidos, carbonatos o sulfuros, se obtiene con cierta facilidad y con una pureza adecuada. (Villoria & Bohórquez, 2016).

El hierro es estable a temperaturas bajas y bajo estas condiciones es definido por la letra griega alfa (α). Una segunda forma también estable, pero a mayores temperaturas se le conoce como etapa gamma (γ) y una tercera etapa, pero a temperaturas todavía más altas se le conoce como etapa delta (δ).

La alotropía del hierro está formada por dos formas cristalinas, a temperatura ambiente el hierro puro es un sistema cúbico centrado en el cuerpo, lo cual significa que tiene un átomo en cada uno de sus 8 esquinas y otro en el centro. En la Figura 1 se puede observar el hierro Alpha, llamado metalúrgicamente como ferrita. Cuando el hierro puro es calentado, no hay cambios en la microestructura hasta los 910 °C., por lo tanto, no habrá cambios en el acomodo de los átomos antes de esta temperatura, a este se le conoce como punto de transformación Ac_3 .

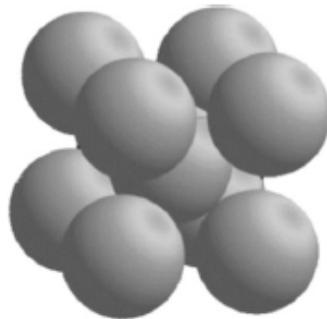


Figura 1. Ferrita con estructura cubica centrada en el cuerpo.

(Totten, 2006)

Cuando el hierro es calentado por encima del punto Ac_3 , el arreglo atómico se transforma a un sistema cúbico centrado en las caras, como se muestra en la figura 2, a esto se le llama hierro gamma (γ), llamado metalúrgicamente como austenita.

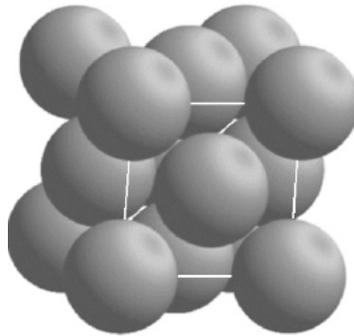


Figura 2. Austenita con estructura cúbica centrado en las caras.

(Totten, 2006)

Si el proceso de calentamiento continua, la fase gamma es transformada en una estructura cúbica centrada en el cuerpo otra vez a $1392^{\circ}C.$, a esto se le conoce como hierro delta (δ). Si el calentamiento continua, se provoca la vibración térmica en los átomos y aproximadamente a $1536^{\circ}C.$ las fuerzas cohesivas desaparecen, lo que deriva en un cambio de estado en el hierro, de sólido a líquido o fundido. En el proceso de enfriamiento, las transformaciones ocurren a las mismas temperaturas aproximadamente. En la Figura 3 se puede observar las distintas fases del hierro a distintas temperaturas.

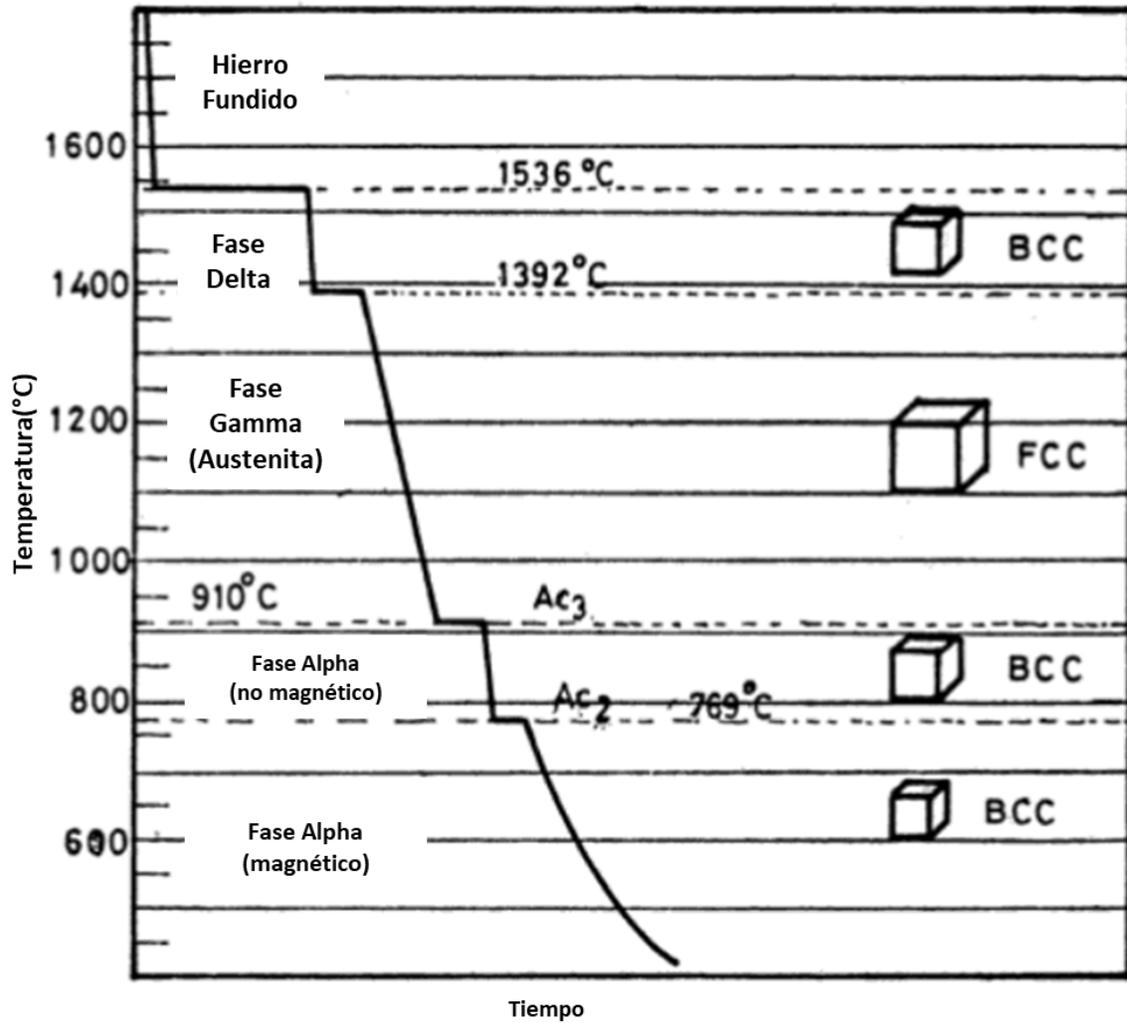


Figura 3. Fases del hierro puro a distintas temperaturas.

(Prabhudev, 1988)

El hierro es ferromagnético a temperatura ambiente, sin embargo, sus propiedades magnéticas desaparecen conforme se incrementa la temperatura, esta propiedad desaparece por completo a 769 °C., a este punto se le llama Ac_2 . Esta propiedad ha servido en numerosos estudios para conocer las propiedades mecánicas del acero sin tener que utilizar métodos destructivos (Martínez-de-Guerenu, Díaz-Fuentes, & Gutiérrez, 2004).

La Tabla 1 ilustra el arreglo atómico, puntos críticos y temperaturas en las cuales ocurren las transformaciones al calentar o enfriar el hierro.

Tabla 1. Arreglo atómico del hierro a distintas temperaturas.

Durante el calentamiento		Durante el enfriamiento	
Estructura atómica	Temperatura, °C	Estructura atómica	Temperatura, °C
Hierro alfa, cúbica centrada en el cuerpo	≤ 910	Hierro alfa, cúbica centrada en el cuerpo	1536-1392
Hierro gamma, cúbica centrada en la cara	910-1392	Hierro gamma, cúbica centrada en la cara	1392-898
Hierro delta, cúbica centrada en el cuerpo	1392-1536	Hierro delta, cúbica centrada en el cuerpo	≤ 898

Elaboración propia

2.2 DIAGRAMA HIERRO CARBONO

De manera general, el acero es definido como la aleación entre hierro, carbono y otros elementos, que son capaces de ser deformados en distintas formas ya sea en frío o calor (Bramfitt & Benschoter, 2002).

La versatilidad del acero depende principalmente en sus propiedades que son obtenidas gracias a aleaciones con otros elementos (además del hierro) y a adecuados tratamientos térmicos. La manera más fácil de clasificar los aceros es por su composición química (ASM International, 2002). Por mucho tiempo se ha querido establecer una sola norma para su clasificación, sin embargo, no ha sido posible, ya que cada país u organización tiene la suya (ASTM International, 2016).

Las propiedades mecánicas están determinadas por la microestructura y la microestructura puede ser modificada por los tratamientos térmicos para así poder obtener las propiedades mecánicas requeridas.

Las propiedades del acero se deben principalmente a la presencia de ciertos elementos químicos, sin embargo, el carbono, es el más importante entre los

elementos que se usan para las aleaciones. Cuando el hierro es aleado con carbono, las transformaciones que ocurren a ciertos rangos de temperatura están relacionados al porcentaje de carbono presente. De acuerdo con las condiciones en las cuales la aleación hierro-carbono es formado, el carbono puede estar presente en una solución o en la forma elemental del grafito, o en una combinación de carburo de hierro (Fe_3C).

El diagrama que representa que cambios de fase ocurren durante enfriamiento o calentamiento lento y en relación con el contenido de carbono, se le llama diagrama de fase hierro-carbono. Este diagrama es la base para el correcto entendimiento de los tratamientos térmicos. En la siguiente ilustración (Figura 4) se puede observar el diagrama de fase hierro-carbono.

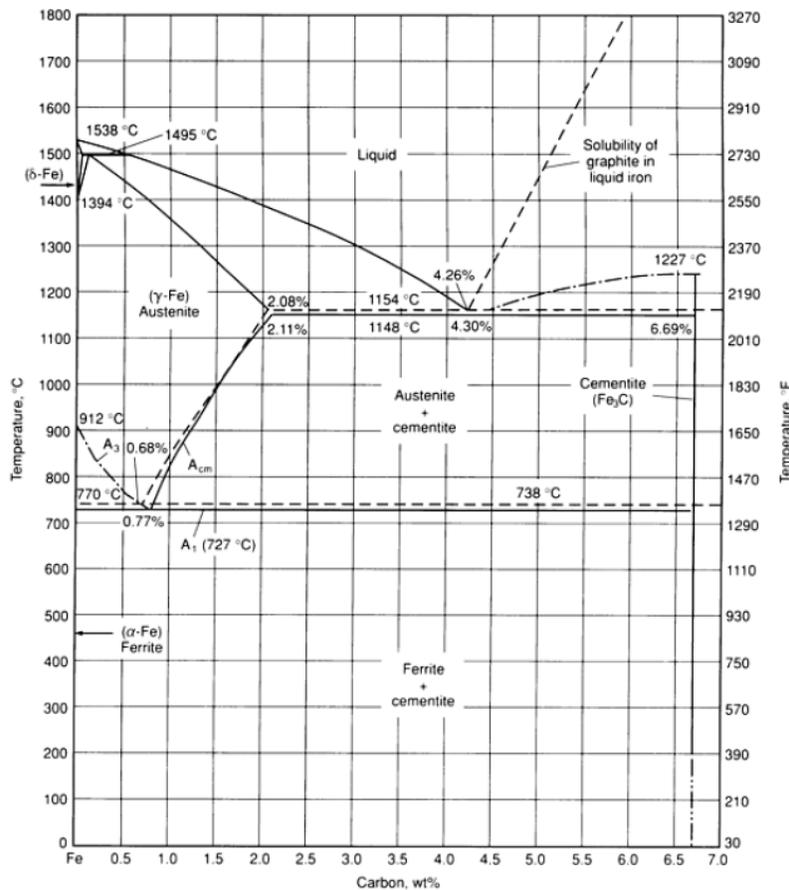


Figura 4. Diagrama de fase hierro-carbono.

(ASM International, 2013)

Cuando el porcentaje de carbono en relación con el peso es menor al 2.11%, se le conoce como acero, cuando es mayor al 2.11% se le conoce como hierro fundido.

La Figura 5 muestra las diferentes microestructuras correspondientes a esa parte del diagrama hierro-carbono a la que aplica el tratamiento térmico del acero.

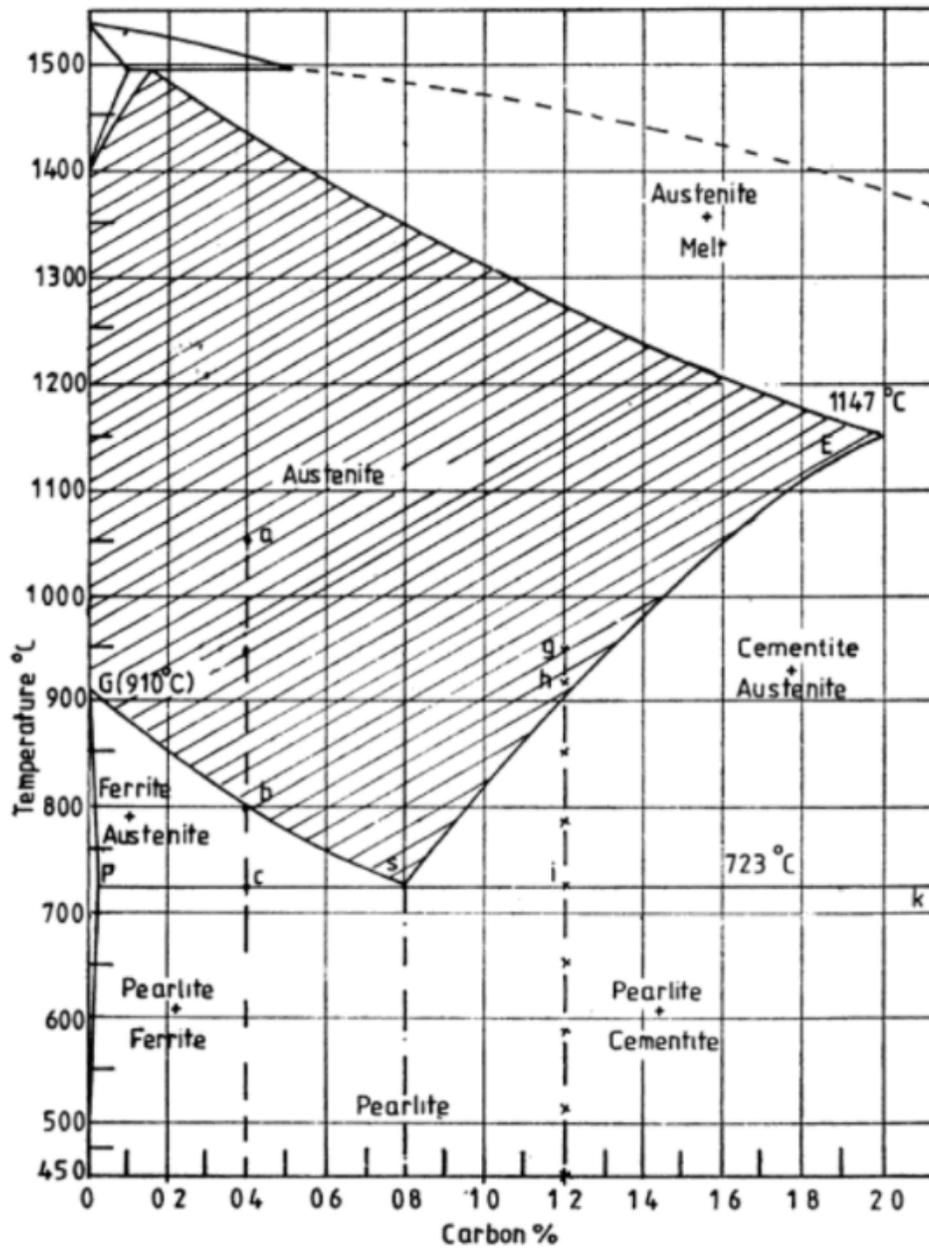


Figura 5. Porción del diagrama hierro-carbono correspondiente al acero.

(Prabhudev, 1988)

El carbono ayuda a estabilizar la austenita incrementando el nivel de formación de austenita en el acero. La máxima solubilidad de carbono en austenita es 2.06% (punto E, Figura 5) a 1147°C., el porcentaje de carbono capaz de ir a una solución en ferrita incrementa desde cero a 910 °C. hasta una máxima de 0.02% a 723 °C., Con enfriamiento adicional, este decrece a aproximadamente 0.008% a temperatura ambiente (Figura 6).

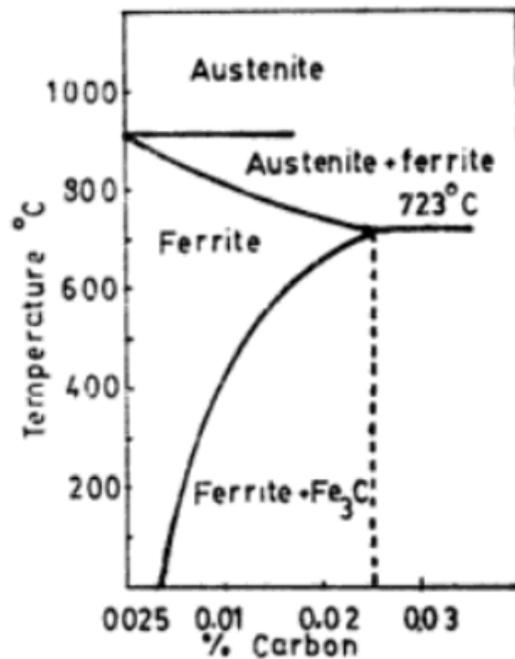


Figura 6. Solubilidad del carbono en hierro alpha.

(Prabhudev, 1988)

Como lo muestra la línea GS en la Figura 5, es evidente que conforme el contenido de carbono en el hierro incrementa, la transformación de austenita en la ferrita decrece. Llegando a un máximo de 0.8% de carbono a 723 °C. como lo muestra el punto s. A este punto se le llama punto eutectoide. La composición eutectoide de los aceros es un punto de referencia para la clasificación de los aceros:

- Acero Eutectoide: contienen 0.8% de carbono.
- Acero Hipoeutectoide: contiene menos de 0.8% de carbono.
- Acero Hipereutectoide: contiene más de 0.8% y menos de 2.11% de carbono.

2.3 ESTRUCTURA METALGRÁFICA

El acero puede ser tratado térmicamente para producir la microestructura y propiedades deseadas, esto se logra calentando y enfriando a temperaturas y tiempos específicos. Estos cambios en la microestructura pueden ser observados superficialmente mediante microscopio. El tipo de microestructura obtenida depende principalmente de la composición química y el tratamiento térmico aplicado. Los diferentes tipos de microestructura existentes son:

- Ferrita: es un estado sólido del carbono y otros elementos aleados en una estructura cubica centrada en el cuerpo. Se forma por el enfriamiento lento un acero hipoeutectoide austenizado debajo de su punto de transformación, el cual puede variar de 910 °C. a 723 °C. dependiendo el porcentaje de carbono presente. A este se le llama el hierro alfa y es representado por la letra griega (α). Cuando el acero austenizado es enfriado debajo de su punto de transformación, la austenita libre de carbono se transforma en ferrita que es básicamente hierro puro. En la siguiente figura se ilustra el hierro puro, los granos de ferrita son poligonales y de una forma y tamaño regular.

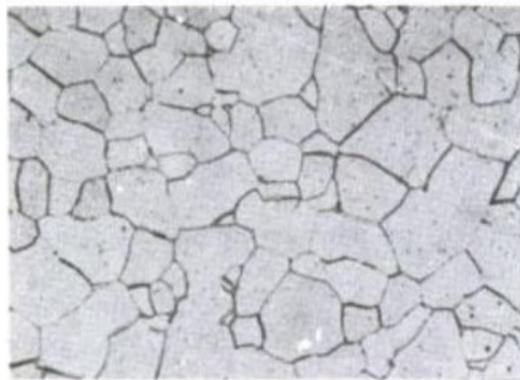


Figura 7. Microestructura de ferrita.

(Prabhudev, 1988)

- Cementita: está constituido por hierro y carbono, se le conoce químicamente como carburo de hierro (Fe_3C). Su forma es redonda

generalmente. La siguiente figura muestra la cementita en una matriz de ferrita.

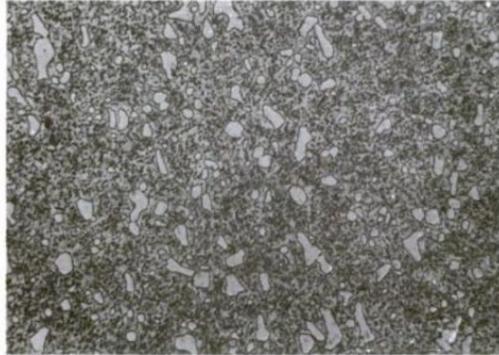


Figura 8. Microestructura de cementita.

(Prabhudev, 1988)

- Perlita: es una mezcla eutectoide de cementita y ferrita. Se forma justo por debajo de la temperatura eutectoide.

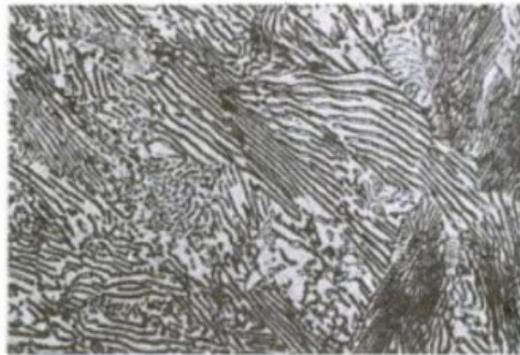


Figura 9. Microestructura de perlita.

(Prabhudev, 1988)

- Bainita: es un agregado metaestable de la ferrita y perlita resultando de la transformación austenítica a temperatura por debajo a la cual la perlita es producida y por encima de la cual la martensita es formada.
- Martensita: es una solución sólida muy saturada de carbono y otros elementos en hierro alfa. Se produce cuando el acero es enfriado desde la

temperatura de endurecimiento a una tasa mayor que la tasa de enfriamiento crítica.

2.4 EFECTOS DE LAS ALEACIONES CON OTROS ELEMENTOS

Las propiedades mecánicas del acero que fue tratado térmicamente dependen principalmente de su composición química. Además de hierro y carbono, el acero puede contener otros elementos como el manganeso, níquel, cromo y molibdeno.

Estos elementos, ya sea individualmente o en combinación, ayudan a obtener las características deseadas, según la aplicación del acero. A continuación, se muestran los efectos que producen en las propiedades del acero cada elemento de manera individual (ASM International, 2002):

- Carbono: se utiliza como el principal elemento de endurecimiento en el acero. Contribuye a incrementar la dureza y fuerza de tensión. Conforme incrementa la cantidad de carbono, la ductilidad y soldabilidad decrece.
- Manganeso: por lo general se le puede encontrar en la mayoría de los aceros comerciales ya que contribuye de igual manera que el carbono, a incrementar la dureza y fuerza, pero a menor escala. Incrementa la resistencia a la abrasión y mejora la calidad superficial.
- Fósforo: se disuelve en la ferrita e incrementa la dureza del acero. Conforme incrementa la cantidad de fósforo, la ductilidad y resistencia al impacto decrece. Una alta cantidad de fósforo en aceros de bajo carbono ayuda a mejorar la maquinabilidad.
- Sulfuro: ayuda a mejorar la maquinabilidad.
- Plomo: al igual que el sulfuro, contribuye a mejorar la maquinabilidad.
- Estaño: mejora la resistencia a la corrosión.
- Silicio: incrementa la dureza y la elasticidad del acero.

Además de los elementos mencionados anteriormente, existen los elementos químicos llamados de traza, son aquellos elementos que no son encontrados en abundancia en la tierra, como el niobio, vanadio y molibdeno. Al dopar las aleaciones de acero con estos elementos, se puede conseguir el mejorar sus

propiedades mecánicas como la dureza ya que se logra refinar el tamaño del grano (Su & K.Y., 1997).

2.5 TRABAJO O ROLADO EN FRÍO

Cuando un metal se deforma plásticamente a temperaturas bastante inferiores a la de su punto de fusión, típicamente a temperatura ambiente, se le conoce como trabajo o rolado en frío. Se considera como trabajo en caliente cuando la deformación se realiza a una temperatura por arriba de la temperatura de recristalización. El trabajo a temperatura media se realiza a temperaturas intermedias.

Los rangos de temperatura a los cuales se realiza la deformación plástica se pueden encontrar en la Tabla 2. Se expresa como una relación entre T/T_m , donde T es la temperatura de trabajo y T_m es la temperatura de fusión del metal.

Tabla 2. Rangos de temperatura para el trabajo del metal.

Rangos de temperatura homóloga para diferentes procesos	
Proceso	T/T_m
Trabajo en frío	<0.3
Trabajo a temperatura media	0.3 a 0.5
Trabajo en caliente	>0.6

(Kalpakjian, 2008)

El trabajo en frío crea deformaciones en los átomos del metal lo que provoca defectos puntuales y dislocaciones. Los defectos puntuales se presentan en forma de vacantes (átomo faltante) o átomos auto intersticiales (ver Figura 10).

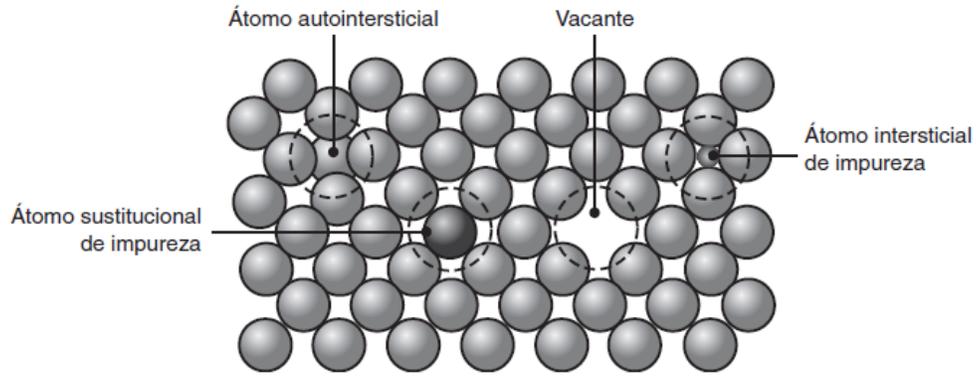


Figura 10. Tipos de defectos en un retículo monocristalino.

(Kalpakjian, 2008)

Las dislocaciones son defectos de la red cristalina o arreglo ordenado de la estructura atómica (ver Figura 11). Las dislocaciones pueden trabarse y obstruir una con otra, también pueden ser impedidas por barreras físicas como los límites de grano, impurezas o inclusiones en el material. Un metal tratado térmicamente puede tener densidades de dislocación del orden de 10^6 a 10^8 líneas de dislocación por cm^2 y un metal trabajado en frío puede tener 10^{12} (Vargas & Llamoca, 2021). Es decir, el trabajo en frío puede aumentar la cantidad de dislocaciones de 1,000 a 100,000 veces.

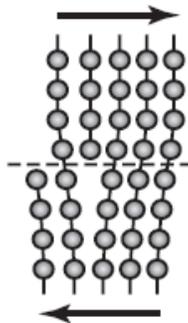


Figura 11. Dislocación de una estructura atómica.

(Kalpakjian, 2008)

El aumento en las obstrucciones aumenta el esfuerzo cortante requerido para el deslizamiento de los átomos, por lo tanto, incrementa la resistencia y dureza del

metal (Kalpakjian, 2008). Cuando se incrementa el porcentaje de deformación, se obtiene un mayor número de obstrucciones y por lo tanto la resistencia del metal incrementa, este efecto es ilustrado en la Figura 12.

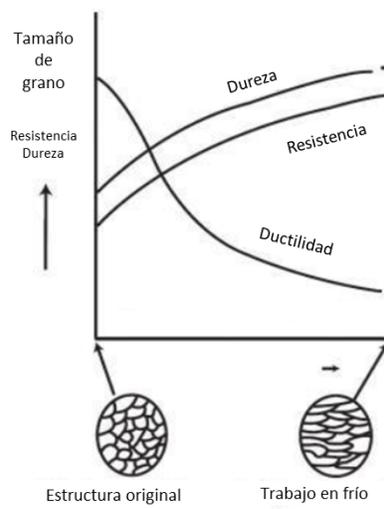


Figura 12. Efecto del trabajo en frío en las propiedades mecánicas del acero.

Elaboración propia

Los aceros bajos al carbono son usualmente trabajados en frío y después tratados térmicamente para eliminar el estrés del proceso (Martínez-de-Guerenu, Díaz-Fuentes, & Gutiérrez, 2004). En la Figura 13 se puede ver un diagrama del proceso típico de trabajo en frío.

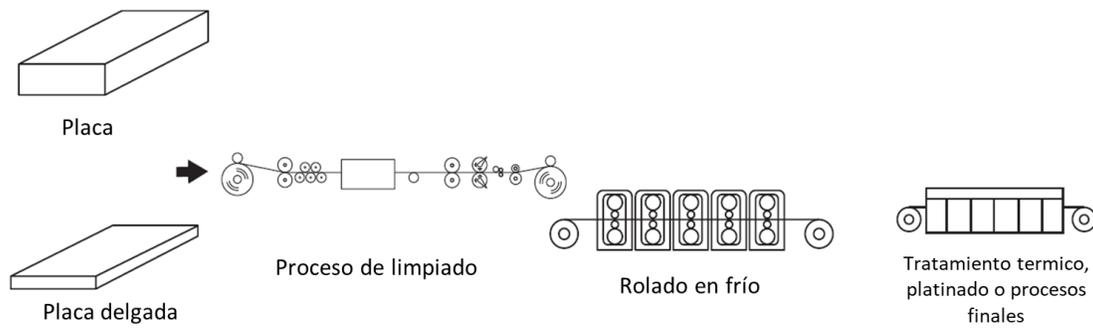


Figura 13. Esquema de procesamiento termo-mecánico del acero.

(Huyett, G. L.)

2.6 TRATAMIENTO TÉRMICO

La microestructura del acero puede ser modificada mediante técnicas de tratamiento térmico, es decir, mediante el calentamiento y enfriamiento controlado a diferentes velocidades. El tratamiento térmico puede provocar la transformación de fase, lo que influye en las propiedades mecánicas como dureza, tenacidad, ductilidad y resistencia al desgaste. Los efectos del tratamiento térmico en el acero dependen de varios factores: composición química, microestructura, el grado de rolado previo en frío y las velocidades calentamiento y enfriamiento durante el tratamiento térmico.

El propósito del tratamiento térmico es (Jaypuria, 2009):

- Ablandar el metal
- Cambiar el tamaño de grano
- Modificar la estructura
- Liberar el estrés ocasionado por los distintos procesos.

Los tratamientos térmicos más populares son el (Prabhudev, 1988):

- Recocido: subcrítico, Intercrítico y completo
- Normalizado
- De liberación de estrés
- Templado
- Revenido

2.6.1 Recocido

Este tipo de tratamiento térmico implica el calentar a una cierta temperatura, dejar reposar por un tiempo determinado y posteriormente enfriar a una tasa controlada (ASM International, 2013). Con este tipo de tratamiento, generalmente se obtiene una microestructura de ferrita-perlita. El propósito de este tratamiento térmico es mejorar las propiedades eléctricas y/o mecánicas, como dureza y ductilidad, así como la estabilidad dimensional.

El diagrama en la Figura 5 puede ayudar a entender mejor los diferentes tipos de recocido que existen: subcrítico, Intercrítico y completo. Ya que para definirlos se utilizan las temperaturas de transformación o críticas.

Temperaturas críticas

Las temperaturas críticas son aquellas que definen el comienzo o finalización de la transformación a austenita. Estas varían dependiendo del contenido de carbono y si se está calentando o enfriando el acero. Cuando se está calentando, las temperaturas críticas de comienzo y finalización para un acero hipoeutectoide se denominan Ac_1 y Ac_3 respectivamente, mientras que para un acero hipereutectoide se denominan Ac_1 y Ac_{cm} . Estas temperaturas son un poco más altas a aquellas que corresponden al comienzo y finalización de la transformación a austenita durante el enfriamiento, a estas se le denominan Ar_3 y Ar_1 para aceros hipoeutectoides y Ar_{cm} y Ar_1 para aceros hipereutectoides. Cuando la tasa de enfriamiento o calentamiento es infinitamente baja estos valores se convierten en Ae_1 , Ae_3 y Ae_{cm} , los cuales están muy cerca de los valores generales A_1 , A_3 y A_{cm} que se pueden observar en la Figura 4 en el diagrama hierro-carbono. La aleación con otros elementos químicos afecta estas temperaturas críticas, ya sea que suba o baje el punto de transformación.

En aceros hipoeutectoides es posible calcular las temperaturas críticas Ac_1 y Ac_3 usando la composición del acero gracias a las fórmulas sugeridas por Trzaska (Trzaska, 2016):

$$Ac_1 = 742 - 29 \cdot \%C - 14 \cdot \%Mn + 13 \cdot \%Si + 16 \cdot \%Cr - 17 \cdot \%Ni - 16 \cdot \%Mo \\ + 45 \cdot \%V + 36 \cdot \%Cu$$

Ecuación 2. Fórmula para cálculo de Ac_1 .

$$Ac_3 = 925 - 219 \cdot \sqrt{\%C} - 7 \cdot \%Mn + 39 \cdot \%Si - 16 \cdot \%Ni + 13 \cdot \%Mo + 97 \cdot \%V$$

Ecuación 3. Fórmula para cálculo de Ac_3 .

Recocido subcrítico

Durante este tipo de tratamiento térmico no se crea austenita, ya que se realiza por debajo de la temperatura crítica A_{c1} . El recocido subcrítico ayuda a reducir la dureza en aceros que fueron previamente trabajados en frío debido a que, durante el proceso recocido subcrítico, ocurren 3 fases o eventos en el metal:

1. **Recuperación:** este proceso ocurre a una temperatura menor a la de recristalización, en esta etapa se produce el alivio de esfuerzos residuales causados principalmente durante el trabajo en frío y no hay cambios significativos en las propiedades mecánicas del acero (ver Figura 17). La energía liberada es principalmente debido al movimiento de defectos puntuales, la relajación de las dislocaciones y el fenómeno de reorganización causado durante el trabajo en frío (Raabe, 2014). La Ecuación 4 formula que ayuda a calcular la temperatura de recuperación (T_{GR}), la cual depende de la temperatura de recristalización (T_R).

$$T_{GR} = T_R - 300 (C^\circ)$$

Ecuación 4. Fórmula para cálculo de temperatura de recuperación

2. **Recristalización:** es el proceso en cual, dentro de un intervalo de temperatura, se forman nuevos granos que reemplazan a los anteriores. Estos nuevos granos son equiaxiales y libres de esfuerzos. Por lo general, estos nuevos granos se forman en las zonas donde el grano ha sido más deformado, como suele ser los límites de granos y planos de deslizamiento. La temperatura en la que ocurre la recristalización varía entre 0.3 y 0.5 T_m . La recristalización depende del grado de trabajo en frío previamente realizado, ya que, cuando el porcentaje de trabajo en frío es mayor, es requerida menos temperatura para que ocurra el proceso de recristalización (Benchabane, Boumerzoug, Gloriant, & Thibon, 2011). En la Figura 15 se puede ver el efecto del trabajo en frío en la temperatura de recristalización. Esto se debe a que al incrementar el porcentaje de trabajo en frío, el número de dislocaciones y la cantidad de energía almacenada también aumenta, energía que proporciona parte del trabajo que se requiere para la

recristalización (Kalpakjian, 2008). Además, en Figura 14 se puede observar que, a mayor temperatura de recocido, menor será el tiempo requerido para alcanzar la fase de recristalización.

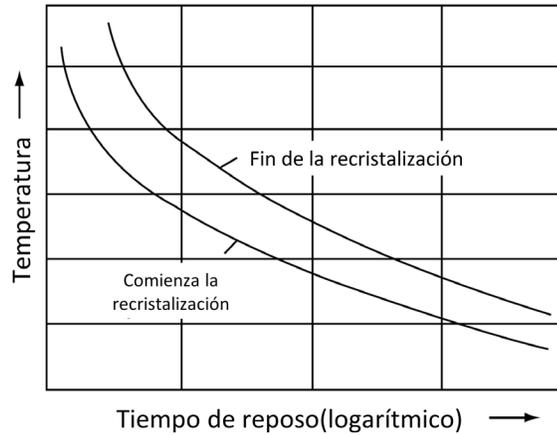


Figura 14. Temperatura de recristalización en función del tiempo de reposo.

Elaboración propia

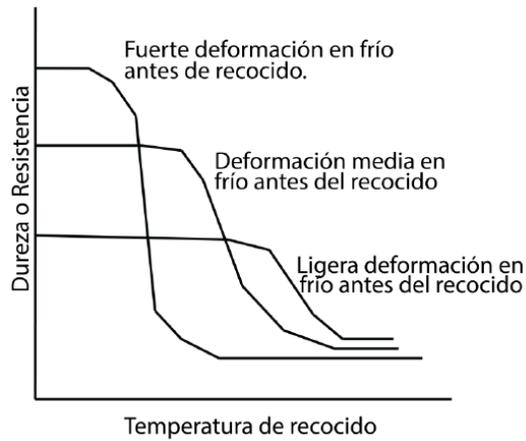


Figura 15. Efecto del trabajo en frío en la temperatura de recristalización.

(Garduño, 2015)

3. **Crecimiento de nuevos granos:** Cuando el metal ha sido completamente recristalizado, nuevos granos comienzan a formarse e incluso el tamaño de los nuevos granos pudiera exceder el tamaño de los granos anteriores.

Cuando los nuevos granos comienzan a formarse toman orientaciones al azar y son independientes unos de otros, a este proceso se le llama nucleación (Figura 16). El tamaño de los nuevos dependerá del porcentaje de rolado en frío aplicado antes del tratamiento térmico, entre más trabajo en frío fue realizado, los granos nuevos serán de menor tamaño.

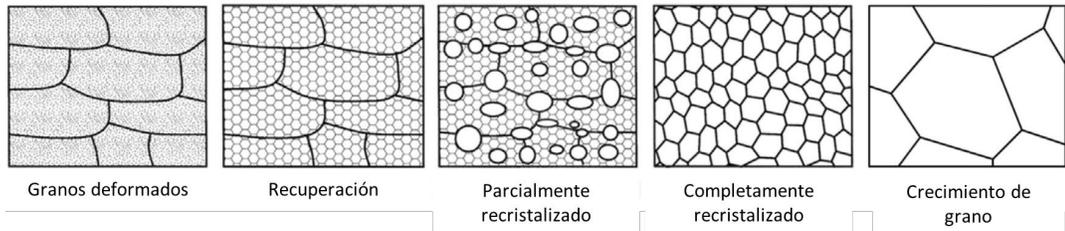


Figura 16. Evolución de la microestructura durante el tratamiento térmico.

(Raabe, 2014)

Como se puede ver en la Figura 17, el tamaño de grano afecta significativamente las propiedades mecánicas de los metales.

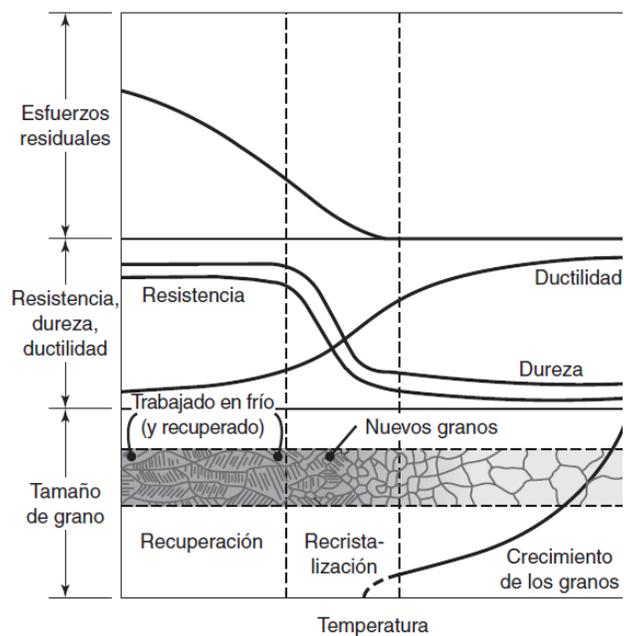


Figura 17. Fases y efectos en las propiedades mecánicas del acero durante el recocido subcrítico.

(Kalpakjian, 2008)

2.7 CLASIFICACIÓN DEL ACERO

El acero puede ser clasificado por diferentes sistemas dependiendo lo siguiente (Totten, 2006):

- Composición: al carbono, de baja aleación o aleado.
- Por aplicación o principal característica: estructural, herramienta, inoxidable o resistentes a altas temperaturas.
- Método de acabado: rolado en caliente, rolado en frío o fundición.
- Forma del producto: barra, placa, tira, tubo o estructural.
- Microestructura: ferrítico, perlítico, martensítico o austenítico.
- Nivel de resistencia requerida según la ASTM.
- Tratamiento térmico: recocido, normalizado o templado.
- Calidad: descrito por estándares comerciales.

De los sistemas de clasificación anteriormente mencionados, la composición química es la base más utilizada por los sistemas internacionales de clasificación (ASTM International, 2016). En la Figura 18 se puede observar un diagrama con este tipo de clasificación.

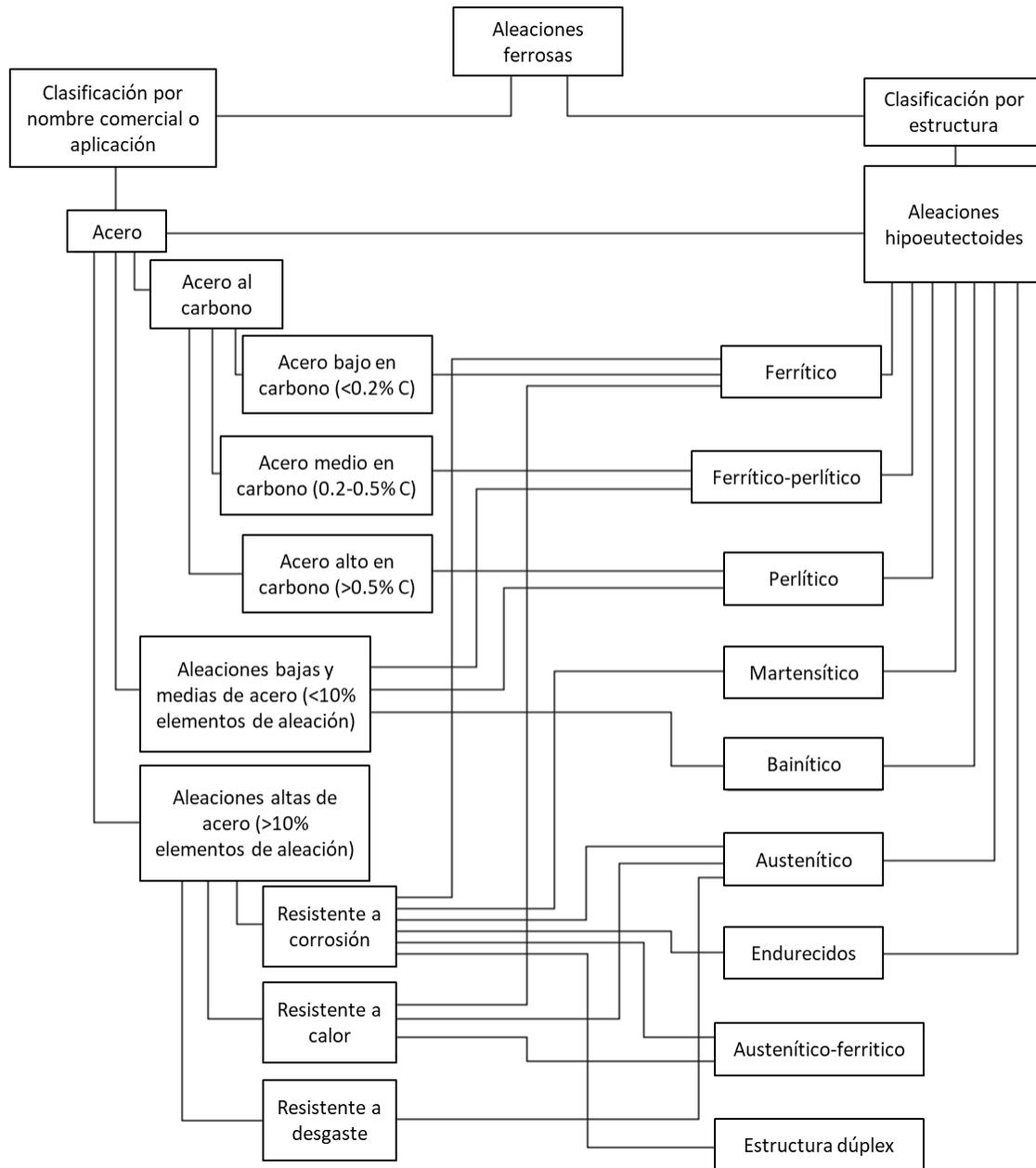


Figura 18. Clasificación del acero según composición química.

(Totten, 2006)

2.8 NOMENCLATURAS PARA NOMBRAR EL ACERO

Como ya se mencionó anteriormente, la microestructura del acero determina en gran medida sus propiedades y a su vez esta es definida por el tratamiento térmico, así como su composición química, es por eso, que la mayoría de los sistemas utilizan

la composición química como base para su nombramiento. A lo largo de los años han surgido diferentes organizaciones alrededor del mundo que han creado sus propias nomenclaturas, tal como la *American Iron and Steel Institute (AISI)*, *Society for Automotive Engineers (SAE)* o *American Society for Testing and Materials (ASTM)* en Estados Unidos, la Norma Oficial Mexicana (NOM) en México, el *British Estándar (BS)* en el Reino Unido, la *Deutsches Institut für Normung (DIN)* en Alemania, *Japan Industrial Standard (JIS)* en Japón, entre otras. Actualmente existe una iniciativa para crear una única norma internacional la cual se llamará *Unified Numbering System (UNS)* (SAE International, 2012), sin embargo, ha sido un proceso complicado ya que no existen como tal equivalentes entre las normas, lo que se está tratando de hacer es agrupar estándares comparables en base a ciertas reglas (ASTM International, 2016).

En México, debido a la cercanía geográfica y a la amplia relación comercial que existe con Estados Unidos, uno de los sistemas más utilizados es el AISI. En este sistema, los aceros se nombran con 4 dígitos que determinan la composición química de carbono u otras aleaciones. Los primeros 2 dígitos hacen referencia a los principales elementos de aleación y los últimos dos a la cantidad de carbono en centésimas de porcentaje.

Los aceros al carbono son designados como 10XX. Por ejemplo, el acero 1045 contiene 0.45% de carbono, bajo la nomenclatura de este sistema. Los aceros resultados están en la serie 11XX, los aceros resultados y refosforizados están en la serie 12XX y con contenido de manganeso están en la serie 15XX. Para aceros aleados existen otras designaciones de series como por ejemplo la 43XX que contiene níquel, cromo y molibdeno.

En ciertos casos, se pudieran agregar la letra B cuando Boro es agregado para mejorar el templado o L cuando se agrega plomo para mejorar la maquinabilidad, estas letras se agregan entre el segundo y tercer dígito. En la Figura 19 se muestra la clasificación según AISI-SAE:

Aceros al Carbono	Descripción
10XX	no-resulfurado, 1.00 Mn máx
11XX	resulfurado
12XX	resulfurado y refosforizado
15XX	no-resulfurado, sobre 1.00 Mn máx
Aceros aleados	
13XX	1.75 Mn
40XX	0.20 o 0.25 Mo, o 0.25 Mo + 0.042 S
41XX	0.50, 0.80 o 0.95 Cr + 0.12, 0.20 o 0.30 Mo
43XX	1.83 Ni, 0.50-0.80 Cr, 0.25 Mo
46XX	0.85 o 1.83 Ni + 0.20 o 0.25 Mo
47XX	1.05 Ni, 0.45 Cr, 0.20 o 0.35 Mo
48XX	3.50 Ni + 0.25 Mo
51XX	0.80, 0.88, 0.93, 0.95 o 1.00 Cr
51XXX	1.03 Cr
52XXX	1.45 Cr
61XX	0.60 o 0.95 Cr + 0.13 o 0.15 V min
86XX	0.55 Ni, 0.50 Cr, 0.20 Mo
87XX	0.55 Ni, 0.50 Cr, 0.25 Mo
88XX	0.55 Ni, 0.50 Cr, 0.35 Mo
92XX	2.00 Si o 1.40 Si + 0.70 Cr
50BXX	0.28 o 0.50 Cr, 0.0005 - 0.003 B
51BXX	0.80 Cr, 0.0005-0.003 B
81BXX	0.30 Ni, 0.45 Cr, 0.12 Mo, 0.0005 - 0.003 B
94BXX	0.45 Ni, 0.40 Cr, 0.12 Mo, 0.0005 - 0.003 B

Figura 19. Tipos de acero según clasificación AISI-SAE.

(ASTM International, 2016)

2.9 ACERO AISI 12L14

El acero AISI 12L14 está clasificado como un acero bajo en carbono que tiene excelentes características de maquinabilidad debido a la cantidad de plomo que contiene. También tiene buena ductilidad que lo hace fácil de doblar y remachar, aunque es muy difícil de soldar. Su punto de fusión (T_m) se encuentra alrededor de los 1540 °C. Este acero se utiliza principalmente en la fabricación de herramientas que tienen requerimientos de gran precisión en dimensión, gran acabado superficial, pero poca propiedad mecánica, como engranes, ejes, pernos, piezas para procedimientos quirúrgicos y dentales y piezas para industria automotriz. La Tabla 3 muestra la composición química del AISI 12L14 según la ASTM A519 (ASTM International, 2018):

Tabla 3. Composición química del acero AISI 12L14 según ASTM A519.

Grado	% máximo a menos que sea especificado de otra manera.				
	C	Mn	P	S	Pb
12L14	0.15	0.85-1.15	0.04-0.09	0.26-0.35	0.15-0.35

(ASTM International, 2018)

3. PROCEDIMIENTO

3.1. ESPECÍMENES

En este estudio se utilizaron especímenes maquinados de acero bajo en carbono AISI 12L14, la Tabla 4 muestra la composición química del acero, que cumple con la norma de composición química ASTM A519 (ASTM International, 2018), los datos se obtuvieron del certificado de material enviado por el proveedor. El acero fue producido industrialmente y luego rolo en frío en forma de barra hexagonal a través de una reducción del 10% del tamaño original, las dimensiones finales de la barra fueron de 365 cm de largo x 24 cm ancho. Posteriormente, la barra fue seccionada en tramos de 30 cm y maquinado hasta la forma final como se muestra en la Figura 20. El maquinado se realizó por medio herramientas de tecnología de transferencia rotativa, tipo Hydromat, en las cuales se cuenta con 16 estaciones y en cada estación se va realizando un paso del maquinado hasta llegar a la forma final, en la Figura 21 se puede observar un diagrama del proceso de maquinado con este tipo de tecnología.

Tabla 4. Composición química de los especímenes de acero AISI 12L14.

Elemento químico	%
Carbono	0.063
Manganeso	1.07
Fósforo	0.073
Sulfuro	0.31
Silicio	0.008*
Plomo	0.285
Estaño	0.001*

Elaboración propia

* Impurezas agregadas durante el proceso de producción del acero.



Figura 20. Espécimen usado en el estudio.

Elaboración propia

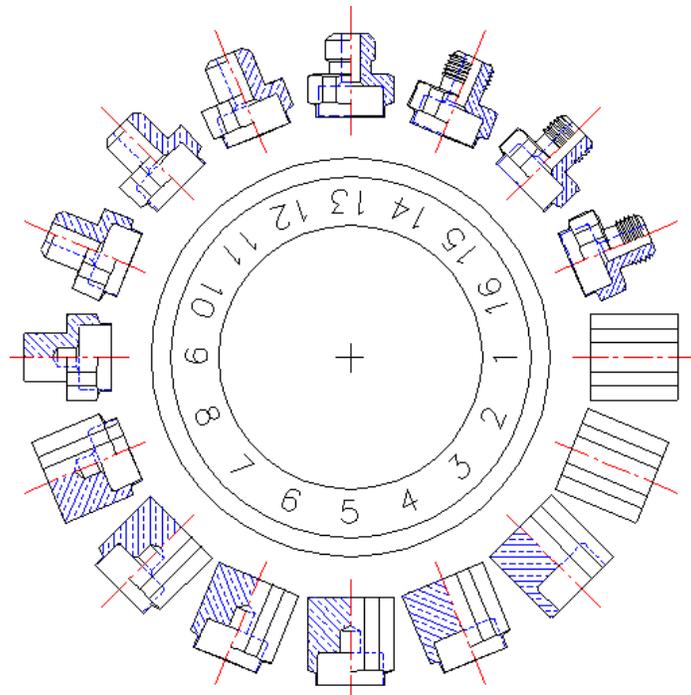


Figura 21. Esquema de proceso de maquinado en Hydromat.

Elaboración propia

3.2. GRUPOS Y FLUJO DE LA PRUEBA

Después del maquinado, los especímenes se dividieron en 5 grupos como se muestra en la Tabla 5, los grupos fueron seleccionados con base en el siguiente criterio:

- Grupo A: sin tratamiento térmico, especímenes de control.
- Grupo B: recocido subcrítico a 260 °C ya que es el tratamiento térmico que se le está aplicando actualmente.
- Grupo C-E: recocido subcrítico por debajo de A_{c1} con incrementos de 50 °C.

Los grupos B a E fueron tratados térmicamente de acuerdo con cada temperatura experimental (T_{ex}) y el Grupo A no fue tratado térmicamente. Luego, se midió el tamaño de grano promedio y la dureza de cada grupo. La Figura 22 muestra el flujo de procesamiento y prueba utilizado para este experimento.

Tabla 5. Resumen de temperaturas de recocido subcrítico.

Grupo	Temperatura de recocido subcrítico (T_{ex})
A	Sin tratamiento térmico
B	Recocido subcrítico a 260 °C
C	Recocido subcrítico a 550 °C
D	Recocido subcrítico a 600 °C
E	Recocido subcrítico a 650 °C

Elaboración propia

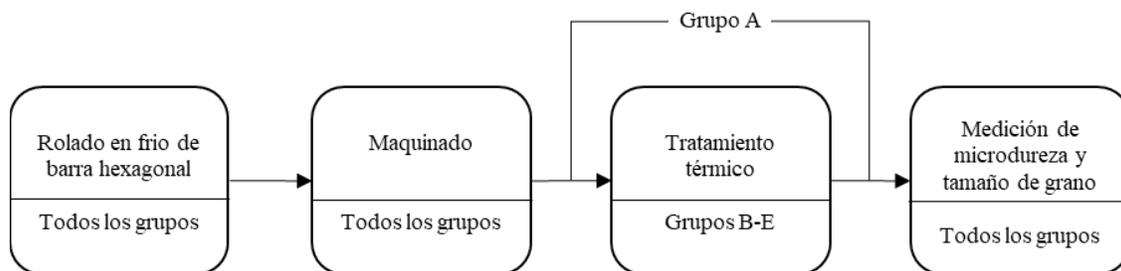


Figura 22. Esquema de procesamiento termo-mecánico.

Elaboración propia

3.2.1 Recocido subcrítico

Las temperaturas para el tratamiento han sido seleccionadas para poder observar el efecto de la temperatura en la microestructura y evitando sobrepasar el punto Ac_1 , que es aproximadamente a 725.3°C para este acero, de acuerdo con los cálculos realizados en la Ecuación 5.

En la Ecuación 5 se puede observar el desarrollo de la fórmula sugerida por Trzaska (Trzaska, 2016) para el cálculo de la temperatura crítica Ac_1 y Ac_3 en el acero AISI 12L14. Para el desarrollo de este cálculo es necesario conocer la composición química del acero. Al ser esta, una fórmula general que aplica para varios tipos de aceros existen valores que tendrán que ser eliminados o reducidos a cero ya que no todos los elementos químicos mencionados en la fórmula están presentes en la composición química de todos los aceros. Por ejemplo, en el caso del acero AISI 12L14 para el cálculo de Ac_1 tuvieron que ser reducidos a cero el Molibdeno, Cromo, Níquel, Vanadio y Cobre.

$$Ac_1 = 742 - (29 \cdot 0.063) - (14 \cdot 1.07) + (13 \cdot 0.008) + (16 \cdot 0) - (17 \cdot 0) - (16 \cdot 0) \\ + (45 \cdot 0) + (36 \cdot 0) = 725.3$$

Ecuación 5. Cálculo de Ac_1 para acero AISI 12L14.

$$Ac_3 = 925 - (219 \cdot \sqrt{0.063}) - (7 \cdot 1.07) + (39 \cdot 0.008) - (16 \cdot 0) + (13 \cdot 0) + (97 \cdot 0) = 862.85$$

Ecuación 6. Cálculo de Ac_3 para acero AISI 12L14.

El tratamiento térmico fue realizado con base en la norma AMS 2759/1D (SAE International, 2007), la cual especifica los parámetros, condiciones y tiempo de reposo en la temperatura de recocido. Con base en los datos la Tabla 6, el tiempo de reposo mínimo sugerido por esta norma fue de 60 minutos, sin embargo, debido a la geometría de los especímenes, carga térmica y acomodo en el horno, se decidió utilizar el doble de tiempo para asegurar que todas las áreas y secciones de los especímenes llegaran a T_{ex} .

Tabla 6. Tiempo de reposo mínimo sugerido por AMS 2759/1D.

<i>Espesor mínimo de la sección más pesada (milímetros)</i>	<i>Tiempo mínimo de reposo (minutos)</i>
Hasta 6.35	25
6.35 a 12.7	45
12.7 a 25.4	60
25.4 a 38.1	75
38.1 a 50.8	90
50.8 a 63.5	105
63.5 a 76.2	120
76.2 a 88.9	135
88.9 a 101.6	150
101.6 a 114.3	165
114.3 a 127.0	180
127.0 a 203.2	210

Elaboración propia

Las piezas fueron tratadas térmicamente en un horno atmosférico y siguieron el siguiente perfil: 2 horas de subida, 2 horas de reposo en T_{ex} y 4 horas de enfriamiento. Para el enfriamiento las piezas fueron dejadas en el horno apagado a temperatura ambiente. En la Figura 23 se puede observar el perfil térmico usado para aplicar el tratamiento térmico a los especímenes.

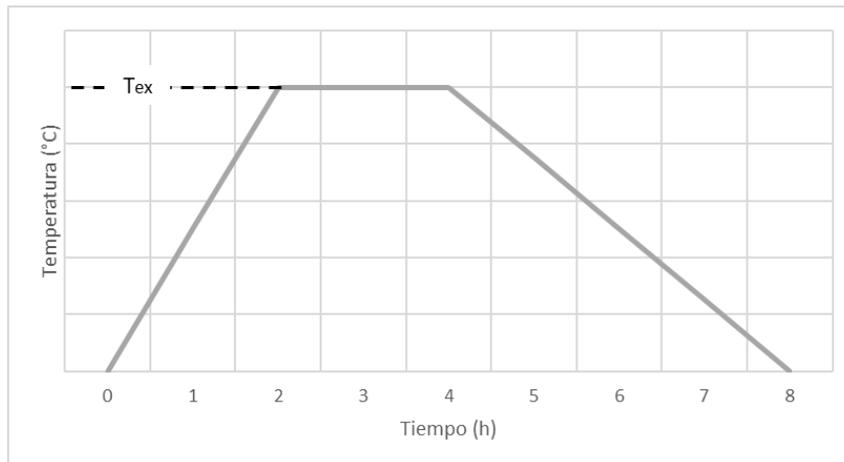


Figura 23. Perfil de tratamiento térmico

Elaboración propia

En Figura 24 y Figura 25 se muestra como fueron posicionadas las piezas en el horno, así como la temperatura T_{ex} establecida para cada grupo de prueba.



Figura 24. Temperatura de reposo para: a) grupo B, b) grupo C, c) grupo D y d) grupo E.

Elaboración propia



Figura 25. Acomodo de especímenes en el horno.

Elaboración propia

3.3 MEDICIÓN DUREZA

La dureza de las piezas fue medida de acuerdo con la escala de Vickers (HV) usando el microdurómetro digital. La locación de la medición es de acuerdo con la Figura 26, se utilizó un penetrador de diamante con una carga de 500 gramos por un tiempo de 15 segundos de acuerdo con la norma ASTM E384 (ASTM International, 2017), la medición fue repetida en 10 puntos por muestra para obtener el promedio.

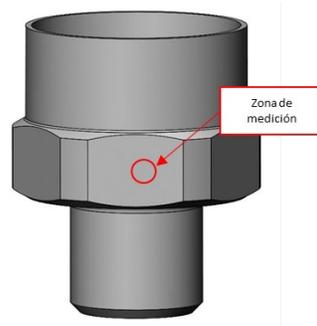


Figura 26. Espécimen maquinado usado en el estudio.

Elaboración propia

3.4 MEDICIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO PROMEDIO

Las muestras fueron seccionadas, pulidas y posteriormente expuestas a solución de Nital al 2% para revelar la microestructura en el microscopio digital. El tamaño de grano promedio fue medido por el método de intercepción lineal de Heyn según la norma ASTM E112 (ASTM International, 2004), analizando micrografías tomadas a 200x de magnificación, para analizar las fotografías se utilizó un software de análisis de imágenes incluido en la paquetería del microscopio digital. En la Tabla 7 se muestra el tamaño de grano (G) según esta norma. Para asegurar la exactitud de las mediciones, se promediaron los resultados de tres líneas trazadas a lo largo de los granos en cada micrografía. La zona de medición se muestra en la Figura 27c.

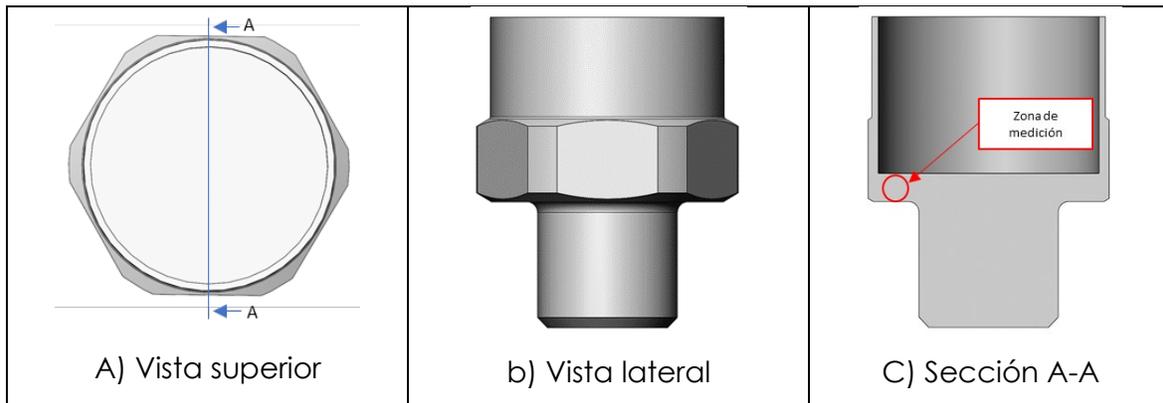


Figura 27. A) Vista superior B) Vista lateral C) Zona de medición del tamaño de grano.

Elaboración propia

Tabla 7. Tamaño de grano según ASTM E112.

Tamaño de grano ASTM (G)	Diámetro promedio		Tamaño de grano ASTM (G)	Diámetro promedio	
	<i>mm</i>	μm		<i>mm</i>	μm
00	0.508	508	7	0.0318	31.8
0	0.3592	359.2	7.5	0.0267	26.7
0.5	0.3021	302.1	8	0.0225	22.5
1	0.254	254	8.5	0.0189	18.9
1.5	0.2136	213.6	9	0.0159	15.9
2	0.1796	179.6	9.5	0.0133	13.3
2.5	0.151	151	10	0.0112	11.2
3	0.127	127	10.5	0.0094	9.4
3.5	0.1068	106.8	11	0.0079	7.9
4	0.0898	89.8	11.5	0.0067	6.7
4.5	0.0755	75.5	12	0.0056	5.6
5	0.0635	63.5	12.5	0.0047	4.7
5.5	0.0534	53.4	13	0.004	4
6	0.0449	44.9	13.5	0.0033	3.3
6.5	0.0378	37.8	14	0.0028	2.8

Elaboración propia

4. RESULTADOS

4.1 DUREZA

La Figura 28 muestra la evolución de la dureza como consecuencia del recocido subcrítico realizado durante este estudio. Se puede observar que para la temperatura de tratamiento térmico de 260°C la dureza no tiene gran cambio, solo ha disminuido de 218 a 205.1 Vickers, en comparación con los especímenes que no fueron tratados térmicamente del grupo A. Sin embargo, para el tratamiento térmico realizado a 550°C y 600°C, la dureza experimenta una caída importante de aproximadamente 20%, lo cual indica que se ha comenzado la fase de recristalización (Martínez-de-Guerenu, Díaz-Fuentes, & Gutiérrez, 2004). Con la temperatura de recocido subcrítico de 650°C, la caída de la dureza es muy significativa, un 42% en comparación con las muestras que no fueron tratadas térmicamente. Es evidente que a medida que la temperatura del tratamiento térmico se acerca a la temperatura crítica A_{c1} , el acero experimenta una caída significativa en la dureza (ASM International, 2013). Esto también concuerda con los resultados obtenidos por Buzko, E. H. et al (Buszko, Krella, Marchewicz, & Gajowiec, 2021) y Kotan, H. et al (Kotan, Saber, Koch, & Scattergood, 2012). El resumen de las mediciones de dureza se puede observar en la Tabla 8.

Tabla 8. Resumen de mediciones de dureza.

Grupo	Temperatura de recocido subcrítico	Dureza promedio (HV)
A	Sin tratamiento térmico	221.8
B	260 °C	205.1
C	550 °C	173.5
D	600 °C	173
E	650 °C	126.5

Elaboración propia

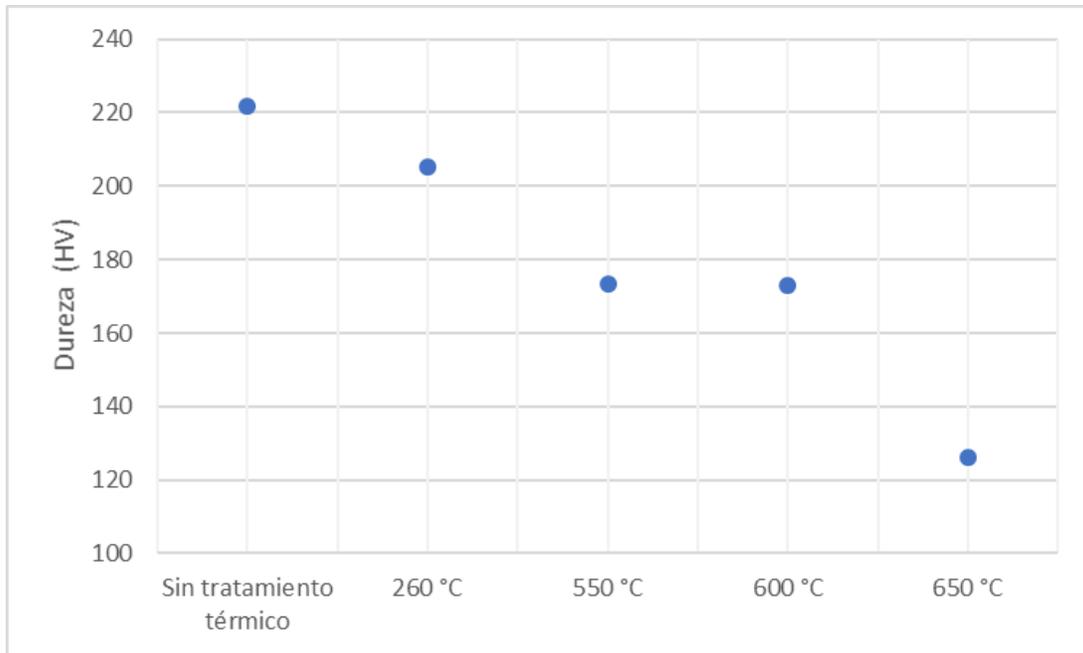


Figura 28. Evolución de la dureza promedio en función de la temperatura de recocido subcrítico.

Elaboración propia

En la Figura 29 se puede observar un diagrama de caja que muestra la dispersión en las mediciones de la dureza por muestra, como se explicó en la sección 4.1, las mediciones de dureza fueron repetidas 10 veces por muestra, por lo tanto, los valores graficados en la Figura 29 corresponden a las mediciones de dureza realizadas a una muestra por temperatura. La mayor dispersión se puede observar en el grupo de prueba con una temperatura de recocido subcrítico de 600 °C: a pesar de que la mayoría de las mediciones se encuentran entre 163.5 y 181.5, también se tomaron mediciones tan variadas como 160 y 195. Esto se debe a que a esta temperatura se tienen granos que apenas se están recristalizando, por lo que su tamaño no es muy grande y por lo tanto su dureza todavía no disminuye como en aquellos en los cuales ya disminuye porque el tamaño de grano ya incrementó.

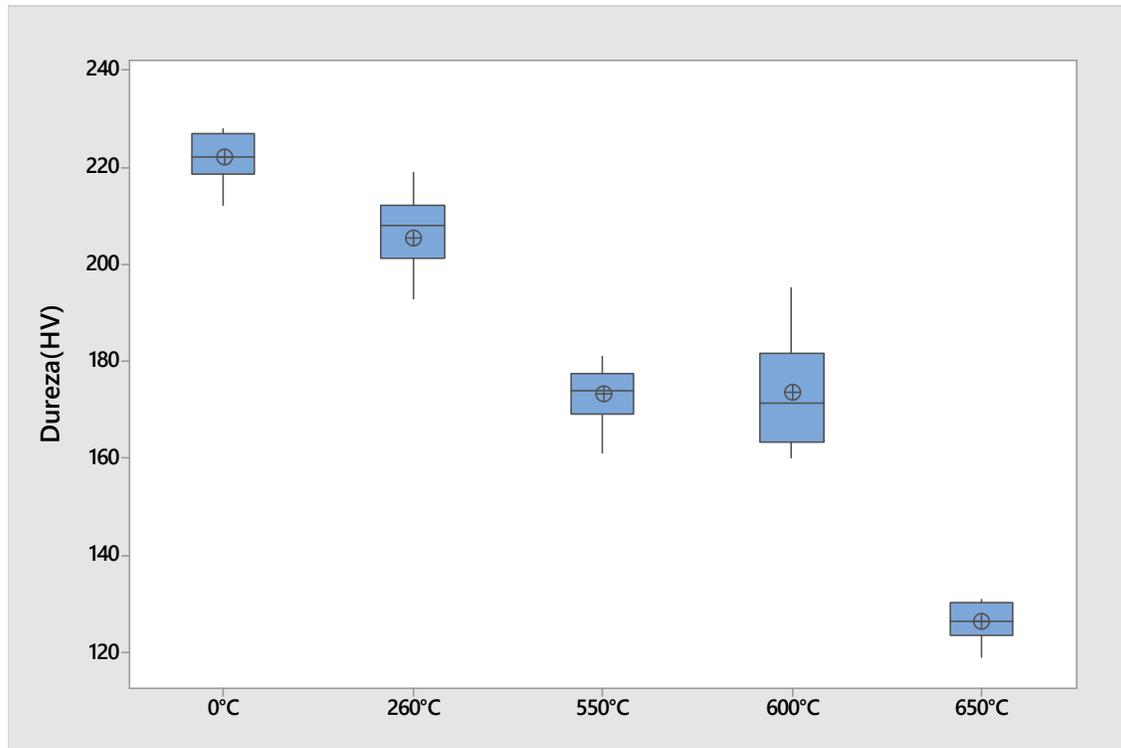


Figura 29. Diagrama de caja para las mediciones de dureza.

Elaboración propia

4.2 TAMAÑO DE GRANO

La Figura 31 muestra la microestructura de las muestras sometidas al recocido subcrítico, en todas se puede observar una microestructura de ferrita-perlita, en las cuales la ferrita son las áreas blancas y la perlita las áreas negras. En la Tabla 9 se muestra el resumen de las mediciones de tamaño de grano.

El tamaño de grano promedio en el grupo A, de especímenes sin tratamiento térmico, es de 11.45 μm , el tamaño de grano promedio para especímenes tratados térmicamente a 260°C y 550°C permanece relativamente similar y constante, sin embargo, a 600°C y 650°C el tamaño de grano aumenta drásticamente a 22.89 μm y 27.58 μm respectivamente, como se muestra en la Figura 30.

Como se puede ver en la Figura 31e, el tamaño de grano de los granos de ferrita recristalizados es mayor que el de la Figura 31d, lo que indica que los granos

recristalizados crecen más con la temperatura de recocido subcrítico (Poyraz & Ögel, 2020).

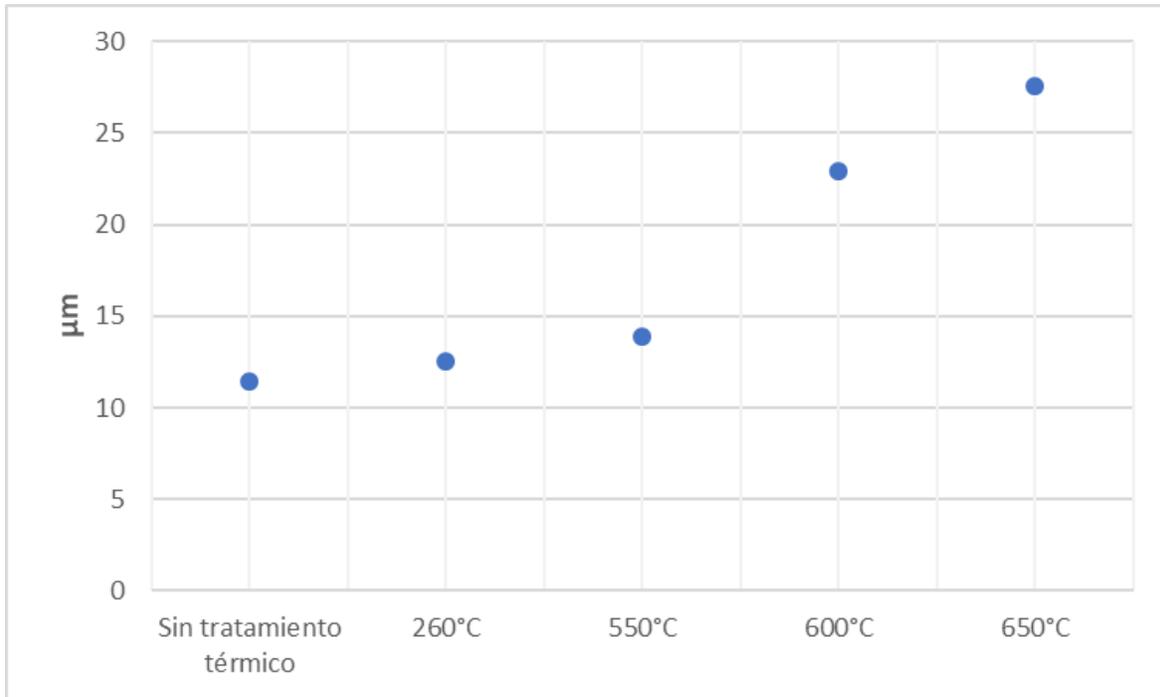


Figura 30. Evolución del tamaño de grano promedio en función de la temperatura de recocido subcrítico.

Elaboración propia

Tabla 9. Resumen de mediciones de tamaño de grano.

Grupo	Temperatura de recocido subcrítico	Tamaño de grano promedio, d (µm)	1/d^{1/2}	No. de clasificación ASTM E112 (G)
A	Sin tratamiento térmico	11.45	0.296	10
B	260 °C	12.57	0.282	9.5
C	550 °C	13.92	0.268	9.5
D	600 °C	22.89	0.209	8
E	650 °C	27.58	0.190	7.5

Elaboración propia

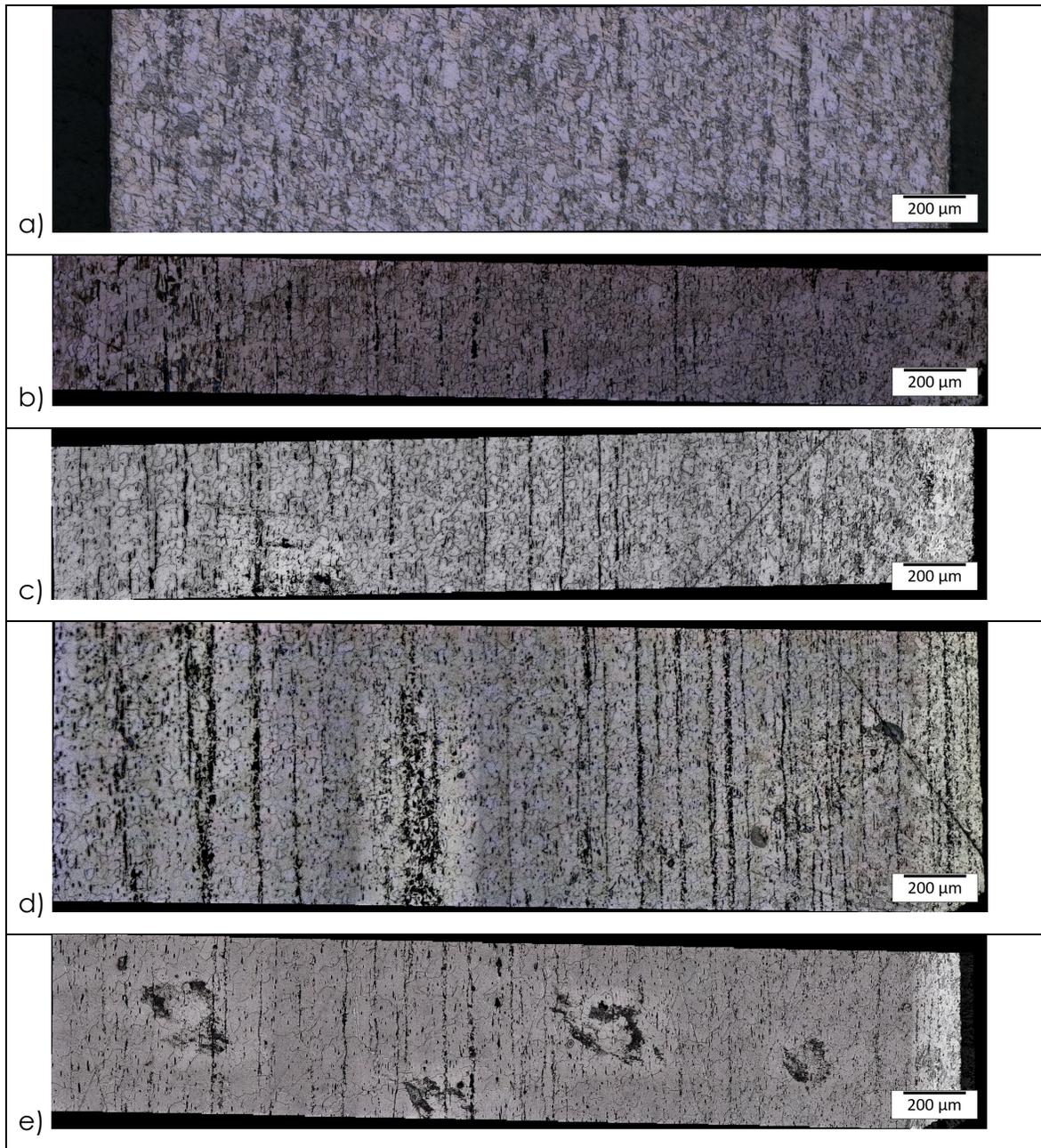


Figura 31. Micrografías que muestran la microestructura de los especímenes procesados en el experimento: A) Sin tratamiento térmico, B) 260°C, C) 550°C, D) 600°C y E) 650°C.

Elaboración propia

La distribución del tamaño de grano de piezas después del maquinado que no han sido tratadas térmicamente (grupo A) puede ser observado en la Figura 32a, este grupo tiene una moda de tamaño de grano de 10 µm con una frecuencia de 38 y el 96.11% de los granos se encuentra entre 5 y 25 µm. En la Figura 32b se puede

observar la distribución del tamaño de grano para los grupos que fueron tratados térmicamente, a comparación del grupo sin tratamiento térmico, en el cual se observa una distribución unimodal, en todos los grupos que fueron tratados térmicamente se observa una distribución bimodal. También se puede observar que en los grupos con un recocido subcrítico a 600°C y 650°C la distribución del tamaño de grano es más grande, alcanzando valores de 55 y 60 μm , esto se debe a que a estas temperaturas algunos granos ya fueron recrystalizados y ahora se encuentran en la fase de crecimiento.

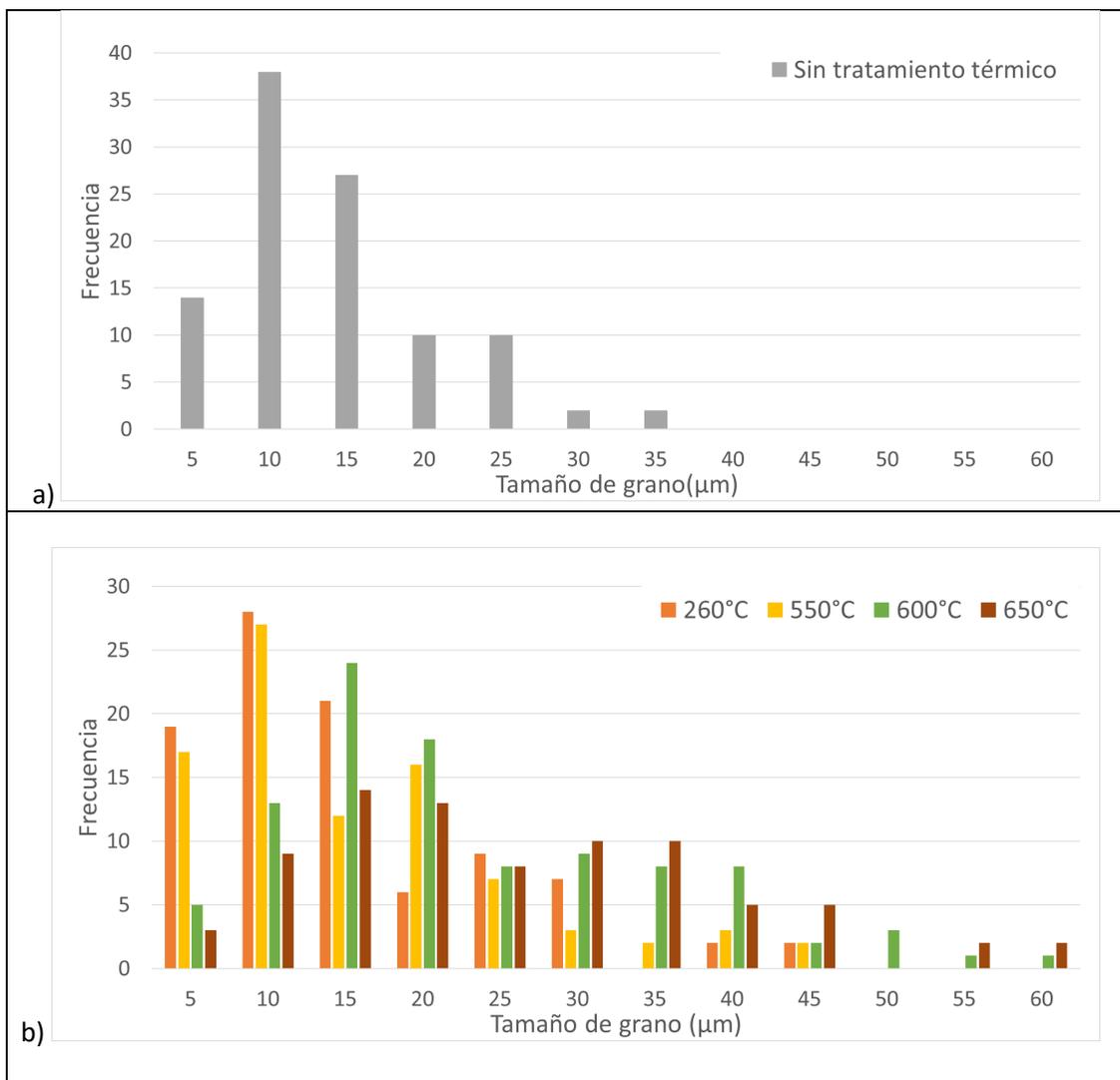


Figura 32. Distribución del tamaño de grano: a) sin tratamiento térmico, b) con recocido subcrítico.

Elaboración propia

4.3 TAMAÑO DE GRANO VS DUREZA

De acuerdo a lo visto en la Figura 33, el recocido subcrítico a la temperatura de 260°C solo se produce una pequeña disminución de la dureza, así como el tamaño de grano tampoco sufre un gran cambio, esto se debe a que aproximadamente a esa temperatura de recocido subcrítico se alcanza la fase de recuperación, de acuerdo a la Ecuación 4 y tomando en cuenta que la fase de recristalización se alcanza a los 550-600 °C según las observaciones de los resultados de dureza. Durante la fase de recuperación se produce la aniquilación de defectos puntuales y el reordenamiento de las dislocaciones causados durante la deformación plástica del trabajo en frío (Byrne, 1965).

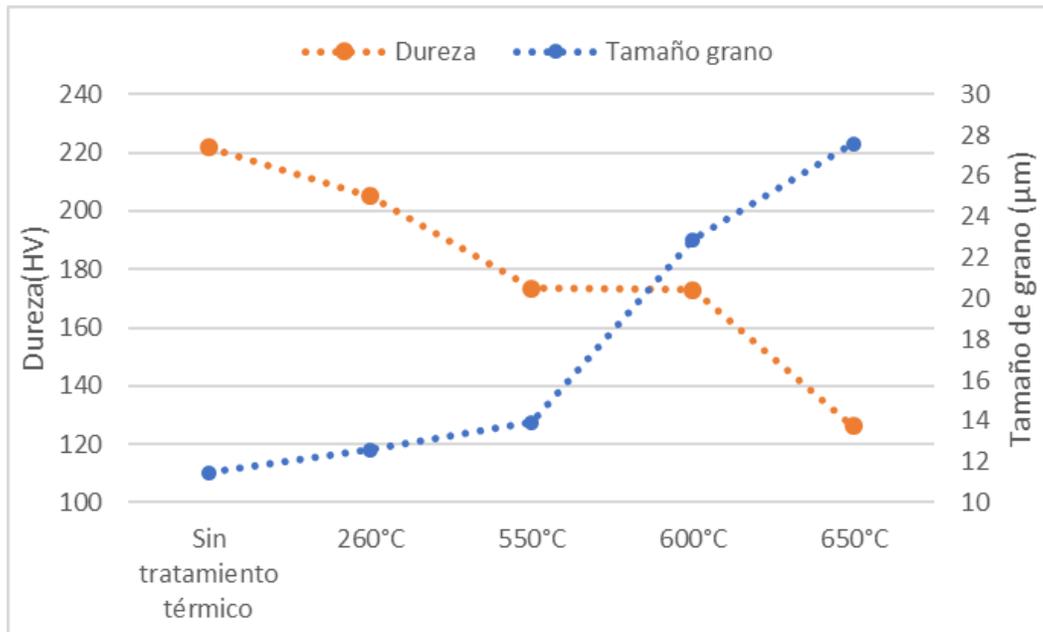


Figura 33. Evolución de la dureza y tamaño de grano en función de la temperatura de recocido subcrítico.

Elaboración propia

Usando los valores de dureza y tamaño de grano previamente obtenidos, en la Figura 34 fueron graficados los resultados de dureza (HV) contra tamaño de grano ($d^{-1/2}$) de los diferentes grupos de prueba. Se puede observar que, a mayor tamaño de grano, menor dureza del acero, lo que es consistente con la ecuación de Hall-Petch (Bata & Pereloma, 2003). En la Ecuación 5 fueron estimados los valores de la

dureza de fricción (H_0) y la pendiente de la ecuación (k). La ecuación obtenida ayuda a calcular el valor de dureza para diferentes tamaños de grano.

Ecuación 7. Ecuación de Hall-Petch para el presente estudio.

$$H = 5.18 + 701.5 d^{-1/2}$$

Donde, la dureza de fricción $H_0 = 5.18$ y $k = 701.5$ es la pendiente de la ecuación.

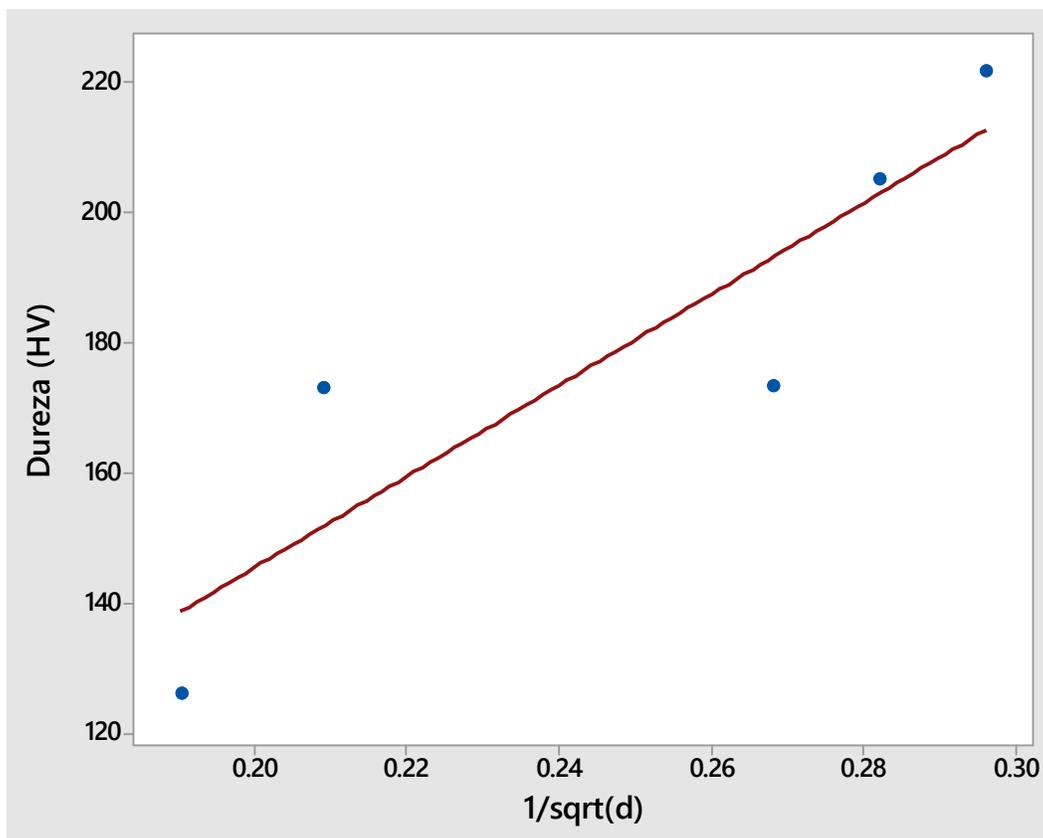


Figura 34. Relación de Hall-Petch: Tamaño de grano vs dureza.

Elaboración propia

La Tabla 10 resume los valores estadísticos calculados para la ecuación propuesta: el coeficiente de determinación R^2 , determina la calidad de un modelo para replicar los resultados, este valor se mide entre 0 y 100%, entre más cercano sea a 100% mayor será el ajuste del modelo a la variable que se pretende explicar

(Minitab, LLC, 2022). El error absoluto medio EAM, mide la diferencia que existe entre los valores calculados y los observados, para calcularlo se requieren valores absolutos, ya que promedia las diferencias, entre más pequeño sea este valor menor diferencia hay entre los valores calculados y los medido. La raíz del error cuadrático medio RECM, es una medida de precisión y sirve para comparar los errores de predicción, un valor cercano a 0 indicaría un ajuste perfecto entre los datos observados y calculados, sin embargo, en la práctica es muy difícil alcanzar esta cifra (Minitab, LLC, 2022).

Tabla 10. Valores estadísticos calculados para el modelo desarrollado.

R ²	79.9%
Error absoluto medio (EAM)	12.95
Raíz del error cuadrático medio (RECM)	14.73

Elaboración propia

En la Tabla 11 se muestran los valores de dureza obtenidos de manera experimental y mediante el modelo de Hall-Petch desarrollado en la Ecuación 5. El error muestra aleatoriedad lo que indica que es un buen modelo. En la Figura 35 se muestra una gráfica de dispersión realizada para la variable dependiente (dureza) con los valores experimentales y calculados.

Tabla 11. Comparación de dureza experimental y calculada.

Temperatura de recocido subcrítico	Dureza experimental (HV)	Dureza calculada (HV)	Error
650 °C	126.25	138.76	-12.51
600 °C	173	151.8	21.2
550 °C	173.5	193.2	-19.70
260 °C	205.1	203.04	2.06
Sin tratamiento térmico	221.8	212.49	9.3

Elaboración propia

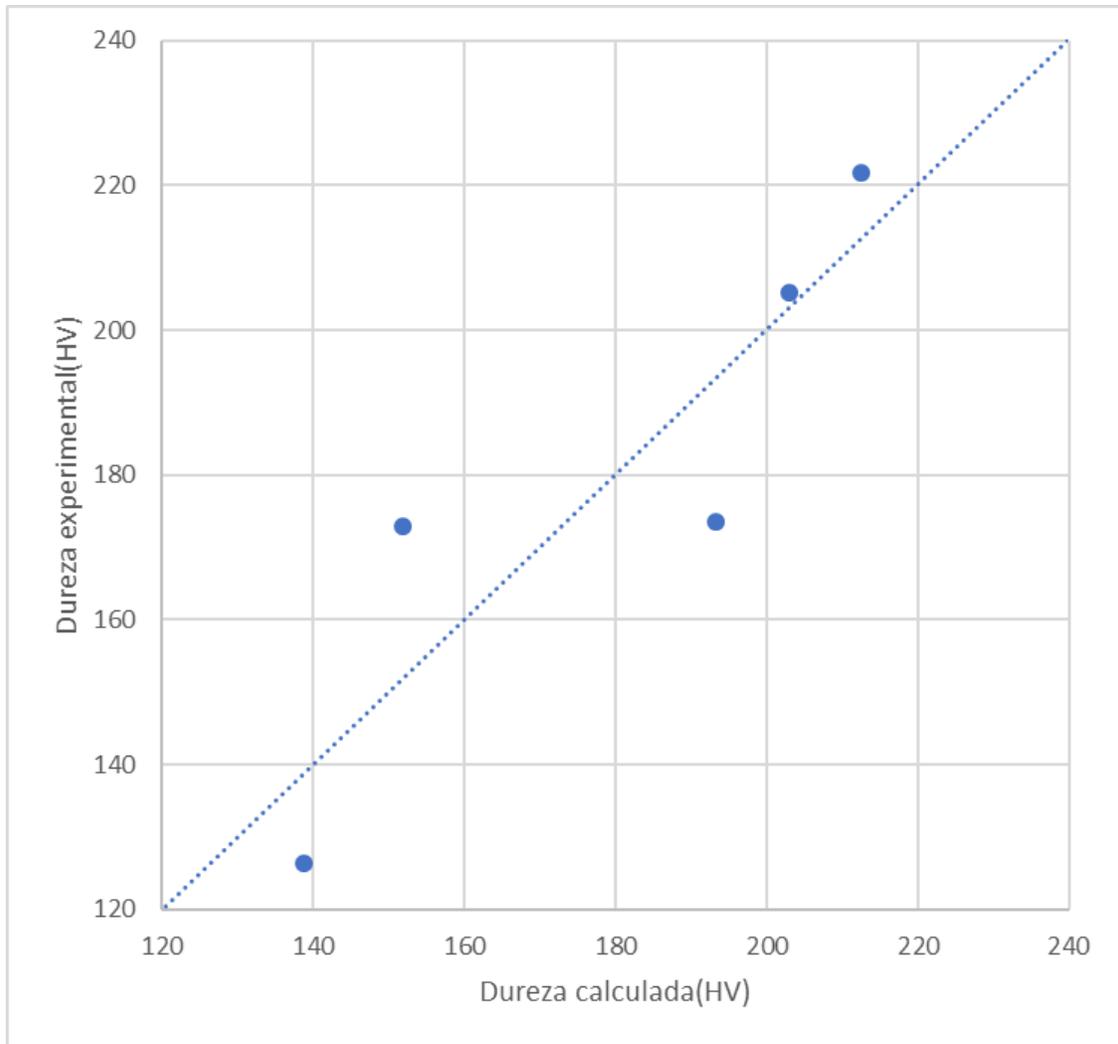


Figura 35. Comparación entre los valores obtenidos experimentalmente y mediante el modelo Hall-Petch desarrollado.

Elaboración propia

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados experimentales obtenidos en el presente trabajo y el estudio de la literatura, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- El recocido subcrítico a 260°C solo alcanza la fase de recuperación ya que la dureza y el tamaño de grano no experimentan un gran cambio en comparación con los especímenes que no fueron tratados térmicamente.
- Tan pronto comienza la fase de recristalización en el recocido subcrítico a una temperatura de 550°C, la curva de dureza refleja el consecuente reblandecimiento del acero AISI 12L14.
- Las micrografías realizadas, muestran que los granos de ferrita recristalizados crecen un 262% con una temperatura de recocido subcrítico de 650 °C en comparación con aquellos que no recibieron tratamiento térmico.
- Los histogramas de tamaño de grano muestran que la distribución se comporta de forma unimodal en el grupo sin tratamiento térmico y bimodal en los grupos que fueron tratados térmicamente, además de que el tamaño de grano promedio se incrementa a mayor temperatura de recocido subcrítico, ya que la frecuencia en tamaños pequeños disminuye y en granos de más de 40 µm aumenta.
- El acero con mayor tamaño de grano se caracteriza por una menor dureza, lo cual es consistente con la relación Hall-Petch.
- El modelo desarrollado y propuesto en la Ecuación 5: $H=5.18+701.5 d^{-1/2}$, ayuda a predecir la dureza del acero AISI 12L14 con base en el tamaño de grano.

RECOMENDACIONES

El presente estudio se realizó en especímenes maquinados con una forma específica requerida para un producto de la industria automotriz, por lo que los resultados obtenidos en cuestión de la dureza y tamaño de grano pudieran diferir o variar un poco respecto a especímenes con otra forma. Se recomienda tomar con mesura los resultados expuestos en el presente trabajo, ya que no pudieran aplicar de la misma manera para otros especímenes con diferente forma, aunque sean constituidos del mismo material.

Por lo cual, para futuros trabajos en los cuales se quieran obtener resultados más generales se hacen las siguientes recomendaciones:

- Realizar el estudio con especímenes con forma regular como cubica o cilíndrica y sin maquinados muy complejos o formas específicas.
- Realizar las mediciones de microdureza en zonas planas de baja rugosidad, ya que una alta rugosidad puede alterar la medición.
- Realizar mediciones de ductilidad.
- Experimentar con el tiempo de reposo en la temperatura de recocido subcrítico, ya que esta variable constituye un papel crítico en la recristalización al igual que la temperatura.

APORTACIÓN DE LA TESIS

En el presente trabajo se estudió el efecto de la temperatura en el tratamiento térmico de recocido subcrítico para especímenes maquinados de un acero bajo en carbono: AISI 12L14. Este estudio ayuda a comprender de una mejor manera el comportamiento de la microestructura y tamaño de grano ante diferentes escenarios de tratamiento térmico realizados por debajo del punto de transformación de Perlita a Austenita, así como su influencia en las propiedades mecánicas del acero estudiado. De igual forma, con base en el estudio de la microestructura, se logró identificar las temperaturas a las cuales el acero transita durante el tratamiento térmico: recuperación, recristalización y crecimiento de grano. El modelo desarrollado, ayuda a predecir con un error relativamente bajo, el comportamiento o valor de la dureza teniendo como base el valor de tamaño de grano.

APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS

El propósito del presente estudio está directamente relacionado con el ahorro de recursos económico, naturales y humanos. En primera instancia, se buscaba conocer de una mejor manera el efecto del tratamiento térmico en la dureza del acero para seleccionar una temperatura que brindara el valor idóneo de dureza y así se evitara la aparición de grietas en el espécimen después de los procesos de fabricación del ensamble. Con lo cual, ayuda a reducir o eliminar el porcentaje de desperdicio relacionado a este fenómeno, por lo que se tienen ahorros económicos significativos. Así mismo, al reducir o eliminar el desperdicio de material se tiene un ahorro de recursos naturales, lo que ayuda a reducir el impacto ambiental de la industria. Por último, también ayuda a reducir el uso de recursos humanos en la problemática de las grietas, ya sea en tiempo de investigación y/o separación de material con esta problemática.

REFERENCIAS

- ASM International. (2002). *Metallographer's guide: practices and procedures for irons and steels*.
- ASM International. (2013). *Heat treating* (Vol. 4). ASM International.
- ASTM International. (2004). *E112-96: standard test methods for determining average grain size*.
- ASTM International. (2016). *Handbook of comparative world steel standards*.
- ASTM International. (2017). *E 384-17: Standard test method for microindentation hardness of materials*.
- ASTM International. (2018). *A519-17: standard specification for seamless carbon and alloy steel mechanical tubing*.
- Bata, V., & Pereloma, E. V. (2003). An alternative physical explanation of the Hall-Petch relation. *Acta Materialia*, 52(3), 657-665.
- Benchabane, G., Boumerzoug, Z., Gloriant, T., & Thibon, I. (2011). Microstructural characterization and recrystallization kinetics of cold rolled copper. *Physica B: Condensed Matter*, 406, 1973-1976.
- Bhansali, K., Keche, A., Gogte, C., & Chopra, S. (2020). Effect of grain size on Hall-Petch relationship during rolling process of reinforcement bar. *Materials today: proceedings*, 26, 3173-3178.
- Bramfitt, B., & Benschoter, A. (2002). *Metallographer's guide: practices and procedures for irons and steels*. ASM International.
- Buszko, M., Krella, A., Marchewicz, A., & Gajowiec, G. (2021). Effect of annealing temperature on slurry erosion resistance of ferritic X10CrAlSi18 steel. *Tribology International*, 153, 106648.
- Byrne, J. G. (1965). *Recovery, recrystallization, and grain growth*. Macmillan.
- Davis, J. (1998). Structure/property relationships in irons and steels. In *Metals Handbook Desk Edition* (pp. 153-173). ASM International.
- Garduño, C. (2015). *Estudio de cobre recristalizado por nanoindentación*. Instituto Politecnico Nacional, Departamento de Ingeniería en Metalurgia y Materiales, Ciudad de México.
- Hurley, P., Muddle, B., & Hodgson, P. (2001). Nucleation sites for ultrafine ferrite produced by deformation of austenite during single-pass strip rolling. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 32, 1507-1517.
- Huyett, G. L. (n.d.). *Engineering Handbook*. Minneapolis, Kansas.

- Jaypuria, S. K. (2009). *Heat treatment of low carbon steel*. NIT Rourkela, Department of Mechanical Engineering.
- Kalpakjian, S. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología* (5th ed.). Pearson Educación.
- Kotan, H., Saber, M., Koch, C., & Scattergood, R. (2012). Effect of annealing on microstructure, grain growth, and hardness of nanocrystalline Fe–Ni alloys prepared by mechanical alloying. *Materials Science and Engineering: A*, 552, 310-315.
- Liu, M., Shi, B., Wang, C., Ji, S., Cai, X., & Song, H. (2003). Normal Hall–Petch behavior of mild steel with submicron grains. *Materials Letters*, 57(19), 2798 – 2802.
- Mabuchi, H., Hasegawa, T., & Ishikawa, T. (1999). Metallurgical features of steel plates with ultra fine grains in surface layers and their formation mechanism. *ISIJ International*, 39(5th), 477-485.
- Martínez-de-Guerenu, A. A., Díaz-Fuentes, M., & Gutiérrez, I. (2004). Recovery during annealing in a cold rolled low carbon steel. Part I: Kinetics and microstructural characterization. *Acta Materialia*, 52(12), 3657-3664.
- Minitab, LLC. (2022). *Interpretar todos los estadísticos para Regresión de mejores subconjuntos*. Retrieved March 2022, from Soporte de Minitab: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/regression/how-to/best-subsets-regression/interpret-the-results/all-statistics/>
- Minitab, LLC. (2022). *Model summary for CART® Regression*. Retrieved March 2022, from Minitab support: [https://support.minitab.com/en-us/minitab/19/help-and-how-to/statistical-modeling/predictive-analytics/how-to/cart-regression/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/model-summary-table/#:~:text=The%20root%20mean%20square%20error,for%20the%20test%](https://support.minitab.com/en-us/minitab/19/help-and-how-to/statistical-modeling/predictive-analytics/how-to/cart-regression/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/model-summary-table/#:~:text=The%20root%20mean%20square%20error,for%20the%20test%20)
- Naka, A., Kobayashi, T., Katou, S., Tsuboi, R., & Tadokoro, C. S. (2016). Effect of microstructure of low-carbon steels on frictional and wear behaviour. *Tribology International*, 93, 696-701.
- Poyraz, O., & Ögel, B. (2020). Recrystallization, grain growth and austenite formation in cold rolled steels during intercritical annealing. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5), 11263-11277.
- Prabhudev, K. H. (1988). *Handbook of heat treatment of steels*. McGraw Hill Education.
- Raabe, D. (2014). 23 - Recovery and Recrystallization: Phenomena, Physics, Models, Simulation. In K. H. David E. Laughlin (Ed.), *Physical Metallurgy* (5th ed., pp. 2291-2397). Elsevier.

- SAE International. (2007). *AMS 2759/1D: heat treatment of carbon and low-alloy steel parts minimum tensile strength below 220 ksi (1517 MPa)*.
- SAE International. (2012). *J1086: numbering metals and alloys*.
- Song, Y., Yeon, J., & Na, B. (2019). Numerical simulations of the Hall-Petch relationship in aluminium using gradient-enhanced plasticity model. *Advances in civil engineering*.
- Su, Y., & K.Y., C. (1997). The influence of niobium, chromium, molybdenum and carbon on the sliding wear behavior of nickel-base hardfacing alloys. *Wear*, 209(1-2).
- Tian, J., Xu, G., Liang, W., & Yuan, Q. (2017). Effect of annealing on the microstructure and mechanical properties of a low-carbon steel with ultrafine grains. *Metallography, microstructure and analysis*, 233–239.
- Totten, G. E. (2006). *Steel heat treatment handbook*, (2nd ed.). CRC Press.
- Trzaska, J. (2016). Calculation of critical temperatures by empirical formulae. *Archives of Metallurgy and Materials*, 61, 981–986.
- Vargas, F. I., & Llamoca, R. A. (2021). *Estudio de la cinética de crecimiento de grano en una aleación comercial CuZn30 con recocido de recristalización*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Facultad de Ingeniería de procesos, Arequipa.
- Villoria, L., & Bohórquez, L. (2016). *Efecto de la temperatura de revenido en la microestructura y en las propiedades mecánicas del acero AISI 4140*. Universidad de Córdoba, Facultad de Ingeniería, Montería.
- Yoshida, S., Ikeuchi, T., Bhattacharjee, T., Bai, Y., Shibata, A., & Tsuji, N. (2019). Effect of elemental combination on friction stress and Hall-Petch relationship in face-centered cubic high / medium entropy alloys. *Acta Materialia*, 171, 201-215.