

## Revisión comparativa de las microestructuras de aceros que han sido sometidos a diferentes tratamientos térmicos

### Comparative review of the microstructures of steels that have undergone different heat treatments

Javier Alexander Pinzon Roballo <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Facultad, Ingeniería mecánica, Semillero de investigación de Materiales,  
javier.pinzonro@usantoto.edu.co.

**Resumen**— El análisis comparativo de las microestructuras de aceros tratados térmicamente es un tema de investigación que busca examinar las características microestructurales resultantes de diferentes tratamientos térmicos aplicados a los aceros. A través de una revisión exhaustiva de trabajos de investigación relacionados, se analizan los efectos de variables como la temperatura, el tiempo de exposición y las tasas de enfriamiento en la formación de fases y la distribución de los constituyentes microestructurales. Este análisis permite comprender la relación entre la microestructura y las propiedades mecánicas de los aceros, como la dureza, la resistencia a la tracción y la tenacidad. Se llevaron a cabo diversos tratamientos térmicos, como temple en agua y en aceite, normalizado y recocido, en un total de 15 probetas de aceros AISI 1045, AISI 4140 y AISI 8620. El objetivo era examinar las microestructuras y fases resultantes en cada uno de ellos tras la aplicación de cada tratamiento. Se realizaron análisis metalográficos en los aceros adquiridos comercialmente y en los tratados, obteniéndose micrografías y midiendo la dureza para confirmar las transformaciones. Además, se identificaron las fases presentes en los materiales estudiados, con el propósito de analizar el impacto específico de cada tratamiento térmico en los tres tipos de acero. Se pudo observar claramente los cambios microestructurales que ocurren en los materiales metálicos cuando son sometidos a tratamientos térmicos, en este caso, aplicados a tres tipos de acero.

**Palabras clave**— Tratamientos térmicos – Microestructura aceros - Fases aceros

**Abstract**— The comparative analysis of thermally treated steel microstructures is a research topic that aims to examine the resulting microstructural characteristics from different heat treatments applied to steels. Through a comprehensive review of related research works, the effects of variables such as temperature, exposure time, and cooling rates on phase formation and distribution of microstructural constituents are analyzed. This analysis allows for an understanding of the relationship between the microstructure and the mechanical properties of steels, such as hardness, tensile strength, and toughness. Various heat treatments were conducted, including water and oil quenching, normalizing, and annealing, on a total of 15 specimens of AISI 1045, AISI 4140, and AISI 8620 steels. The objective was to examine the resulting microstructures and phases in each steel type after each treatment. Metallographic analyses were performed on both commercially acquired and treated steels, resulting in micrographs and hardness measurements to confirm the transformations. Furthermore, the phases present in the studied materials were identified, aiming to analyze the specific impact of each heat treatment on the three steel types. Clear microstructural changes occurring in metallic materials when subjected to heat treatments, in this case applied to three steel types, were observed.

**Keywords**— Heat treatments - Steel microstructure, phases

## I. INTRODUCCION

La revisión comparativa de las microestructuras de aceros que

han sido sometidos a diferentes tratamientos térmicos es un tema de investigación relevante en la industria metalúrgica. Diversos estudios han abordado esta temática, utilizando técnicas de caracterización microestructural y mecánica para evaluar las propiedades de los materiales. En algunos casos, se han utilizado procesos térmicos y termomecánicos para obtener aceros de fase dual (ferrita-martensita) (Castillo Gutiérrez, D. E., Angarita Moncaleano, I. I., & Rodríguez Baracaldo, R. (2018). Caracterización microestructural y mecánica de aceros de fase dual (ferrita-martensita), obtenidos mediante procesos térmicos y termomecánicos. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 26(3), 430-439.)

Los análisis de microscopía óptica y de imagen han permitido examinar las microestructuras y determinar el tamaño de grano austenítico (Alcelay Larión, J. I., Al Omar Mesnaoui, A., & Prado Pozuelo, J. M. (2014). Estudio comparativo del conformado en caliente de un acero microaleado usando criterios termodinámicos continuos y criterios fenomenológicos. *Trater press*, 44(diciembre), 41-50.)

Además, se han realizado ensayos de laboratorio para caracterizar las propiedades mecánicas de los materiales. Los resultados de estos estudios han permitido comparar los aceros tratados térmicamente con el acero en estado inicial, y evaluar la evolución microestructural de los materiales sometidos a tratamientos isotérmicos (Tobón Aguirre, J. A. (2022). Estudio de la evolución microestructural de los aceros de herramientas AISI A2 y D2 sometidos a tratamientos isotérmicos para aplicaciones de deformación en frío por impacto).

El análisis comparativo de las microestructuras de aceros tratados térmicamente es un tema de investigación importante que ha permitido mejorar la comprensión de las propiedades de los aceros. En una revisión comparativa de las microestructuras de aceros sometidos a diferentes tratamientos térmicos, se analizan y comparan los efectos de estos tratamientos en la microestructura y las propiedades mecánicas resultantes. Se examinan aceros con diferentes composiciones químicas y se evalúan los cambios en la microestructura después de cada tratamiento térmico.

Para un ingeniero mecánico, es crucial comprender las transformaciones que ocurren en la microestructura de un acero durante un tratamiento térmico, ya que esto tiene un impacto directo en las propiedades mecánicas de las piezas tratadas. Por lo tanto, es importante poder predecir los cambios en un material cuando la temperatura de servicio supera la temperatura de transformación.

Además de estos tratamientos básicos, existen otros procesos térmicos más especializados, como la normalización, que se utiliza para mejorar la uniformidad de la microestructura y reducir las tensiones residuales en el acero. (Becerra-Rodríguez, M., Aguilar-Díaz, V. J., Bernardino-González, J., & Santana-Ramírez, F. (2021). Tratamientos térmicos. *TEPEXI Boletín Científico de la Escuela Superior Tepeji del Rfo*, 8(15), 40-44.). También se pueden aplicar tratamientos térmicos de endurecimiento superficial, como el endurecimiento por inducción o el tratamiento de nitruración, para mejorar la resistencia al desgaste y la fatiga en las capas superficiales del acero. (Soriano, C. (2022). Endurecimiento y revenido superficial mediante un haz láser oscilante.)

En este documento se presenta un estudio dentro del área de Ingeniería de Materiales, donde se llevó a cabo la identificación de las fases antes y después de someter los aceros más utilizados en ingeniería mecánica para la fabricación de componentes de máquinas a tratamientos térmicos, como temple en agua, temple en aceite, normalizado y revenido.

## II. MATERIALES Y METODOLOGÍA

Se seleccionaron los aceros que se van a analizar y que sean relevantes para el estudio. Se tomaron en cuenta las propiedades mecánicas y microestructurales de los aceros en estado inicial y después de ser sometidos a tratamientos térmicos. Para este estudio, se emplearon tres tipos de acero: AISI 1045, AISI 4140 y AISI 8620, se compararon los tres aceros a partir del diagrama de fase Fe-C y el diagrama TTT.

El diagrama de fase Fe-C es el equilibrio o de fases que representa las transformaciones que sufren los aceros al carbono con la temperatura. (Echegaray Yépez, M. A. (2021). Diagrama hierro-carbono.). Este diagrama se emplea para la representación de las transformaciones que sufren los aceros al carbono con la temperatura, admitiendo que el calentamiento (o enfriamiento) de la mezcla se realiza muy lentamente de modo que los procesos de difusión (homogeneización) tienen tiempo para completarse. En este diagrama se representan las diferentes fases que se forman en función de la temperatura y la composición de la aleación. En el caso del acero AISI 1045, que es un acero hipoeutectoide, las fases presentes son austenita, ferrita proeutectoide y perlita. El diagrama de fase Fe-C es la base para entender los tratamientos térmicos de los aceros y es utilizado para determinar las condiciones de temperatura y tiempo necesarias para obtener las propiedades deseadas en los aceros.

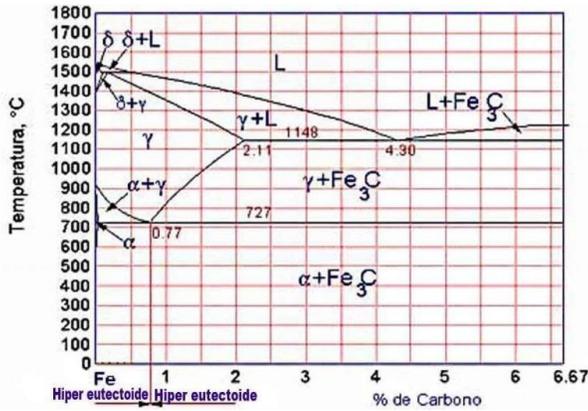


Figura 1 Diagrama de fase Fe-C . Fuente: Echegaray Yépez, M. A. (2021). Diagrama hierro-carbono

El acero AISI 1045 es un acero hipoeutectoide, ubicado por debajo de la eutectoide, por lo que las fases presentes son austenita, ferrita proeutectoide y perlita. En la literatura se pueden encontrar diferentes estudios que abordan la microestructura y propiedades mecánicas del acero AISI 1045 sometido a tratamientos térmicos, como el temple y el austemperado. En estos estudios se han utilizado técnicas de caracterización microestructural y mecánica para evaluar las propiedades de los materiales y comparar los aceros tratados térmicamente con el acero en estado inicial. En general, el acero AISI 1045 es un material ampliamente utilizado en la industria debido a su buena combinación de resistencia mecánica y tenacidad.

El trabajo "Atlas of Time-Temperature Diagrams for Irons and Steels" es un recurso que recopila una variedad de diagramas de tiempo-temperatura para hierros y aceros. El atlas contiene una amplia gama de diagramas TTT para diferentes aleaciones de hierro y acero, lo que permite a los profesionales de la metalurgia y a los investigadores tener acceso a información detallada sobre las propiedades y características de estos materiales en función de las condiciones de tratamiento térmico.

El diagrama TTT (Tiempo-Temperatura-Transformación) es una gráfica que resume las posibles transformaciones de la austenita para cada acero en función de la temperatura y el tiempo de enfriamiento.

El diagrama TTT del acero AISI 1045 representa las transformaciones que sufre este acero al ser sometido a diferentes tratamientos térmicos. A partir de los resultados de diferentes estudios, presenta las siguientes características:

**Recocido:** El recocido se realiza calentando el acero a una temperatura por encima de la temperatura crítica y luego enfriándolo lentamente en horno. Este tratamiento reduce la

dureza y la resistencia del acero, al tiempo que mejora su maquinabilidad y tenacidad. El recocido también ayuda a eliminar las tensiones internas y mejorar la ductilidad.

**Temple:** El temple implica calentar el acero AISI 1045 a una temperatura por encima de la temperatura crítica y luego enfriarlo rápidamente en agua, aceite u otro medio de enfriamiento. El temple aumenta significativamente la dureza y la resistencia del acero, pero a costa de una disminución en la tenacidad. El acero templado es más duro pero también más frágil.

**Revenido:** Después del temple, el acero se somete al revenido, que es un tratamiento de calentamiento a una temperatura moderada, seguido de enfriamiento lento. El revenido reduce la fragilidad y el estrés residual del acero templado, al tiempo que mejora su tenacidad y resistencia a la fatiga. El resultado es un acero más tenaz pero ligeramente menos duro.

El acero AISI 1045 es un acero hipoeutectoide, por lo que las fases presentes son austenita, ferrita proeutectoide y perlita.

El tratamiento térmico de temple produce una microestructura de martensita, que es una fase metaestable que se forma a partir de la austenita al ser enfriada rápidamente.

El tratamiento térmico produce una microestructura de ferrita y austenita bainítica, que es una fase que se forma a partir de la austenita al ser enfriada a una velocidad intermedia.

El diagrama de transformación isométrica (IT) del acero AISI 1045 muestra que la transformación de la austenita a martensita ocurre en un rango de temperatura entre los 200°C y los 450°C, dependiendo del tiempo de enfriamiento.

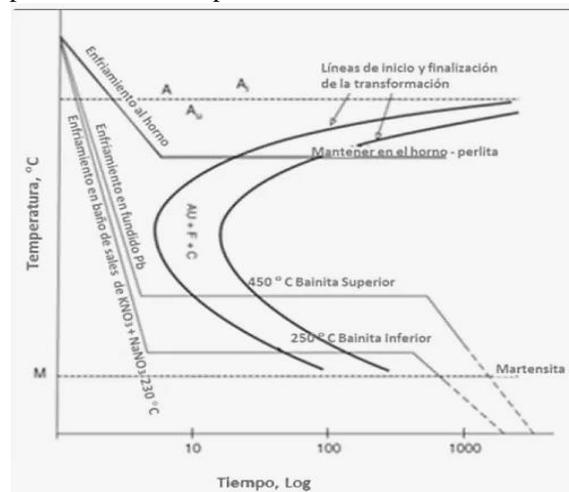


Figura 2

Diagrama De transformacional isométrica (IT) .

Fuente: Caracterización microestructural de un acero sae 1045 con un tratamiento termomecánico

Su diagrama TTT muestra las transformaciones de fase que ocurren durante el enfriamiento del acero AISI 1045.

**Austenización:** La temperatura típica de austenización está en

el rango de 715 °C a 745 °C.

**Enfriamiento:** Después de la austenización, el acero AISI 1045 se enfría a diferentes velocidades. Las diferentes regiones del diagrama TTT del AISI 1045 representan las transformaciones de fase que ocurren durante este enfriamiento.

**Martensita:** Si el acero se enfría rápidamente desde la temperatura de austenización, se forma martensita, una fase dura y frágil. En el diagrama TTT del AISI 1045, la región de martensita se encuentra en el extremo izquierdo, cerca del enfriamiento más rápido.

**Bainita:** Si el acero se enfría a una velocidad moderada, se forma bainita, que es una fase que combina propiedades de resistencia y tenacidad. La región de bainita se encuentra en el centro del diagrama TTT del AISI 1045.

**Ferrita perlítica:** Si el acero se enfría a una velocidad más lenta, se forma ferrita perlítica, que es una mezcla de ferrita y perlita. La perlita es una estructura lamelar compuesta de ferrita y cementita. La región de ferrita perlítica se encuentra en el extremo derecho del diagrama TTT del AISI 1045.

**Acero AISI 4140**

El acero AISI 4140 es un acero de baja aleación con gran resistencia al impacto, a la fatiga y a la abrasión. Este material es conocido como acero AISI / SAE 4140, la forma pre-templada es asistida térmicamente en la fundición y es designada como 4140 HT. El acero AISI 4140 es un acero hipoeutectoide, que contiene entre 0.38 a 0.43 % de carbono, de

0.15 a 0.35 % de silicio, y de 0.75 a 1.00 % de manganeso. Además, de 0.80 a 1.10 de cromo y 0.15 a 0.25 de molibdeno. Se endurece por medio de tratamiento térmico como revenido, temple y recosido, es frecuentemente utilizado para fabricar piezas que son más resistentes que otros tipos de acero. El diagrama de fases del acero AISI 4140 se puede entender a partir del diagrama de fases Fe-C.

A partir de la teoría de diferentes estudios, se puede inferir que el diagrama TTT del acero AISI 4140 presenta las siguientes características:

El acero AISI 4140 es un acero de baja aleación con gran resistencia al impacto, a la fatiga y a la abrasión.

Su diagrama TTT muestra las transformaciones de fase que ocurren durante el enfriamiento del acero AISI 4140 desde una temperatura de austenización.

La austenización es el proceso de calentar el acero a una temperatura por encima de su punto crítico para transformarlo completamente en austenita, que es una fase sólida de alta temperatura. En el caso del AISI 4140, la temperatura de austenización típica está entre 815 °C y 870 °C.

**Enfriamiento:** Después de la austenización, el acero AISI 4140 se enfría a diferentes velocidades. Las diferentes regiones del diagrama TTT del AISI 4140 representan las transformaciones de fase que ocurren durante este enfriamiento.

**Martensita:** En el diagrama TTT del AISI 4140, la región de martensita se encuentra en el extremo izquierdo, cerca del enfriamiento más rápido.

**Bainita:** La región de bainita se encuentra en el centro del diagrama TTT del AISI 4140.

**Ferrita perlítica:** La región de ferrita perlítica se encuentra en el extremo derecho del diagrama TTT del AISI 4140.

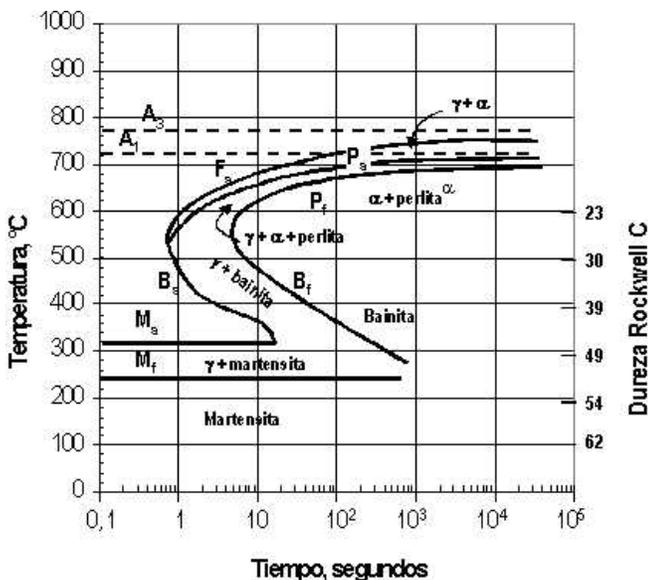


Figura 2 Diagrama TTT para el acero 1045. Fuente: Guachamín Guamán, Á. F., & Vargas Vargas, H. V. (2011). Determinación del efecto de la temperatura de enfriamiento en las propiedades mecánicas de los aceros de medio carbono (AISI 1045 y AISI 1070) durante el tratamiento térmico (Bachelor's thesis, QUITO/EPN/2011)

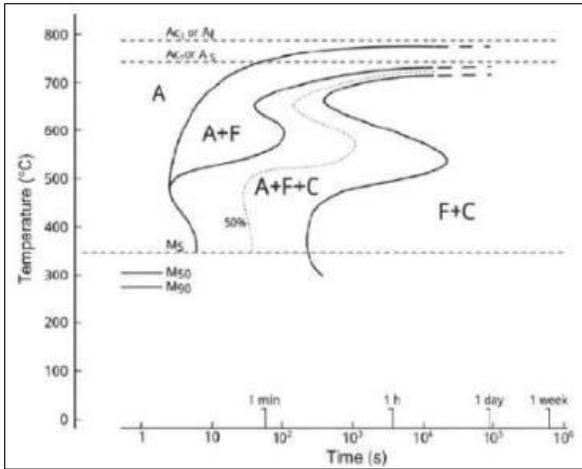


Fig. 3 Curvas TTT para acero AISI 4140. Fuente: Fernández, S. F., & Mora, K. R. (s.f.). TRATAMIENTO TÉRMICO DEL ACERO AISI 4140. Escuela de Ingeniería de Biosistemas Universidad de Costa Ric.

**Acero AISI 8620**

El acero AISI 8620 es un acero de baja aleación que contiene cromo, molibdeno y níquel. A partir de la teoría de la búsqueda, contiene una cantidad significativa de níquel, cromo y molibdeno, lo que le confiere una mayor resistencia al impacto y a la fatiga en comparación con el acero AISI 4140. En general, los aceros de baja aleación como el AISI 8620 son ampliamente utilizados en la industria debido a su buena combinación de resistencia mecánica y tenacidad, y son sometidos a diferentes tratamientos térmicos para mejorar sus propiedades. Para entender las transformaciones que sufre el acero AISI 8620 al ser sometido a diferentes tratamientos térmicos, se puede utilizar el diagrama TTT Fe-C como base y adaptarlo a las características específicas del acero. (Moreno Sanchez, S. N., & Español Marroquin, U. A. Comparación microestructural de los aceros 1020, 1045 y 8620 templados a temperaturas intercríticas y revenidos.)

En la figura 3 se muestra un diagrama TTT para el acero AISI 8620:

**Austenización:** La austenización implica calentar el acero a una temperatura por encima de su punto crítico para transformarlo en austenita, una fase sólida de alta temperatura. En el caso del AISI 8620, la temperatura típica de austenización está en el rango de 815 °C a 870 °C

**Enfriamiento:** Después de la austenización, el acero AISI 8620 se enfría a diferentes velocidades. Las diferentes regiones del diagrama TTT del AISI 8620 representan las transformaciones de fase que ocurren durante este enfriamiento.

**Martensita:** En el diagrama TTT del AISI 8620, la región de martensita se encuentra en el extremo izquierdo, cerca del enfriamiento más rápido.

**Bainita:** La región de bainita se encuentra en el centro del diagrama TTT del AISI 8620.

**Ferrita perlítica:** La región de ferrita perlítica se encuentra en el extremo derecho del diagrama TTT del AISI 8620.

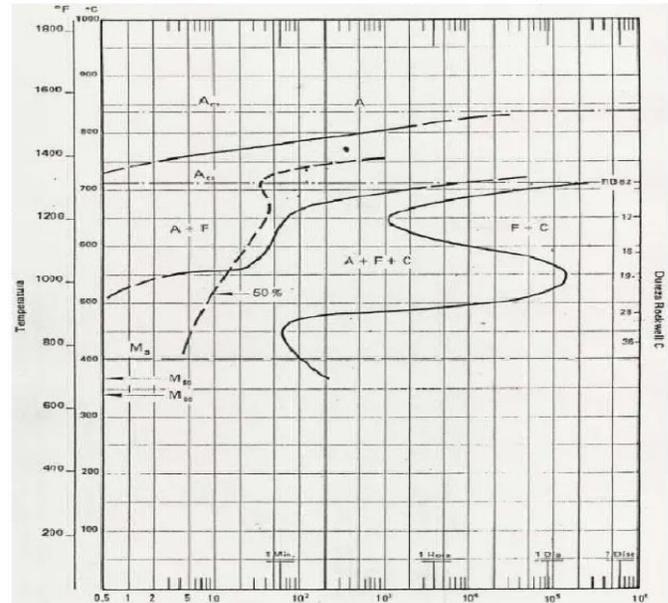


Figura 4. Diagrama TTT de AISI8620 Fuente: (Becerra-Rodríguez, M., Aguilar-Díaz, V. J., Bernardino-González, J., & Santana-Ramírez, F. (2021). Tratamientos térmicos. TEPEXI Boletín Científico de la Escuela Superior Tepeji del Río, 8(15), 40-44.).

Se prepararon un total de cinco probetas para cada uno de ellos, y a cuatro de estas se le sometió a un tratamiento térmico siguiendo las siguientes condiciones:

**A. Temple en agua**

Para llevar a cabo el tratamiento térmico de temple en agua del acero AISI 8620, se siguieron los procedimientos y las temperaturas estandarizadas según la norma ASTM A-255. Se utilizó un horno mufla, el cual fue calentado hasta alcanzar los 950°C necesarios para la austenización del material. La temperatura se mantuvo constante durante 30 minutos para garantizar una completa austenización. Posteriormente, las probetas fueron retiradas del horno y sumergidas en agua durante 10 minutos, tras lo cual fueron retiradas y dejadas secar al aire. Para analizar la microestructura resultante, se realizaron pruebas de caracterización microestructural y mecánica, incluyendo pruebas de microscopía óptica.



Figura. 5 (a) Probetas de acero en el horno mufla, (b) Probetas calentadas hasta temperatura de austenización completa (950°C). Fuente: Autores

### B. Temple en aceite

El tratamiento térmico de temple en aceite es un proceso importante para mejorar las propiedades mecánicas de los aceros, y su efectividad depende de factores como la temperatura de enfriamiento y el tipo de aceite utilizado. En un estudio realizado se evaluó la influencia del uso de aceites reutilizados como medio de enfriamiento en el proceso de temple del acero AISI 1045. Los resultados mostraron que el enfriamiento en aceites reutilizados produce una microestructura de martensita más fina y homogénea que el enfriamiento en aceites nuevos, lo que se traduce en una mayor resistencia mecánica del material.

Se evaluó la influencia del tipo de aceite utilizado en el proceso de temple del acero AISI 1045. Los resultados mostraron que el enfriamiento en aceite rápido produce una microestructura de martensita más fina y homogénea que el enfriamiento en aceite caliente, lo que se traduce en una mayor resistencia mecánica del material.



Figura. 6 temple en aceite. Fuente: Autores

### C. Normalizado

Cada una de las probetas se introdujo en la mufla y se calentó hasta alcanzar la temperatura de austenización típica para el acero AISI 1045, está en el rango de aproximadamente 800°C a 870°C, para el acero AISI 4140, generalmente se austenitiza en el rango de aproximadamente 850°C a 900°C y el acero AISI

8620, se austenitiza típicamente en el rango de alrededor de 845°C a 900°C la cual se mantuvo durante 30 minutos. Después de este periodo, las probetas se retiraron de la mufla y se dejaron enfriar al aire libre durante 3 días.

El proceso de enfriamiento al aire libre después de la austenización es un factor importante en el tratamiento térmico de los aceros, ya que permite que la microestructura se establezca y se reduzca el riesgo de deformaciones y grietas. Sin embargo, la velocidad de enfriamiento al aire libre es mucho menor que la velocidad de enfriamiento en agua o aceite, lo que puede afectar las propiedades mecánicas del material.

### D. Recocido

Cada una de las probetas se calentó en un horno mufla hasta llegar a la temperatura de austenización típica para el acero AISI 1045, está en el rango de aproximadamente 800°C a 870°C, para el acero AISI 4140, generalmente se austenitiza en el rango de aproximadamente 850°C a 900°C y el acero AISI 8620, se austenitiza típicamente en el rango de alrededor de 845°C a 900°C, y se mantuvo a esa temperatura durante 30 minutos. Luego, el horno se apagó y las probetas se dejaron dentro para que se enfriaran durante 3 días.

El recocido es un tratamiento térmico utilizado en los aceros para modificar su estructura interna y mejorar sus propiedades mecánicas. A continuación, se presentan algunos análisis investigativos sobre el tema, basados en los resultados de la búsqueda:

El proceso de recocido consiste en calentar el acero a una temperatura determinada y mantenerlo a esa temperatura durante un tiempo determinado, para luego enfriarlo lentamente al aire libre o en un horno. El objetivo principal del recocido es ablandar el acero, regenerar su estructura o eliminar las tensiones internas que siguen a un trabajo en frío.

El recocido se utiliza en diferentes tipos de aceros, como el acero al carbono para herramientas, para mejorar su ductilidad y maleabilidad, también se utiliza en aceros inoxidables para mejorar su resistencia a la corrosión y su mecanizabilidad (Artigas, A., Páez, M., Celentano, D., & Monsalve, A. Revisión y Análisis de Los Procesos de Recocido Continuo Industrial Actuales. In Conamet/Sam-Simposio Materia (pp. 207-213).)

### E. Metalografía

La preparación metalográfica es un proceso importante para analizar la microestructura de los aceros y evaluar sus propiedades mecánicas. A continuación, se presentan algunos análisis investigativos sobre el tema, basados en los resultados de la búsqueda:

La preparación metalográfica sigue los lineamientos

establecidos en la norma ASTM E-3, que establece los procedimientos para la preparación de muestras metalográficas para su análisis microscópico

El proceso de ataque químico es importante para revelar la microestructura del acero. El tipo de reactivo y el tiempo de exposición dependen del tipo de acero y de la microestructura que se desea observar.

Se tomaron muestras de barras de acero comerciales AISI 1045, AISI 4140 y AISI 8620 con un diámetro de 25 mm y una altura de 30 mm. El corte se realizó utilizando una segueta manual. Debido al tamaño de las probetas, no fue necesario realizar un montaje.

Después de aplicar los tratamientos térmicos, se llevó a cabo el desbaste grueso y fino utilizando una pulidora metalográfica. Para el desbaste grueso, se utilizó papel de lija con granos 80, 120 y 180; mientras que para el desbaste fino se emplearon los números 240, 320, 400 y 600. El pulido se realizó utilizando paño y alúmina como abrasivo hasta lograr un acabado de espejo en las caras de las probetas. Para revelar la microestructura, se aplicó un ataque químico con Nital al 2% durante un tiempo máximo de 8 segundos por probeta. Posteriormente, se lavaron y secaron las probetas para tomar fotografías de la microestructura utilizando un microscopio óptico.

### III. RESULTADOS

El trabajo "Heat Treatment and Properties of Iron and Steel" aborda el tratamiento térmico y las propiedades de los hierros y aceros. El artículo proporciona información sobre los diferentes procesos de tratamiento térmico utilizados en hierros y aceros, como la austenización, el temple, el revenido y el recocido.

Además, el trabajo explora cómo el tratamiento térmico afecta las microestructuras de los hierros y aceros, y cómo estas microestructuras influyen en las propiedades finales del material. También se discuten los efectos de los diferentes elementos de aleación en el comportamiento del tratamiento térmico y las propiedades resultantes. (Heat Treatment and Properties of Iron and Steel)

Comparison de microestructuras y fases

#### A. ACERO 1045

La microestructura del acero AISI 1045 en su estado comercial se muestra en la Figura 7. En esta imagen, las áreas claras representan la fase ferrita ( $\alpha$ ), mientras que las áreas oscuras corresponden a la perlita (P).



Figura 7 Probeta de acero 1045 a 100X- Sin tratamiento. Fuente: Autores

Esta muestra fue sometida a un proceso de normalizado y su estructura se muestra en la Figura 8. En comparación con el acero 1045 sin tratamiento (Figura 7), se observa que presenta un grano más uniforme. Las áreas claras corresponden a la fase ferrita, mientras que las áreas oscuras representan la perlita. El tratamiento de normalizado consiste en calentar el material hasta alcanzar la temperatura de austenización, seguido de un enfriamiento al aire. Este tratamiento se utiliza para reducir las tensiones internas del material sin provocar cambios significativos en la microestructura

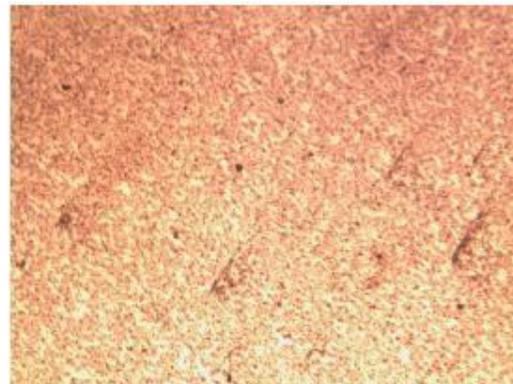


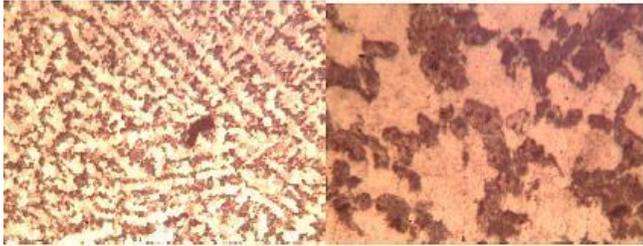
Figura 8 Probeta de acero 1045 a 100X- Normalizada. Fuente: Autores

El trabajo "Identifying Isothermally-Transformed Steel Microstructural Constituents" se centra en identificar y caracterizar los constituyentes microestructurales de aceros transformados isotérmicamente.

El objetivo del estudio es comprender mejor la evolución microestructural de los aceros durante la transformación isotérmica y determinar los constituyentes que se forman en diferentes condiciones. Los constituyentes microestructurales comunes en los aceros transformados isotérmicamente incluyen la perlita, la bainita, la martensita y la ferrita.

La Figura 9 muestra el efecto del recocido en la estructura del acero 1045. En la Figura 9(a), se pueden observar zonas claras de ferrita y zonas oscuras de perlita en proporciones aproximadamente iguales, alrededor del 50% cada una. El

recocido provoca un aumento en el tamaño de grano en comparación con el acero sin tratamiento térmico (Figura 7). En la parte (b) se muestra la distribución de ferrita y perlita, y este aumento en el tamaño de grano resultará en un incremento en la ductilidad del material.



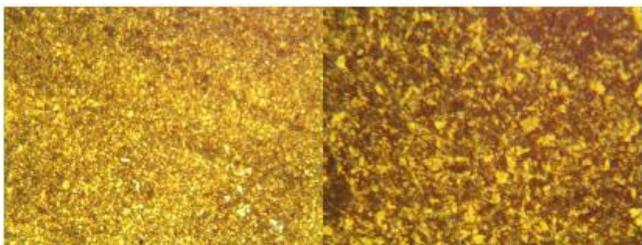
(a) (b)  
Figura 9 Probeta de acero 1045 – Recocida. (a) 100X, (b) 400X. Fuente: Autores

La Figura 10 muestra la microestructura de un acero que ha sido sometido a un proceso de temple en aceite, y se puede observar una modificación en comparación con la estructura inicial del material. En este tipo de tratamiento, se forma la fase martensita, que se puede observar a una ampliación mayor a 1000X.

En cuanto al acero 1045 templado en agua, se puede apreciar en las Figuras 5(a) y 7(b) una estructura de grano fino.



Figura 10 Probeta de acero 1045 a 100X – Temple en aceite. Fuente: Autores



(a) (b)  
Fig. 13. Probeta de acero 1045 – Templado en agua. (a) 100X, (b) 400X. Fuente: Autores

El temple en aceite y en agua producen una modificación en la estructura del material, formando la fase martensita y aumentando la resistencia mecánica del material

En cuanto a los valores de dureza obtenidos para el acero 1045 tratado, se puede observar que el temple en agua produce los valores más altos, seguido del temple en aceite, mientras que el recocido y el normalizado producen valores más bajos

En la Tabla 1 se presentan los valores de dureza obtenidos par el acero1045 tratado.

Tabla 1. Valores de dureza obtenidos para el acero 1045

TRATAMIENTO TÉRMICO	DUREZA (HBN)
Sin tratamiento	92-98
Normalizado	93-87
Recocido	88-87
Temple en Aceite	111-119
Temple en Agua	128-146

Fuente: autores

### B. ACERO 4140

En esta tesis sobre Tratamientos térmicos y su afectacion en la dureza superficial de aceros comerciales 4140, SISA 01 y SISA D2(Alejandro, P. R. J. (2022). Tratamientos térmicos y su afectacion en la dureza superficial de aceros comerciales 4140, SISA 01 y SISA D2.), se men.ciona que el acero 4140 GGD ("Deterioro del Crecimiento de Grano") es un procesamiento de acero con capacidad de endurecimiento medio, asociada al cromo y molibdeno, que se utiliza en la fabricación de piezas como engranes, piñones, árboles de levas, moldes para la industria del plástico, mordazas, coronas y satélites, entre otros. La presencia de cromo y molibdeno en el acero 4140 aumenta su resistencia a la tensión, su tenacidad y su resistencia al desgaste

El acero AISI-SAE 4140 tiene una composición química estándar de 0.38 - 0.43 %C, 0.75 - 1.00 % Mn, 0.15 - 0.35 % Si, 0.80 - 1.10 % Cr, 0.15 - 0.25 % Mo, 0.035 % P máximo, y 0.040

% S máx., (porcentajes en peso). El acero 4140 es un acero aleado grado maquinaria. El contenido de cromo y molibdeno incrementa la resistencia a la tensión, buena templabilidad, tenacidad y alta resistencia al desgaste. (Ferrocortes G.M Y CIA S.A.S (2016) Ferroportes soluciones en acero, Colombia)

En la Figura 12 se presenta la microestructura obtenida para el acero 4140 sin tratamiento térmico, en la cual las zonas claras corresponden a ferrita (α) y las zonas oscuras a perlita (P).

Se observa que su microestructura en estado comercial también se compone de áreas claras que representan la fase ferrita (α), mientras que las áreas oscuras corresponden a la perlita (P). El normalizado permite aliviar tensiones internas del material, mientras que el recocido provoca un aumento en el tamaño de grano y una disminución en la resistencia mecánica del material. El temple en aceite produce la formación de bainita en una matriz de martensita, aumentando la resistencia mecánica del material, mientras que el temple en agua produce la formación de martensita en una matriz de austenita retenida,

aumentandola fragilidad del material.

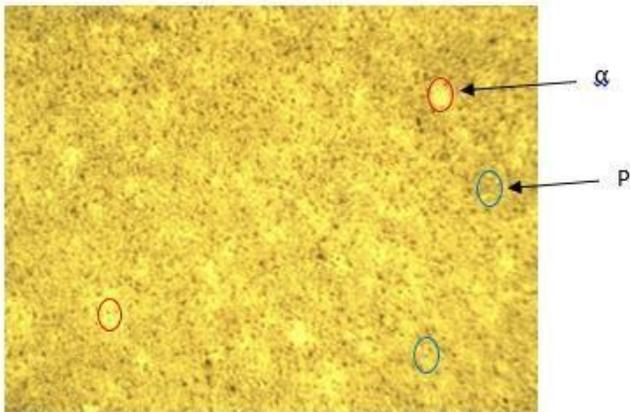


Figura 12 Probeta de acero 4140 a 100X- Sin tratamiento. Fuente: Autores

En la Figura 13 se observan un poco más definidos los granos en el material luego del normalizado. Este tratamiento permite aliviar tensiones internas del material, producidas por los procesos de conformado, la estructura es muy similar al acero no tratado, lo cual permite inferir que no habrá un cambio significativo en las propiedades mecánicas de este material, luego de un normalizado. Las regiones claras corresponden a ferrita y las oscuras a perlita.

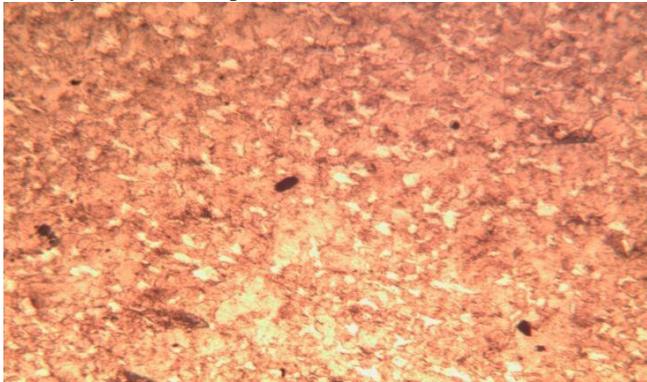


Figura 13 Probeta de acero 4140 a 100X – Normalizada. Fuente: Autores

La Figura 14 muestra la estructura del acero 4140 a 100 X luego del tratamiento de recocido. Se evidencia un cambio significativo en la microestructura del acero, se observa el crecimiento del tamaño de grano de la ferrita (zonas claras) con respecto a este acero sin tratamiento térmico. Las zonas oscuras corresponden a perlita (P), cuyos granos están bien definidos y son más gruesos con respecto al acero 4140 sin tratamiento. El crecimiento de grano se debe a una baja velocidad de enfriamiento. Esto permite evidenciar que este material es susceptible al recocido, lo cual influye en sus propiedades mecánicas así: disminuye la resistencia a la tensión, por tener un tamaño de grano más grueso que el material inicial, aumenta su ductilidad, debido al aumento de ferrita y por lo tanto disminuye su dureza.

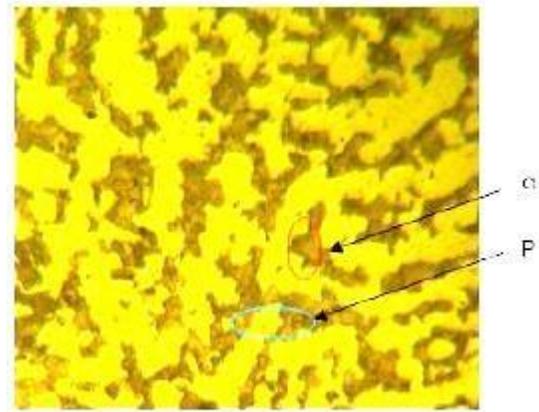
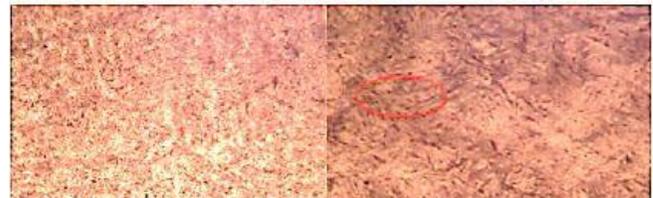


Figura 14 Probeta de acero 4140 a 100X – Recocido. Fuente: Autores

La estructura del acero 4140 templado en aceite se presenta en la Figura 15. En la parte (a) a 100X se alcanza a apreciar una estructura acicular, que es más notoria a 400X (b), en donde se observan agujas negras de bainita superior en una matriz de martensita (clara). Estas fases aparecen porque el aceite permite una alta velocidad de enfriamiento del acero, pero no tan elevada como en el temple con agua. El aceite aumenta su temperatura durante el temple y permite que la temperatura final se mantenga por un tiempo, permitiendo la formación de bainita. La resistencia mecánica obtenida aumenta con respecto al acero inicial.

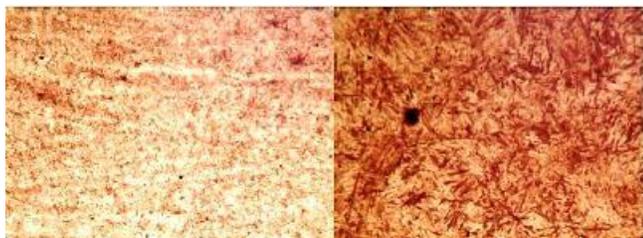


(a) (b)

Figura 15 Probeta de acero 4140 – Templado en aceite. (a) 100X, (b) 400X. Fuente: Autores

El temple en aceite produce la formación de bainita en una matriz de martensita, aumentando la resistencia mecánica del material, mientras que el temple en agua produce la formación de martensita en una matriz de austenita retenida, aumentando la fragilidad del material (Gomez Vilbao, J. D. (2021). Evaluación de la influencia del proceso temple y particionamiento en las propiedades mecánicas del acero comercial aisi-sae 4140.)

En el caso del temple en agua para el acero 4140 (Figuras 110a y 10b), se observa una estructura alargada, como pequeñas agujas de martensita (negras), en una matriz clara de austenita retenida. Estas fases aparecen por la alta velocidad de enfriamiento del acero, debido a la rápida pérdida de calor de la austenita, sin que actúe la difusión. Esta transformación de fases genera un aumento en la fragilidad del material y en la dureza, en ocasiones agrietamiento. En la Figura 16(b) se observa más claramente la estructura acicular.



(a) (b)  
 Figura 16 Probeta de acero 4140– Templado en agua. (a) 100X, (b) 400X.  
 Fuente: Autores

En el artículo mencionado, se realizó un estudio sobre la dureza superficial de aceros comerciales 4140, SISA 01 y SISA D2 después de diferentes tratamientos térmicos. Los resultados mostraron que el acero 4140 totalmente endurecido posee rangos de 543-634 HBN, dependiendo de la cantidad precisa de carbono.

Además, se observó que el tratamiento de normalizado no produce cambios significativos en las propiedades mecánicas del acero 4140, mientras que el recocido disminuye la resistencia a la tensión y aumenta la ductilidad del material

En la Tabla 2 se presentan los valores de dureza obtenidos par el acero 4140 tratado.

Tabla 2. Valores de dureza obtenidos para el acero 4140.

TRATAMIENTO TÉRMICO	DUREZA (HBN)
Sin tratamiento	165-166
Normalizado	128-171
Recocido	101-104
Temple en Aceite	185-206
Temple en Agua	304-319

Fuente: Autores

### C. ACERO 8620

Es un acero de baja aleación al níquel-cromo-molibdeno. Se utiliza en piezas que requieran una superficie considerablemente más dura que el núcleo. Es un acero para cementación y para temple superficial, manteniendo gran tenacidad en el núcleo.

La composición química es: 0.18 - 0.23 %C, 0.70 - 0.90 % Mn, 0.15 - 0.35 % Si, 0.80 - 1.10 % Cr, 0.40 - 0.70 % Mo, 0.15-0.25, 0.035 % P máximo, y 0.040 % S máx., (porcentajes en peso). (Ferrocortes G.M Y CIA S.A.S (2016) Ferrocortes soluciones en acero, Colombia)

Este acero se utiliza en la fabricación de engranes, piñones, árboles de levas, moldes para la industria del plástico, mordazas, coronas y satélites, entre otros.

La microestructura del acero 8620 sin tratar se compone de ferrita y perlita. El normalizado permite aliviar tensiones internas del material, mientras que el recocido provoca un aumento en el tamaño de grano y una disminución en la resistencia mecánica del material. El temple en aceite produce

la formación de bainita en una matriz de ferrita, aumentando la resistencia mecánica del material, mientras que el temple en

Javier Alexander Pinzon Roballo  
 agua produce la formación de martensita en una matriz de ferrita, aumentando la fragilidad del material y produciendo agrietamiento en algunos casos (Moreno Sanchez, S. N., & español Marroquin, U. A. Comparación microestructural de los aceros 1020, 1045 y 8620 templados a temperaturas intercríticas y revenidos.)

Las fases presentes en el acero 8620 sin tratar son ferrita y perlita. La Figura 17 presenta la estructura obtenida en el normalizado de este acero. Se pueden observar las fases bien definidas en donde las zonas claras son de ferrita y las zonas oscuras de perlita.



Figura 17 Probeta de acero 8620 a 100X- Normalizada. Fuente: Autores

En la Figura 18 se aprecia la estructura del acero 8620 recocido. Se nota el aumento en el tamaño de grano, con respecto al mostrado en la Figura 17, lo cual hará que el acero disminuya su resistencia mecánica

El normalizado permite aliviar tensiones internas del material, mientras que el recocido provoca un aumento en el tamaño de grano y una disminución en la resistencia mecánica del materia. (Gomez Vilbao, J. D. (2021). Evaluación de la influencia del proceso temple y particionamiento en las propiedades mecánicas del acero comercial aisi-sae 4140.)

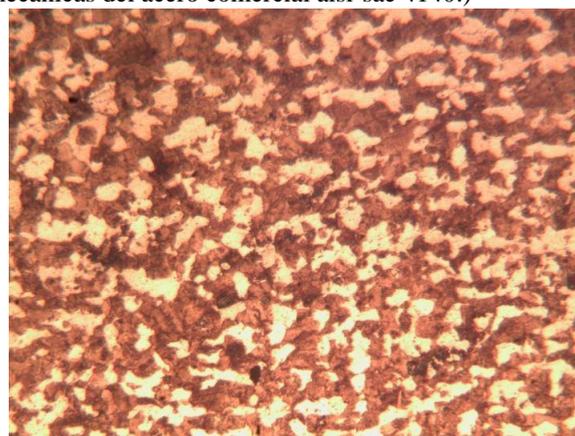


Figura 18 Probeta de acero 8620 a 100X- Normalizada. Fuente: Autores

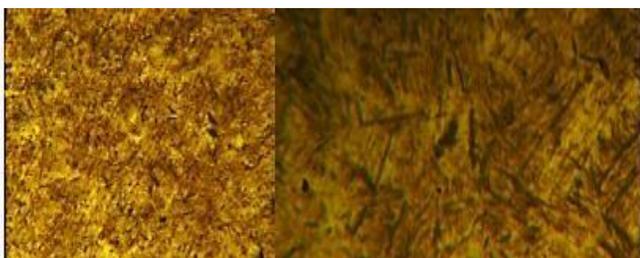
Las Figuras 13 a y 13b presentan la estructura del acero 8620 templado en aceite a 100 X y 400X, respectivamente. Las líneas negras a 400X nos indican la presencia de bainita en una matriz de ferrita (zona clara).

Este acero se templó también en agua y su estructura se observa en la Figura 20. En la parte (a) se alcanzan a visualizar zonas alargadas, indicio de la formación de martensita. A 400X (Figura 20b) se aprecia con más detalle zonas oscuras alargadas, correspondientes a la fase martensita en una matriz ferrítica. Esta probeta se fracturó (Figura 21), debido al choque térmico (alta velocidad de enfriamiento) producido durante el tratamiento. Esto indica que no es recomendable este tratamiento para el acero 8620, lo cual se corrobora con el aumento de la dureza (Tabla 3).

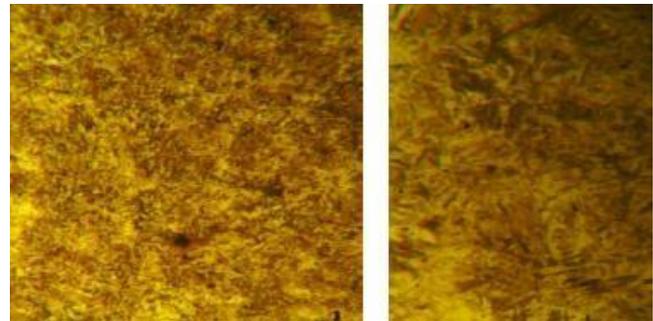
En otro estudio sobre la influencia del proceso de temple y particionamiento en las propiedades mecánicas del acero comercial AISI-SAE 4140, se observó que el normalizado permite aliviar tensiones internas del material, mientras que el recocido provoca un aumento en el tamaño de grano y una disminución en la resistencia mecánica del material (Fernández Columbié, T., Fernández Guilarte, E., Rodríguez González, I., Alcántara Borges, D., & Castillo Matos, R. (2013). Comportamiento microestructural del acero AISI 1045 endurecido en frío y traccionado. Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela, 28(3), 91-96) Estos resultados son similares a los obtenidos en el acero 8620.

Los tratamientos de temple en el acero 8620 tienen diferentes efectos en la microestructura y las propiedades mecánicas.

El temple en aceite produce la formación de bainita en una matriz de ferrita, lo que aumenta la resistencia mecánica del material. En contraste, el temple en agua produce la formación de martensita en una matriz de ferrita, lo que aumenta la fragilidad y puede provocar agrietamiento en algunos casos.



(a) (b)  
Figura 21 Probeta de acero 8620 – Templado en aceite. (a) 100X, (b) 400X. Fuente: Autores



a) (b)  
Figura 20 Probeta de acero 8620 – Templado en agua. (a) 100X, (b) 400X. Fuente: Autores

El acero 8620 es un acero de baja aleación al níquel-cromo-molibdeno utilizado en piezas que requieren una superficie considerablemente más dura que el núcleo. La microestructura del acero 8620 sin tratar se compone de ferrita y perlita. El normalizado permite aliviar tensiones internas del material, mientras que el recocido provoca un aumento en el tamaño de grano y una disminución en la resistencia mecánica del material. El temple en aceite produce la formación de bainita en una matriz de ferrita, aumentando la resistencia mecánica del material, mientras que el temple en agua produce la formación de martensita en una matriz de ferrita, aumentando la fragilidad del material y produciendo agrietamiento en algunos casos.( Acero 8620 - ferrocortes. (s.f.). Ferrocortes)



Figura 21 Probeta de acero 8620 fracturada por el temple en agua. Fuente: Autores

En la Tabla 3 se presentan los valores de dureza obtenidos por el acero 8620 tratado.

TRATAMIENTO TÉRMICO	DUREZA (HBN)
Sin tratamiento	209-217
Normalizado	130-128
Recocido	93-104
Temple en Aceite	339-349
Temple en Agua	396-409

Tabla 3. Valores de dureza obtenidos para el acero 8620. Fuente:

Autores

#### IV. CONCLUSIONES

Los diferentes tratamientos térmicos tienen un impacto significativo en la microestructura y propiedades mecánicas de los aceros estudiados. Es importante considerar cuidadosamente el tratamiento térmico adecuado para cada aplicación específica del material.

Al analizar la estructura del acero 1045 templado en aceite, se puede observar que, al utilizar este medio de enfriamiento, la velocidad de enfriamiento es más lenta, lo que resulta en la formación de la fase bainita en su microestructura.

En el caso del acero 8620, se pudo comprobar que, al aplicar el tratamiento de temple en agua, el material se vuelve muy duro pero también más frágil, lo que puede provocar la formación de grietas en el material.

Los resultados obtenidos demuestran la efectividad de los tratamientos térmicos en la mayoría de los casos. En particular, el tratamiento de recocido se destaca, ya que en todos los casos se observó un crecimiento de los granos debido a un enfriamiento lento que duró 3 días dentro del horno mufla.

Con relación al tratamiento de normalizado, se encontró que en los tres tipos de acero estudiados se logró eliminar las tensiones internas, ya que se observó una reducción en los valores de dureza en comparación con el material inicial.

La comparación de las microestructuras de aceros sometidos a diferentes tratamientos térmicos es un tema de investigación relevante en la industria metalúrgica. Estudios previos han utilizado técnicas de caracterización microestructural y mecánica para evaluar las propiedades de los materiales y comparar los aceros tratados térmicamente con los aceros en estado inicial.

Los diagramas de fase Fe-C y TTT son herramientas importantes para comprender las transformaciones que ocurren en la microestructura de los aceros durante los tratamientos térmicos. Estos diagramas permiten predecir las fases presentes y las transformaciones que suceden en función de la temperatura y el tiempo de enfriamiento.

Los aceros estudiados, como el AISI 1045, AISI 4140 y AISI 8620, presentan diferentes composiciones químicas y propiedades mecánicas. Sin embargo, se pueden encontrar similitudes en los diagramas de fase y TTT de estos aceros, lo que sugiere que pueden experimentar transformaciones similares durante los tratamientos térmicos.

Los tratamientos térmicos, como el temple, austemperado, normalizado y revenido, tienen un impacto significativo en la

microestructura y las propiedades mecánicas de los aceros. Estos tratamientos permiten obtener diferentes estructuras, como martensita, bainita, perlita y ferrita, que influyen en la dureza, resistencia y tenacidad del material.

Los aceros de fase dual (ferrita-martensita) obtenidos mediante procesos térmicos y termomecánicos son de particular interés, ya que combinan una alta resistencia con una buena tenacidad. Estos aceros se han estudiado en diversos trabajos de investigación, utilizando técnicas de caracterización microestructural y mecánica para evaluar sus propiedades.

#### V. AGRADECIMIENTOS

Es necesario presentar un reconocimiento y agradecimiento a la ingeniera Yenny Marlen González Mancilla, quien siempre estuvo dispuesta a prestar su ayuda y sus conocimientos, gracias a ella, muchos estudiantes se inclinan hacia la investigación quizás sin saber de su gran importancia dentro de sus vidas.

#### VI. REFERENCIAS

- [1] Castillo Gutiérrez, D. E., Angarita Moncaleano, I. I., & Rodríguez Baracaldo, R. (2018). Caracterización microestructural y mecánica de aceros de fase dual (ferrita-martensita), obtenidos mediante procesos térmicos y termomecánicos. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 26(3), 430-439. [https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S071833052018000300430&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S071833052018000300430&script=sci_arttext)
- [2] Alcelay Larrión, J. I., Al Omar Mesnaoui, A., & Prado Pozuelo, J. M. (2014). Estudio comparativo del conformado en caliente de un acero microaleado usando criterios termodinámicos continuos y criterios fenomenológicos. *Trater press*, 44(Diciembre), 41-50. <http://hdl.handle.net/2117/26414>
- [3] Tobón Aguirre, J. A. (2022). Estudio de la evolución microestructural de los aceros de herramientas AISI A2 y D2 sometidos a tratamientos isotérmicos para aplicaciones de deformación en frío por impacto. <https://hdl.handle.net/10495/26098>
- [4] (Becerra-Rodríguez, M., Aguilar-Díaz, V. J., Bernardino-González, J., & Santana-Ramírez, F. (2021). Tratamientos térmicos. *TEPEXI Boletín Científico de la Escuela Superior Tepeji del Río*, 8(15), 40-44.). <https://doi.org/10.29057/estr.v8i15.6397>
- [5] (Soriano, C. (2022). Endurecimiento y revenido superficial mediante un haz láser oscilante.)

<http://hdl.handle.net/2183/30964>

Actuales.Pdf .

- [6] Echegaray Yépez, M. A. (2021). Diagrama hierro-carbono
- [7] Guachamín Guamán, Á. F., & Vargas Vargas, H. V. (2011). Determinación del efecto de la temperatura de enfriamiento en las propiedades mecánicas del acero de medio carbono (AISI 1045 y AISI 1070) durante el tratamiento térmico (Bachelor's thesis, QUITO/EPN/2011). <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4365>
- [8] Fernández, S. F., & Mora, K. R. (s.f.). TRATAMIENTO TÉRMICO DEL ACERO AISI 4140. Escuela de Ingeniería de Biosistemas Universidad de Costa Ric.
- [9] Alza, V. A. (2022). FUNDICIONES DE HIERRO y SUS TRATAMIENTOS TÉRMICOS. [https://www.researchgate.net/profile/Victor-Alcantara-7/publication/363718895\\_FUNDICIONES\\_DE\\_HIERRO\\_y\\_SUS\\_TRATAMIENTOS\\_TERMICOS/links/632b4241873eca0c00a4c52a/FUNDICIONES-DE-HIERRO-y-SUS-TRATAMIENTOS-TERMICOS.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Victor-Alcantara-7/publication/363718895_FUNDICIONES_DE_HIERRO_y_SUS_TRATAMIENTOS_TERMICOS/links/632b4241873eca0c00a4c52a/FUNDICIONES-DE-HIERRO-y-SUS-TRATAMIENTOS-TERMICOS.pdf)
- [10] Moreno Sanchez, S. N., & Español Marroquin, U. A. Comparación microestructural de los aceros 1020, 1045 y 8620 templados a temperaturas intercríticas y revenidos. <http://hdl.handle.net/11349/14041>
- [11] Alejandro, P. R. J. (2022). Tratamientos termicos y su afectacion en la dureza superficial de aceros comerciales 4140, SISA 01 y SISA D2. <https://rinacional.tecnm.mx/jsui/handle/TecNM/5342>
- [12] Ilpem | sae 1045. (s.f.). ILPEM | Inicio. <http://ilpem.com.ar/acero/calidades/40/sae-1045>
- [13] Gomez Vilbao, J. D. (2021). Evaluación de la influencia del proceso temple y particionamiento en las propiedades mecánicas del acero comercial aisi-sae 4140.) <https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/19818>
- [14] Acero 8620 - ferrocortes. (s.f.). Ferrocortes. <https://www.ferrocortes.com.co/acero-8620/>
- [15] Vander Voort, G. (s.f.). Atlas of time-temperature diagrams for irons and steels. <https://mmsallaboutmetallurgy.com/wp-content/uploads/2019/08/TTT-Diagrams-Collection.pdf>
- [16] Artigas, A., Páez, M., Celentano, D., & Monsalve, A. Revisión y Análisis de Los Procesos de Recocido Continuo Industrial Actuales. In Conamet/Sam-Simposio Materia (pp. 207-213). [https://www.researchgate.net/profile/Maritza-Paez/publication/237235002\\_Revision\\_Y\\_Analisis\\_De\\_Los\\_Procesos\\_De\\_Recocido\\_Continuo\\_Industrial\\_Actuales/links/590e2abfa6fdccad7b10dd78/Revision-Y-Analisis-de-los-Procesos-de-Recocido-Continuo-Industrial-](https://www.researchgate.net/profile/Maritza-Paez/publication/237235002_Revision_Y_Analisis_De_Los_Procesos_De_Recocido_Continuo_Industrial_Actuales/links/590e2abfa6fdccad7b10dd78/Revision-Y-Analisis-de-los-Procesos-de-Recocido-Continuo-Industrial-)