

CONSTRUCCIÓN DE UN MAPA DE CARACTERIZACIÓN METALOGRAFICA PARA
ACERO ESTRUCTURAL AISI-SAE 1045 SOMETIDO A DIFERENTES TRATAMIENTOS
TÉRMICOS.

JEISON DAVID GONZÁLEZ CONTRERAS

JAVIER GONZÁLEZ CUETO

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
MONTERÍA-CÓRDOBA

2024

CONSTRUCCIÓN DE UN MAPA DE CARACTERIZACIÓN METALOGRÁFICA PARA
ACERO ESTRUCTURAL AISI-SAE 1045 SOMETIDO A DIFERENTES TRATAMIENTOS
TÉRMICOS.

JEISON DAVID GONZÁLEZ CONTRERAS

JAVIER GONZÁLEZ CUETO

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO
DE INGENIERO MECÁNICO

ASESOR

JAVIER RICARDO SANCHEZ CASTILLO

ASESOR

INGENIERO METALURGICO

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
MONTERÍA-CÓRDOBA

2024

A la memoria amorosa de mi querida abuelita, Josefita Machado.

En cada página de esta tesis, resuena el eco de tu sabiduría y el afecto que siempre brindaste. Tu luz ilumina mi camino académico, y aunque ya no estés físicamente presente, tu legado perdura en cada logro. Este trabajo está dedicado a ti, mi eterna fuente de inspiración.

Con amor y gratitud, Jeison David Gonzalez Contreras

AGRADECIMIENTOS

A Dios, fuente eterna de sabiduría y bendiciones, gracias por iluminar mi camino y fortalecer mi espíritu en esta travesía académica.

A mis padres y familiares, cuyos amorosos corazones y apoyo incondicional han sido mi ancla en los momentos difíciles y mi viento en las velas del éxito.

A mí mismo, incansable buscador de conocimiento y perseverante luchador,

Este logro no solo representa mi esfuerzo, sino también el reflejo del amor, sacrificio y fe que han tejido la red invisible que me sostuvo a lo largo de esta travesía.

Con gratitud infinita, Jeison David Gonzalez Contreras.

CONTENIDO

RESUMEN

.....¡ERROR!

MARCADOR NO DEFINIDO.

ABSTRACT:

.....¡ERROR!

MARCADOR NO DEFINIDO.

INTRODUCCIÓN:

.....¡ERROR!

MARCADOR NO DEFINIDO.

Objetivo General: 11

Objetivos específicos..... 11

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:10

MARCO TEÓRICO12

ESTADO DEL ARTE:24

METODOLOGÍA28

Revisión bibliográfica y web-biográfica 28

Preparación de muestras para tratamientos térmicos	28
Preparación de TTT (medios y mufla)	31
Tratamientos térmicos aplicados	33
Preparación de muestras para análisis metalográfico	34
Ataque químico de muestras para análisis metalográfico	37
 CONCLUSIONES Y	
RECOMENDACIONE.....	¡ERROR! MARCADOR
NO DEFINIDO.	
 Análisis metalográfico	 43
Temple.....	45
Normalizado	48
Recocido.....	51
Revenido 1:30 h	54
Revenido 2 h.....	57
 Ensayo de dureza	 59
 Recomendaciones.....	 ¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama Hierro-Carbono (Fe-C).....	15
Figura 2 Curva de Jominy	20
Figura 3 Curvas de Templabilidad para Cinco Diferentes Aceros.....	20
Figura 4 Curva TTT de un Acero Eutectoide.....	22
Figura 5 Especificaciones Técnicas.....	29
Figura 6 Nomenclatura Técnica	29
Figura 7 Preparación Superficial de las Probetas	30
Figura 8 Mufla.....	31
Figura 9 Probeta de Temple Bajo Microscopio.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 10 Ampliación Aleatoria de Probeta de Temple	¡Error! Marcador no definido.
Figura 11 Probeta de Normalizado Bajo Microscopio	¡Error! Marcador no definido.
Figura 12 Ampliación Aleatoria de Probeta de Normalizado	¡Error! Marcador no definido.

Figura 13 Probeta de Recocido Bajo el Microscopio.....; **Error! Marcador no definido.**

Figura 14 Ampliación Aleatoria de Probeta de Recocido ..; **Error! Marcador no definido.**

Figura 15 Probeta de Revenido 1:30 h Bajo el Microscopio; **Error! Marcador no definido.**

Figura 16 Ampliación Aleatoria de Probeta de Revenido 1:30 h; **Error! Marcador no definido.**

Figura 17 Probeta de Revenido 2 h Bajo el Microscopio....; **Error! Marcador no definido.**

Figura 18 Ampliación Aleatoria de Probeta de Revenido 1:30 h; **Error! Marcador no definido.**

RESUMEN

En este trabajo de investigación se realizó un mapa exploratorio de caracterización metalográfica para un acero estructural AISI SAE 1045 sometido a diferentes tratamientos térmicos como lo son temple, revenido, normalizado y recocido, diseñando de esta forma las rampas de calentamiento con una temperatura de 900°C y 500°C correspondiente a cada tratamiento térmico aplicado, así mismo, de mantenimiento y enfriamiento. En este trabajo de investigación no se controlaron los tiempos de enfriamiento, debido a que este trabajo consiste en un análisis general, para los respectivos tratamientos térmicos, determinando como estos influyen en cada una de las transformaciones experimentadas durante y después de ser aplicados, realizando ensayos que determinen los cambios en las propiedades mecánicas, como el ensayo de dureza, e igualmente un análisis metalográfico que muestre

los cambios ocurridos en sus fases microestructurales. Siguiendo la norma ASTM E3 y ASTM E18 de 2017.

Palabras clave: diagramas TTT, tratamientos térmicos, transformaciones, acero estructural, fases microestructurales, norma ASTM E3.

INTRODUCCIÓN:

Se considera de gran importancia el estudio de la metalografía para la comprensión de las propiedades mecánicas de los aceros. En la producción de aceros, estos perfiles son imprescindibles en la interpretación de las fases microestructurales del acero, dando así una mejor comprensión de las variables que influyen en cada una de las transformaciones experimentadas durante y después de los tratamientos térmicos (TT). Siendo los TT fórmulas comerciales, las cuales se protegen bajo secreto comercial de las empresas fabricantes de aceros, dado esto, en la actualidad se realizan investigaciones, con el fin de realizar una estandarización de los TT y los efectos que estos producen en la microestructura y las propiedades mecánicas de los aceros. Por tanto, en esta investigación se planteó un análisis térmico y metalográfico de diferentes muestras de acero, con el fin de estudiar y crear tablas de datos, en función de los aceros estructurales SAE AISI 1045, ya que, este es un acero comercial y comúnmente usado en sectores de la construcción, mediante varillas de acero corrugadas, tornillería grado 5, bielas, chavetas, engranajes de baja velocidad, e incluso en piezas de armas como lo son los cañones de fusiles. De esta forma se observó como las propiedades mecánicas y las fases microestructurales de estos varían con cada tratamiento térmico.

CAPITULO 1

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:

En la industria se puede encontrar diversas empresas que requieren los diagramas TTT, siendo empresas productoras de aceros, de las cuales se puede mencionar Gerdau Diaco, Acerías Paz del Río, Sidenal, Sidoc y Ternium, que representan gran parte de la industria siderúrgica de Colombia (ANDI, 2018). Siendo estos perfiles imprescindibles para el diseño y la interpretación de las fases microestructurales que resultan después de ser aplicados los tratamientos térmicos, la elaboración de estos diagramas ha permitido al ingeniero investigador tanto en la industria, como al estudiante, tener un acercamiento y comprensión de las variables que influyen en la transformación experimentada durante y después que el acero es sometido a tratamientos térmicos, conociendo así su composición, el tamaño de grano, y las diferentes fases presentes (Lobaina Sánchez & Goyos Pérez, 2007).

El conocimiento relacionado con los tratamientos térmicos de aleaciones en el ciclo de formación de ciencia de los materiales, es un conocimiento fundamental para la comprensión de los materiales aplicados en el quehacer de la ingeniería mecánica, en este curso actualmente se están impartiendo, los componentes teóricos de los tratamientos térmicos, y cuenta con los recursos para la realización de prácticas de laboratorio que pueden facilitar los tratamientos térmicos en aceros estructurales, que pueden fortalecer el afianzamiento y el conocimiento experimental de la respuesta térmica de aceros. Teniendo en cuenta su importancia en la industria metalmeccánica y en el área de investigación de ciencias de los materiales, es de gran importancia la elaboración de un mapa metalográfico correspondiente

al acero estructural 1045, con el fin de crear una base de datos para el estudio de tratamientos térmicos en la UPB, que sirva de guía para próximos estudios realizados en esta área, además de enriquecer así el contenido en la asignatura de ciencia de los materiales, la cual es de mucha importancia en la formación como ingenieros mecánicos. Por tanto, ¿Cómo es la evolución de las fases de aceros estructurales obtenidos a través de TTT en el laboratorio de la UPB?

Objetivo General:

Construir un mapa de caracterización metalográfica para acero estructural AISI-SAE 1045 sometido a diferentes tratamientos térmicos.

Objetivos específicos

- Verificar el origen del fabricante del acero y las especificaciones técnicas del mismo.
- Diseñar las rampas de calentamiento, mantenimiento y enfriamiento del acero seleccionado para los respectivos tratamientos térmicos.
- Fabricar las probetas a caracterizar, acorde a las disposiciones de las normas ASTM E3 y ASTM E18.
- Realizar ensayos de caracterización metalográfica y de dureza en las probetas tratadas térmicamente.

MARCO TEÓRICO

Desde que el ser humano adquirió la habilidad para crear herramientas y armas se vio en la necesidad de alargar la vida útil de estas, en principio esta necesidad fue suplida con el descubrimiento de nuevos materiales como el bronce y el hierro, pero nuevamente tuvo que enfrentarse a reinventar estos materiales ya conocidos. Aproximadamente en el año 1000 AC los griegos descubrieron una técnica para endurecer las armas hechas de hierro usando un tratamiento térmico, dando inicio así a los primeros tratamientos térmicos registrados en la historia humana. Hasta el siglo XIV las aleaciones de hierro se clasifican como hierro forjado. Los artesanos de la forja aprendieron a fabricar el acero calentando el hierro forjado y el carbón vegetal en un horno de arcilla por varios días, siendo este hierro producido en ese entonces 0,1% de impurezas y alrededor de 3% de partículas provenientes de escorias del medio ambiente. Llegando así a la producción moderna del acero, cuyo objetivo no ha cambiado mucho, debido a que se siguen usando los tratamientos térmicos con el fin de mejorar las propiedades mecánicas de los aceros, otorgándoles mayor dureza, elasticidad y alargando su vida útil. Esta labor se ha ido perfeccionando a lo largo de la historia con los avances tecnológicos e investigaciones realizadas (Construdata, 2007).

La comprensión de los aceros y del grado de modificación de sus propiedades mecánicas como efecto de los tratamientos térmicos aplicados, se ha beneficiado de diferentes avances y desarrollo tecnológicos.

Algo muy relevante en los tratamientos térmicos, son los diagramas de fases, los cuales representan los estados y las transformaciones en un estado de equilibrio mientras se realizan los tratamientos térmicos, pudiendo observar las transformaciones de fase que se dan en

condiciones de equilibrio, y así igualmente las que se dan fuera de este. Las fases microestructurales del acero que se pueden encontrar son:

Ledeburita: que es eutéctico de austenita y cementita, siendo inestable a temperatura ordinaria.

Ferrita: se compone de hierro puro, dúctil, ferromagnético y maleable, tiende a ser de color blanco y es el más blando de los aceros.

Perlita: son laminas alteradas de cementita y ferrita yuxtapuestas.

Cementita: es carburo de hierro cristalizado con forma de láminas hexagonales.

Bainita: son agregaciones de cementita y ferrita, con un ligero cambio en su estructura.

Grafito: es carbono cristalizado con forma de láminas hexagonales.

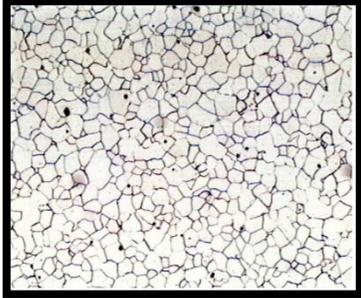
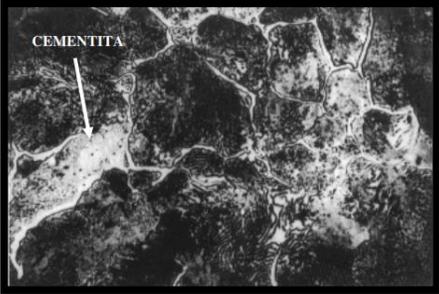
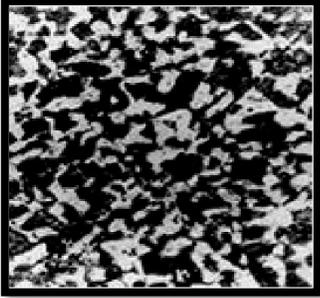
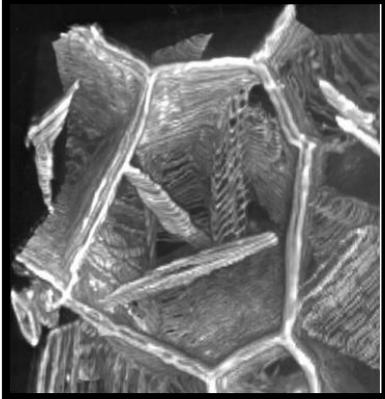
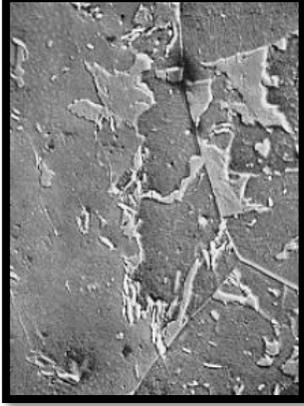
Troostita: consta de un agregado muy fino de ferrita y cementita que aparece en los aceros que son débilmente templados y esto causa un enfriamiento debido de la austenita.

Austenita: es conocida como el acero gamma, y su estructura es de tipo cristalina cúbica.

Martensita: posee una estructura de aguja cristalinas muy duras (Ferrepo, 2017).

Tabla 1

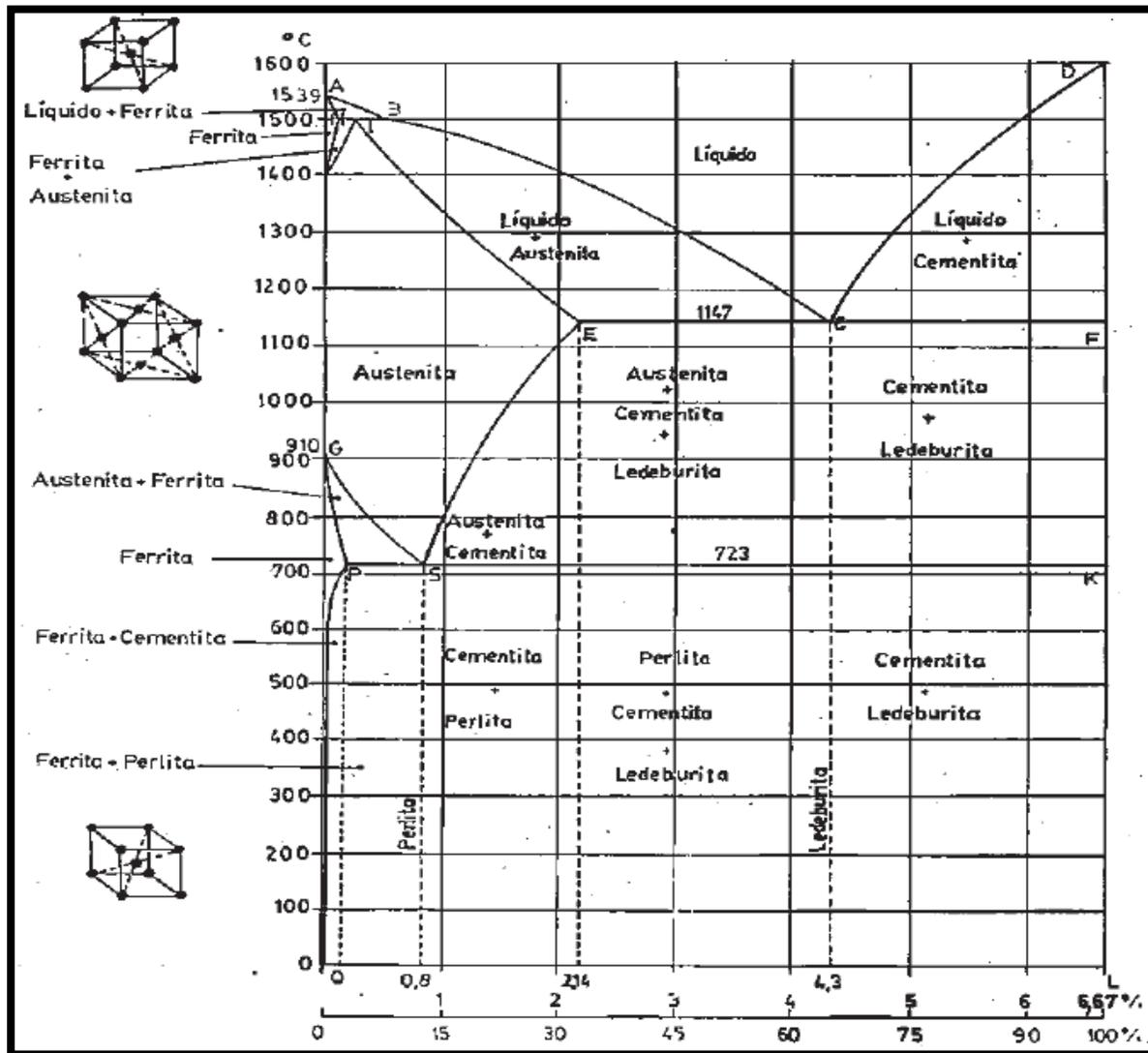
Fases Microestructurales del Acero

Ferrita	Cementita	Perlita
		
Austenita	Martensita	Bainita
		

Nota: En la tabla se muestra imágenes de algunas fases microestructurales del acero.

Imágenes tomadas de (Portillo, 2007).

Figura 1
Diagrama Hierro-Carbono (Fe-C)



Nota: Diagrama de hierro-carbono. Tomado de (Llulluna Llumiuinga, 2014)

Siendo uno de los más comunes el diagrama de hierro-carbono, el cual es empleado para tener una representación de las transformaciones que ocurren a los aceros al carbono, destacando así los acero hipereutectoide, que son los aceros que poseen un porcentaje de carbono entre 0,77% y 2%, siendo su constituyente principal la cementita y se caracterizan

por ser un acero duro y de difícil mecanización, por otra parte también están los aceros hipoeutectoides, con un porcentaje de carbono inferior al que corresponde a la composición eutectoide es decir inferior a 0,77% de carbono, siendo conformado por una mezcla de ferrita y perlita.

Los tratamientos térmicos se pueden clasificar principalmente en dos grupos, tratamientos térmicos que alteran la composición química de los aceros, y los tratamientos térmicos que alteran la superficie de los aceros, como lo son, el recocido, normalizado, temple, temple con revenido, entre otros.

El temple del acero consiste en el enfriamiento de forma rápida en función de la temperatura de austenización, generalmente a una temperatura entre 727°C y 1300°C , variando esto en el tipo de acero y su aleación, luego enfriando la pieza a una velocidad mayor que la crítica de temple, produciendo así un endurecimiento, para el enfriamiento se sumerge la pieza de acero en aceite o agua. Dando como resultado el desarrollo de estructuras martensíticas. Existe una temperatura de austenización para cada tipo de acero, pero estas temperaturas generalmente para los aceros hipoeutectoides son de 777°C a 838°C , para los aceros estructurales considerados de media aleación se utiliza generalmente un tiempo de 25 minutos sin importar sus dimensiones, pero para los aceros ordinarios al carbono y los aceros estructurales de baja aleación se utiliza un tiempo de sostenimiento mínimo de 30 minutos si la pieza es mayor a 25 mm. Las velocidades críticas del acero al carbón tienden a variar entre 210°C y 600°C/s , por esto se debe emplear un medio que supere estas velocidades. (Hernán Patiño, 2016).

El recocido por su parte consiste en calentar el acero hasta que lograr reducir la dureza y así aumentar la ductilidad, este tratamiento térmico también puede ser usado para aliviar

esfuerzos presentes en el acero, eliminar gases, refinar los granos o preparar el acero para otro tratamiento térmico, generalmente se calienta la pieza a una temperatura entre 750°C y 980°C, esta temperatura se mantiene alrededor de 30 a 120 minutos, luego se deja enfriar lentamente la pieza al aire libre (Barrios, Padrón, & Esquivel, Atlas metalográfico e influencia de los tratamientos térmicos, 1997).

En el revenido se eleva la temperatura hasta un valor un por debajo de su temperatura de eutectoide, y esta temperatura se mantiene por un tiempo establecido, después de eso se deja enfriar el acero a una temperatura ambiente. Esto otorga al acero una variación en su dureza y un cambio en su resistencia mecánica. El temple con revenido es un tratamiento térmico del acero el cual consiste en aplicar un revenido una vez realizado el temple en la pieza, esto con el fin de modificar las propiedades adquiridas en el temple, dando una mayor resistencia mecánica a la pieza, pero a su vez reduciendo la dureza, de esta forma se aumenta la tenacidad, disminuyendo su fragilidad. Una vez realizado el temple se vuelve a calentar el acero a una temperatura entre 475°C y 625°C y se mantiene por un aproximado de 2 horas, para así producir los cambios necesarios para el revenido en la estructura interna del acero, una vez hecho esto, se deja enfriar al aire (Cueto, 2016).

El normalizado es un tratamiento térmico, el cual sirve para afinar la estructura del acero y así eliminar las tensiones que suelen aparecer en la forja, esto debido a sobrecalentamientos o enfriamientos hechos en condiciones no óptimas. Este tratamiento térmico se usa para dar una preparación a los aceros con el fin de homogeneizar su estructura antes de realizar el temple, generalmente se tiende a calentar la pieza a 50°C por encima de su punto de

austenización, luego se deja enfriar a condiciones normales, es decir al aire, obteniéndose de esta forma una estructura uniforme, en este caso la velocidad de enfriamiento es más lenta que la del temple y más rápida que la del recocido (Aparicio, Laboratorio de forja, 2017).

La forma de definir la templabilidad es la capacidad de endurecer un acero en cierta profundidad por medio de un tratamiento térmico. Cuando se realiza el temple del acero, su velocidad de enfriamiento es máxima en su superficie y esta disminuye hacia el centro, la martensita se forma solo en la sección de la pieza donde se logró sobrepasar la velocidad crítica de enfriamiento. la velocidad de enfriamiento está dada por la relación entre la superficie y la masa, y esto en función del diámetro de la pieza. La templabilidad del acero depende de varios factores, de los cuales se puede resaltar lo siguiente:

La velocidad crítica de enfriamiento está dada por la estabilidad de la austenita y la nucleación durante la transformación. Principalmente la estabilidad de la austenita depende de los elementos presentes en la aleación, como lo son el carbono, la descomposición de la austenita es reprimida cuando aumenta la concentración de carbono, tal que la velocidad crítica disminuye.

La transformación o descomposición de la austenita como crecimiento y fenómeno de nucleación, varía por la presencia de límites de grano y los carburos no disueltos, los cuales actúan como núcleos, generando un aumento de la velocidad crítica de enfriamiento.

Por tanto, es relevante resaltar que, si un acero presenta las mismas condiciones de templado, la profundidad de este y la dureza máxima que se obtiene, se verá aumentada hasta el contenido de carbono correspondiente a la concentración eutectoide, y a un contenido de carbono constante, sería posible aumentar la profundidad de templado debido a una austenización dada a temperaturas superiores (Rodríguez & Solís, 2012).

De esta forma, para medir la templabilidad en un acero se realiza el ensayo Jominy, el cual consiste en templar una probeta, y llevarla hasta la temperatura de austenización en una atmosfera controlada, posteriormente al finalizar el calentamiento, la probeta es colgada por un extremo, de tal forma que un chorro de agua a una temperatura constante incida directamente en el extremo inferior de la probeta, de esta forma se iría enfriando a distinta velocidad, de acuerdo a la distancia respecto al punto de incidencia del chorro de agua, por tanto el extremo inferior de la probeta tendrá un enfriamiento más rápido, sufriendo un temple más severo, siendo de esta forma más duro que el otro extremo, una vez que la probeta se enfría a una temperatura ambiente, se realiza un desbaste superficial de aproximadamente 0,4 milímetros de espesor, y después se realiza las medidas de dureza Rockwell C a lo largo de la superficie del extremo del temple. De esta manera se traza la curva de templabilidad, también conocida como curva Jominy, representando esta los valores de la dureza en función de la distancia al el extremo templado, por tanto si en los valores de la curva de templabilidad, la dureza disminuye rápidamente al alejarse del extremo templado, entonces el acero tendrá una templabilidad considerada baja, por el contrario, si las curvas son casi horizontales, entonces se considera una alta templabilidad, esto quiere decir que estos aceros serán susceptibles a endurecerse más rápido cuando se realiza un temple (Fernández, 2012).

Nota: En este grafico se muestra la curva de Jominy en función de de la dureza y la distancia base de una probeta. Tomado de (Fernández, 2012).

Figura 3
Curva de Jominy

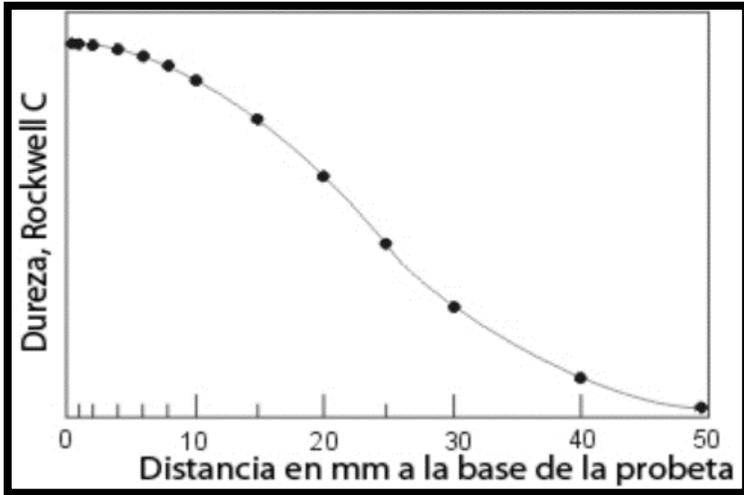
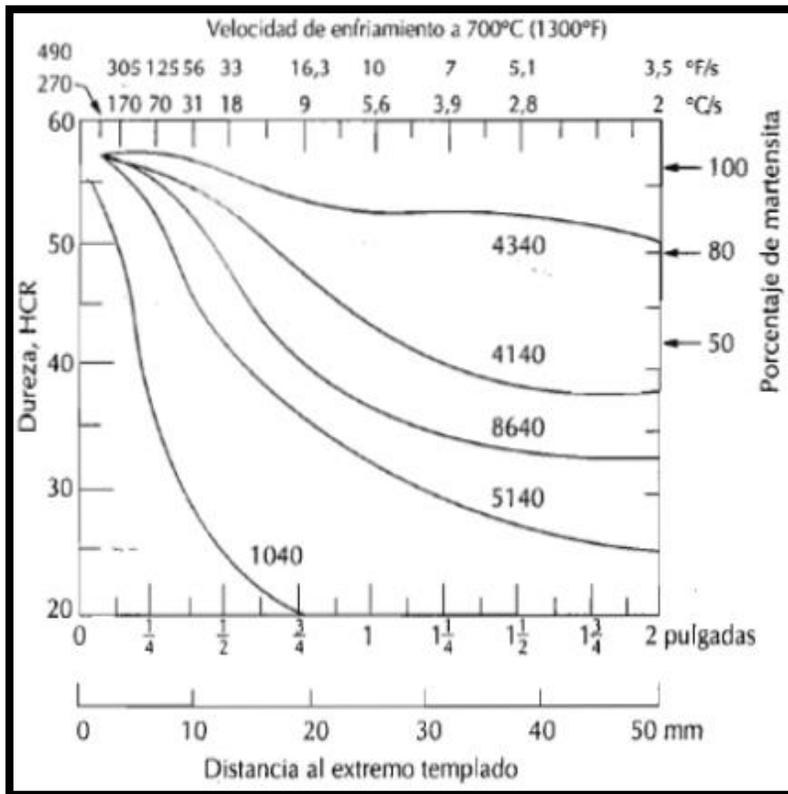


Figura 2
Curvas de Templabilidad para Cinco Diferentes Aceros

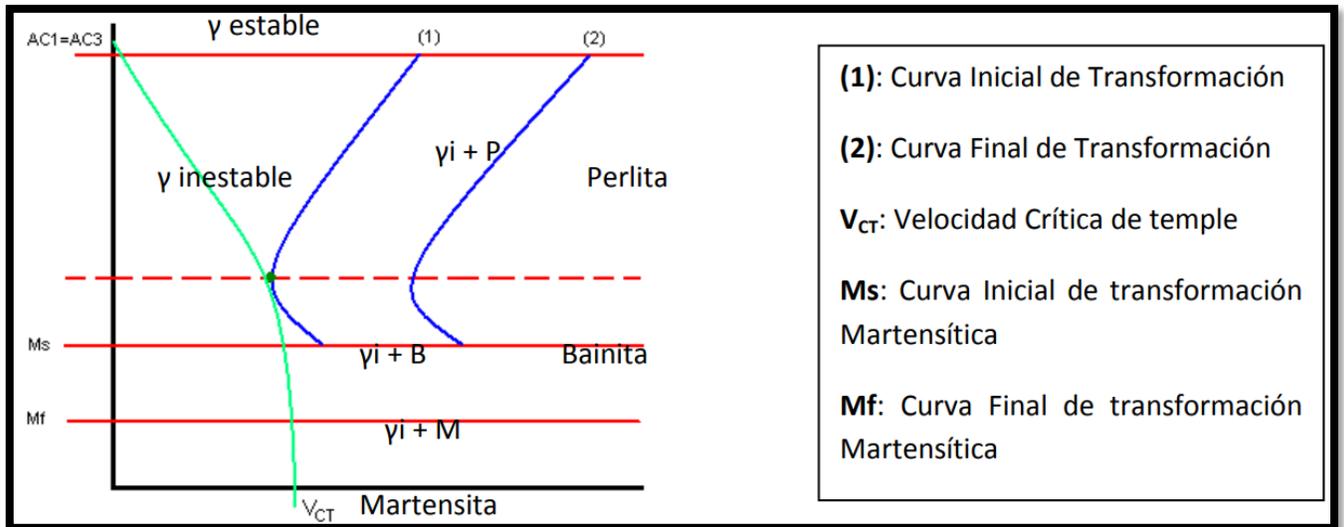


Nota: En este grafico se muestra las curvas de templabilidad de cinco aceros con aleaciones aproximadamente del 0,4%. cuando la curva de templabilidad se mantiene constante, se considera que el acero es de alta templabilidad, por el contrario, entre esta más disminuye, se considera un acero de baja templabilidad. Tomado de (Fernández, 2012).

Se le conoce como curvas TTT al diagrama que relaciona la temperatura y el tiempo que son necesarios para que se dé una transformación isotérmica. Estos diagramas son útiles para poder entender las transformaciones de un acero, el cual se enfría isotérmicamente, como lo es ejemplo de una fase austenita, que es inestable por debajo de una temperatura de transformación eutectoide, entonces es necesario saber cuánto es el tiempo necesario para que se inicie la transformación y la temperatura subcrítica específica, teniendo como resultado el producto de esta transformación (Guachamín Guamán, 2011).

Siendo las curvas TTT de gran importancia en los tratamientos, debido a que son diagramas los cuales representan el tiempo que es necesario para que inicie y termine una transformación o cambio de fase, de ahí su nombre tiempo-temperatura-transformación (García, 2016).

Figura 4
Curva TTT de un Acero Eutectoide



Nota: En la figura se muestra la curva TTT de un acero Eutectoide, pudiéndose observar la curva inicial y final de transformación, la velocidad crítica de temple, y la curva inicial y final de transformación martensítica. Tomado de (Guachamín Guamán, 2011).

Para la caracterización de las muestras tratadas térmicamente se necesita hacer un análisis metalográfico el cual es realizado conforme a la norma ASTM E3. La cual indica que, para la preparación de muestras metalográficas, una de las cosas de mayor relevancia es selección de la muestra, esto se debe a que la probeta seleccionada debe representar en todas las características al material a examinar, de los cuales existen tres tipos de estudios metalográficos; generales, de fallas, de investigación.

Se debe tener en cuenta también el tipo de material que se va a examinar, por tanto;

La fundición debe ser un corte perpendicular, los metales trabajados al frío o al calor, se deben hacer cortes transversales y longitudinales, los pequeños círculos y alambres sus secciones deben ser a través del centro. Se recomienda que los tamaños de las muestras no sean mayores de 12 a 25 mm cuadrados, y si el material es cilíndrico, entonces debe ser de 12 a 25 mm de diámetro, además de que la altura no debe ser mayor para así tener una mejor manejabilidad del material.

ESTADO DEL ARTE:

Para la formulación de este proyecto se tuvieron en cuenta los siguientes artículos de investigación en el área de tratamientos térmicos de los aceros.

Esta investigación se llevó a cabo teniendo en cuenta los fundamentos principales del acero, como lo son su clasificación, su microestructura y su composición, de acuerdo con los tratamientos térmicos usados en la industria nacional mexicana, aplicando las normas American Iron and Steel Institute (AISI). Dando prioridad en esta investigación a los aceros empleados en la industria automotriz, y a los tratamientos térmicos de temple, cementado y revenido. Obteniendo como resultado que los tratamientos térmicos de temple y revenido permiten la modificación de la dureza en los aceros, y esto facilita el mecanizado en caso de realizarse una reparación a piezas usadas en la industria tales como piñones, pasadores, ejes, etc. (Castillo & Ponton, 2010).

En este trabajo de investigación se realizó un análisis térmico y metalográfico con diferentes muestras de acero, con el fin de estudiar y crear unas tablas de datos para dichos tratamientos térmicos, teniendo en cuenta principalmente normalizado, recocido, temple y cementación. Obteniendo como resultado que los aceros AISI/SAE 1010, 8615, 12L14, 304, 1040, 1016 solo consiguen un ligero incremento en su dureza, siendo esto una modificación no apreciable debido al tratamiento térmico de cementación, por el contrario de los aceros AISI/SAE 420 Mod., DF-2 y el 4140, los cuales si presentan una modificación significativa gracias al tratamiento térmico empleado (Barrios, Padrón, & Esquivel, Atlas metalográfico e influencia de los tratamientos térmicos, 1997).

Otro trabajo de investigación relevante enfocado en los resultados obtenidos al aplicar un tratamiento térmico con el fin de mejorar las propiedades de un acero. En este caso fue usado el revenido, teniendo como enfoque principal las temperaturas y el tipo de enfriamiento utilizado, siendo un enfriamiento rápido o lento según el caso, y los resultados que se estén buscando. De los cuales se puede observar que los aceros tratados previamente a temperaturas de 920°C se aprecian más marcado en las muestras templadas una mayor solubilidad de carburos, causando un endurecimiento, y esto recibe el nombre de dureza secundaria, teniendo en cuenta que los aceros sometidos a temperaturas entre 920°C y 940°C , que han sido enfriados con aire forzado, presentan estructuras menos duras y más dúctiles (Cueto, 2016).

Continuando con los tratamientos térmicos realizados a los aceros en función de un estudio de estos, se tiene en cuenta el trabajo de investigación con el fin de analizar las propiedades mecánicas de los aceros de baja y alta aleación, enfocándose en los elementos aleantes presentes en la microestructura de los aceros, destacando nuevamente los tratamientos térmicos de recocido, normalizado, revenido y temple. Obteniendo de los aceros sometidos a normalizado y recocido, siendo los procesos que presentan un enfriamiento a velocidades más bajas, pero a medida que se aumentan estas velocidades de enfriamiento se pueden apreciar fases metaestables, como lo son la bainita y martensita. También se tuvo en cuenta que los elementos aleantes promovían la creación de diferentes precipitados como nitruros, carburos, etc., siendo los precipitados de mayor tamaño un impedimento al crecimiento de grano (Caro & Vidal, 2020).

Otro trabajo de investigación a resaltar, que tuvo entre sus objetivos principales la creación de un texto que tuviese todo lo concerniente a los tratamientos térmicos, con el fin de servir como manual de información a al público relacionado con esta temática, como lo es el caso de ingenieros, técnicos, investigadores. Además de dejar una base fundamental para futuras investigaciones y desarrollos tecnológicos correspondientes (Patiño J. A., 1997).

En otro estudio que resalta los tratamientos térmicos, especialmente el temple, se realizó un análisis, dando un enfoque principal a los procesos llevados a cabo durante este tratamiento térmico, como lo son el tipo de temple, la temperatura de austenización, el calentamiento y la velocidad de enfriamiento. Obteniendo como resultado que la velocidad de enfriamiento se ve afectada por las dimensiones de la pieza, además de los diferentes métodos de enfriamiento usados, en este caso fueron aceite, agua, agua + hielo + sal, siendo el agua con sal y hielo el que presento un mayor valor en la dureza del acero y un menor tamaño de grano una vez realizado el temple, siguiendo luego las probetas que fueron enfriadas en agua y aceite (Patiño & Rosero, 2016).

Esta investigación se llevó a cabo resaltando los conceptos básicos y técnicos de los tratamientos térmicos y los diferentes tipos que existen de estos. Se tuvo como objetivo demostrar la relación presente entre el tratamiento térmico y el mejoramiento a la vida útil de los materiales procesados, y el cómo estos tratamientos térmicos reflejan una mejora significativa en las propiedades mecánicas de los metales tales como lo son la resistencia, la dureza, etc. Todo esto con el fin de adecuar de una mejor forma las diferentes piezas a los trabajos requeridos en la industria (Rodríguez, Díaz, González, & Ramírez, 2021).

Resaltando de esta forma, el trabajo de crear una guía con el fin de servir al público como base de información (Patiño J. A., 1997), así mismo la investigación que plantea un análisis térmico y metalográfico de diferentes muestras de acero, con el fin de estudiar y crear tablas de datos (Barrios, Padrón, & Esquivel, Atlas metalográfico e influencia de los tratamientos térmicos, 1997), al igual que el análisis hecho en función de los aceros de alta y baja aleación que tuvo como enfoque la microestructura de estos (Caro & Vidal, 2020), y finalmente el trabajo enfocado en los resultados obtenidos con el fin de mejorar mediante tratamientos térmicos las propiedades mecánicas de los aceros (Cueto, 2016).

METODOLOGÍA

Para la realización de este trabajo, se utilizó la metodología de investigación exploratoria, debido a que, en esta investigación se busca dar una visión general de los tratamientos térmicos que se aplicaron, siendo este un tema en el cual se ha tenido poca investigación dentro de la UPB seccional Montería. Dando así, un inicio con este trabajo a futuros proyectos de investigación que lleven a una mayor profundidad.

Revisión bibliográfica y web-biográfica

En la elaboración de este trabajo, se utilizaron diversas fuentes bibliográficas y web-biográficas, de las cuales se puede mencionar (Patiño & Rosero, 2016), (Caro & Vidal, 2020), (Barrios, Padrón, & Esquivel, Atlas metalográfico e influencia de los tratamientos térmicos, 1997). Además, se llevó a cabo bajo las especificaciones de la norma ASTM E3 2017 para la preparación de muestras metalográficas.

Origen del fabricante del acero y especificaciones técnicas

Para la preparación de las muestras usadas para el temple, se emplearon probetas de acero estructural, de referencia **COL TX 4 W60** (la descripción de la nomenclatura se puede ver en las **Figuras 5 y 6**), fabricada por la empresa Ternium bajo la norma ASTM A706 y/o A615, que regula las propiedades mecánicas y la composición química de las varillas de acero estructural. Se tomaron dos probetas para cada tratamiento térmico, y estas se hicieron con una medida de aproximadamente 15 mm de longitud y 12,7 mm de diámetro, se les dio un acabado superficial desbastando la superficie de una de sus caras con papel abrasivo (lija) de diferentes tamaños de granos, como lo son la lija 80, 200, 600, 800 y 1000. De esta forma,

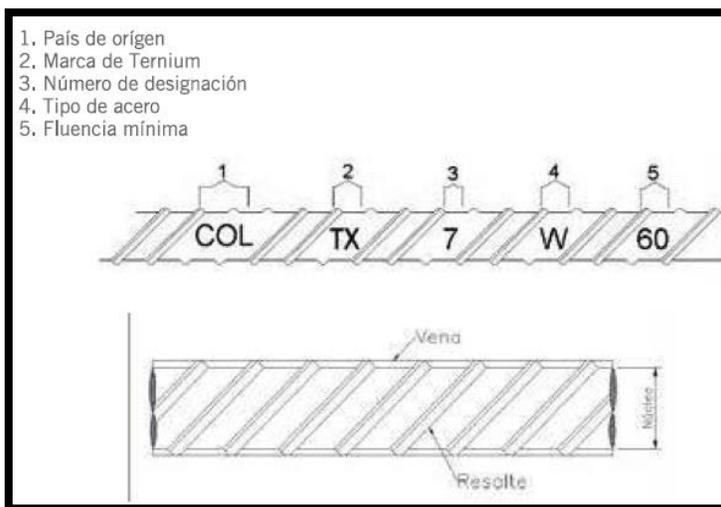
se fue disminuyendo cada vez más su abrasión, hasta conseguir un acabado de espejo, siguiendo las especificaciones técnicas de la norma ASTM E3 para la preparación de muestras metalográficas.

Figura 5
Especificaciones Técnicas

Designación	Diámetro octavos de pulgada	Diámetro nominal milímetros	Peso (masa nominal) (kg/m)	Requisitos de tracción		
				% de elongación (alargamiento) mínimo	Esfuerzo de fluencia (psi)	Esfuerzo último mínimo (psi)
3	3/8"	9.500	0.56	14	60000 - 78000	80000
4	1/2"	12.700	0.994	14	60000 - 78000	80000
5	5/8"	15.875	1.552	14	60000 - 78000	80000
6	3/4"	19.050	2.235	14	60000 - 78000	80000

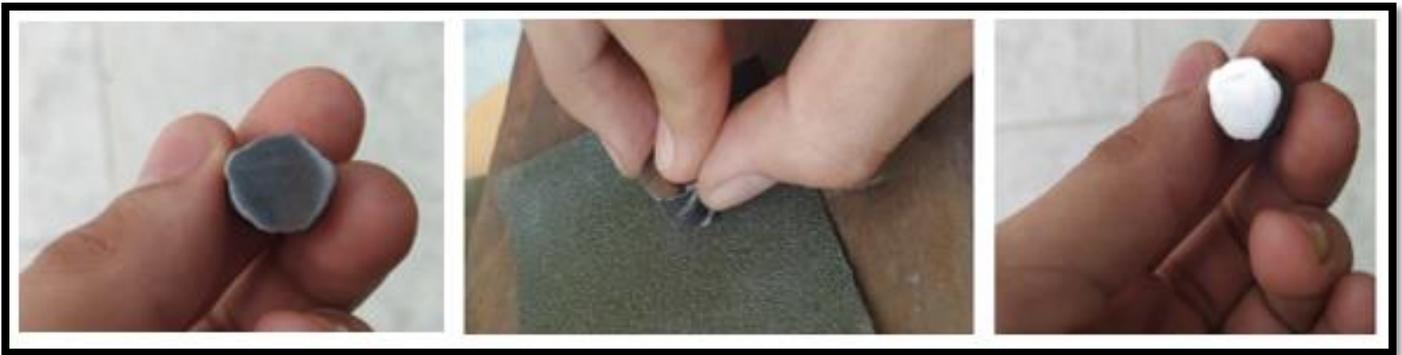
Nota: Especificaciones técnicas del fabricante, en este caso Ternium. Tomado de (Ternium, 2021)

Figura 6
Nomenclatura Técnica



Nota: Nomenclatura técnica de las varillas de acero producidas por Ternium. Tomado de (Ternium, 2021).

Figura 7
Preparación Superficial de las Probetas



Nota: Preparacion superficial de probetas para tratamientos termicos utilizando lija para desbastar la superficie. Elaboración propia

Rampas de Calentamiento, Mantenimiento y Enfriamiento del acero

Figura 8
Mufla



Nota: Mufla usada para los tratamientos térmicos aplicados. Laboratorio UPB. Elaboración propia.

Para la preparación de los tratamientos térmicos que se llevaron a cabo, se configuró la mufla a 900°C para el tratamiento térmico de temple y esa temperatura se mantuvo durante 105 min, y una temperatura de 500°C para revenido la cual se mantuvo por 90 min y 120 min, correspondientemente. También se usó una pulidora de paño para dar el acabado final de la superficie de las probetas antes de ser atacadas con Nital.

Tabla 2

Configuración de la Mufla

Configuración de mufla para temple, normalizado y recocido	Configuración de mufla para revenido
 <p>Mufla configurada a 900°C para los tratamientos térmicos de temple, normalizado y recocido.</p>	 <p>Mufla configurada a 500°C para tratamiento térmico de revenido.</p>

Nota: En la tabla se muestra la mufla utilizada para los tratamientos térmicos en el laboratorio de la facultad de ingeniería mecánica en la UPB. Elaboración propia.

Tabla 3

Referencia Mufla



Nota: En la tabla se muestra la

referencia de la mufla usada en el laboratorio de la UPB seccional Montería.

Tratamientos térmicos aplicados

En este trabajo se aplicaron los tratamientos térmicos de temple, revenido, recocido, y normalizado. el temple se realizó a una temperatura de 900°C durante 105 min, y luego se enfrió rápidamente las probetas en agua a temperatura ambiente, así igualmente el recocido y normalizado se realizaron a la misma temperatura de 900°C por 105 min, dejando enfriar las probetas de normalizado a temperatura ambiente. Las probetas de recocido se enfiraron lentamente en la mufla mientras esta disminuya su temperatura una vez que alcanzó el punto de austenización de las probetas. Los dos tratamientos térmicos de revenido se hicieron a una temperatura de 500°C, variando su tiempo, de 90 min y 120 min correspondientemente a cada uno. Dicha información se puede apreciar mejor en la siguiente tabla.

Tabla 4

Temperaturas, Medios de enfriamiento y Tiempos de TT

T. Térmico	Temple	Temple + revenido		Normalizado	Recocido
Temperatura	900°C	500°C	500°C	900°C	900°C
Tiempo (TT)	2 h TT	1:30 h TT	2 h TT	2 h TT	2 h TT + 18 H de enfriamiento
Medio de enfriamiento	Agua	Aire	Aire	Aire	Horno

Nota: En la tabla se muestran las temperaturas, los medios de enfriamiento y los tiempos de cada tratamiento térmico aplicado.

Fabricación de las Probetas a Caracterización, Acorde a las Disposiciones de las

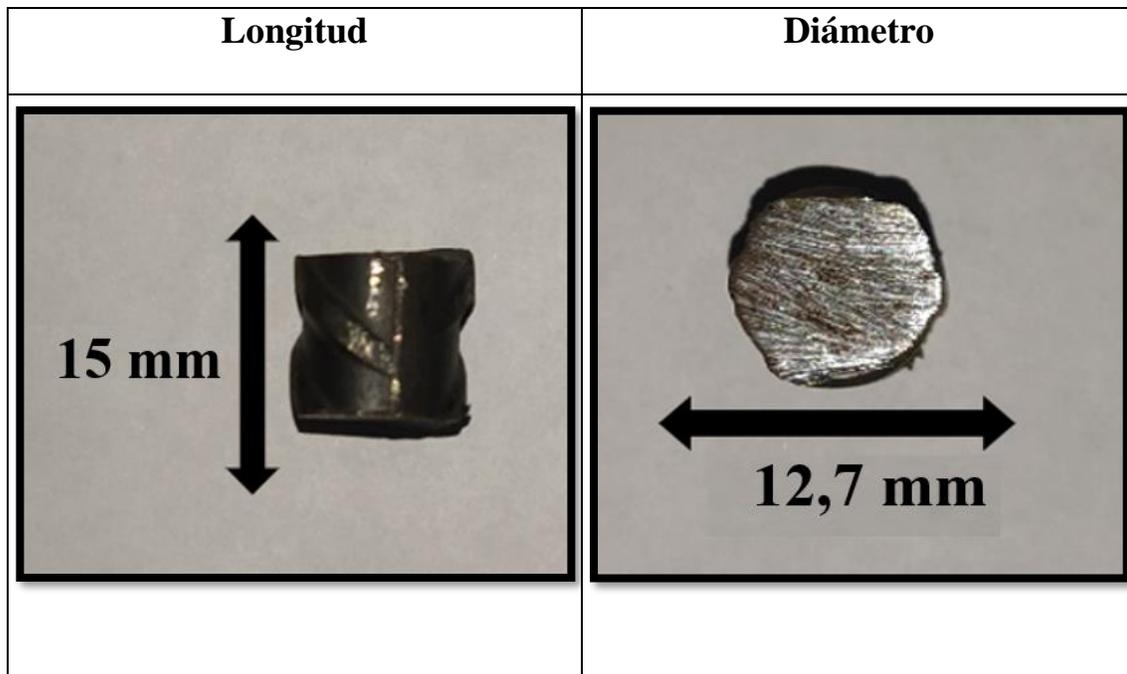
Normas ASTM E3 y ASTM E18 de 2017

Se debe tener en cuenta el tipo de material que se va a examinar, por tanto; el corte realizado en fundiciones, debe ser un corte perpendicular, en los metales trabajados al frío o al calor, se deben hacer cortes transversales y longitudinales, los pequeños círculos y alambres, sus secciones deben ser a través del centro. Se recomienda un tamaño aproximado de 12 a 25 mm cuadrados para las muestras, o de 12 a 25 mm de diámetro si la forma geométrica es cilíndrica y la altura no debe mayor para así tener un mejor manejo de las muestras. Al momento de preparar las muestras es de gran importancia que todos los aceites, grasas, y residuos que hayan podido quedar de los cortes realizados, sean removidos por un solvente orgánico, debido a que se debe remover la mayor cantidad de residuos que se puedan quedar en la superficie, los cuales interfieren con el grabado de la base del material. Las muestras pueden ser preparadas llevando a cabo una secuencia de esmerilado y pulido. Para el esmerilado, este puede ser mediante un papel abrasivo o con el uso de equipos automáticos,

para realizar el pulido es necesario el uso de un lubricante, se puede dividir este proceso en dos etapas, las cuales van de un pulido rudo a un pulido más fino al final, de esta forma se proporciona una superficie adecuada para la investigación a realizar. En este caso se utilizaron probetas de acero estructural con una concentración de 0,3% de carbono, con medidas de 15 mm de longitud y 12,7 mm de diámetro. Para llevar un orden con las probetas hechas para tratamientos térmicos se diseñó la siguiente nomenclatura para cada tratamiento térmico y el número de las probetas respectivamente; Temple (T1, T2), Temple + revenido (TR1, TR2, TR3, TR4), Recocido (R1, R2), Normalizado (N1, N2).

Tabla 5

Tamaño Promedio de las Probetas



Nota: En la tabla se muestra el tamaño aproximado de las probetas usadas para tratamientos térmicos y análisis metalográfico acorde a las disposiciones de la norma ASTM E3, correspondiente a la preparación de muestras metalográficas.

Ataque químico de muestras para análisis metalográfico

Con el análisis metalográfico se busca evidenciar las fases presentes en cada muestra, utilizando una reacción química producida por la aplicación de un ácido revelador, para el cual, se puede ver su composición en la siguiente tabla. En este caso se utilizó el Nital como reactivo de ataque (ver **Tabla 6**) y se configuró el microscopio a 20 micras.

Tabla 6

Reactivo de Ataque

Reactivo de ataque	Composición		Aplicaciones
Ácido Nítrico (Nital)	Ácido Nítrico	5 cc	Aceros y hierros
	Alcohol etílico	95 cc	

Nota: En la tabla se muestra el reactivo utilizado para revelar las fases presentes en las probetas después de la preparación metalográfica y la aplicación de los tratamientos térmicos.

Ensayo de Dureza

Por tanto, para determinar la dureza obtenida post tratamiento térmico, se realizó una prueba en el durómetro para determinar la dureza de las probetas, este ensayo se llevó a cabo en la Rockwell Scale “B”, utilizando el Indentor 1/16” Ball a una carga de 100kg, que consistió en someter las probetas a una carga puntual en 5 puntos diferentes en cada una de las probetas, como se puede ver en la **Figura 9**.

Figura 9
Probeta Post Ensayo de Dureza



Nota: Se muestra la probeta post ensayo de dureza, con 5 puntos en los cuales penetró el Indentor.

Tabla 7

Durómetro e Indentor

Durómetro	Indentor utilizado
	

Nota: Equipo utilizado para realizar los ensayos de dureza, las pruebas fueron realizadas en el laboratorio de ingeniería mecánica de la UPB.

Tabla 8

Referencia del Durómetro



Nota: En la tabla se muestra la referencia del durómetro utilizado para el ensayo de dureza en los laboratorios de la UPB seccional Montería.

Tabla 9

Microscopio

Microscopio			
DETALLES (NOMBRE ACTIVO)	TIPO ACT.	MARCA	SERIAL
MICROSCOPIO	MA	OLYMPUS	9H12219



Nota: En esta tabla se muestra el microscopio usado y su referencia en el laboratorio de UPB seccional Montería.

Origen del Fabricante del Acero y las Especificaciones Técnicas

Se determinó que el acero utilizado, según la referencia **COL TX 4 W60** (como se indica en las **Figuras 5 y 6**), corresponde a un acero estructural de una varilla corrugada, con un porcentaje de carbono de 0,3%, con el cual, en el diagrama de hierro carbono (**Figura 1**), es posible determinar que, con esta concentración de carbono, su A1, estaría por debajo de

900°C, aproximadamente a 800°C, por tanto, para que haya una transformación en su microestructura, es necesario que las probetas sean llevadas más allá del A1, siendo llevadas a A3, siendo esta temperatura una variable, se determinó el A3 en 900°C, garantizando así la transformación de las fases presentes en el acero después de ser sometido a los tratamientos térmicos.

Rampas de Calentamiento, Mantenimiento y Enfriamiento del Acero Seleccionado

Se diseñaron las rampas de calentamiento, mantenimiento y enfriamiento, tomando en cuenta los tiempos de sostenimiento aproximados encontrados en el estado del arte, de los cuales, se pueden resaltar trabajos como (Patiño & Rosero, 2016), (Caro & Vidal, 2020), (Barrios, Padrón, & Esquivel, Atlas metalográfico e influencia de los tratamientos térmicos, 1997). En donde se realizan tratamientos térmicos como revenido, normalizado y recocido, debido a que no hay una temperatura estandarizada para realizar dichos tratamientos térmicos, se realizó una aproximación de estos a 500°C, así mismo, el enfriamiento para este trabajo de investigación no se realizó de forma controlada, ya que, fueron enfriados al aire en condiciones de temperatura ambiente, a excepción del recocido, el cual, se enfrió en el horno durante 18 h.

Caracterización Metalográfica y de Dureza en las Probetas Tratadas Térmicamente.

Se realizó el análisis metalográfico y ensayo de dureza de las probetas sometidas a los diferentes tratamientos térmicos, viendo de esta forma las fases presentes y las variaciones en cada una de sus fases microestructurales con relación a los respectivos tratamientos térmicos, como se podrá ver a continuación.

Análisis metalográfico

Del análisis metalográfico se puede identificar que, estas fases presentes se deben a la precipitación de los límites de granos, los cuales desplazan hacia los lados los átomos de carbono, migrando estos a las zonas de más alta temperatura, y al experimentar un enfriamiento, estos granos sufren un aumento en su tensión y en su dureza.

La martensita revenida es obtenida al realizar el tratamiento térmico de revenido al temple, para disminuir la dureza, como se indicó anteriormente, por tanto, la martensita revenida es casi tan dura y resistente como martensita. Como se pudo observar en las imágenes (**Figura 9 a la 18**) tomadas en laboratorio, al analizar las estructuras formadas post tratamiento.

Así mismo, la perlita también está presente en el tratamiento térmico de recocido, siendo esta fase compuesta por ferrita y cementita, presentando alternancias entre estas dos fases, su microestructura se puede observar con forma laminar o con forma globular, se identifica como perlas microscópicas a poco aumento, de ahí proviene su nombre perlita, por tanto, al observarse microscópicamente es más notable los granos, de los cuales por lo general sus capas están siempre orientadas en la misma dirección, aunque esto varía en cada grano, siendo así, al ser atacadas con Nital, este revela la perlita, tomando un color negro u oscuro, notando así de una forma explícita las fases presentes de perlita, distinguiéndose claramente de la ferrita.

En este caso debido al tratamiento térmico aplicado, se presentó en forma globular, siendo esta una estructura menos dura y resistente en comparación con la forma laminar, esta estructura es buscada en aceros para mecanizados, ya que es considerada una estructura más blanda con mayor ductilidad si es comparada con fases como lo son la cementita y la martensita, de esta forma, si se buscara disminuir la dureza de la perlita laminar, esto es

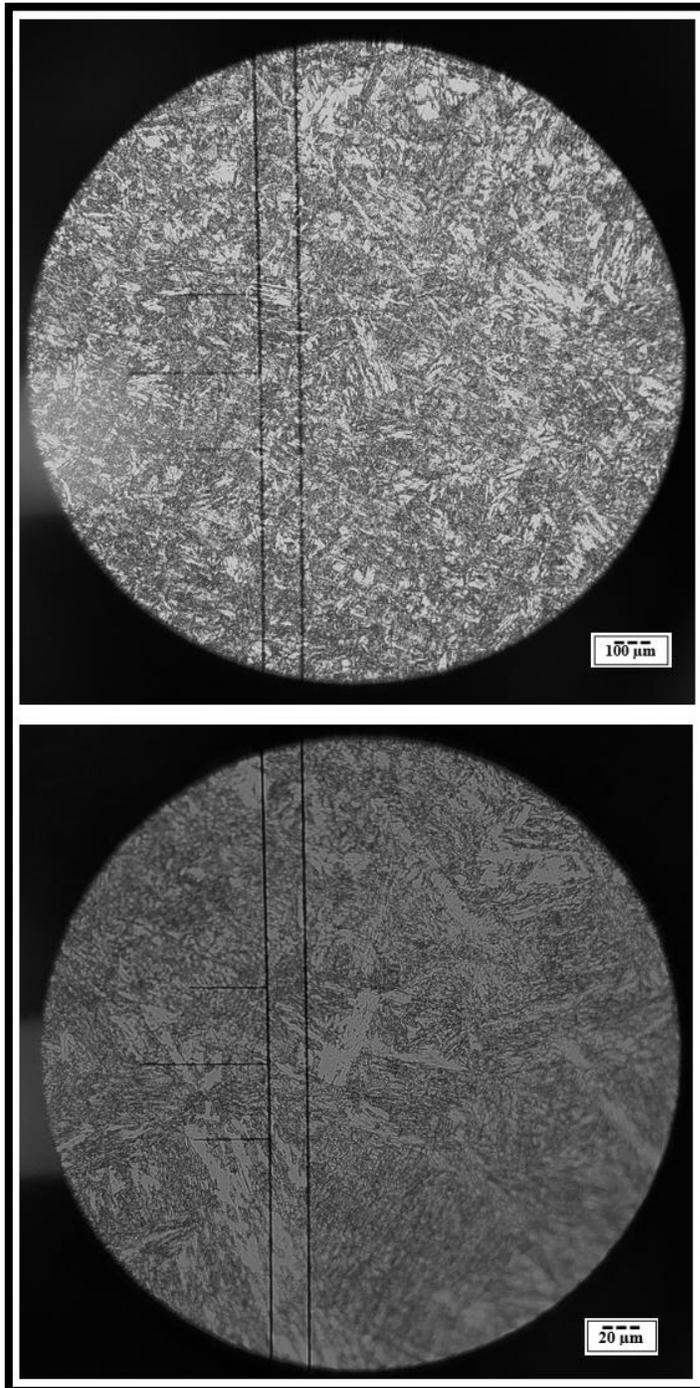
posible si se calienta a una temperatura inferior a la de austenización, entonces, la perlita laminar adoptará la forma de perlita globular, a esta fase de perlita, se le considera un punto medio entre dureza y ductilidad, gracias a la presencia de ferrita y cementita en su microestructura.

La martensita revenida es obtenida al realizar el tratamiento térmico de revenido al temple, para disminuir la dureza, como se indicó anteriormente, por tanto, la martensita revenida es casi tan dura y resistente como martensita, pero a su vez es más dúctil, lo cual permite con más facilidad los procesos de mecanizado debido a que, con la disminución de la dureza este material es menos frágil en comparación con la martensita, ya que, su microestructura consiste en partículas mucho más pequeñas de cementita concentrada en una matriz ferrítica, que en este caso es continua y uniformemente dispersa, siendo así, esta ductilidad que es conseguida en el revenido es determinada por el tiempo y la temperatura a la cual se realiza el tratamiento térmico, como se pudo observar en las imágenes tomadas en laboratorio al analizar las estructuras formadas post tratamiento.

Temple

Figura 10

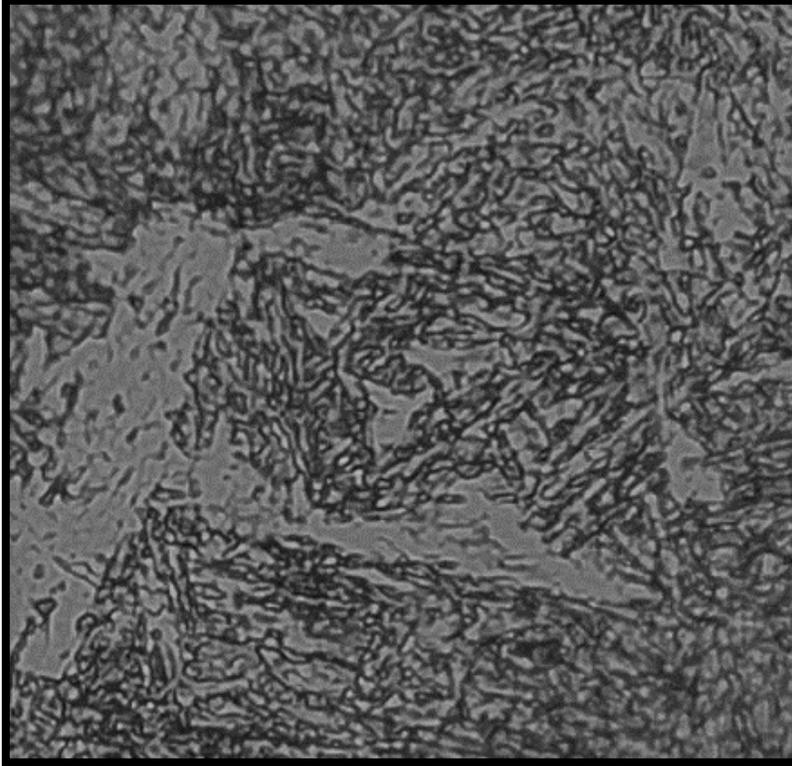
Probeta de Temple Bajo Microscopio



Nota: Fases microestructurales de las probetas de temple bajo el microscopio a 20 micras, con lentes de x100 y x500 respectivamente, las fases presentes corresponden a las estructuras de martensita, cementita y ferrita. Elaboración propia.

Figura 11

Ampliación Aleatoria de Probeta de Temple



Nota: Imagen de temple ampliada de forma aleatoria para observar mejor la metalografía de las fases presentes.

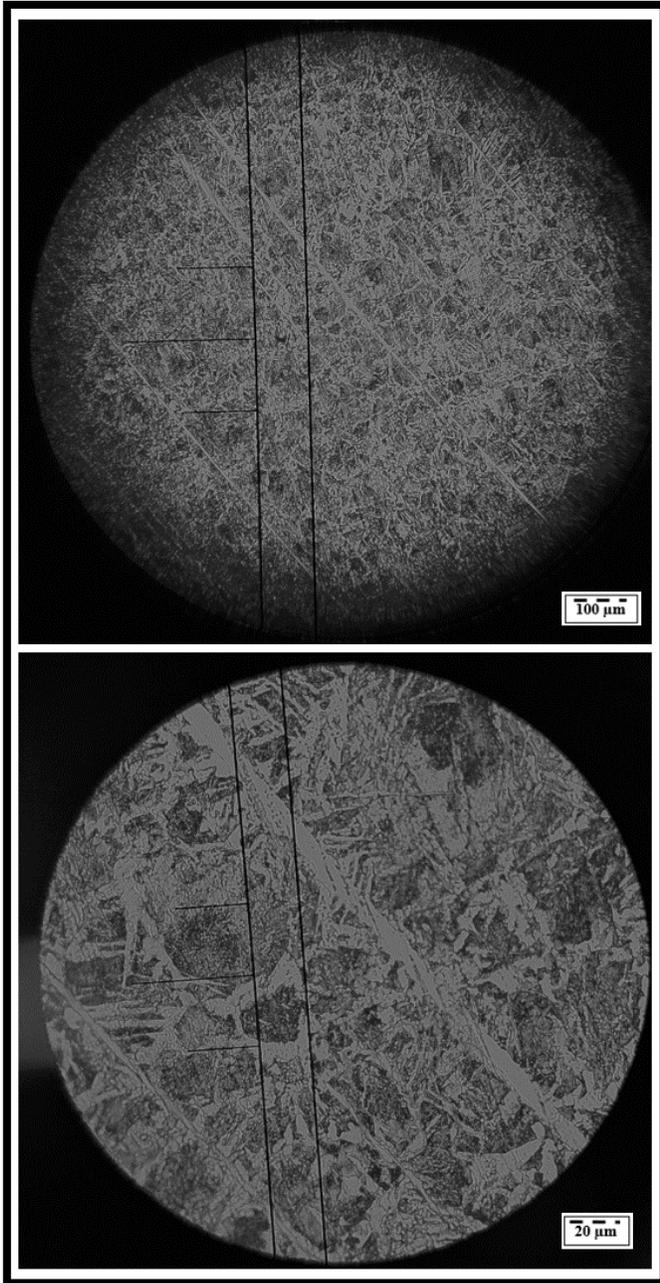
Al realizar el análisis de la metalografía del tratamiento térmico de temple, se encuentra un tamaño de grano fino, una dispersión con alto grado

dispersión y muy heterogénea de las direcciones cristalográficas de las agujas que crecieron, recordando que esas agujas son de martensita en forma de estructura widmanstätten, son estructuras laminares que crecen por el efecto de la contracción de la fase BCC (cubica centrada en el cuerpo), que se convierten en TCP (tetragonal centrada en el cuerpo), por el sobre enfriamiento al que es sometido, siendo TCP la fase martensita y BCC la fase ferrita, por tanto, al no tener un enfriamiento organizado, y ser este un sobre enfriamiento, esto produce una contracción de la BCC, que acaba cizallando el grano de BCC y lo convierte a TCP, esto se puede ver en las propiedades de dureza (**Tabla 13**), indicando un aumento de esta, y esto va relacionado con una disminución de la tenacidad, teniendo como resultado un

acero frágil con bajo grado de deformación plástica, esto se podría apreciar si se realizara un ensayo de tensión, por otra parte, se van observar grano muy finos, homogéneamente dispersos y heterogéneamente orientados cristalográficamente con tamaños de grano muy pequeños especialmente en las agujas presentes, sabiendo que la amplitud de las gujas no está condicionada en estas metalografías por la orientación del lijado, al no ver homogeneidad en la orientación de estas agujas widmanstätten, además, es posible ver la aparición de zonas más oscuras que son predominantemente perlíticas y la de zonas claras muy finamente dispersas de tamaño de grano más fino, que son ferrita proeutectoide, aunque se ve a tener mucha formación de martensita, se alcanza a tener formación de ferrita, debido a que en este trabajo no se va a caracterizar los tiempos de enfriamiento, no se tiene control sobre la velocidad de enfriamiento en la fase ferrita, por tanto, en esta investigación no se puede controlar ese grado de formación de ferrita, sin embargo, se puede evaluar la aparición de martensita, la dispersión de los granos de martensita, ferrita y perlita.

Normalizado

Figura 12
Probeta de Normalizado Bajo Microscopio



Nota: Fases microestructurales de las probetas de normalizado bajo el microscopio a 20 micras, con lentes de x100 y x500 respectivamente. las fases presentes corresponden a las estructuras constituidas de láminas de ferrita y cementita. Elaboración propia.

Figura 13

Ampliación Aleatoria de Probeta de Normalizado



Nota: Imagen de normalizado ampliada de forma aleatoria para observar mejor la metalografía de las fases presentes.

En esta probeta se puede observar como existe una predominancia de agujas que son producto de

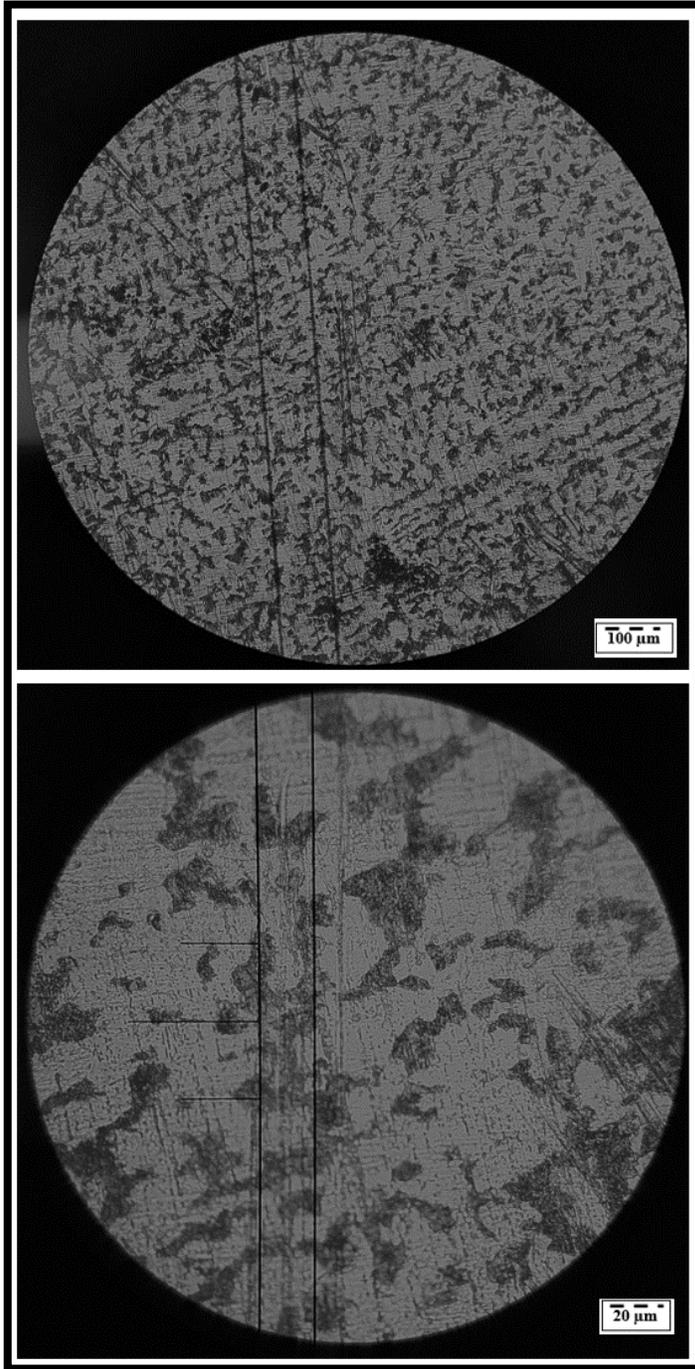
falencias en la preparación metalográfica, al momento de realizar el desbaste con papel abrasivo, por tanto, no se puede determinar que las fases que tienen forma alargada como agujas sean ferrita, sin embargo, al realizar un aumento de la micrografía se puede apreciar zonas que están fuera de esa área de influencia de las líneas del pulido, que presentan diferentes direcciones y tamaño de grano grueso, estas zonas claras son presencia de ferrita proeutectoide, esta ferrita como sabemos del diagrama de hierro-carbono, es producto de un enfriamiento desacelerado, debido a que en el normalizado, no es controlada la velocidad de enfriamiento, ya que, es dejada enfriar al aire, y la temperatura ambiente de Montería es aproximadamente a 33°C , se tiene un enfriamiento que favorece la formación de esta ferrita proeutectoide, en esta micrografía se puede observar como casi no hay presencia de

martensita, debido a su baja temperatura de templabilidad, recordando que la temperatura de austenización para este acero es de 900° C, según el estado del arte (Hernán Patiño, 2016), (Cueto, 2016), (Caro & Vidal, 2020). Por otra parte, se puede observar que la orientación de los granos tiene una mayor secularidad, con respecto a las probetas templadas, esto se debe a que su enfriamiento desacelerado, se tiene una mayor libertad del crecimiento de los granos, contrario al tratamiento térmico de temple, en estas probetas no se va a observar decarburación, esto se caracteriza por unas cáscaras de carbono que son expulsadas de la probeta al ser templadas, debido a que en tratamiento térmico de normalizado, la segregación de carbono hacia los límites de grano es menor, por tanto, los granos son más organizados, más dispersos y de mayor tamaño, pudiendo ver con mayor facilidad la fase de ferrita y perlita, como es correspondiente a un acero 1054 hipoeutectoide.

Recocido

Figura 14

Probeta de Recocido Bajo el Microscopio



Nota: Fases microestructurales de las probetas de recocido bajo el microscopio a 20 micras, con lentes de x100 y x500 respectivamente. las fases presentes corresponden a las estructuras de perlita-ferrita. Elaboración propia.

Figura 15

Ampliación Aleatoria de Probeta de Recocido



Nota: Imagen de recocido ampliada de forma aleatoria para observar mejor la metalografía de las fases presentes.

Al analizar la probeta de recocido, se puede observar una predominancia de microestructura dendrítica,

que es producto de un crecimiento mucho más lento que fomenta una mejor agrupación de los granos, una mejor migración del carbono hacia la perlita, facilitando un mayor crecimiento de la fase ferrítica y una mayor estabilidad de esta fase, lo cual produce un mayor tamaño de grano de las fases ferríticas, además de un menor tamaño de grano y una mejor dispersión de las fases de perlita, sin embargo, es notable también el efecto de algunas líneas, producto de la preparación metalográfica, también es notable un alto grado de agrupación de los granos, lo cual es causado por una mayor facilidad del crecimiento de los tamaños de grano en una matriz ferrítica.

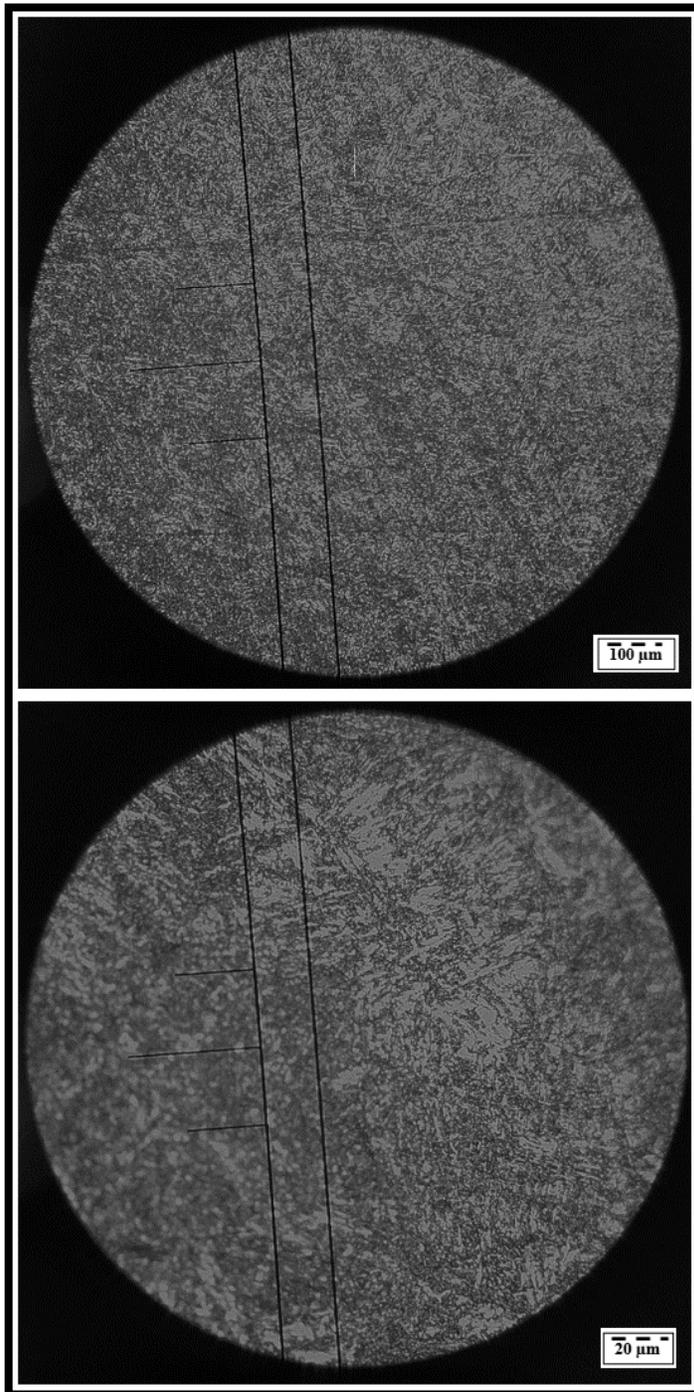
También se puede observar casi una ausencia de estructuras laminares de origen martensítico, siendo esto parte de lo esperado, debido a las bajas velocidades de enfriamiento, y a los altos tiempo de sostenimiento de la probeta en estos procesos de recocido, en estos tratamientos

siempre se busca aliviar tensiones y aumentar los tamaños de grano, para que estas probetas puedan ser llevadas a matrices de troquelado, trefilado y de conformado en caliente, que disminuyan las tensiones internas del acero y permitan ser tratados post tratamiento térmico, este tipo de aceros es muy usado en la fabricación de ejes y componentes que posteriormente van a ser endurecidos superficialmente o por medio de tratamientos térmicos.

Revenido 1:30 h

Figura 16

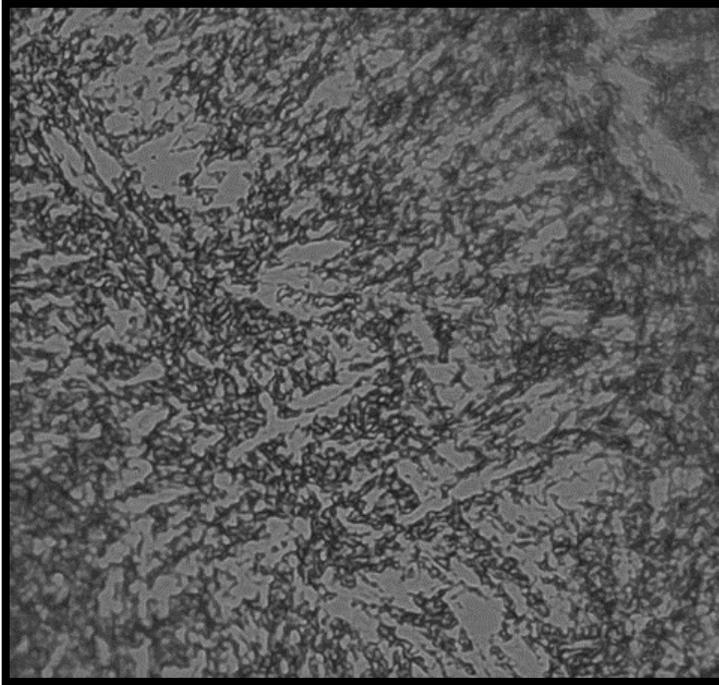
Probeta de Revenido 1:30 h Bajo el Microscopio



Nota: Fases microestructurales de las probetas de recocido revenido 1:30 h bajo el microscopio a 20 micras, con lentes de x100 y x500 respectivamente. las fases presentes corresponden a las estructuras de martensita revenida. Elaboración propia.

Figura 17

Ampliación Aleatoria de Probeta de Revenido 1:30 h



Nota: Imagen de revenido 1:30 h ampliada de forma aleatoria para observar mejor la metalografía de las fases presentes.

Finalmente en las probetas tratadas térmicamente con revenido, se encuentra una menor secularidad con respecto a las probetas de temple, esto se debe a que en primero lugar, los tiempos de revenido fueron altos, esto porque es poca la información encontrada acerca de los tiempos de este tratamiento térmico, como se pudo evidenciar en el estado del arte, por tanto, esto lleva a un alto grado de transformación de la martensita, y debido a su tiempo de sostenimiento si fue posible la migración de los átomos de carbono y la estabilización de los granos con estructura TCP, que empiezan a convertirse en BCC, por esto, es posible observar una mayor presencia de ferrita, y una menor presencia de agujas widmanstätten de predominancia martensítica, sin embargo, al analizar los resultados obtenidos en el ensayo de dureza, se puede ver que en remanente de dureza, con un aumento de la presencia de ferrita, que es muy probable de un aumento en la tensión, esto pese a que no se tienen las curvas de tensión, debería estar aumentando la tenacidad, por tanto, se hace relevante que permitiese con mayor facilidad la

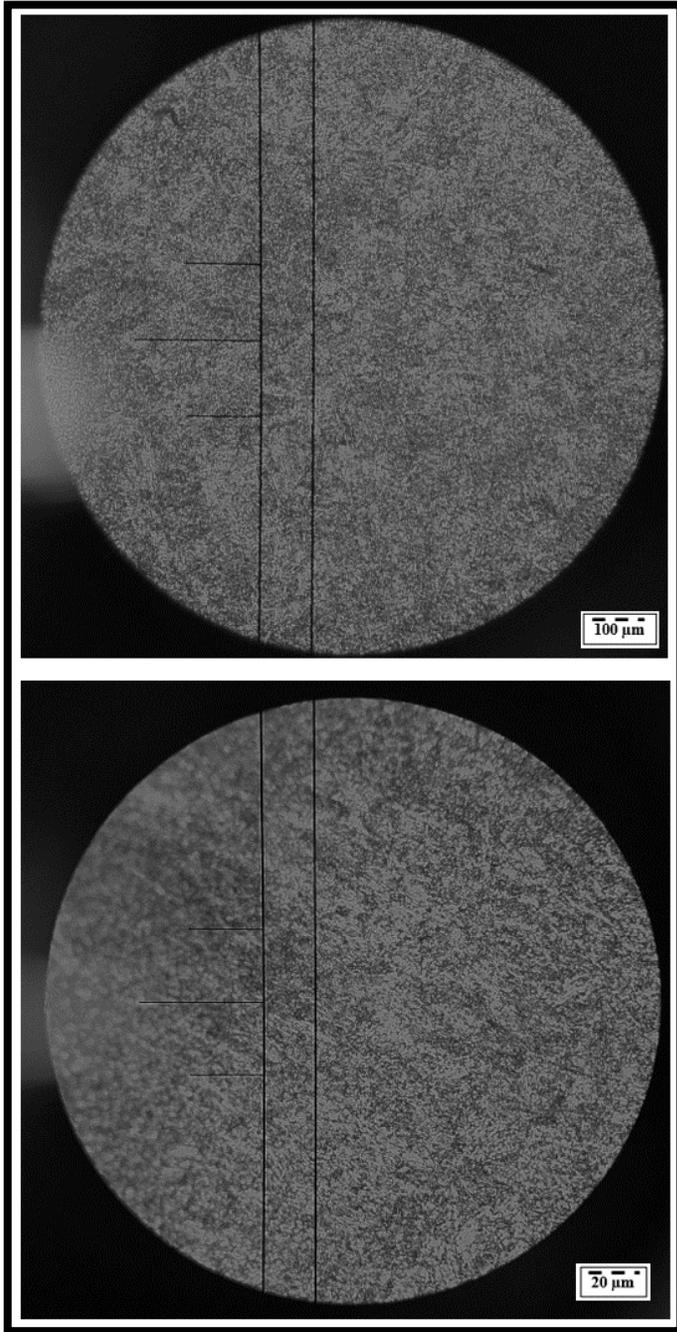
evaluación del impacto de los tiempos de revenido sobre la disminución de la dureza y el aumento de la tenacidad de los aceros 1045.

Esta homogenización de la estructura, el aumento del tamaño de grano, y la fomentación de fases ferríticas, va a permitir una mejor relación de resiliencia-tenacidad en el acero, que lo hace más apto para procesos de alta resistencia o requerimientos mecánicos que exijan del acero su mayor respuesta mecánica con la mejor tenacidad y resiliencia, sin embargo, sacrificando la dureza que fue obtenida en el temple, también se puede ver una dispersión más fina, tanto de la fase ferrítica como de la fase perlítica y de las fases martensíticas, de las cuales se alcanza a observar algunas agujas widmanstätten que no fueron deformadas totalmente, lo cual lleva a una mayor homogeneidad y una mayor isotropía de las propiedades mecánicas del acero.

Revenido 2 h

Figura 18

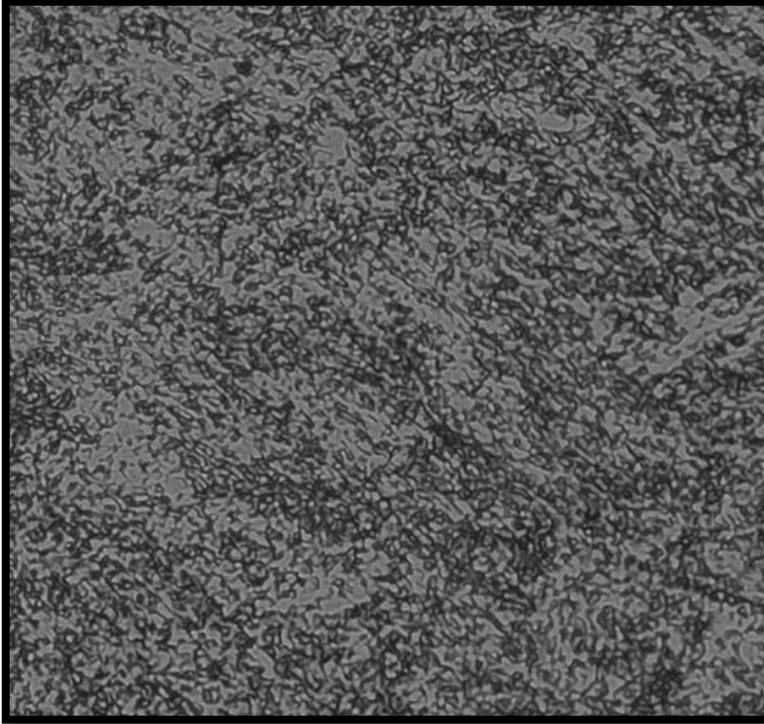
Probeta de Revenido 2 h Bajo el Microscopio



Nota: Fases microestructurales de las probetas de recocido revenido 2 h bajo el microscopio a 20 micras, con lentes de x100 y x500 respectivamente. las fases presentes corresponden a las estructuras de martensita revenida. Elaboración propia.

Figura 19

Ampliación Aleatoria de Probeta de Revenido 1:30 h



Nota: Imagen de revenido 1:30 h ampliada de forma aleatoria para observar mejor la metalografía de las fases presentes.

En esta probeta tratada térmicamente con revenido a 2 h, no se logra evidenciar un efecto del tiempo de revenido, debido a que no se

está controlando la propiedad mecánica de resistencia en tensión, que ayudaría a consolidar mejor los resultados, sin embargo, es posible evidenciar un impacto sobre la transformación de la martensita a martensita revenida, y sobre la secularidad, no obstante, se observa un menor tamaño de grano y una mayor dispersión de la fase martensítica, lo cual es bastante extraño, debido a que, al tener más tiempo en el proceso de revenido, debería tener mayor crecimiento en los tamaños de grano, esto es un fenómeno que debería ser ampliado y estudiado en trabajos posteriores, que exploren a mayor profundidad los procesos de revenido.

Ensayo de dureza

El ensayo de dureza se realiza con la finalidad de medir las propiedades mecánicas de un material, tales como la dureza y la ductilidad. La dureza es la resistencia que opone un material a ser deformado plásticamente, mediante la penetración de un Indentor, de esta forma, la dureza de un material es medida como esa propiedad presente en su capa superficial, la cual se opone a los esfuerzos de contacto locales que son provocados por un agente externo al intentar deformar su superficie, por tanto, una forma de definir el ensayo de dureza es como una evaluación, la cual permite medir la resistencia de un material a ser deformado permanentemente, mediante la penetración de otro material más duro. Siendo así se obtuvieron los siguientes resultados (ver **Tabla 11 a 16**).

Tabla 10

Dureza Temple

Temple [Rockwell B]		
Puntos	T1	T2
1	101,5	101,2
2	106,8	106,6
3	96,9	98,8
4	95,4	106,9
5	105,3	100,8
Promedio	101,2	102,9

Nota: En esta tabla se muestran los valores obtenidos en el ensayo de dureza con las probetas de temple.

Tabla 11

Dureza Temple + Revenido 1:30 h

Temple + Revenido 1:30 h [Rockwell B]		
Puntos	TR4	TR3
1	101,8	97,7
2	98,8	98,9
3	100,4	94
4	104,5	95,4
5	100,1	99,5
Promedio	101,1	97,1

Nota: En esta tabla se muestran los valores obtenidos en el ensayo de dureza con las probetas de Temple + Revenido 1:30 h.

Tabla 12

Dureza Temple + Revenido 2 h

Temple + Revenido 2 h		
[Rockwell B]		
Puntos	TR2	TR1
1	90,7	95,8
2	101,4	95,1
3	101,8	99,2
4	102,5	100,5
5	102,5	103,2
Promedio	99,8	98,8

Nota: En esta tabla se muestran los valores obtenidos en el ensayo de dureza con las probetas de Temple + Revenido 2 h

Tabla 13

Dureza Normalizado

Normalizado [Rockwell B]		
Puntos	N1	N2
1	96,3	95,5
2	92	94
3	92,5	93,9
4	95,1	95,4
5	95,4	93,1
Promedio	94,3	94,4

Nota: En esta tabla se muestran los valores obtenidos en el ensayo de dureza con las probetas de Normalizado.

Tabla 14

Dureza Recocido

Recocido [Rockwell B]		
Puntos	R1	R2
1	90,3	90,5
2	90	86,9
3	84,2	89,6
4	87,8	89,4
5	88,1	86,1
Promedio	88,1	88,5

Nota: En esta tabla se muestran los valores obtenidos en el ensayo de dureza con las probetas de Recocido

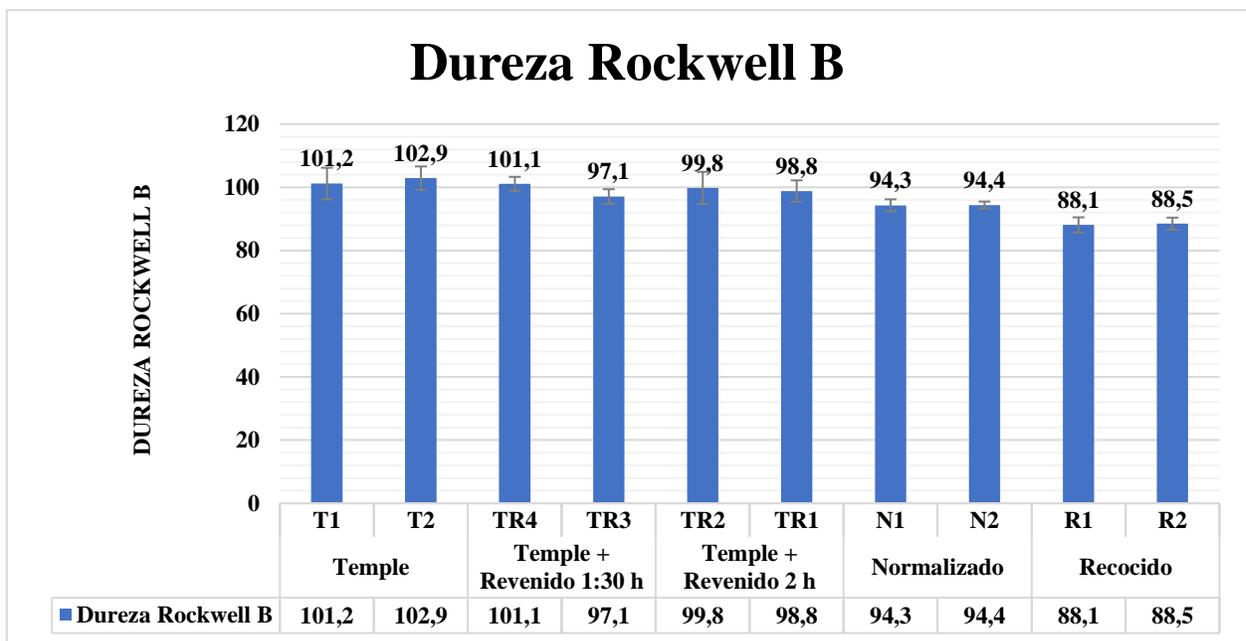
Tabla 15

Dureza, Tiempo, Temperatura, Medio de enfriamiento, D. Estándar, Promedio de Dureza

T. Térmico	Temple		Temple + revenido				Normalizado		Recocido	
Tiempo (T. T)	2 h T. T		1:30 h T. T		2 h T. T		2 h T. T		2 h T.T + 18 H de enfriamiento	
Promedio dureza (HRB)	T1	T2	TR4	TR3	TR2	TR1	N1	N2	R1	N2
	101,2	102,9	101,1	97,1	99,8	98,8	94,3	94,4	88,1	88,5
D. estándar (%)	5,0	3,7	2,2	2,3	5,1	3,4	1,9	1,1	2,4	1,9
Temperatura	900°C		500°C		500°C		900°C		900°C	
Medio de enfriamiento	Agua		Aire		Aire		Aire		Horno	

Nota: En esta tabla se muestra la dureza, el tiempo, la temperatura, el medio de enfriamiento, la desviación estándar y el promedio de dureza de cada probeta de acuerdo con el tratamiento térmico correspondiente.

Tabla 16
Dureza Rockwell B



Nota: En la gráfica se muestra en promedio los resultados de las pruebas de dureza para cada tratamiento térmico realizado.

Se puede observar cómo los valores de dureza obtenidos en este ensayo son mayores en el tratamiento térmico de temple, y así mismo van disminuyendo con los demás tratamientos cuyo objetivo es justamente la disminución de las tensiones internas, el crecimiento de grano, la transformación de la martensita y el aumento de la tenacidad, sacrificando al mínimo la resiliencia, como es el caso del revenido, el cual es aplicado post temple, para disminuir la dureza obtenida en ese tratamiento térmico, restando así su fragilidad, lo cual indica una disminución en la dureza y por tanto, un aumento en la ductilidad, mostrando así, como a nivel microestructural estas fases varían, causando cambios en las propiedades mecánicas de los aceros tratados térmicamente. Como es el caso del revenido, el cual, es un tratamiento térmico que se realiza buscando disminuir la fragilidad, incrementar la ductilidad y tenacidad del acero, teniendo como resultado un acero que busca mantener la dureza necesaria, esto es útil en la industria, para la fabricación de herramientas, que necesiten cierto grado de dureza, pero a su vez, tener presente otras propiedades mecánicas como lo son la ductilidad y la tenacidad. Aun así, en la industria son requeridas piezas con una mayor dureza, para ello, es usado el temple, el cual consiste en endurecer mediante un choque térmico la estructura del acero, siendo esto muy útil en la industria que fabrica piezas que están en contacto y requieren un alto grado de dureza, como lo son los engranes, los ejes, las levas, etc. De igual forma, en la industria son requeridos aceros que presenten un mayor grado de ductilidad y menores tensiones internas, es ahí cuando es aplicado el recocido, siendo usado en aceros que buscan un mecanizado más fácil, como lo son las piezas forjadas, los alambres trabajados en frío y algunas piezas de fundición, que van a ser mecanizadas posteriormente. Finalmente, el tratamiento térmico de normalización es realizado con el objetivo de proporcionar una estructura uniforme, con un tamaño de grano fino, siendo utilizado este tratamiento térmico,

en aceros con la intención de normalizar su estructura después de haber sido forjados o laminados en caliente, eliminando así componentes no deseados que pudieran aparecer.

CONCLUSIONES

La metalografía obtenida va en función del acero analizado, para este proyecto se utilizó un acero AISI-SAE 1045, por tanto, cada tratamiento térmico revela fases que son propias de la temperatura y el medio de enfriamiento utilizado, como se puede observar en el tratamiento térmico de temple, su metalografía indica los cambios y el choque térmico al que fue sometido al momento de ser enfriado rápidamente, esto se puede observar en la formación de las agujas widmanstätten, las cuales son resultado de las contracciones de la fase BCC en los aceros, así mismo se puede observar como los tamaños de grano y la distribución de estos es mayor en los tratamientos térmicos que tuvieron un enfriamiento más lento y graduado como el recocido y el normalizado, permitiendo la agrupación de los átomos de carbono con mayor libertad, respecto al temple.

Se puede concluir que los datos obtenidos en el ensayo de dureza corresponden a las propiedades mecánicas de cada tratamiento térmico, como era de esperarse, la probeta de temple obtuvo el mayor grado de dureza respecto a los demás tratamientos térmicos, esto se debe a que su microestructura, fue formada en un choque térmico que contrae las fases, generando una metalografía en su mayor parte de cementita y martensita, siendo estas las fases con mayor dureza en los aceros al carbono. Seguido por la dureza obtenida en los revenidos, las cuales corresponden a la martensita revenida, siendo esta fase una de las variaciones en que se puede encontrar la martensita, se caracteriza por tener un alto grado de dureza respecto a las demás fases, pero no tan dura como la martensita, por tanto, el tratamiento térmico de revenido revela una dureza similar a la del temple, como se observó

en la **Tabla 13**, pero de igual forma, se puede observar una leve disminución en ella, y esta disminución es mayor en el revenido de 2 horas, así mismo los demás tratamientos térmicos presentan una disminución en su dureza, como es el caso del recocido, debido a que su enfriamiento es el más lento, ya que, se realiza en el horno, y este va disminuyendo su temperatura periódicamente, resulta en la predominancia de microestructura dendrítica, siendo el producto de un crecimiento mucho más lento que fomenta una mejor agrupación de los granos, una mejor migración del carbono hacia la perlita, resultando en un acero menos duro, y por ende menos frágil respecto al temple.

Por tanto, los cambios en la metalografía y en las propiedades mecánicas del acero AISI-SAE 1045, como lo son la dureza de las probetas y las diferentes fases microestructurales encontradas, varía en función de la aplicación de cada tratamiento térmico, determinando así, las características de cada fase observadas anteriormente en el análisis metalográfico, como lo son el temple, el cual, presenta una mayor dureza respecto a los demás tratamientos térmicos, esto debido a la formación de martensita y cementita que se obtuvo en el choque térmico al que fue sometida esta probeta, así mismo, el revenido, gracias a la martensita revenida sigue presentando una dureza considerable, pero a su vez se aprecia que esta disminuye respecto al temple, pudiendo relacionar lo visto en la metalografía de esta probeta, lo cual indica una menor secularidad, debido a la menor presencia de agujas widmanstätten en su estructura, observando esto también en el revenido de 2 horas. Así mismo, es notable la disminución de la dureza en los tratamientos térmicos de normalizado y recocido, los cuales, al tener una mayor libertad de crecimiento de granos, debido a las temperaturas y medios de enfriamiento, estos presentan unos granos de mayor tamaño y más organizados,

resultando en una probeta con menor dureza, una mayor homogeneidad e isotropía de las propiedades mecánicas, permitiendo una mejor relación de resiliencia-tenacidad en el acero. Siendo estas propiedades obtenidas post tratamiento, requeridas en múltiples sectores de la industria, variando estas aplicaciones al perfil requerido para cada una de ellas, como lo es el caso del temple, siendo este tratamiento térmico usado en piezas que requieran una mayor dureza, respecto a las propiedades mecánicas iniciales del acero, como se menciona anteriormente en la introducción de este trabajo, así mismo, los demás tratamientos térmicos son empleados acorde a las especificaciones requeridas, como lo son una mayor ductilidad y tenacidad, pero conservando una dureza significativa, siendo usado el revenido en este caso. Para los requerimientos de una pieza salida de fundición o laminado en caliente, en algunos casos es empleado el recocido o normalizado, buscando aliviar las tensiones internas del acero, haciendo más fácil su mecanizado, como lo son las piezas que requieren un acabado final para su uso en la industria.

RECOMENDACIONES

Para una mejor obtención de la metalografía, se recomienda realizar un desbaste más detallado, teniendo en cuenta factores como lo son el papel abrasivo a usar, y la técnica de desbaste, la cual debe ser de manera uniforme y en una sola dirección como lo indica la norma ASTM E3 que busca un acabado de espejo, para evitar de esta forma, las líneas que puedan aparecer por una mala preparación metalográfica, y así mismo tener en cuenta que las probetas estén niveladas, debido a que, al momento de ser colocadas en el microscopio, éstas se puedan observar de manera clara, si no están niveladas, la metalografía se verá borrosa y opaca, ya que, los lentes del microscopio no enfocan de manera correcta superficies inclinadas, también se recomienda al hacer el ataque con Nital no sobre exponer la probeta al ácido revelador, debido a que si la exposición es prolongada, esto podría ocasionar que la probeta quede sobre atacada, y al momento de ser analizada en el microscopio esta no revele de forma correcta las fases presentes, o se vea en su mayoría de color oscuro, lo cual haría que fuese más complejo llegar a la conclusión de las imágenes obtenidas. Esto con el fin de disminuir los errores que puedan aparecer en trabajos que se desarrollen después de este.

BIBLIOGRAFÍA

ANDI . (Octubre de 2018). *El acero colombiano* . Obtenido de Comité colombiano de productores de acero:
<http://www.andi.com.co/Uploads/LIBRO%20ACERO%20FINAL%20-%20BAJA.pdf>

Aparicio, V. M. (26 de Diciembre de 2016). *Laboratorio de forja*. Obtenido de <https://laboratoriodeforja2.wordpress.com/2016/12/26/revenido/>

Aparicio, V. M. (31 de Enero de 2017). *Laboratorio de forja*. Obtenido de <https://laboratoriodeforja2.wordpress.com/2017/01/31/normalizado/>

Barrios, J. J., Padrón, D. E., & Esquivel, L. A. (9 de Enero de 1997). Obtenido de Atlas metalográfico e influencia de los tratamientos térmicos:
<https://repositorio.utb.edu.co/bitstream/handle/20.500.12585/481/0058157.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Barrios, J. J., Padrón, D. E., & Esquivel, L. A. (Enero de 1997). *Atlas metalográfico e influencia de los tratamientos térmicos*. Obtenido de <https://biblioteca.utb.edu.co/notas/tesis/0058157.pdf>

Caro, J. C., & Vidal, J. A. (2020). *Efecto de los tratamientos térmicos en la microestructura y en las propiedades mecánicas de aceros de altas resistencia y baja aleación-HSLA.*

Obtenido de

<https://repositorio.unicordoba.edu.co/bitstream/handle/ucordoba/3517/ca%c3%b1averacarojhan-fuentesvidaljanio.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Castillo, C. I., & Ponton, M. X. (2010). *Tratamientos Térmicos, pruebas mecánicas y metalográficas de los aceros utilizados en el campo automotor a nivel nacional.*

Obtenido de <http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/6294/1/08084.pdf>

Construdata. (2007). ¿Qué es el acero? *Construcción Metálica*, 10-11. Obtenido de

<https://dibujotecnicoutepsa.files.wordpress.com/2013/08/el-acero.pdf>

Cueto, E. G. (Septiembre de 2016). *Influencia de la temperatura del revenido en un acero aleado.* Obtenido de

<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/9156/386972.pdf?sequ>

Fernández, P. L. (2012). *Determinación de la curva Jominy del acero 30GC*. Obtenido de Facultad de Ingeniería Mecánica Centro de Investigaciones de Soldadura: <https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/2383/Pabel%20Lobaina%20Fern%c3%a1ndez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Ferrepro. (18 de Abril de 2017). Obtenido de Microestructura del Acero: propiedades a diseño: <http://ferrepro.mx/microestructura-del-acero-propiedades-a-diseno/>

García, A. d. (07 de Octubre de 2016). *Tratamientos termicos*. Obtenido de <http://www.dicis.ugto.mx/profesores/balvantin/documentos/Ciencia%20de%20Materiales%20para%20Ingenieria%20Mecanica/Unidad%20III%20-%201%20Tratamientos%20T%C3%A9rmicos.pdf>

Guachamín Guamán, Á. F. (9 de Noviembre de 2011). *Determinación del efecto de la temperatura de enfriamiento en las propiedades mecánicas de los acero de medio carbono(AISI 1045 y AISI 1070) durante el tratamiento térmico*. Obtenido de BIBDigital: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4365>

Hernán Patiño, B. R. (Agosto de 2016). *Tratamiento termico de temple, influencia del medio de enfriamiento*. Obtenido de Journal de Ciencia e Ingeniería : <https://www.researchgate.net/profile/Hernan-Patino->

Duque/publication/320295979_Tratamiento_termico_de_temple_influencia_del_medio_de_enfriamiento/links/59dc2421aca2728e20183ccf/Tratamiento-termico-de-temple-influencia-del-medio-de-enfriamiento.pdf

Llulluna Llumiquinga, F. R. (14 de Febrero de 2014). *BIBDigital [Diagrama]*. Obtenido de Procesamiento de imágenes mediante software libre python para el análisis metalográfico en aceros de bajo contenido de carbono: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/7171/1/CD-5361.pdf>

Lobaina Sánchez, R., & Goyos Pérez, L. (Enero-Abril de 2007). *Revista de Ingeniería mecánica*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/2251/225117649005.pdf>

Patiño, H., & Rosero, B. (Agosto de 2016). *Tratamiento térmico de temple, influencia del medio de*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/320295979_Tratamiento_termico_de_temple_influencia_del_medio_de_enfriamiento

Patiño, J. A. (29 de Marzo de 1997). *Tratamientos térmicos*. Obtenido de <http://eprints.uanl.mx/435/1/1020115008.PDF>

Portillo, E. A. (Octubre de 2007). *Compilación de microestructuras de piezas de acero al carbono de uso frecuente en el Salvador*. Obtenido de Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas":
https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/47623026/compilacion_de_microestructuras_de_piezas_de_acero_al_carbono_de_uso_frecuente_en_El_Salvador.pdf?1469804455=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DFACULTAD_DE_INGENIERIA_Y_ARQUITECTURA_IN.pdf&Exp

Rodríguez, F. D., & Solís, A. R. (2012). *Aceros, estructuras y tratamientos térmicos*. Obtenido de Universidad Nacional Autónoma De México:
http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/aceros%20estructuras%20y%20tratamientos%20termicos.pdf

Rodríguez, M. B., Díaz, V. J., González, J. B., & Ramírez, F. S. (2021). *TEPEXI Boletín científico de la escuela superior de Tepeji del Río*. Obtenido de Tepexi:
<https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/tepexi/article/view/6397/7745>

Ternium. (2021). *Ternium*. Obtenido de Catalogo Aceros Largos:

<https://co.ternium.com/es/productos/aceros-largos/barra-corrugada>