CONTRASTE DE LAS VENTAJAS DE LA METALOGRAFÍA A COLOR FRENTE A LA CONVENCIONAL EN EL ANÁLISIS MICROSCÓPICO DE LOS ACEROS AISI SAE 4140 Y 1040

María Camila Numa Rivero

Jorge Luis Hernández Suárez

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD TECNOLÓGICA

TECNOLOGÍA EN MECÁNICA

BOGOTÁ

2016

CONTRASTE DE LAS VENTAJAS DE LA METALOGRAFÍA A COLOR FRENTE A LA CONVENCIONAL EN EL ANÁLISIS MICROSCÓPICO DE LOS ACEROS AISI SAE 4140 Y 1040

María Camila Numa Rivero

Jorge Luis Hernández Suárez

Tesis para optar al título de tecnólogo mecánico

MsC Luis Hernando Correa Murillo

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD TECNOLÓGICA

TECNOLOGÍA EN MECÁNICA

BOGOTÁ

2016

DEDICATORIA

A Dios por permitirme culminar esta etapa de mi vida, dándome la fortaleza necesaria para levantarme en cada caída.

A mi madre Olga Lucia Rivero, por hacer tantos esfuerzos y sacrificios por mi educación, por alentarme a seguir a pesar del cansancio, siempre confiar en mis capacidades intelectuales y personales, y nunca dudar que lo lograría.

A nuestro tutor MsC. Luis Hernando Correa, por tener paciencia para guiarnos y corregirnos en este proceso. Y con él, a todos docentes que aportaron para mi desarrollo, no solo con sus conocimientos teóricos sino de la vida misma.

A mi estimado profesor del bachillerato MsC. Roger Ayala, por enseñarme a buscar una solución a pesar de las adversidades, su frase *'Séquese las lágrimas y busque solución'* la recordaré y aplicaré siempre, con cariño y una sonrisa.

A mi gran amigo Ing. Daimer Ospina, que me enseñó la belleza de la ingeniería, el diseño y la innovación. Y sobre todo el ser un gran amigo.

A mi novio y compañero de trabajo Jorge Hernández por ser siempre mi apoyo, por crecer a mi lado, no dejarme desfallecer, por el amor y la ternura con que soportó mis quebrantos; la paciencia con la que me mostró mis errores y cómo solucionarlos y su sonrisa al decirme que todo estaría bien.

María Camila Numa Rivero

Dedicatoria

Gracias a Dios, primordialmente por dejarme tener esta esta experiencia, un gran paso en mi vida tanto como persona, como alguien que busca conocimiento

A mi compañera, que ha estado conmigo en toda esta carrera, que siempre fue un impulso para siempre ser mejor y dar lo mejor en esta carrera. Con ella he vivido mucho en estos años. Aprendí que se puede querer a alguien con corazón y alma.

A mi familia que siempre me ha impulsado a salir adelante, y siempre me ha logrado ayudar para conseguir los objetivos de mi vida. A mi abuelo y mis tíos, por sus consejos y sus alientos de cómo vivir, a mi abuela por prestarnos siempre un espacio.

A mi mamá por sacarme adelante tantos años, siempre dándonos lo mejor a hermano y a mí, pasando por mucho para verme en esta posición de mi vida. También a mi Papá que gracias a él es que me gusta la mecánica y soy la persona que soy ahora.

Jorge Luis Hernández Suarez

AGRADECIMIENTOS

Los autores, agradecen a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, por el apoyo que nos han brindado durante el proceso de formación académica y profesional.

A nuestro tutor, MsC. Luis Hernando Correa, por su compromiso con nosotros, compartiendo sus conocimientos y experiencias permitiéndonos llevar a cabo el desarrollo de este trabajo de grado.

A los laboratoristas, quienes siempre nos brindaron apoyo y ayuda cuando más lo necesitamos, de quienes también aprendimos; y a quienes debemos de cierta forma el culminar nuestro proyecto.

Muchas gracias a todos.

CONTENIDO

RESUMEN 1

INTRODUCCIÓN 1

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 3

JUSTIFICACIÓN 4

OBJETIVOS 5

General 5

Específicos 5

I. CONCEPTOS BÁSICOS 6

METALOGRAFÍA 6

Metalografía a color 6

CLASIFICACIÓN DE LA SAE. 6

Acero SAE 4140 7

Acero SAE 1040 8

EQUILIBRIO DE LAS FASES 9

Diagramas de equilibrio de fases 9

Diagrama hierro-carbono (Fe-C) 10

Diagrama TTT (Tiempo, Temperatura, Transformación) 11

Diagramas por enfriamiento continuo (CCT) 12

COMPONENTES DE LA ESTRUCTURA DE LOS ACEROS 14

Ferrita 14

Perlita 15

Martensita 16

Austenita 16

Sorbita 17

Bainita 17

Carburos 18

Cementita 18

DUREZA 19

Medición de dureza 20

Microdurómetro 20

II. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS METALOGRÁFICAS 21
SELECCIÓN DE LA MUESTRA 21
Corte y dimensionamiento de las muestras metalográficas 21
Encapsulación de las probetas 22
Desbaste de las muestras 22
TRATAMIENTOS TÉRMICOS 24
Bonificado 24
Temple 25
Revenido 26
Normalizado 26
III. ATAQUE QUÍMICO DE LAS MUESTRAS 27
FUNDAMENTOS INICIALES 27
REACTIVO NITAL (ÁCIDO NÍTRICO) 28
REACTIVO SEGÚN BERAHA TIPO I 28
PROCESOS DE ATAQUE 28
IV. OBSERVACIÓN DE LAS MUESTRAS METALOGRÁFICAS 30
1040 EN ESTADO DE TEMPLE 30
1040 EN ESTADO BONIFICADO 33
4140 EN ESTADO DE TEMPLE 34
4140 EN ESTADO BONIFICADO 37
4140 EN ESTADO NORMALIZADO 39
1040 EN ESTADO NORMALIZADO. 41
V. CONCLUSIONES 43
VI. RECOMENDACIONES 44
GLOSARIO 45
BIBLIOGRAFÍA 46

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Composición química promedio del acero SAE 1040 **7**

Tabla 2: Composición química acero 1040 **8**

Tabla 3: Resultados del microdurómetro acero 1040 **33**

Tabla 4: Resultados del microdurómetro acero 4140 **37**

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama Fe-C 10
Figura 2: Ejemplos de estructuras de aceros en el diagrama Fe-C 11
Figura 3: Diagrama TTT 12
Figura 4: CCT de acero 4130 (temperatura vs velocidad de enfriamiento) 13
Figura 5: CCT de acero modelado por software (temperatura vs tiempo) 13
Figura 6: Ferrita 14
Figura 7: Perlita 15
Figura 8: Martensita en estado primario y revenido 16
Figura 9: Austenita a x500 17
Figura 10: Cementita blanco 19
Figura 11: Transformación de un acero hipoeutectoide con 0.4% de carbono 30
Figura 12: Diagrama TTT para un proceso de temple para acero 1040. 31
Figura 13: Acero 1040 en estado de temple atacado con Behara 31
Figura 14: Acero 1040 en estado de temple atacado con Behara 32
Figura 15: Muestra de la huella en acero 1040 templado 32
Figura 16: Acero 1040 en estado bonificado atacado con nital 33
Figura 17: Acero 1040 en estado bonificado atacado con Behara 34
Figura 18: Diagrama TTT con el proceso de temple para un acero 4140. 35
Figura 19: Diagrama CCT con el proceso de temple para un acero 4140 35
Figura 20: Acero 4140 con tratamiento de temple atacado con Nital 36
Figura 21: Acero 4140 con tratamiento de temple atacado con Beraha 36
Figura 22: Acero 4140 en estado bonificado atacado con nital 37
Figura 23: Acero 4140 en estado bonificado atacado con beraha 38
Figura 24: Diagrama TTT con el proceso de normalizado para un acero 4140. 39
Figura 25: Diagrama CCT con el proceso de normalizado para un acero 4140 39
Figura 26: Acero 4140 en estado normalizado atacado con Nital 40
Figura 27: Acero 4140 en estado normalizado atacado con Behara 40
Figura 28: Diagrama CCT con el proceso de normalizado para un acero 4140 41
Figura 29: Acero 1040 en estado normalizado atacado con Nital 41
Figura 30: Acero 1040 en estado normalizado atacado con Beraha 42

RESUMEN: *En este trabajo se busca encontrar las falencias que presenta la identificación metalográfica por medio de escala de grises frente a la de color. Para esto se selecciona un material y se realizan tres tipos de tratamientos térmicos diferentes a seis probetas de la misma muestra, y se someten tres a un ataque químico convencional y tres a color y se verifican los resultados. Se espera que con la imagen a color se puedan distinguir con más claridad las fases además de algunos otros componentes invisibles en la imagen de escala de grises, con lo que se pueda comprender mejor el comportamiento de los materiales.*

INTRODUCCIÓN

Los metales han sido parte del desarrollo de la humanidad, incluso han sido cruciales para ciertas eras de la historia que marcaron un punto importante para el desarrollo tecnológico de herramientas de uso cotidiano para el hombre, haciendo su vida más sencilla.

Parte de ese desarrollo se ve evidenciado en el área de la ingeniería mecánica, que no solo ha aprovechado de estos materiales sino que ha enfocado un área de la ciencia para estudiar el comportamiento y las propiedades de los metales lo cual ha desembocado en el diseño de diferentes materiales por medio de aleación, el estudio y aplicación del efecto de temperatura, la estandarización de procesos de conformado y de mecanizado, tablas para la selección de correcto medio de enfriamiento, entre otros factores que aseguran que un material cumpla a cabalidad las especificaciones de un diseño mecánico.

La clave del éxito de un diseño mecánico, radica en gran parte en la correcta selección del material a utilizar, y/o la correcta selección de procesos que pueden modificar sus propiedades. Estas propiedades a su vez están basadas en el tipo de estructura que presenta dicho material, y para identificar estas estructuras ya sea para nivel empresarial o a nivel educativo, se utilizan pruebas de ataque químico. El área encargada de esta labor es la metalografía.

La metalografía es la disciplina que se encarga de la identificación de los metales, basado en su estructura y composiciones, haciendo uso de imágenes a niveles microscópicos, tomadas al material luego de la debida preparación, además de gráficas y tablas estandarizadas para dar como resultado la caracterización, más que del material en general, del estado de la probeta individual analizada, con lo que pueden analizarse los efectos en la estructura causados por los procesos por los que la muestra haya sido sometida. A todo este proceso puede agruparse como análisis metalográfico.

Los análisis metalográficos por medio de ataques químicos han sido ampliamente utilizados para la identificación de la microestructura de aceros y aleaciones. Sin embargo la metalografía convencional tiene limitaciones visuales, ya que no resulta tan evidente la identificación de fases a causa de que es una imagen en escala de grises. Para ello se ha venido utilizando la metalografía a color como una alternativa más acertada y que soluciona el problema de la visualización de las fases, además de dar la posibilidad de identificar más a fondo la estructura.

Con este proyecto se busca compilar, apropiar y utilizar los conceptos concernientes a las áreas de metalografía y tratamientos térmicos, con el fin de hacer una revisión a las actuales normativas para realizar análisis de metalografía cromática y resaltar su preponderancia respecto las imágenes obtenidas con la metalografía convencional, además de aprovechar la particularización de materiales que se usarán para dar un aporte a cerca de los correctos reactivos a utilizar respecto a lo que se desee observar del mismo.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La industria de la mano de la ingeniería está siempre en constante avance, lo que conlleva la necesidad de innovar en procesos, maquinaria, materiales y otros tópicos que se relacionan directamente con el éxito de la producción.

Esto le impone a la ingeniería mecánica, por ser la más completa en cuanto a disciplinas, una exigencia inmediata de mejorar y crear nuevas opciones, apoyado en las disciplinas que involucre. Lo que se espera obtener por el área de materiales, son materias primas que no solo cumplan un requerimiento sino que cada vez pueda aumentarse su vida útil y que su tiempo de servicio sea lo más provechoso posible.

Por medio de los conocimientos teóricos y prácticos obtenidos del área de metalografía y tratamientos se busca hacer un análisis a nivel microscópico del material, por medio de la microscopía óptica.

Sin embargo, la microscopía óptica convencional, a pesar de que ha sido una herramienta indispensable para el avance en la ciencia de materiales, resulta todo un reto para aquellos que apenas inician en el estudio de los materiales, o para quien quiere obtener información precisa de una micrografía, donde se encuentren muchas fases. Incluso se puede correr el riesgo de confundir fases debido a que las tonalidades son prácticamente iguales, o puede omitirse fases que el reactivo convencional no logre delimitar.

Es por esto que se busca establecer dónde radican las ventajas de una fotomicrografía a color sobre una de escala de grises, y la cantidad de información que puede perderse utilizando la convencional, para el estudio de la estructura de un acero.

JUSTIFICACIÓN

La metalografía ha sido una herramienta indispensable para el estudio de los metales, todo esto apoyándose en diferentes estudios como los ensayos mecánicos y químicos, diagramas teóricos que en conjunto dan una idea de las propiedades aprovechables del material.

Este estudio no es solo útil para la industria, donde se asimilan y modifican dichas propiedades por medio de tratamientos térmicos para resaltarlas o mejorarlas, sino también en el ámbito académico, donde facilita el estudio y la explicación de las asignaturas relacionadas con los metales y el posterior desarrollo de nuevos materiales en la investigación institucional.

No obstante, es claro que resulta sumamente difícil lograr conseguir que un metal en la industria solo tenga en su composición los elementos que se indican en el catálogo, ya que en el proceso de fabricación es inminente que se cuelen partículas e impurezas, y residuos de elementos ajenos al material pero que se utilizan en su conformación, tal es el caso del azufre; y esta situación hace que deban tenerse cuenta al momento de establecer las propiedades. El inconveniente radica en que la forma más cómoda para visualizar estas, y otras posibilidades de elementos componentes del material, es utilizando la opción de la microscopía a color, que ofrece una clara diferenciación de los componentes y las fases, que facilitan el reconocimiento del material. Además de propiciar la búsqueda y estudio de nuevos reactivos para mejorar el estudio.

OBJETIVOS

General

Establecer las principales diferencias entre la metalografía convencional y la de color, en la identificación de la estructura de un acero AISI SAE4140 y un AISI SAE 1040, y evidenciar cual es más conveniente según el material, el tratamiento y lo que se desea observar.

Específicos

- Realizar una investigación acerca de los reactivos utilizados para metalografía a color y seleccionar los más convenientes para los aceros seleccionados.
- Seleccionar los tratamientos térmicos a utilizar con los materiales seleccionados, basándose en conocimientos adquirido en el área de tratamientos térmicos y las especificaciones de fabricante.
- Llevar a cabo los tratamientos y ataques en probetas seleccionadas de cada material.
- Evaluar los resultados para verificar que las decisiones acerca de los reactivos fueron acertadas, y en el caso contrario rehacer las pruebas implementando los cambios que se consideren pertinentes.

I. CONCEPTOS BÁSICOS

METALOGRAFÍA

La metalografía en una disciplina encargada del estudio a nivel microscópico de las características estructurales de un material. La metodología de esta área es la toma de micrografías en base a las cuales se establece tamaño de grano, fases presentes y de forma indirecta, predecir el comportamiento a nivel macro que ofrecerá un material.

Para este proceso se utilizan muestras pequeñas del material a estudiar y se realizan pulidos graduales hasta alcanzar una superficie lisa y de brillo tipo espejo, para luego ser atacada con un reactivo según las fases que se espera observar y el tipo de material.

Metalografía a color

La metalografía a color se ha venido estudiando desde hace poco más de ochenta años, con el fin de mejorar la metalografía clásica. Los ataques químicos realizados tienen como resultado imágenes, que dependiendo del material y el reactivo, ofrecerán delimitaciones de color, de modo que facilita la diferenciación de fases y la visualización de componentes que no se lograban ver con la convencional.

CLASIFICACIÓN DE LA SAE.

La SAE es una norma que clasifica a los aceros y aleaciones de materiales no ferrosos.

Entre 1930 y 1940 el “Instituto Americano de Hierro y Acero” (AISI) y la “Sociedad de Ingenieros Automotores“(SAE) unieron sus esfuerzos para estandarizar y crear un sistema de numeración para los aceros. Estos esfuerzos entre las compañías

las llevaron a crear un sistema que lleva décadas en funcionamiento. Aunque desde 1995 la SAE es la única que continúa con el manejo de la norma.

Hoy en día en la venta de aceros se pueden conseguir certificados de material referidos con AISI o con SAE. No hay una diferenciación específica y los materiales conseguidos en estas clasificaciones distintas son válidos en procesos que se necesiten un aproximado y no una composición exacta. Aunque esto puede ser resuelto si se sabe bajo qué norma están trabajando en la fabricación de los aceros.

Los aceros al carbono y aceros aleados se clasifican en una serie de cuatro dígitos. El primero especifica la aleación principal, el segundo indica el porcentaje aproximado del elemento principal y con los dos últimos dígitos se conoce la cantidad de carbono presente.

Acero SAE 4140

El acero 4140 es un acero de ingeniería de alta resistencia, con un contenido medio de carbono (de entre 0.38% y el 0.43% de carbono), aleado al cromo-molibdeno, cuyos porcentajes en la composición son de 0.80 a 1.10% para el cromo y de 0.15 a 0.25% para el molibdeno.

Análisis típico en %	0,38 0,43	0,75 1,0	0,035	0,04	0,2 0,35	0,8 1,1	0,15 0,25

Tabla 1: Composición química promedio del acero SAE 4140

Esta composición le da al material un buen comportamiento ante esfuerzos de fatiga y flexión, por lo que es ampliamente utilizado en la fabricación de ejes,

cigüeñales, árboles de turbinas y en general elementos con exigencias de torsión y tensión. Pero este material no se suelda fácilmente (Necesita un tratamiento previo a la soldadura), aunque este material contenga cromo, no existe en grandes cantidades para proporcionar la resistencia a la corrosión. [1]

Acero SAE 1040

El acero 1040 en un acero de composición media de carbono (entre 0.37% y 0.44%), con una dureza aproximada de 149 HB, con resistencia a la tracción de 518.8 MPa, un alargamiento del 30.2% en un estado recocido, es un acero de fácil maquinabilidad apropiado para tratamientos de temple-revenido.

Análisis típico en %	0,37 0,44	0,6 0,9	0,04	0,04	0,15 0,35	0	0

Tabla 2: Composición química acero 1040. [2]

Es un acero utilizado en maquinaria, en la fabricación de ejes, engranajes, pernos y piezas endurecidas superficialmente. También se usa para máquinas tornillos de arado y carros, alambre de amarre, pernos, barras de refuerzo de hormigón, piezas forjadas. [3]

EQUILIBRIO DE LAS FASES

El equilibrio se define en función de la termodinámica, por la denominada energía libre, esta depende de la energía interna de un sistema y también del azar o desorden de los átomos o moléculas. Un sistema está en equilibrio si la energía libre es mínima en condiciones específica de temperatura presión y composición. [4]

Este término se usa para explicar el equilibrio de un material cuando posee más de una fase, la combinación de componentes pueden tener igualdad en un estado sólido, pero al calentarse, pierde este equilibrio lo que permite el cambio de fase de un material afectando su estructura y su comportamiento.

Visto desde una perspectiva sólida del material, en muchos casos ocurre que el estado de equilibrio nunca se alcanza completamente, esto debido a que la velocidad para llegar a este estado es sumamente lenta; se denomina estado de no equilibrio o metaestable.

Conociendo el estado de equilibrio, la velocidad de enfriamiento y la microestructura se pueden conocer el comportamiento del material esto con el fin de lograr identificar sus propiedades mecánicas.

Diagramas de equilibrio de fases

Estos diagramas sirven para predecir el comportamiento y tener el control de la microestructura resultante, de esto sale el su otro nombre “diagrama constitucional”, a partir de los cambios de fases por el cambio de temperatura, se originan los cambios de fase lo que provocará el cambio en la microestructura. Los datos de estos diagramas son la composición y la temperatura, los valores de composición dados en un porcentaje entre un elemento y todo el material en cuestión, la temperatura si está dada en cualquier escala de medición de temperatura.

En estos diagramas se pueden averiguar las fases presentes, las denominaciones de cada fase (alfa, beta, sigma, etc.); Cuanto es la composición en la que se encuentran, en el estado de la materia que se encuentran normalmente estos diagramas sólo se componen de su forma sólida líquida y la mezcla entre ellas ; y la cantidad de la fase, esto es cuanto es el porcentaje que tiene la mezcla sólido-líquido y a cada estado cuanto de las fases posee, esto se determina visualmente con la regla de la palanca, que da los resultados en porcentaje.

Diagrama hierro-carbono (Fe-C)

El diagrama Fe-C es una forma de visualizar la estructura que se va a conseguir dependiendo de la temperatura en la que se encuentre y el porcentaje de carbono contenido. De esta forma se puede asociar las características que tendrá el material y se tomarán decisiones sobre modificación de propiedades mediante tratamientos. [5]

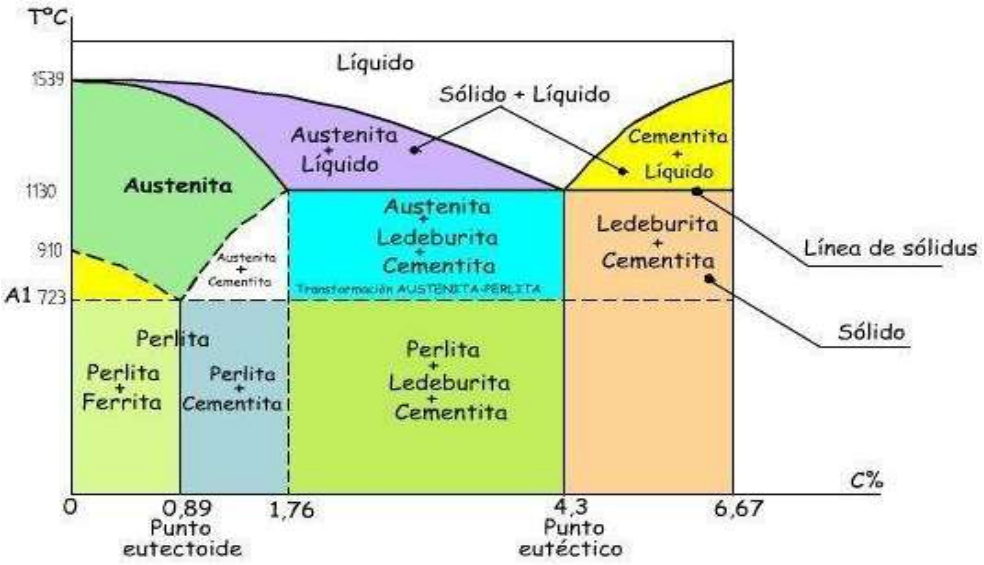


Figura 1: Diagrama Fe-C [6]

Como se puede ver en la Fig. 1, en el diagrama se pueden distinguir las formas alotrópicas de acero líquido, hierro alfa y beta, austenita, perlita, etc., además de las diferentes zonas donde se pueden encontrar mezcladas dos o más de estas fases. También se encuentran los puntos: eutéctico, eutectoide, y peritéctico.

Para identificar el proceso de solidificación de un acero y su estructura final, se traza una línea vertical en el porcentaje de carbono correspondiente en el eje de C% y se observa su comportamiento a medida que la temperatura va disminuyendo.

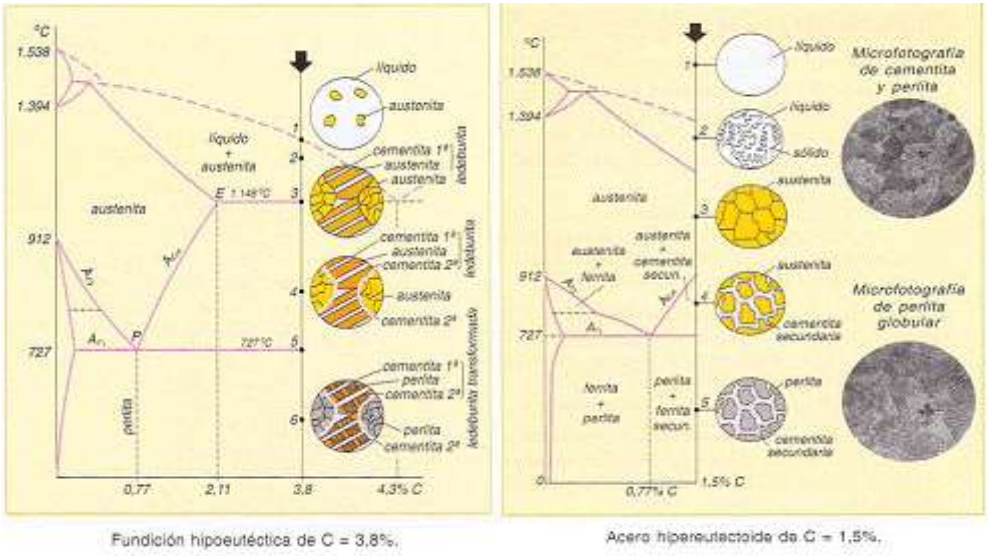


Figura 2: Ejemplos de estructuras de aceros según su composición en el diagrama Fe-C. [7]

Las anteriores figuras son ejemplo de aceros hipereutectoides de porcentajes de carbono de 3.8% y 1.5%, y es claro notar que las estructuras finales son totalmente distintas y así mismo será su comportamiento.

Diagrama TTT (Tiempo, Temperatura, Transformación)

Los diagramas TTT o diagramas de transformación isotérmica, son gráficas de temperatura contra tiempo, existentes para cada porcentaje de carbono en los aceros y aceros aleados, su construcción es totalmente experimental y son útiles para entender las transformaciones de la estructura de un acero. Sirve para lograr anticipar un resultado de la estructura del material y por lo tanto las cualidades aproximadas resultantes. Este gráfico es el complemento del diagrama de fase hierro-carbono ya que muestra las posibles microestructuras y el tiempo en alcanzarlas.

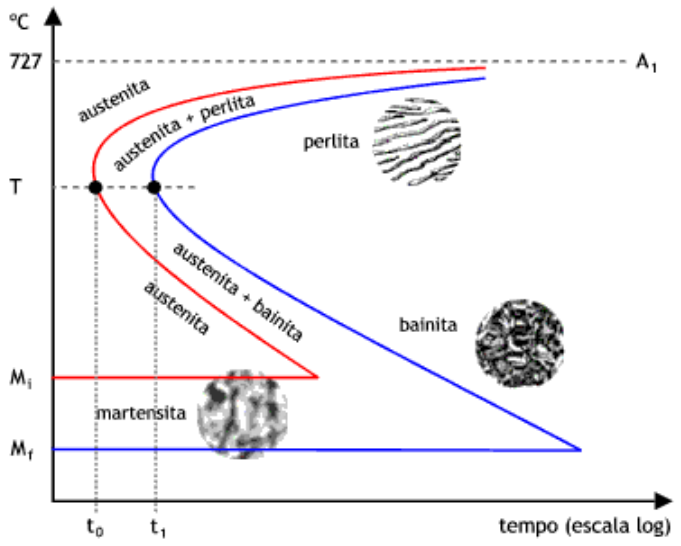


Figura 3: Diagrama TTT. [8]

La teoría del funcionamiento de este diagrama consta de llevar el metal encima del punto de austenización, con base a la microestructura que se quiera obtener dejar que el material alcance la temperatura de conversión (en este caso T) y mantenerla entre un tiempo t_0 y t_1, basado en el Mi y Mf esto con el fin de que entre en un proceso de cambio de microestructura. Por eso su nombre es diagrama de transformación isotérmica porque se mantiene la temperatura mientras se produce la transformación de las fases.

Aunque también puede utilizarse este diagrama para saber la microestructura en un enfriamiento continuo no es recomendable, para aplicaciones donde se necesite conocer el porcentaje exacto porque este diagrama no da esos valores en este tipo de enfriamiento.

Diagramas por enfriamiento continuo (CCT)

Debido a que en la práctica un tratamiento isotérmico son muy difíciles de conseguir debido a que se necesita un enfriado parejo por la pieza en altas velocidades, desde la temperatura de austenización y luego en una temperatura T mantener el calor, desde luego es un proceso que requiere una precisión

computarizada debido a la “inercia” calorífica (estabilizar la energía libre no es sencillo). Por esto la mayoría de tratamientos térmicos del acero involucran un enfriamiento continuo hasta la temperatura ambiente.

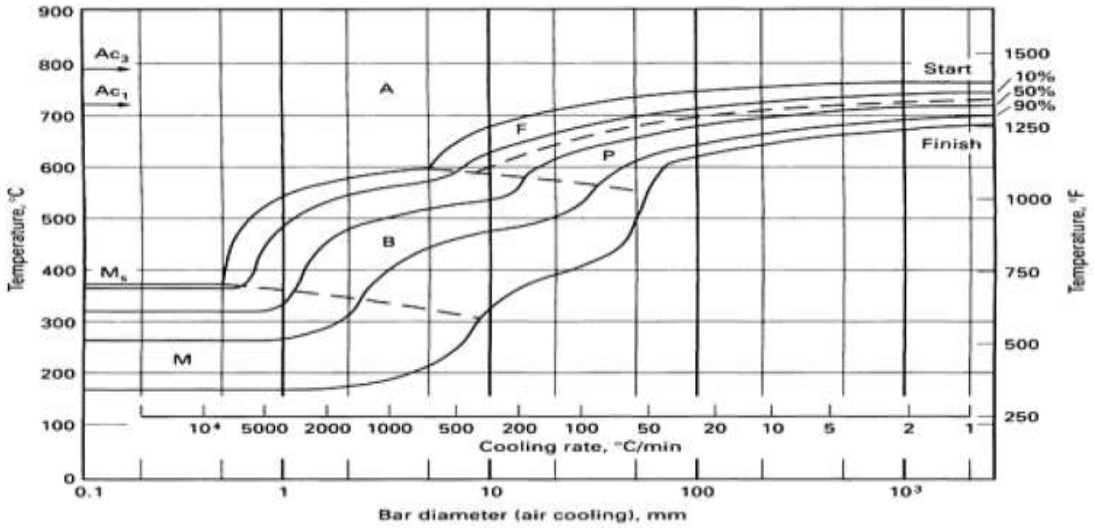


Figura 4: CCT de acero 4130 (temperatura vs velocidad de enfriamiento)

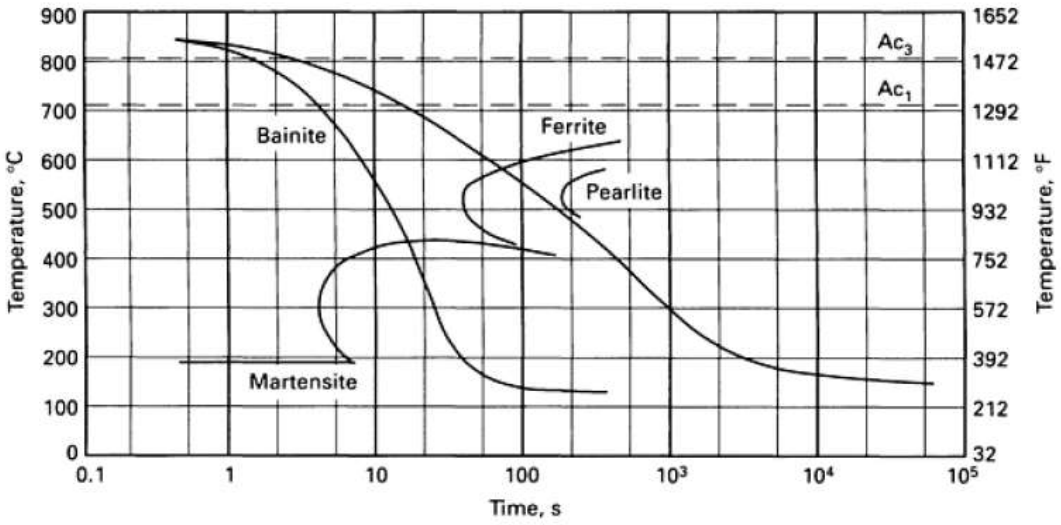


Figura 5: CCT de acero modelado por software (temperatura vs tiempo)

Estos diagramas pueden ser encontrados con la velocidad de enfriamiento, con una temperatura de partida estable o como su tiempo de enfriamiento, la microestructura se puede conocer debido a que es la suma de todas las líneas de formaciones microestructurales que atraviesen en el enfriamiento.

Al final los diagramas CCT y TTT son un pequeño punto del diagrama de fase con la añadidura del parámetro del tiempo.

COMPONENTES DE LA ESTRUCTURA DE LOS ACEROS

Los aceros están conformados por dos grandes componentes el hierro y el carbón, pero es la distribución y composición del porcentaje de carbono en su estructura lo que genera un cambio en sus propiedades mecánicas, gracias a este conocimiento se logró clasificar y refinar el proceso de creación del acero.

Al estudiar la composición y distribución bajo un microscopio se encontró que a niveles muy pequeños, imperceptibles al ojo humano existían patrones, de esta forma, al realizarse varios estudios se determinó que estas fases se podían predecir con la composición del material y su tiempo de enfriamiento.

Ferrita

Es el resultado de la solución sólida de carbón en el hierro alfa, su solubilidad es de aproximadamente 0.008% de carbono y de 0.02% a 723°C. Se caracteriza por ser altamente maleable y tenaz a pesar el constituyente más blando. Puede visualizarse mediante ataques metalográficos y se distingue como granos amorfos de color claro o blanco (Fig. 6)

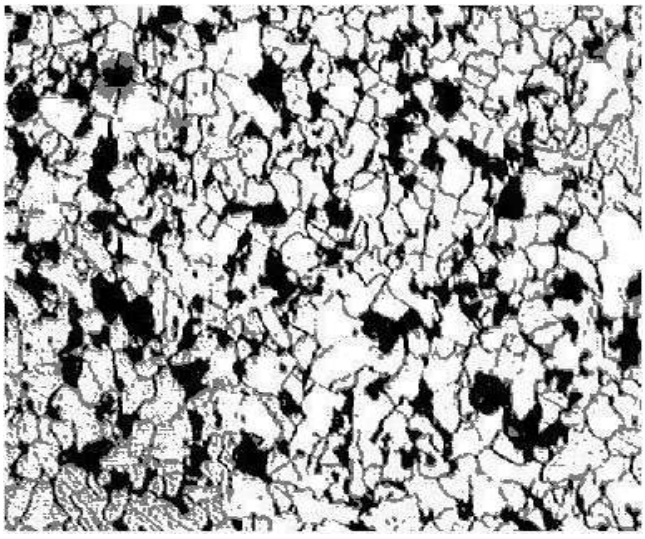


Figura 6: Ferrita [9]

La ferrita puede aparecer también formando una malla que rodea los granos de perlita; en forma de agujas o bandas circulares orientados en dirección de los granos de austenita o como eutectoide de la perlita como láminas intercaladas con cementita, todo dependiendo del porcentaje de carbono en el acero que se analice. También pueden verse combinadas con la martensita en resultado de un temple incompleto. [10]

Perlita

Formado por capas alternadas de ferrita y cementita, compuesta por el 88 % de ferrita y 12 % de cementita, contiene el 0.8 %C. El nombre de perlita se debe a las irisaciones que adquiere al iluminar, parecidas a las perlas. La perlita aparece en general en el enfriamiento lento de la austenita y por la transformación isotérmica de la austenita en el rango de 650 a 723°C.

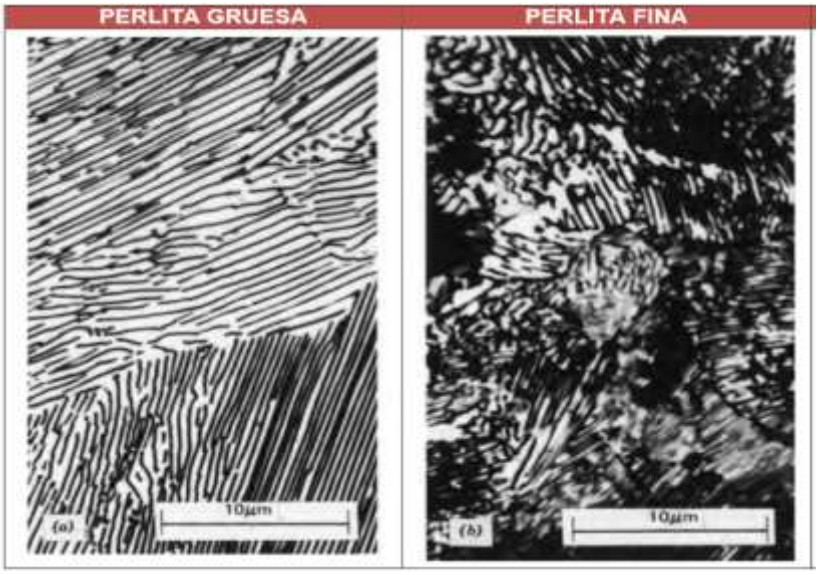


Figura 7: Perlita (a) gruesa (b) fina. [11]

Si la perlita laminar se somete a un recocido a temperatura próxima a 723°C, la cementita adopta la forma de glóbulos incrustados en la masa de ferrita, denominándose perlita globular.

Martensita

La martensita es una estructura deformada porque tiene exceso de átomos de carbono, es una solución sólida porque consta de una estructura cristalina y admite átomos sustitucionales o intersticiales. Ocurre sin difusión, no hay movimiento de átomos de carburo (adifusional). Esta fase es producto de un enfriamiento brusco de la solución sólida, lo que causa un movimiento de corte en la red de la estructura. Cuando se observa en el microscopio se visualiza como agujas o fibras rectas y paralelas separadas por una matriz granular. Sin embargo la martensita es visible sólo si el porcentaje de carbono es considerablemente alto para que se vea como hilos de paja en montón. Es la estructura más dura y más frágil, dureza entre los 50 y 68 HRC. [12]



Figura 8: Martensita en estado primario (izquierda) y revenido (derecha) [11]

Austenita

Este es el constituyente más denso de los aceros, y está formado por la solución sólida, por inserción, de carbono en hierro gamma. A temperatura ambiente no es estable excepto en algunos inoxidables. Es dúctil es blanda y dúctil, y se forja a los 1100ºC, cuando la fase austenítica es estable. [13]

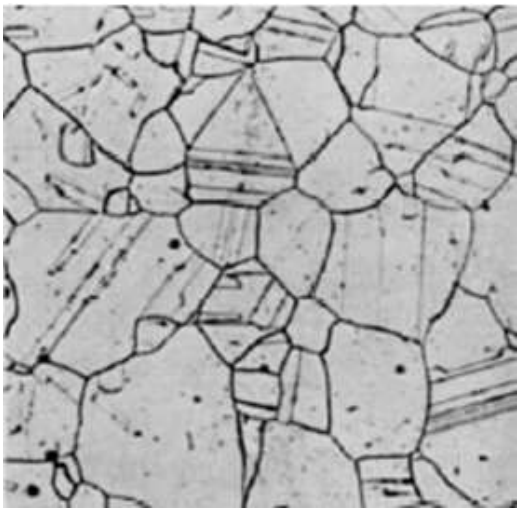


Figura 9: Austenita a x500 [14]

En el temple siempre tiene austenita retenida (enfriamiento rápido) pero al no tener buenas propiedades por ser inestable a temperatura ambiente se utiliza el revenido para cambiar esta estructura del metal.

Sorbita

Es un agregado fino de cementita y ferrita. Se produce por transformación isotérmica (600°C-650°C), Se denota como láminas más finas que la troostita y también similares a la perlita. Con pocos aumentos aparece en forma muy difusa como manchas, pero con 1000X toma la forma de nódulos blancos muy finos sobre fondo oscuro, de hecho tanto la troostita como la sorbita pueden considerarse como perlita de grano muy fino. Normalmente aparece en aceros forjados y laminados en los que la velocidad es muy lenta para ser un temple pero tampoco tan lenta como para formar perlita.

Bainita

Es una mezcla de ferrita y cementita la bainita se forma de una transformación de la austenita en un proceso que se basa en mantener la temperatura entre 250°C y 550°C, se puede presentar en aceros aleados. No se produce accidentalmente en un temple donde la velocidad sea diferente a la especificada, la dureza aumenta con la concentración de carbono.

La estructura de la bainita está dividida en dos formas, las cuales dependen de la temperatura de transformación a la que se haya tratado, estas son:

Bainita superior: Se forma en las temperaturas inferiores a la perlita, se compone por agujas o bastones de ferrita y no en forma de placas, se encuentra principalmente en los aceros aleados. Se parece a la martensita debido a que la estructura es demasiado fina y al atacarse se visualiza como un material claro.

Bainita inferior: La estructura de la bainita inferior es de alguna manera similar a la martensita ligeramente templada. En la formación la ferrita se produce a partir de la austenita por desplazamiento de corte y luego se precipita la cementita al interior de la ferrita. Se observa en el microscopio en forma de placas oscuras. Los carburos son extremadamente finos esta tiene a ser más tenaz y a ser más resistente.

Carburos

Son compuestos que se forman a partir de la unión del carbono con otro elemento presente en la solución sólida del acero. Los carburos, principalmente los carburos metálicos, son agregados a la aleación con el fin de mejorar las características de la aleación. [15]

Los carburos solo se forman con los elementos que, en la tabla periódica, se encuentran a la izquierda del hierro, debido a su disponibilidad en el subnivel electrónico d, por ejemplo el titanio, vanadio, cromo, molibdeno, wolframio, entre otros. En los aceros pueden formarse carburos de dos tipos: I y II, donde la cementita es el principal carburo de tipo I.

Cementita

Se produce por efecto del exceso de carbono sobre el límite de solubilidad. Tiene una gran dureza, pero su plasticidad es muy baja, prácticamente nula. Estas propiedades son, probablemente, consecuencia de la compleja estructura de la red cristalina de la cementita. [16]

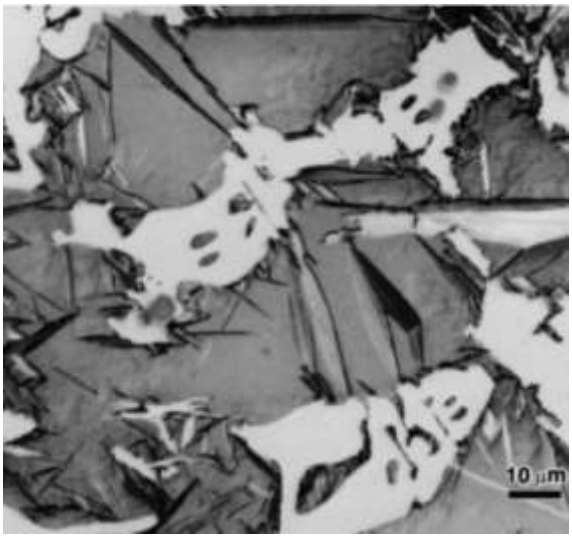


Figura 10: Cementita blanco [17]

DUREZA

La dureza es una medida para determinar qué tan resistente es un material sólido a varios tipos de deformación cuando una fuerza compresiva es aplicada, ya sea abrasión, rayado, cortadura, las deformaciones permanentes entre otras. Esta propiedad es dependiente de otras propiedades como la elasticidad, plasticidad y la cohesión.

Los materiales como el metal son más duros que otros, todo esto se basa en la fuerza entre las uniones intermoleculares. Por esto es que la dureza de un acero está directamente relacionada con su estructura pero a niveles atómicos, en otras palabras su estructura cristalina. Sin embargo un metal puede contener más de un tipo de estructura cristalina. Todo esto debido a que su formación a un nivel microscópico es de varios granos compuestos de estas estructuras, todo esto pos la composición que manejen. Esto puede generar que pequeños granos sean más fuertes que otros debido a que su composición cristalina puede ser pura y no contener irregularidades, (átomos intersticiales, vacíos en la estructura y dislocaciones), por eso una gran forma de determinar qué grano es el que se está viendo es con una prueba no destructiva de micro dureza.

Medición de dureza

La dureza tiene tres principales métodos de medición, Por rayado, penetración o indentación e impacto o capacidad de rebote. Todas estas pruebas medidas en diferentes escalas.

La dureza por rayado es la medida de que tan resistente es una muestra de un material a su fractura o deformación plástica por la fricción de un objeto afilado. Este tabla se basa que entre mayor dureza sea un material rayara a un material menos duro y esta será su clasificación dentro de la tabla. La escala más común es la escala de Mohns, que es para la minería.

La dureza por rebote, también conocida por llamarse dureza dinámica, mide la altura del “rebote” de un martillo con punta de diamante, arrojado desde una altura al material. Este tipo de dureza está relacionada con la elasticidad. Las escalas utilizadas de medida son la escala de pruebas de dureza de rebote Leeb y la escala de dureza Bennett.

La dureza por indentación o penetración, es la resistencia a la deformación debido a una carga de compresión con un objeto afilado, esta es utilizada por los ingenieros en el campo de la metalurgia. Este test se basa en medir cuánto fue la deformación del material mediante las medidas dejadas por indentador. Las escalas que se utilizan son las Rockwell, Vickers, Shore y Brinell.

Microdurómetro

Un microdurómetro es un dispositivo que mide la dureza de una muestra de material, ejerciendo una fuerza con un indentador que consiste en una pirámide hecha de diamante. Este indentador se le aplica una carga de fuerza P y como la dureza del material es proporcional a 1.547P/d^2 donde D es la longitud en diagonal de la huella del indentador en la probeta, la cual se mide en el mismo dispositivo. Esta aplicación de carga es automática lo que elimina el factor humano en la factor mecánico de hallar la dureza del material, pero la medición de la huella dejada por el indentador y la especulación de la correcta calibración

de la máquina, al igual que las condición atmosféricas, dejan un lugar a la interpretación de operario de la máquina lo que puede significar diferentes resultados en la medición y de valores significantes debido a la escala que se maneja.

La principal aplicación de un microdurómetro es la verificación mediante la dureza de los componentes de las estructuras de los aceros, esto se nota en la escala que posee porque las mediciones llegan a ser de micrómetros.

II. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS METALOGRÁFICAS

Esta preparación de muestras se hace basados en la ASTM E3-11 [18] (Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens). Edición actual aprobada el 1 de Mayo, 2011. Publicado en Junio de 2011.

SELECCIÓN DE LA MUESTRA

La selección de la muestra es un paso sumamente importante, ya que de esto depende la veracidad de la prueba. La selección de la muestra debe hacerse según el tipo de ensayo o prueba que quiera realizarse y teniendo en cuenta la tentativa del resultado que se espera obtener, de esto se derivan tres posibles necesidades de estudio: Estudios generales o de rutina, análisis de falla y estudios para investigación. Estos últimos son los más exhaustivos, se utilizan para la caracterización del material para investigación y es el que nos interesa para este caso.

Corte y dimensionamiento de las muestras metalográficas

Uno de los pasos más críticos durante el proceso de estudio metalográfico es el corte de las muestras. Esto se debe a que durante este proceso se pueden generar aumentos de temperaturas no deseados que, sí son considerables, modificarán incontrolablemente la estructura del material y por lo tanto los

resultados se verán afectados. De tal modo que debe evitarse por completo el uso de cortes en seco u oxicortes que pueden destemplar o contaminar las muestras. Según la norma, se establece que el corte debe ser transversal al centro de la pieza, ya que esto facilita la visualización de impurezas y su distribución, e imperfecciones en la estructura del material.

Es por esto que el corte de las muestras se ha realizado utilizando la sierra metalográfica, una cortadora de disco abrasivo Mekton T41 para trabajo en humedad, disponible en el laboratorio de preparación metalográfica. Este proceso se llevó a cabo manteniendo un avance lento y una constante refrigeración, supervisando constantemente que el proceso se estuviera llevando a cabo según lo esperado. Las muestras son cortadas de dos varillas de una pulgada de diámetro y los cortes se realizan de aproximadamente pulgada y media de longitud.

Encapsulación de las probetas

Bajo la norma se especifica que se debe encapsular en resina (si se desea) la muestra para su mejor pulido y posterior almacenado. Esto se hace con resina en frío o resina caliente. En este caso la encapsuladora metalográfica de la universidad trabaja en caliente. Pero debido a las dimensiones de nuestra probeta se decidió no encapsular, puesto que las probetas no serían almacenadas y re-utilizadas en todo el proceso de prueba y resultado

Desbaste de las muestras

El desbaste es un proceso sucesivo en el cual se utilizan diferentes calidades de papel abrasivo o lija, en orden de mayor a menor tamaño de grano con el fin de obtener una superficie óptima para realizar el ataque. El objetivo principal de realizar el desbaste es la eliminación de capas de material y de residuos del corte, de este modo la micrografía no se verá interrumpida por imperfecciones y la imagen será clara y diferenciable.

Este proceso se llevará a cabo en tres etapas:

- Desbaste de homogeneización de la superficie (este proceso se ahorra gracias al corte con disco abrasivo).
- Desbaste intermedio con papel de lija de agua y en seco.
- Desbaste fino (Pulido final.)

El desbaste intermedio se realiza utilizando lijas de tamaño de grano desde 80 a 1000 dependiendo de la profundidad de las imperfecciones en la superficie. Siempre lijando perpendicularmente la probeta, en base a la última aplicación de la lija y removiendo el material residual. La velocidad de aplicación de la lija es inversamente proporcional a lo largo de la probeta, esto con el fin de que la probeta termine con un acabado totalmente plano y no existan curvaturas en la probeta que puede generar desenfoques en el microscopio.

Debe tenerse extremo cuidado con la fuerza aplicada durante los procesos de desbaste o de los residuos en las lijas, ya que no solo pueden producirse imperfecciones más profundas sino que se pueden desplazar capas superficiales, modificando la estructura original.

El desbaste fino se realiza en la pulidora metalográfica, que es disco con una superficie plana entre 20 y 40 cm de diámetro, que gira a una velocidad entre 500 y 600 revoluciones. Esta pulidora se utilizó adaptando las lijas entre 1200 a 2000, para obtener el mejor pulido posible y después se utilizó el paño.

El paño especial o telas para el pulido se clasifican por su textura superficial, esto basado en lo largo de las fibras o si no posee fibras desprendibles, las telas de mejor calidad no requieren un tratamiento previo antes de ser utilizadas, de tener una tela de textura irregular o fibras muy duras se recomienda hervir en agua.

El abrasivo debe tener como base un dureza relativamente alta, con granulometrías de alrededor 10 a 0,25 micras, debe tener formas irregulares con una gran cantidad de bordes, se puede conseguir el abrasivo en suspensión (diluidas en algún líquido) o en polvo.

La alúmina existe en tres formas cristalográficas distintas: alfa, beta y gamma. De ellas, la alfa y la gamma son las más empleadas como abrasivos. El abrasivo debe tener 15 gr por cada 100 ml de agua. [19]

El paño suministrado es de lana polar lisa una fibra sintética basada en petróleo, siendo un material hidrófobo debido a que retiene menos del 1% de su peso en agua, esto permite que las partículas del abrasivo se sedimenten en la superficie y puedan tratar la probeta para su acabado dependiendo del tamaño del grano abrasivo.

El abrasivo es Alúmina que es óxido de aluminio, que se encuentra primordialmente en arcillas. Este polvo de alúmina contiene partículas de máximo 0.3 micrómetros entre los puntos más lejanos, según el catálogo su uso es para el pulido final del brillo espejo.

TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Bonificado

La bonificación es el conjunto de procesos de temple y revenido que se le aplica a un material. El objetivo de llevar a cabo este proceso es mejorar la tenacidad, aumentar la resistencia a la tracción y eliminar las tensiones resultado de temple inicial. Los valores de resistencia a la tracción (en función de la sección transversal de la pieza) están entre 700 y 1000 N/mm².

Sin embargo tiene inconvenientes para que la pieza sea posteriormente mecanizada, y aún más conseguir resultados óptimos regulares cuando el proceso de bonificado se produce en masa; debido a la necesidad de hacer el tratamiento por lotes y la dificultad de que el proceso se lleve a cabo exactamente igual. [20]

Temple

El temple es un tratamiento térmico en el cual, como en los otros, el material se somete a un aumento de temperatura, un determinado sostenimiento de dicha temperatura y un enfriamiento rápido, a una velocidad establecida como crítica, y medio establecidos según el resultado que se espera obtener. El objetivo de realizar este proceso es, por medio del aumento de temperatura, obtener formación de austenita en el máximo del acero; y al enfriar, convertir la austenita en martensita.

Esto es en teoría, ya que en realidad la totalidad de austenita no se convierte en martensita, debido probablemente, a que no se consigue la velocidad de enfriamiento establecida en la teoría referente a las dimensiones de la pieza. Aunque puede deberse a que no se busque martensita, sino ciertos porcentajes de vainita u otros componentes en la microestructura.

El proceso de temple se lleva a cabo en dos principales etapas: calentamiento y enfriamiento. Durante la etapa de calentamiento es importante que se inicie con el horno a la temperatura más baja posible, con el fin de que la elevación de la temperatura de la pieza sea paulatina y constante, y lo más importante, lenta.

Para los aceros al carbono se recomienda temperaturas de hasta 850°C; el tiempo de sostenimiento de la temperatura, para piezas cuyo diámetro (D) sea igual o inferior a 25 mm, será de:

$$t(min) = 20 + D/2(mm)$$

Debe tenerse en cuenta de que el tiempo de sostenimiento a la temperatura máxima debe ser la mínima posible ya que esto influye en el crecimiento de grano. [21]

En el caso del enfriamiento, se busca que se realice lo más rápido posible con el fin de obtener un máximo de transformación austenita-martensita, y en algunos casos bainita.

Para el éxito del temple, es necesario tener en cuenta también el medio en el cual se realiza el enfriamiento, que puede aportar una velocidad algo mayor a la crítica de temple; y cada uno aportará un resultado diferente. Estos medios pueden ser: agua, aceite mineral, vegetal o animal, o soluciones salinas.

Cuando se realiza temple a una pieza, lo que se está haciendo es una modificación a su estructura cristalina, lo que provocará variaciones en las propiedades originales; mejoran la dureza y resistencia mecánica, sin embargo el material se hará más frágil y menos tenas. [22]

Revenido

Este tratamiento térmico se realiza luego de templar para mejorar posibles condiciones de fragilidad y tensiones internas que puedan hacer fallar al material. Este proceso se lleva a cabo a una temperatura más baja de Ac1 (por encima de 600°C), manteniendo la temperatura según lo estipulado por el fabricante o según las propiedades que se deseen y se deja enfriar al aire.

En este proceso se obtiene una estructura de grano grueso, al bajar la temperatura de revenido, se van obteniendo estructuras cada vez más finas y más duras. [23]

Normalizado

El normalizado es un tratamiento en el cual se lleva la estructura a equilibrio, calentado rápidamente el material a una temperatura superior a la línea A3 y manteniéndola para luego dejarla enfriar al aire y de esta forma se recristalice y afine (descarburice y elimine impurezas) la perlita.

Para los aceros con alto contenido de carbono, el normalizado puede equivaler a una especie de temple, por lo que al final puede aparecer estructura perlítica o martensítica; mientras que en los de bajo carbono, este tratamiento tiene un resultado similar al recocido. Para casos de aceros cuyo contenido de carbono

varía entre 0.3 y 0.5%, someter al proceso de normalizado puede aportar más dureza al material.

El objetivo del normalizado es preparar el material para los procesos a los que se someterá, ya sea procesos mecánicos, otros tratamientos térmicos o ambas; además se subsanar tensiones resultado del conformado del material.

III. ATAQUE QUÍMICO DE LAS MUESTRAS

FUNDAMENTOS INICIALES

El objetivo de realizar un ataque químico a las probetas es utilizar la superficie pulida y realizar una micro corrosión seccionada con el fin de que se puedan diferenciar, por medio de una micrografía, la estructura del material. Para esto se utilizan combinaciones de ácidos diluidos en alcohol, agua u otros.

Para este proceso intervienen factores importantes como el tiempo de ataque, el método de exposición de la muestra al reactivo y el trato de la misma posterior al ataque.

Tener un control adecuado de los tiempos de ataque garantiza que el agente pueda avanzar en la estructura; si la exposición no es suficiente, el reactivo no diferenciará la estructura y si es excesivo terminará por opacar toda la muestra. Así mismo existen diferentes métodos de ataque, ya sea por inmersión continua o humedeciendo la muestra con algodón.

El principio del ataque radica en que, si el tiempo es debidamente controlado, el reactivo atacará rápidamente las primeras zonas atacables y las demás quedarán intactas lo que mostrará la diferencia visual.

REACTIVO NITAL (ÁCIDO NÍTRICO)

El nital es un reactivo comúnmente utilizado en la metalografía convencional debido a su fácil preparación y buenos resultados según la función que se le otorgó. El nital se prepara disolviendo aproximadamente 5ml de ácido nítrico en 100 ml de un alcohol (etanol o metanol), aunque existen diferentes versiones de nital dependiendo del porcentaje de ácido nítrico contenido en la solución.

Colorea los límites de grano de ferrita, dejando el grano en sí de color blanco; y oscurece las zonas perlíticas. Pueden diferenciarse también, en forma de puntos o granos más oscuros, los nódulos de ferrita. El ataque se realiza por inmersión entre uno y cinco segundos e inmediatamente se interrumpe el ataque con un chorro de agua, se limpia la probeta con alcohol y se deja secar

REACTIVO SEGÚN BERAHA TIPO I

Beraha realizó una clasificación de los reactivos según la forma en la que se deposita la película de color. El primer tipo, que será el que se utilice para este caso, efectúa su trabajo por medio de una película delgada que se deposita sobre las regiones anódicas de la estructura sin afectar a las demás. A este grupo hacen parte diferentes variaciones a base de metalbisulfito de potasio ($K_2S_2O_5$), metalbisulfito de sodio ($Na_2S_2O_5$) y tiosulfato de sodio ($Na_2S_2O_3$).

PROCESOS DE ATAQUE

Según lo consultado, para cada caso en que se utilizó este reactivo, se realizaban pequeñas variaciones según la necesidad por lo que fue necesario que se realizarán también variaciones a la norma original para conseguir los mejores resultados por medio de diferentes posibilidades. Dentro de estas posibilidades se variaron composiciones, tiempo y forma de aplicación del reactivo a las muestras con el fin de lograr un ataque uniforme. Originalmente se sugiere que se utilice 3 gr de metalbisulfito de potasio ($K_2O_5S_2$) y 1 gr de ácido sulfámico (NH_2SO_3H)

diluidos en 100ml de agua destilada [24] (la fuente no especifica el uso de agua destilada, sin embargo se decide utilizarse para evitar componentes no deseados y posibles alteraciones desagradables) y que la muestra sea sumergida por un lapso no mayor a dos minutos; sin embargo, tras utilizar esta versión se observó que la superficie no se atacaba completamente por lo que se decide probar aumentan el tiempo de inmersión pero sin resultados satisfactorios.

Por esta razón se decide iniciar con la variación de concentración de agente, donde de manera aleatoria se decide aumentar la masa de componentes directamente al doble y atacando impregnando la muestra y distribuyendo el agente por un tiempo igual al 12.5% del tiempo original y verificando los resultados. De esta experiencia se pudieron obtener imágenes cercanas a lo que se buscaba, pero también se pudo apreciar que el ataque no era uniforme, por lo que se repitió el proceso siguiendo lo estipulado de realizar el proceso por inmersión.

De esta última experiencia se obtuvieron resultados acertados respecto a lo que se esperaba, además de aclarar el procedimiento adecuado para este caso en específico.

El reactivo de Beraha no ataca uniformemente toda la superficie de las probetas si se encuentra cualquier impureza en ellas (restos de alúmina, alcohol o partículas de lija) por lo que se recomienda una limpieza delicada pero intensa, además de esto se denoto que al ser un ácido el Beraha es más agresivo a lo cual conlleva que cualquier tipo de rayón será amplificado debido a la retención de ácido en esa parte de la muestra, las probetas están listas cuando adquieren un color azul y amarillo.

IV. OBSERVACIÓN DE LAS MUESTRAS METALOGRÁFICAS

Para la observación de las diferencias, y más específicamente las fortalezas que tiene cada método para obtención de imágenes de microestructuras, se han realizado dos tratamientos térmicos de prueba: Normalizado y bonificado (temple y revenido), esto a los dos aceros a comparar (1040 y 4140) y se atacan con los dos reactivo seleccionados y se comparan uno a uno las imágenes obtenidas.

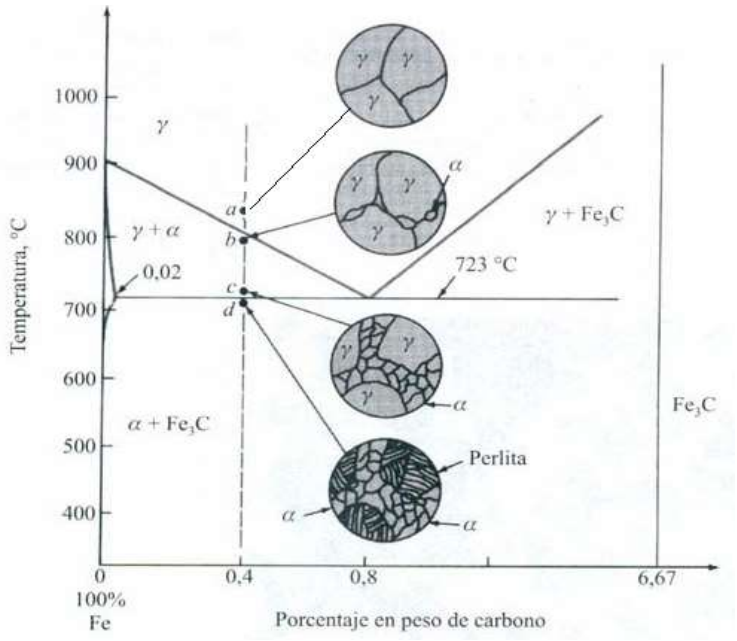


Figura 11: Transformación de un acero hipoeutectoide con 0.4% de carbono [25]

1040 EN ESTADO DE TEMPLE

Cuando se requiere un material resistente al desgaste a un costo considerablemente bajo, se somete a un tratamiento de calentamiento que supere la temperatura de austenización para luego ser enfriado en un medio determinado que puede ser agua, salmuera o aceite, ya sea en reposo o en agitación. Para este caso se han calentado las probetas hasta los 850°C para luego ser enfriadas

en agua agitada, con el fín de que la estructura resultante sea netamente martensítica al no cruzar la nariz de la curva como muestra la figura 12.

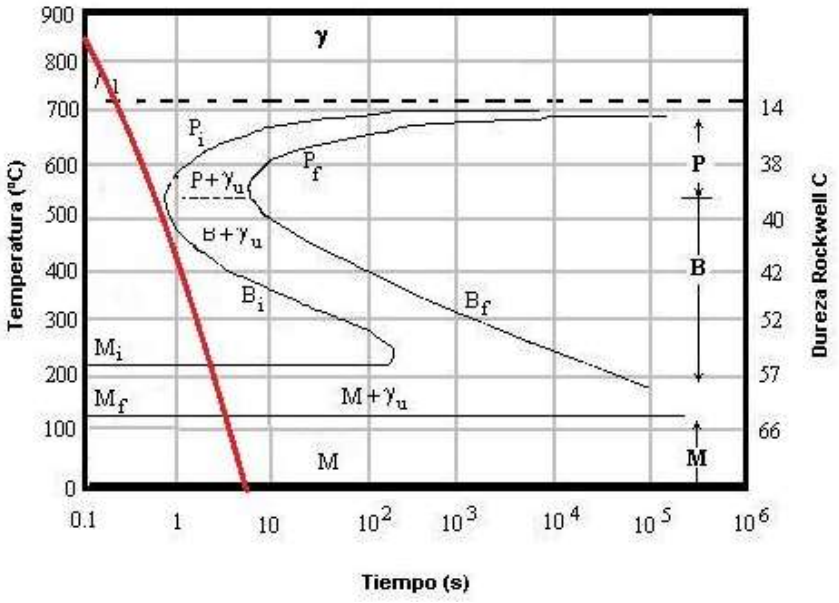
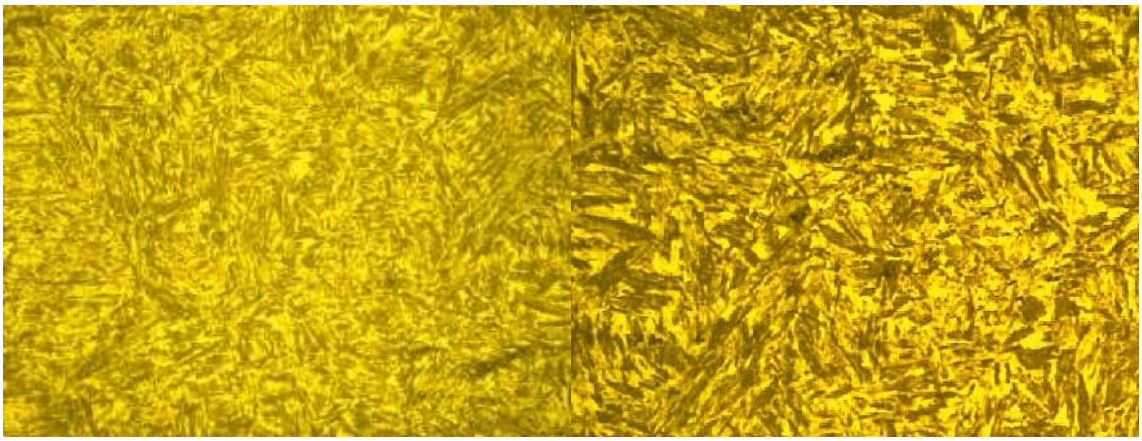
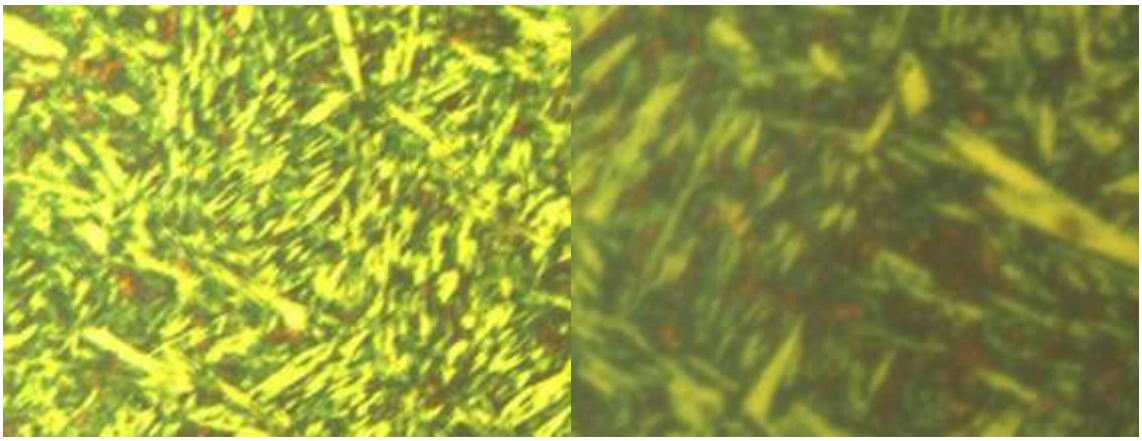


Figura 12: Diagrama TTT para un proceso de temple para acero 1040. [26]



(a) **(b)**

Figura 13: Acero 1040 en estado de temple atacado con Behara (a) 500x (b) 1000x



(a) (b)

Figura 14: Acero 1040 en estado de temple atacado con Behara (a) 500x (b) 1000x

Teórica y visualmente podemos afirmar que en la Fig. 13 y Fig. 14 se está observando que la muestra es monofásica de martensita, sin embargo en la figura 14 se pueden ver, de color cobre, un componente extra al esperado, que puede ser precipitación de carburos o impurezas. Lo que se puede verificar con la propiedad mecánica de la dureza. Para esto se midió en las probetas en 5 puntos diferentes en diferentes partes de una probeta no atacada por el reactivo, el resultado fue un valor de dureza de 57.28 Rc, como se puede ver en la tabla 3, el cual coincide con la dureza aproximada de la martensita para este material en la teoría.

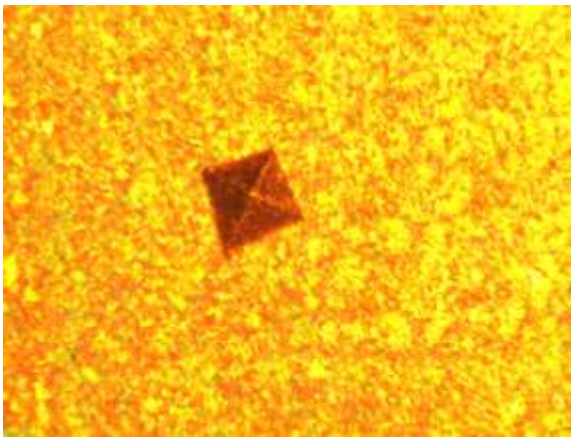


Figura 15: Muestra de la huella en acero 1040 templado

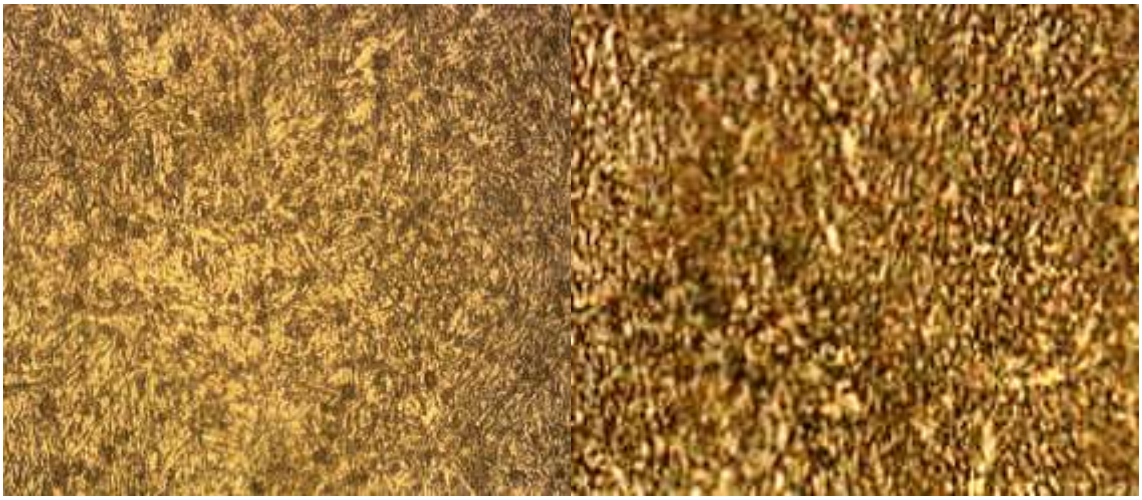
Acero templado 1040						
N° medición	1	2	3	4	5	Promedio
Dureza	57,0	59,9	58,0	56,9	57,8	57,9

Tabla 5: Resultados del microdurómetro acero 1040

1040 EN ESTADO BONIFICADO

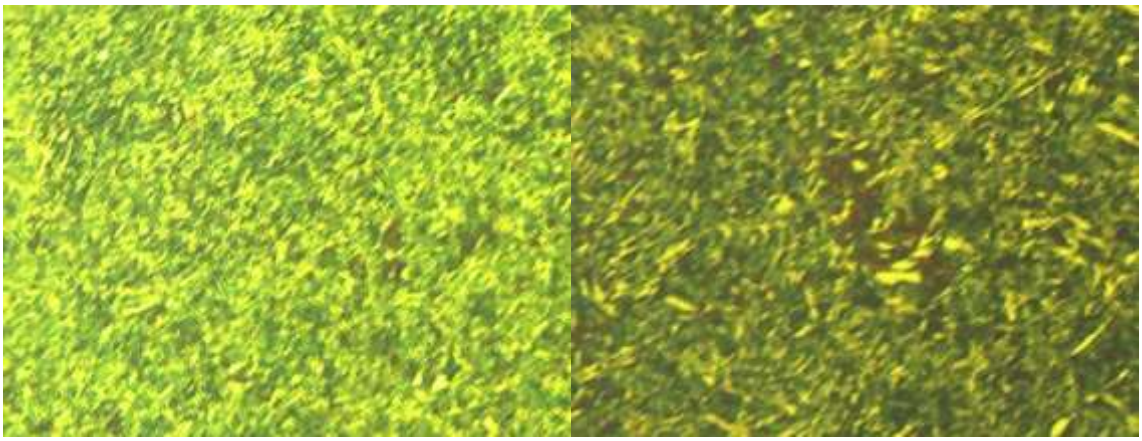
Como se ha especificado anteriormente, para el proceso de bonificado (temple y revenido) se han llevado las muestras de acero hasta 850°C, por encima de la temperatura de austenización, durante unos 30 min y se enfría rápidamente en un medio de agua (temple).

Luego del temple, se reviene, se lleva el material a 600°C y se deja enfriando al aire (revenido) para eliminar las tensiones internas de la estructura y disminuir la fragilidad, por lo que al final, la imagen que se espera ver es la figura 16 realizada con un ataque de Nital.



(a) **(b)**

Figura 16: Acero 1040 en estado bonificado atacado con nital (a) 500x (b) 1000x [27]



(a) **(b)**

Figura 17: Acero 1040 en estado bonificado atacado con Behara (a) 500x (b) 1000x

La figura 16 es una imagen de acero 1040 en estado bonificado y atacado con nital, en aumentos de 500 (a) y 1000 (b) donde puede distinguirse la forma de arroces que toma la martensita y las precipitaciones de carburos, característica de martensita revenida. La imagen obtenida con en Beraha pueden verse claramente la estructura modificada a causa del revenido, al igual que el de Nital, sin embargo podemos ver que identifica en un tono cobre algunas islas de impurezas (Fig. 17 (b)) que no pueden identificarse en la figura 16.

4140 EN ESTADO DE TEMPLE

Para lograr el tratamiento de temple para este material las muestras de acero se llevan a 850°C por encima de la temperatura de austenización y se mantiene la temperatura por 30 minutos, luego se enfría rápidamente hasta temperatura ambiente, introduciendo las probetas en algún medio de refrigeración. Se determinó el tiempo de enfriamiento basado en los diagramas TTT y CCT, y a partir de esa velocidad se determinó que el medio de enfriamiento es agua.

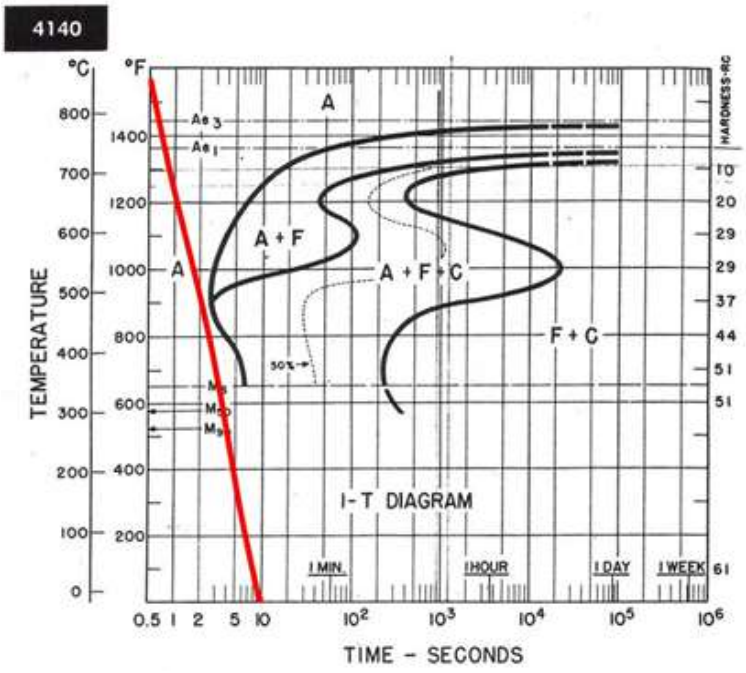


Figura 18: Diagrama TTT modificado con el proceso de temple para un acero 4140. [28]

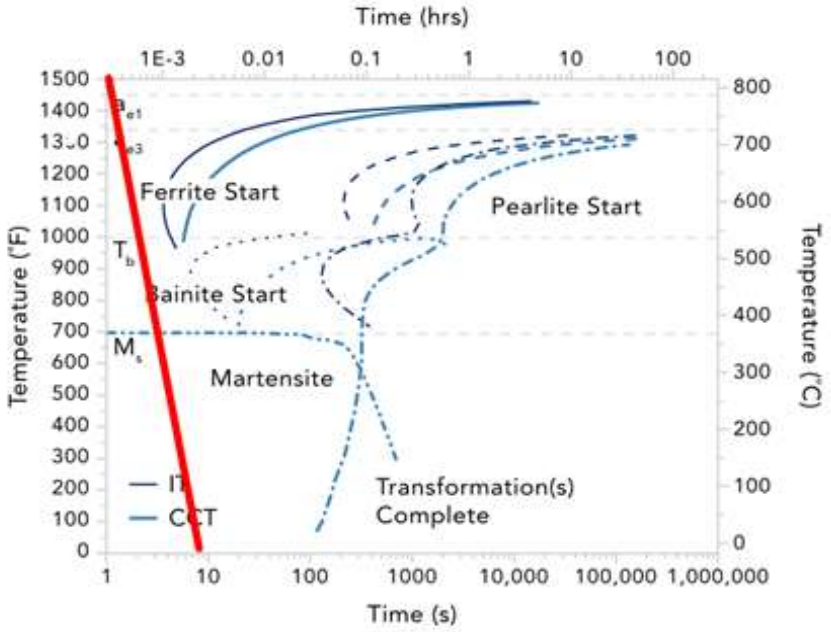
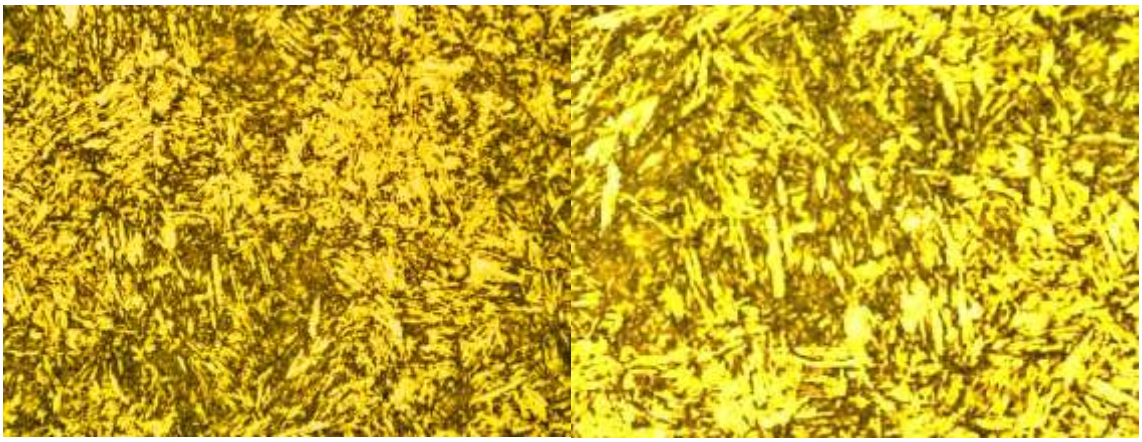
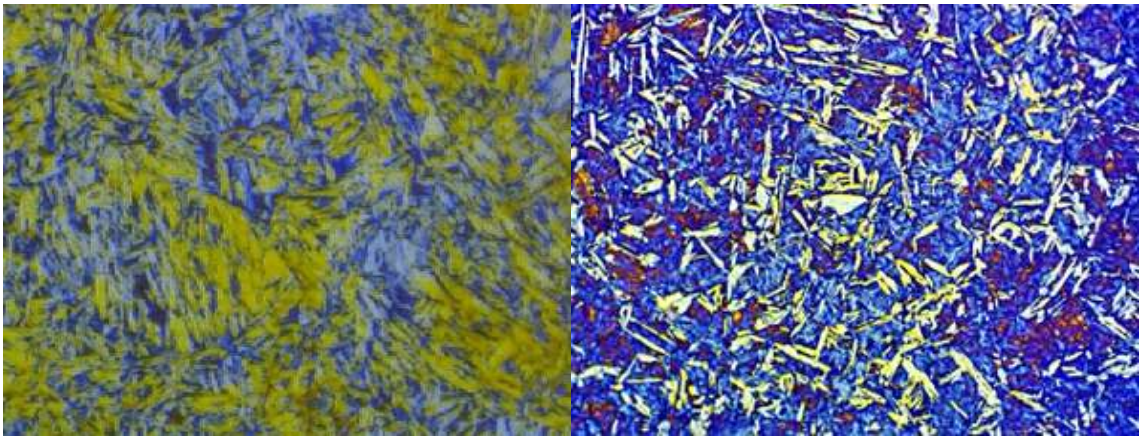


Figura 19: Diagrama CCT modificado con el proceso de temple para un acero 4140 [29]



(a) (b)

Figura 20: Acero 4140 con tratamiento de temple atacado con Nital. (a) 500x (b)1000x.



(a) (b)

Figura 21: Acero 4140 con tratamiento de temple atacado con Beraha. (a) 500x (b) 1000x.

La Fig. 20 y Fig. 21 se puede distinguir una mono fase de martensita gracias a su forma de agujas, esto como resultado del tiempo de enfilación del templado con base a los diagramas TTT y CCT. Se puede observar que el Behara logra resaltar muy bien la forma de agujas que posee la martensita además de una incrustación de impureza en la mitad de la imagen. Se hizo una muestra de microdureza para verificar por propiedades mecánicas, el resultado fue de 60.6 Rc lo que coincide con la dureza aproximada de la martensita según el catálogo del material.

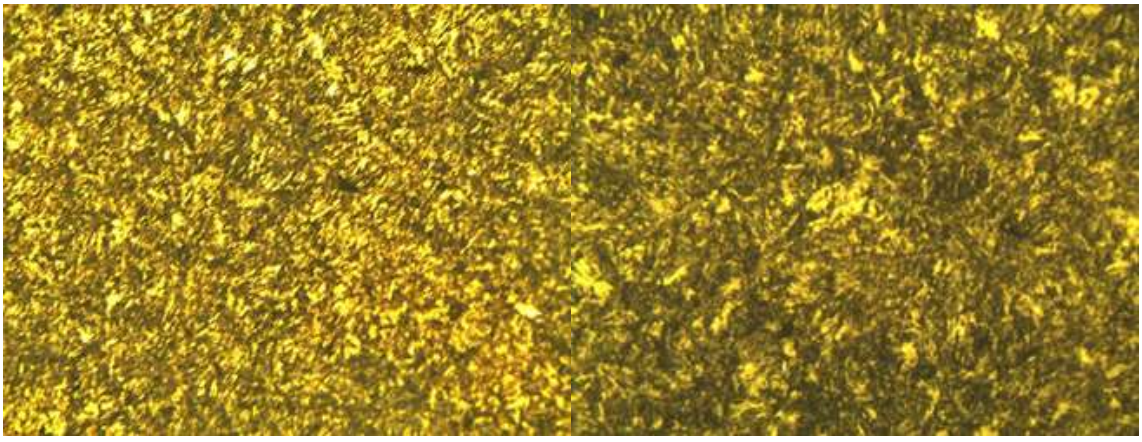
Acero templado 4140						
N° medición	1	2	3	4	5	Promedio
Dureza	60,4	60,7	60,8	60,6	60,7	60,6

Tabla 6: Resultados del microdurómetro acero 4140

4140 EN ESTADO BONIFICADO

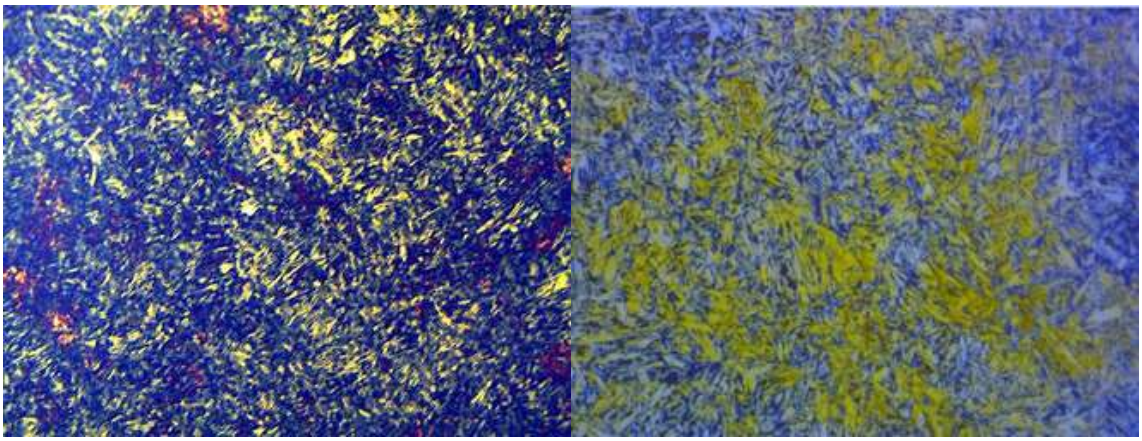
Para lograr la bonificación de este material después del temple se reviene el material calentándolo a 600°C y dejándolo enfriar al aire. Se determinó bajo por las temperaturas recomendados en el catálogo. Debido a que el revenido no cruza por la línea de iniciación de cambio de microestructura entonces el revenido también es una mono fase.

Su estructura debe asemejarse a la del 1040 debido a que tienen el mismo porcentaje de carbono, sin embargo discrepan debido a los componentes aleantes presentes en el 4140. Para este material se espera ver martensita revenida, resultado del temple y posterior revenido de las muestras.



(a) **(b)**

Figura 22: Acero 4140 en estado bonificado atacado con nital (a) 500x (b) 1000x



(a) (b)

Figura 23: Acero 4140 en estado bonificado atacado con beraha (a) 500x (b) 1000x

En la primera imagen (a) se pudo identificar que se trataba de una estructura de martensita revenida, por comparación con libros y otros trabajos como en la Fig. 22. Sin embargo en la imagen (b) puede verse nucleaciones de ferrita y cementita resultado del revenido de la martensita. Se entiende que esta estructura martensítica es resultado de la falta de tiempo para la difusión atómica, por lo que la estructura mantiene la misma composición (Ferrita α y Fe_3C), donde ya no se tendrá fase austenítica sino martensítica al enfriar por debajo de la temperatura M_f donde se forman agujas dentro de los antiguos granos de austenita.

Cuando la estructura martensítica es revenida, deja de ser en si martensita y se convierte en nucleaciones aleatorias y dispersas de ferrita y cementita, más exactamente finas partículas de cementita en una matriz de ferrita. La cantidad de cementita aumenta proporcionalmente con la cantidad de carbono del material, por lo que el material será considerablemente más duro.

Por el tipo de acero (medio carbono) la martensita tiene un muy buen porcentaje de carbono intersticial en su estructura. [30] Es posible obtener una dispersión excepcionalmente fina de Fe3C (conocida como martensita revenida) si primero se templa la austenita para producir martensita, y después se realiza el revenido. Durante el revenido, se forma una mezcla íntima de ferrita y cementita a partir de la martensita. El tratamiento de revenido controla las propiedades físicas del acero. [31]

4140 EN ESTADO NORMALIZADO

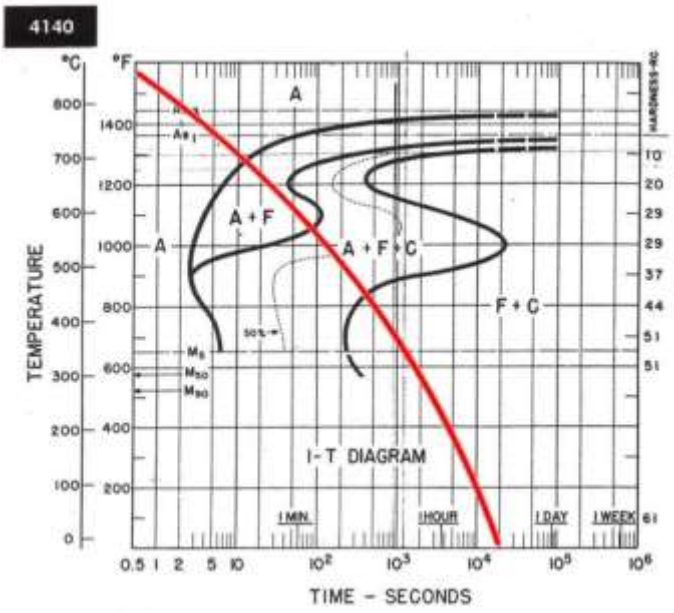


Figura 24: Diagrama TTT con el proceso de normalizado para un acero 4140.

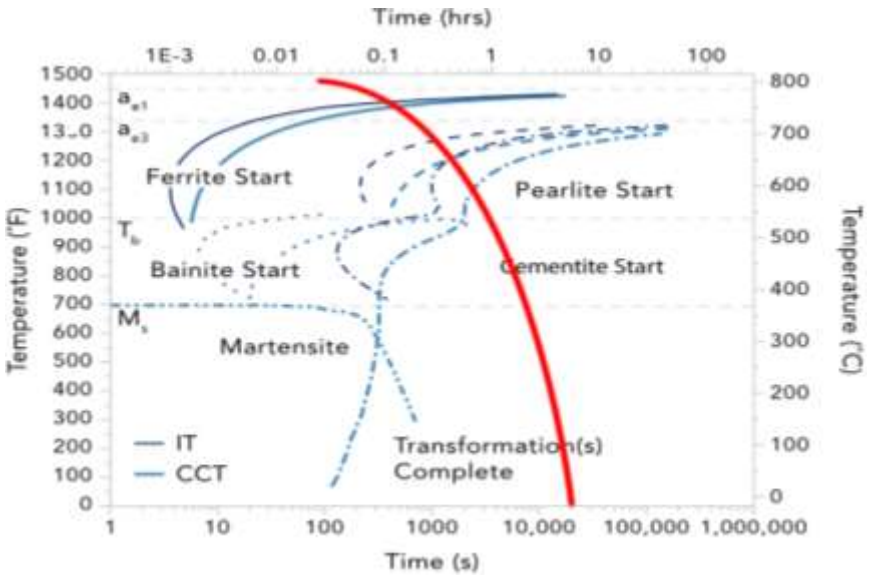
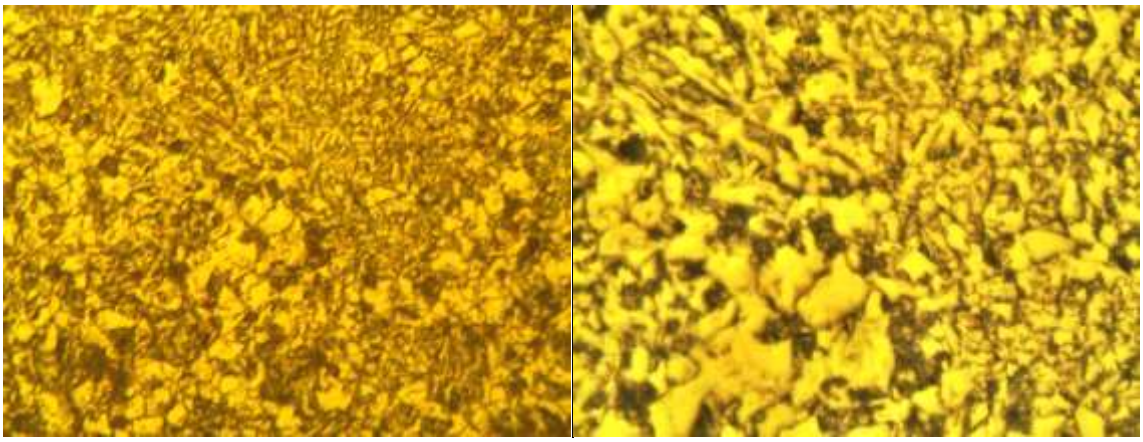
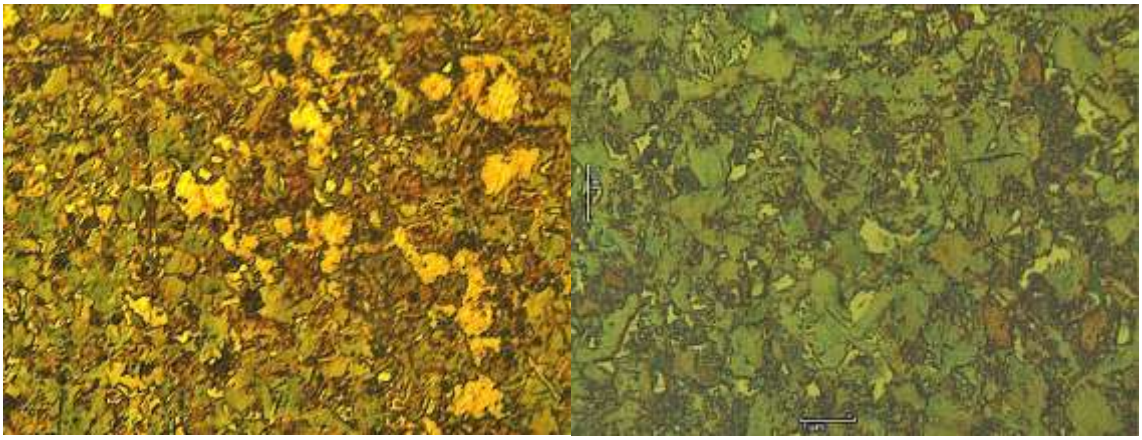


Figura 25: Diagrama CCT con el proceso de normalizado para un acero 4140



(a) (b)

Figura 26: Acero 4140 en estado normalizado atacado con Nital (a) 500x (b) 1000x



(a) (b)

Figura 27: Acero 4140 en estado normalizado atacado con Behara (a) 500x (b) 1000x

El acero 4140, luego de ser tratado, se espera encontrar teoricamente bainita y sorbita. La bainita es la estructura parecida a agujas en la foto a 500x mientras que la sorbita toma la fórmula de pequeños formaciones blancas en un fondo negro.

La bainita es la estructura que en la foto de 500x aumentos se ve como una gran sección borrosa y a 1000x se ven como agujas desordenadas con tendencia a volverse placas, Esto se debe a que la bainita es una matriz ferrítica con partículas alargadas de cementita, aunque la microestructura de la bainita es muy fina, que solo se puede ver a altas resoluciones que solo son captadas por un microscopio electrónico. Además, en la foto se puede notar que es un acero

tratado en un proceso de normalizado, enfriado al aire el cual en los aceros agrega más perlita fina, gracias a que este proceso homogeniza el material y el enfriado ayuda a la creación de colonias. Pero entre las transformaciones perlítica y bainítica solo una de ellas puede estar presente debido a que se compiten por los materiales presentes. Esto se denota en que la estructura de la foto no está homogeneizada si no al contrario hay grandes secciones de bainita y pocas de sorbita.

1040 EN ESTADO NORMALIZADO.

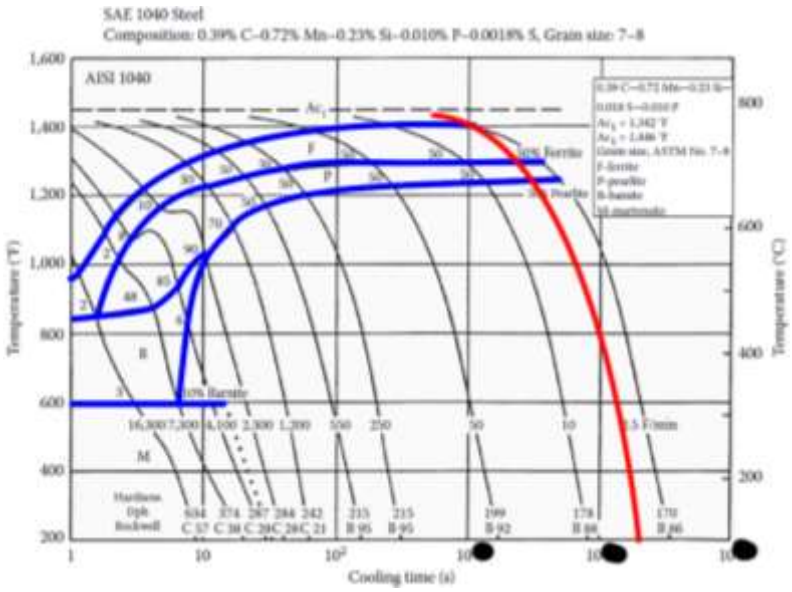
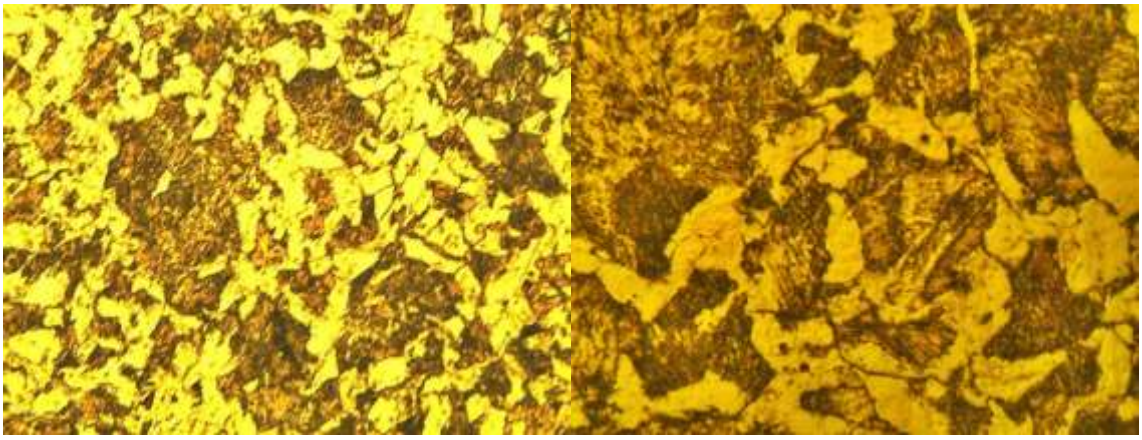


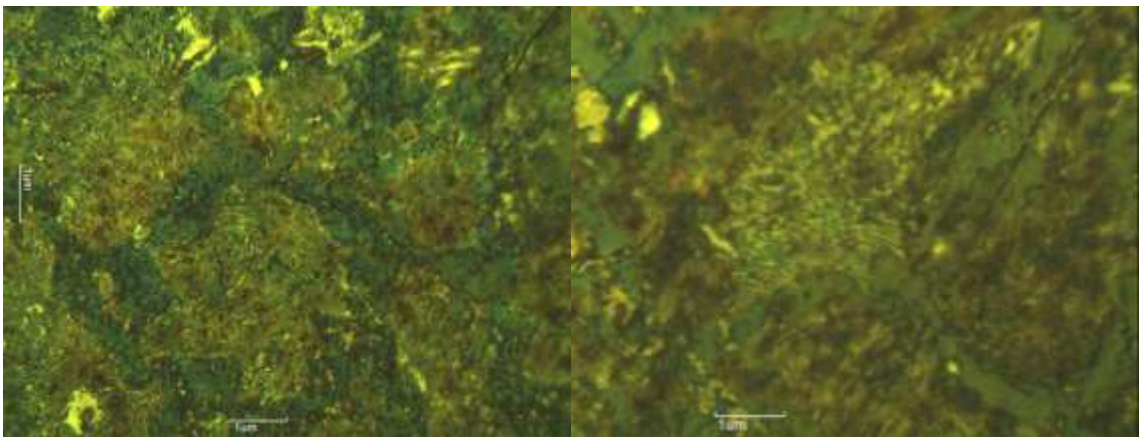
Figura 28: Diagrama CCT con el proceso de normalizado para un acero 4140



(a) **(b)**

Figura 29: Acero 1040 en estado normalizado (a) 500x (b) 1000x atacado con Nital

El acero 1040 luego de ser tratado, se constituye de perlita en matriz de austenítica (granos claros) rodeado de ferrita que se va a los intersticios. En ambas imágenes puede apreciarse los granos austeníticos, sin embargo en la figura 30 (b) pueden distinguirse con gran claridad las laminaciones de perlita.



(a) **(b)**

Figura 30: Acero 1040 en estado normalizado (a) 500x (b) 1000x atacado con Beraha

Además, en la figura 30, en ambos aumentos, se ven islas blanquecinas, correspondientes a otros componentes del acero, las cuales no son diferenciables en la figura 29.

V. CONCLUSIONES

- La principal diferencia entre los reactivos usados es claramente lo detalladas que son sus imágenes resultantes, ya que el nital solo demarcan los límites de grano, mientras que el Beraha nos da una mejor claridad con que pueden identificarse impurezas y carburos precipitados. Sin embargo puede concluirse que por cuestión de costos y de disponibilidad de los componentes, es recomendable utilizar el reactivo Nital, cuando se trata de tratamientos como el temple, donde pueden diferenciarse la única fase. En caso de requerirse un estudio más riguroso, mayor definición en los componentes del material o destacar dos o más fases, se recomiendo el uso de Beraha.
- La ventaja de las imágenes de la metalografía a color se nota con mayor claridad en las probetas con múltiples fases en su estructura, porque muestra con más precisión los límites de grano y los cambios de fase, y gracias a las gamas de colores que presente la imagen, es más fácil distinguirlas.
- La cámara juega un papel importante en la metalografía a color pero es recomendable trabajar sin filtros y sin efectos, debido a que la imagen puede procesarse mejor en su respectivo programa de captura.

VI. RECOMENDACIONES

- La preparación de las probetas para una metalografía a color, debe ser más riguroso si se va a utilizar reactivo Beraha I, debido a que los materiales utilizados para el reactivo atacan cualquier imperfección de forma muy agresiva lo cual hace que dichas pequeñas imperfecciones resulten como grandes manchas o rayones en las micrografías.
- Es necesario tener un control visual de la probeta además del control de tiempo durante el ataque con Beraha para evitar que esta se sobre ataque, así como el uso de agua destilada, ya que en pruebas realizadas con agua de la llave se obtuvieron resultados indeseados.
- Para futuros trabajos, se recomienda hacer pruebas con otros tratamientos térmicos y materiales, con el fin de identificar más opciones para las que el uso de la metalografía a color sea más apropiado, realizando la respectiva selección del reactivo para el material que se elija, instaurando pautas y corrigiendo concentraciones para que la universidad se incline hacia este tipo de guía para la enseñanza en pro de la academia.

GLOSARIO

Aleación: Proceso por el cual se mezclan dos elementos con el fin de obtener un tercer elemento nuevo, que adquiera las propiedades de los dos originales.

Alotropía: Es la propiedad que posee una sustancia de presentarse en diferentes estructuras moleculares. Las moléculas conformadas por un único elemento y diferente estructura moléculas entre ellas, se consideran alótropos.

Estructura cristalina: Forma como se ordenan los átomos de un elemento en estado sólido.

Eutectoide, Mezcla: El resultado de la formación donde sus componentes son solubles solo en estado líquido.

Eutectoide, Mezcla: Son el resultado de una formación donde los componentes están en estado sólido y su resultado es sólido. Cuando la mezcla eutectoide se enfría hasta la temperatura eutectoide, se transforma en dos fases sólidas α y β.

Fase: Parte o fracción de la materia que comparte las mismas propiedades químicas y físicas.

Impureza: Partícula que se incrusta en una mezcla que no hace parte de los componentes planteados.

Isotérmico, proceso: Proceso que se lleva a cabo manteniendo una temperatura constante.

Micrografía: Imagen que se toma utilizando un microscopio para revelar elementos muy pequeños.

Región anódica: Zona donde se produce corrosión.

BIBLIOGRAFÍA

[1] thyssenkrupp, «ThyssenKrupp Aceros y Servicios,» [En línea]. Available: http://www.thyssenkrupp.cl/archivos/SAE_-_4140.pdf. [Último acceso: 11 Octubre 2015].

[2] SUMINDU, S.A., «SUMINDU, S.A. Aceros Especiales e Inoxidables,» [En línea]. Available: http://www.sumindu.com/especificaciones/17-%201040.pdf. [Último acceso: 2015 Octubre 11].

[3] MatWeb, «MatWeb: Online Materials Information Resource,» [En línea]. Available: http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=20739ca4086741689a71a136fa7c459a&ckck&ckck. [Último acceso: 9 Octubre 2015].

[4] W. Callister, «Introduccion a la ciencia e ingenieria de los materiales,» Reverte S.A., 2000.

[5] C. A. d. T. p. l. Educación, «Demo de E-duactiva Catedu,» [En línea]. Available: http://e-ducativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/1000/1092/html/2_diagrama_de_aleacin_hierrocarbono.html. [Último acceso: 2015 Octubre 9].

[6] I. V. d. T. d. Teruel, «Departamento de Tecnología,» [En línea]. Available: http://tecno.iesvegadelturia.es/apuntes/tecind2/Tema_1/diagrama.html. [Último acceso: 11 Octubre 2015].

[7] E.-D. CATEDU, «Diagrama Fe-C,» [En línea]. Available: http://e-ducativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4910/html/6_diagrama_fec.html. [Último acceso: 28 Septiembre 2015].

[8] I. P. d. Valdivia, «Tecnología en la ESO,» [En línea]. Available: http://www.tecnologia-informatica.es/tecnologia/transformaciones-de-estado-solido.php. [Último acceso: 20 Septiembre 2015].

[9] U. d. l. republica, «Universidad de la republica Facultad de ingenieria,» [En línea]. Available: http://iie.fing.edu.uy/investigacion/grupos/gti/timag/trabajos/2002/acero/. [Último acceso: 19 Septiembre 2015].

[10] U. T. d. Pereira, «Aceros,» [En línea]. Available: http://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/7643_metalografia.pdf. [Último acceso: 17 Septiembre 2015].

[11] E. C. d. Ingenieria, «Escuela Colombiana de Ingenieria,» [En línea]. Available: http://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/7643_metalografia.pdf. [Último acceso: 17 Septiembre 2015].

[12] CIMM -Centro de Información de Metal Mecánica, «ACEROS,» [En línea]. Available: http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6439-transformacoes#.VhROEitSUWk. [Último acceso: 29 Septiembre 2015].

[13] Universidad Autónoma de Madrid, «ACEROS: ALEACIONES HIERRO-CARBONO,» [En línea]. Available: https://www.uam.es/docencia/labvfmat/labvfmat/practicas/practica4/fases%20del%20acero.htm#_top. [Último acceso: 1 Octubre 2015].

[14] Recopilacion, «METALOGRAFÍA – UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA,» UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA, [En línea]. Available: http://blog.utp.edu.co/metalografia/7-aceros-inoxidables/#parte6. [Último acceso: 2015 Octubre 07].

[15] M. G. M. O. M. A. J. E. L. E. L Agote, «Desarrollo de aceros reforzados con carburos primarios vía metalurgia líquida,» *Revista de Metalurgía,* pp. 53-57, 2005.

[16] EcuRed, «Cementita,» [En línea]. Available: http://www.ecured.cu/index.php/Cementita. [Último acceso: 03 Octubre 2015].

[17] ASM International, ASM Metals Handbook, 2004.

[18] ASTM INTERNATIONAL, *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens1,* 2012.

[19] Tecnológico de Monterrey, «Preparación de las probetas para obeservación metalografica,» [En línea]. Available: http://www.mty.itesm.mx/dia/deptos/im/m00-861/lecturas/lectp1m1.pdf. [Último acceso: 15 septiembre 2015].

[20] Jörn Rohde, «Rohde Schutzgasöfen GmbH,» 2012. [En línea]. Available: http://www.rohdetherm.de/es/verfahren/verguten/. [Último acceso: 31 Octubre 2016].

[21] Universidad Tecnológica de Pereira, «Tratamientos térmicos de los aceros,» [En línea]. Available: http://www.utp.edu.co/~dhmesa/pdfs/clase9ptt.pdf. [Último acceso: 31 Octubre 2016].

[22] Universidad Tecnológica de Pereira, «Temple y revenido en aceros,» [En línea]. Available: http://www.utp.edu.co/~publio17/laboratorio/temple.htm. [Último acceso: 22 Septiembre 2015].

[23] Universidad Tecnológica de Pereira, «Temple y revenido en aceros,» [En línea]. Available: http://www.utp.edu.co/~publio17/laboratorio/temple.htm. [Último acceso: 22 Septiembre 2016].

[24] ASM Metals, «Handbook V. 9 - Metallography And Microstructures,» p. 1253.

[25] COSMOLINUX, LINUX, [En línea]. Available: http://cosmolinux.no-ip.org/uned/unedcurset23.html. [Último acceso: 5 Octubre 2015].

[26] Departament of Engineering Desing, Indian Institute of Technology Madras, «Materials for Automobiles,» 18 Agosto 2011. [En línea]. Available: http://ed.iitm.ac.in/~shankar_sj/Courses/ED5312/Materials_for_Automobiles5.pdf. [Último acceso: 23 dic 2015].

[27] J. C. AVILA HERRERA, *ESTUDIO COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE ADHESIVO EN UN ACERO AISI/SAE 1040 CON TEMPLE Y REVENIDO,* Bogotá, 2015.

[28] The University of Vermont, «Phase Transformation and Microstructure,» [En línea]. Available: http://www.uvm.edu/~dhitt/me124/JominyNotes.pdf. [Último acceso: 1 Diciembre 2015].

[29] TimkenSteel, «4140HW meets AISI4140 standards and has improved hardenability and strength in heavier cross-sections,» [En línea]. Available: http://www.timkensteel.com/~/media/4140HW%20Alloy%20Steel%20Technical%20Data.as. [Último acceso: 2015 Diciembre 4].

[30] U-Cursos, «Ciencia de los materiales,» [En línea]. Available: https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2007/1/ME32A/1/historial/. [Último acceso: 26 septiembre 2015].

[31] Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, «Curso de Materiales,» [En línea]. Available: http://copernico.escuelaing.edu.co/lpinilla/www/protocols/MATE/TRATAMIENTO%20TERMICO%20rev1.pdf. [Último acceso: 1 Octubre 2015].

[32] U. T. d. Pereira, «ACEROS,» [En línea]. Available: http://www.utp.edu.co/~publio17/aceros.htm#austenita. [Último acceso: 2015 Octubre 01].