



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Determinación de los parámetros
empleados en los tratamientos
térmicos convencionales para los
aceros SAE 1018 y 1045**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

Roberto Montiel Campoy

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Carlos Alberto González Rodríguez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y en especial a la Facultad de Ingeniería, por brindarme las herramientas y recursos como parte de mi formación académica y profesional.

Al Dr. Carlos Alberto González Rodríguez, por ser una gran persona, un amigo, un profesor y un excelente mentor. Le agradezco su paciencia, sus conocimientos, sus consejos y sobre todo la confianza y compromiso que depositó en mí.

A mis profesores y profesoras que me compartieron su conocimiento fuera y dentro de las aulas, y que también me apoyaron y alentaron a dar lo mejor de mí durante mi trayectoria escolar.

A la empresa *Carpenter Aceros Fortuna*, Por la aportación del material empleado en esta investigación y por la confianza en la continua formación de profesionales en nuestro país.

Al M.C. Jorge Luis Romero Hernández, por su tiempo y apoyo en el desarrollo de las pruebas realizadas en este proyecto.

A mis sinodales, por tomarse el tiempo de leer y revisar de manera objetiva mi trabajo de tesis y por contribuir con aportaciones para la mejora de la misma.

Dedicatoria

A mis papás, por su cariño, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta este punto de mi vida y convertirme en lo que soy, agradezco la confianza que me brindan, así como cada palabra de aliento y su apoyo incondicional.

A mis hermanos, por siempre apoyarme y alentarme a cumplir mis metas, por escucharme y guiarme en los momentos más difíciles, y sobre todo por creer y confiar en mí.

A mis compañeros y amigos de la facultad de ingeniería, que hicieron que estos años fueran muy agradables y llenos de grandes momentos. En especial a Renata por acompañarme a lo largo de estos años, por ayudarme y alentarme y por siempre sacarme una sonrisa, sin duda una de las mejores personas y una gran amiga. A Mariza, por compartir momentos muy divertidos y por siempre confiar en mí. A Jorge, Carlos, Julio, Juan y Eduardo, por brindarme su amistad y apoyo desde primer semestre.

Resumen

En la presente investigación se analizaron los tratamientos térmicos convencionales desde un punto de vista termodinámico, donde se utilizan modelos matemáticos ya desarrollados previamente en la literatura para analizar los parámetros asociados a los tratamientos térmicos.

El diseño de los tratamientos se llevó a cabo a partir de conocer los valores de las temperaturas intercríticas, para que posteriormente se realizará una aproximación de la microestructura y dureza por medio de diagramas de fase y de los diagramas temperatura, tiempo, transformación (TTT). Así mismo se generaron dos alternativas de cada tratamiento al modificar el rango de las temperaturas, esto con el fin de conocer las variaciones en sus propiedades mecánicas.

Los materiales que se emplearon para llevar a cabo estos procesos fueron los aceros de comerciales SAE 1018 y 1045, los cuales son ampliamente usados en la industria.

Antes de realizar los tratamientos térmicos a los materiales propuestos, estos fueron analizados tanto en su microestructura y dureza, para conocer las características de ambos materiales a fin de obtener un punto como comparación, además se realizaron pruebas para determinar los efectos de la decarburización cuando estos se sometan a diferentes gradientes de temperatura. Por ello se decidió realizar una protección superficial (cobrizado), a fin de reducir los efectos de este fenómeno.

Posteriormente se realizaron los tratamientos térmicos, de temple y revenido, recocido y normalizado.

Finalmente se realizó una comparación de los resultados prácticos y los resultados esperados de manera teórica.

Abstract

In this research, conventional heat treatments were analyzed from a thermodynamic point of view, where mathematical models previously developed in the literature were used to analyze the parameters associated with heat treatments.

The design of the treatments was carried out from knowing the values of the intercritical temperatures, so that later an approximation of the microstructure and hardness could be made by means of phase diagrams and temperature, time, transformation (TTT) diagrams. Likewise, two alternatives of each treatment were generated by modifying the temperature range, in order to know the variations in their mechanical properties.

The materials used to carry out these processes were SAE 1018 and 1045 commercial steels, which are widely used in the industry.

Before performing the heat treatments to the proposed materials, they were analyzed both in their microstructure and hardness, to know the characteristics of both materials in order to obtain a reference. In addition, tests were performed to determine the effects of decarburization when these are subjected to different temperature gradients. For this reason, it was decided to perform a surface protection (copper plating), in order to reduce the effects of this phenomenon.

Subsequently, the heat treatments of quenching and tempering, annealing and normalizing were carried out.

Finally, a comparison was made between the practical results and the theoretically expected results.

Introducción.

La constante evolución en desarrollo de tecnologías en todo el mundo, crea cada vez más la necesidad de contar con materiales que puedan tolerar las exigencias que se requieren, está es la razón por la que es importante desarrollar nuevos materiales y mejorar los que actualmente se conocen. Ambos casos ya se estudian hoy en día, en donde ante la primera situación que se menciona, se han tenido avances en la obtención de nuevas aleaciones, materiales compuestos, superaleaciones, polímeros, cerámicos, etcétera, los cuales han generado un impacto positivo dado que sus propiedades físicas y químicas son óptimas para una aplicación determinada. Mientras que en el segundo caso se tienen a los materiales que son más comunes, entre ellos los aceros, los cuales han sido de los más estudiados a lo largo de los años y que han permitido el desarrollo de la mayoría de lo que en la actualidad se conoce, esto debido a las grandes transformaciones y propiedades mecánicas que se le pueden dar a estos materiales, pero no por esto se dejan de utilizar ni de investigar, de hecho datos de *World Steel*, indican que tan solo en 2021, la producción mundial de acero fue de 1,953.304 millones toneladas, pero eso no es todo, puesto que se tiene la perspectiva que para 2023 la producción tenga un crecimiento del 2.2%. Hablando de manera local, es decir en México, se estima una producción anual de 18,454 toneladas, por lo que CANACERO lo coloca al país como el 15vo productor en el mundo. [4]

En vista de la importancia del acero en el mundo a partir de su transformación para su aplicación dentro de todas las industrias existentes, se ha continuado su estudio a fin de encontrar la forma que permita obtener las mejores propiedades mecánicas. Una de las técnicas más usadas para lograr esto es por medio de tratamientos térmicos, los cuales son procesos que tienen por objetivo realizar un cambio microestructural a partir de un calentamiento, usualmente por arriba de la temperatura de austenización (Ac3), en donde se mantendrá el tiempo necesario para que ocurra alguna transformación de fase y finalmente se enfríen en algún medio según sea el tratamiento térmico que se aplique.

En los aceros los tratamientos térmicos más comunes que se encuentran en la industria:

- Temple, tratamiento que genera la dureza máxima en los aceros debido a que su velocidad de enfriamiento es muy rápida y a la transformación de fase.
- Revenido, tratamiento que se realiza posterior al tratamiento de temple, este tiene la característica de incrementar la tenacidad y disminuir las tensiones internas.

- Normalizado, tratamiento que se usa para homogeneizar la estructura y mejorar la maquinabilidad del material.
- Recocido, tratamiento que aumenta la ductilidad y disminuye la dureza a fin de mejorar las operaciones de trabajo en frío.

Aunque estos tratamientos térmicos se han explicado de manera general se puede entender la finalidad de cada uno de ellos, sin embargo, cabe mencionar que dentro de cada uno de estos tratamientos se han podido generar alternativas que mejoran al proceso, pudiendo obtener propiedades deseadas según sea la aplicación deseada.

Para el desarrollo de los tratamientos térmicos se cuenta con herramientas que permiten conocer lo que ocurrirá cuando el proceso se lleve a cabo, como es el caso de los diagramas de fases, diagramas temperatura, tiempo, transformación (TTT) y diagramas de transformación por enfriamiento continuo (CCT).

Como bien se menciona, existe la manera de predecir el resultado que se tendrá después de llevar a cabo un tratamiento térmico, sin embargo, esto no es del todo cierto, ya que existen factores que pueden sesgar el resultado, por ejemplo, se tienen las variantes principales como el tiempo, la temperatura y el enfriamiento, las cuales, si no se logra tener un control de ellas, el resultado se puede ver afectado. También se puede hablar de descarburización, inclusiones en el material e incluso fallas en los dispositivos térmicos. Es por estas razones que los ingenieros deben de generar un diseño que involucre la mayor parte de ellas, a fin de procurar obtener los mejores resultados del material, además de generar procesos que sean cada vez más eficientes en cuanto al uso de los recursos, principalmente de la energía que se emplea, todo esto con la intención de generar un menor impacto al medio ambiente, sin dejar de lado crear nuevas técnicas o mejoramientos que permitan un mayor desarrollo en el mundo.

Objetivos

Objetivo general.

Determinar de manera analítica las temperaturas intercríticas y parámetros necesarios para la ejecución de tratamientos térmicos convencionales en los aceros 1018 y 1045.

Objetivos particulares.

- Analizar información de distintas fuentes especializadas sobre tratamientos térmicos industriales aplicados a aceros de bajo carbono, con el fin de conocer los parámetros vinculados en cada uno de ellos, así como entender las transformaciones de fase que se suscitan en estos procesos.
- Determinar a partir de modelos matemáticos las temperaturas intercríticas de los aceros SAE 1018 y SAE 1045, además de generar los diseños de los tratamientos térmicos convencionales.
- Generar la ruta adecuada para la realización de los tratamientos térmicos de temple y revenido, recocido y normalizado, en los aceros SAE 1018 y 1045, mediante el uso de los diagramas de fases hierro - carbono, los diagramas TTT de los aceros y los parámetros obtenidos por los modelos propuestos.
- Comparar los resultados teóricos con los obtenidos prácticamente, para establecer si existen diferencias microestructurales, así como de propiedades mecánicas.

Contenido

Capítulo 1. Marco teórico.	1
1.1 Aceros al carbono.	1
1.1.1 Estructura cristalina de los aceros.	3
1.1.2 Diagrama Fe-C.	4
1.1.3 Transformaciones de fase en el calentamiento y enfriamiento de los aceros... 7	
1.1.4 Influencia de las impurezas en el comportamiento mecánico de los aceros. . 10	
1.2 Diagrama Temperatura–Tiempo-Transformación (DiagramaTTT).	10
1.3 Termodinámica y cinética en la metalurgia de los aceros.	12
1.4 Tratamientos térmicos convencionales en aceros.	14
1.4.1 Tratamiento de temple.	15
1.4.2 Tratamiento de revenido.	15
1.4.3 Tratamiento de recocido.	16
1.4.4 Tratamiento de normalizado.	17
1.5 Aplicaciones de la transferencia de calor en la determinación de parámetros de los tratamientos térmicos.	17
Capítulo 2. Planteamiento y desarrollo de la investigación.	19
2.1 Caracterización de los aceros SAE 1018 y 1045.	19
2.1.1 Acero SAE 1018.	19
2.1.2 Acero SAE 1045.	20
2.2 Determinación de las temperaturas Intercríticas.	21
2.3 Efecto de la descarburación por difusión del carbono (segunda ley de Fick).	23
2.4 Determinación de los parámetros de los tratamientos térmicos convencionales. ... 27	
2.4.1 Determinación de los parámetros de temple y revenido.	31
2.4.2 Determinación de los parámetros de normalizado.	44
2.4.3 Determinación de los parámetros de recocido.	50
Capítulo 3. Metodología.	57
3.1 Obtención del material.	57
3.2 Preparación de las probetas.	57
3.2.1 Corte.	58
3.2.2 Desbaste.	59
3.2.3 Pulido.	60

3.3	Caracterización del material base	60
3.4	Efecto del descarburizado.	62
3.4.1	Cobrizado.	62
3.5	Metodología de los tratamientos térmicos.	63
3.5.1	Temple y revenido.	63
3.5.2	Normalizado.....	64
3.5.3	Recocido.....	65
Capítulo 4.	Análisis de resultados	66
4.1	Caracterización del material base	66
4.1.1	Acero SAE 1018.....	67
4.1.2	Acero SAE 1045.....	68
4.2	Efecto de la descarburización y cobrizado.....	70
4.3	Resultado del temple y revenido.	74
4.3.1	Acero SAE 1018.....	74
4.3.2	Acero SAE 1045.....	77
4.4	Resultado normalizado.....	80
4.4.1	Acero SAE 1018.....	80
4.4.2	Acero SAE 1045.....	83
4.5	Resultado recocido.	86
4.5.1	Acero SAE 1018.....	86
4.5.2	Acero SAE 1045.....	88
4.6	Matriz de comparación de resultados.	92
Conclusiones	94
Perspectivas	97
Bibliografía	98

Capítulo 1. Marco teórico.

1.1 Aceros al carbono.

Los aceros son una aleación de hierro – carbono. El hierro como elemento puro suele dar características físicas como baja resistencia y ductilidad, pero al ser aleado con el carbono, estas propiedades se ven modificadas de tal manera que hacen al material duro y resistente. Pero esto dependerá del contenido de carbono que exista en la aleación, el cual puede variar desde un 0.003% hasta 2.11% en peso, según sea el requerimiento para la aplicación que se le dará al material. Bajo este último argumento se pueden encontrar tres clasificaciones que permiten identificar su uso. [1,2]

- Aceros de bajo carbono.

Estos aceros tienen un contenido de carbono comprendido entre 0.003 a 0.25%. Presentan una microestructura principalmente de ferrita y perlita. Este no permite obtener martensita a través de tratamientos térmicos, por lo que regularmente son endurecidos por carburización o por deformación en frío. Sin embargo, en este tipo de aceros se obtienen propiedades mecánicas como; excelente ductilidad y tenacidad, en contraparte al contener poco contenido de carbono el material poco resistente.

Estas aleaciones son usadas en la fabricación de: carrocerías de automóviles, vigas (en forma de I, canales y ángulos) y láminas para construir tuberías, edificios, puentes y latas estañadas. Estos aceros suelen tener un límite elástico de 275 MPa, una resistencia a la tracción comprendida entre 415 y 550 MPa y una ductilidad del 25%. [3]

- Aceros de medio carbono.

Estas aleaciones presentan un contenido de carbono entre el 0.25 a 0.6%. Son los más favorecidos por los tratamientos térmicos convencionales, obteniendo propiedades mecánicas como tenacidad y resistencia, pero no se logran altos niveles de dureza. Comúnmente presentan una microestructura de martensita revenida para uso industrial, con lo que se puede dar aplicaciones como la elaboración de engranes, cigüeñales y elementos similares que requieran una alta resistencia mecánica y resistencia al desgaste.

- Aceros de alto carbono.

En estos materiales el contenido de carbono es de 0.6 a 1.4%, presentan una mayor dureza y menos ductilidad en comparación con las dos categorías anteriores. A estas aleaciones es posible aplicar tratamientos térmicos convencionales para mejorar sus características físicas, en especial el temple y revenido. Estos son ampliamente utilizados en la fabricación de herramientas de corte y matrices debido a su dureza y su resistencia al desgaste.

Como se puede analizar el papel del acero en la vida cotidiana juega un rol muy importante, ya que tienen una gran participación en diferentes sectores de la industria (Figura 1), lo cual permite satisfacer necesidades en la sociedad. Si bien existen otros materiales distintos a las aleaciones ferrosas, estas siguen siendo las más importantes en la actualidad, debido a sus propiedades físicas y químicas que pueden aportar, además cabe destacar que son de los materiales con más tiempo de estudio, por lo que se puede tener una mejor predicción de su comportamiento a diferentes aplicaciones, sin dejar de lado que son materiales que pueden ser reutilizados e incluso que tienen un largo ciclo de vida si son protegidos adecuadamente.



Figura 1. Uso del acero en diferentes sectores industriales. [4]

1.1.1 Estructura cristalina de los aceros.

Los aceros presentan una gran variedad de propiedades según su composición química, las fases y microconstituyentes presentes, lo que eventualmente, depende del tratamiento térmico. [5]

En la Tabla 1, se aprecian las fases que se obtienen después de realizar un tratamiento térmico a un acero, las cuales se deben al contenido de carbono en el hierro, puesto que este se integra en la estructura cristalina como elemento intersticial.

Tabla 1. Fases y microconstituyentes en los aceros. [5-7]

Fase (microconstituyente)	Estructura cristalina de las fases	Características
Ferrita (Fe_{α})	BCC	Fase de equilibrio de baja temperatura, relativamente blanda. La máxima solubilidad es 0.02% de carbono a 727°C, y disuelve sólo 0.008% de carbono a temperatura ambiente. Tiene una resistencia a la tensión aproximada de 28 [Kg/mm^2], elongación del 40% por cada 2 pulgadas y una dureza Brinell comprendida entre los 90 HB.
Ferrita- δ (Fe_{δ})	BCC	Fase de equilibrio estable a alta temperatura, isomorfa con hierro α
Austenita (Fe_{γ})	FCC	Fase de equilibrio estable a temperatura media, relativamente blanda. Es una solución sólida de carbono en hierro gamma. La cual puede contener desde 0 a 1.7 % de carbono, por lo que se tiene un constituyente de composición variable. Esta fase está presente en todos los aceros cuando se calienta por encima de la temperatura crítica (Ac_3). Las propiedades promedio son: resistencia a la tensión, 105 Kg/mm^2 ; elongación, 10 % en 2 pulgadas; dureza de 40 HRC aproximadamente. Y tiene gran resistencia al desgaste.
Cementita (Fe_3C)	Ortorrónica compleja	Fase metaestable. Es un compuesto de hierro y carbono que comprende un 93.33% de hierro y 6.7% de carbono, es por eso que se tiene al constituyente más duro y frágil de los aceros, su dureza es superior a los 68 HRC, cristaliza formando un paralelepípedo ortorrónico de gran tamaño. Tiene una baja resistencia a la tensión ($5000lb/pulg^2$), pero una alta resistencia a la compresión y llega a ser magnética a temperatura por debajo de los 218°C.

Perlita		Microconstituyente metaestable; mezcla laminar de ferrita y cementita. Es de composición química constante y definida y contiene aproximadamente seis partes de hierro y una de carburo. La distancia interlaminar de la perlita sirve para clasificarla en: Perlita gruesa con una separación entre las láminas de unas 400µm con una dureza de 200 HB, la cual se obtiene por enfriamiento muy lento dentro del horno. La perlita normal tiene 350µm y 250 HB de dureza. La perlita fina, se obtiene cuando se enfría dentro del horno o cuando se deja enfriar el acero al aire, con esto se logra una dureza aproximada de 300 HB.
Martensita	BCT (solución sobresaturada de carbono en ferrita)	Fase metaestable de alta dureza, morfología de placas o agujas, según el % de carbono. Es un constituyente metaestable obtenido a partir de la transformación de la austenita, a través de velocidades de enfriamiento por encima de la crítica, como lo es el temple. Sus propiedades físicas varían con su composición, aumentando su dureza, resistencia y fragilidad con el contenido en carbono, hasta un máximo para 0,90 % aproximadamente. Después de los carburos y de la cementita, es el constituyente más duro de los aceros. Tiene una resistencia de 170 a 250 Kg/mm^2 , una dureza de 50 a 68 HRC.
Bainita		Microconstituyente metaestable duro; mezcla no laminar de ferrita y cementita en escala extremadamente fina; la bainita superior se forma a temperaturas altas y tiene aspecto plumoso; la inferior se forma a temperaturas bajas y su apariencia es acicular. La dureza aumenta cuando desciende la temperatura de formación.

1.1.2 Diagrama Fe-C.

Una vez revisadas las fases y microconstituyentes del acero, es necesario conocer la relación que guardan entre sí, cuando se someten a un cambio de estado, con el fin de tener el control y conocimiento de cada fase y por ende de su microestructura. Para esta situación se emplea el uso del diagrama de fases, el cual muestra las fases y sus composiciones para cualquier intervalo de temperatura y su porcentaje de carbono de la aleación en condiciones de equilibrio.

Para los aceros se utiliza, el diagrama de fases binario dado que solo presenta dos elementos en aleación y sus fases dependerán del porcentaje que contenga de cada uno de ellos. En la Figura 2 se muestra el diagrama de fases Fe-C, el cual muestra las fases que se tienen desde 0% hasta un 6.7% de peso en carbono, esto debido a que es el intervalo en donde se encuentran la mayoría de materiales comerciales (aceros y fundiciones) y de aplicaciones dentro de la ingeniería.

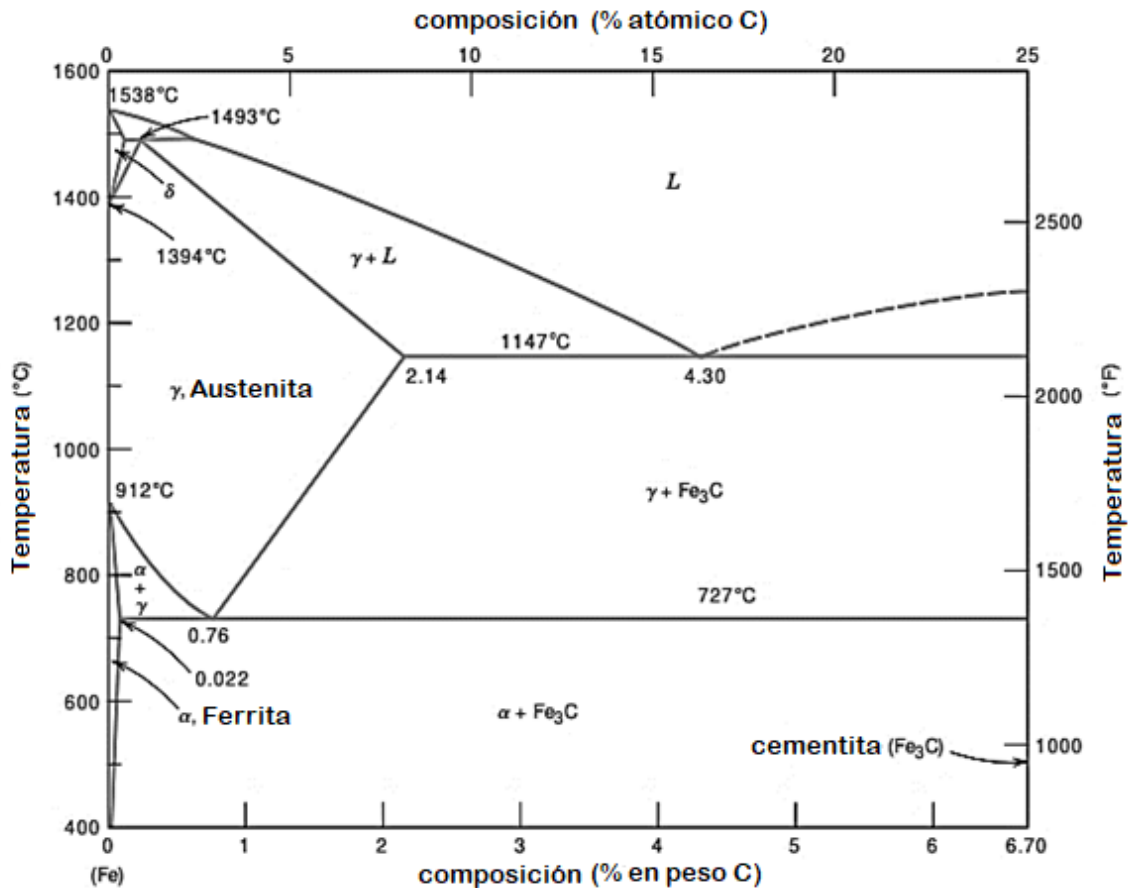


Figura 2. Diagrama de fases hierro – carburo de hierro [8].

Este diagrama permite conocer la microestructura o las fases que se tendrán en el acero, sin embargo, es necesario tener conocimiento de los puntos o zonas de interés, puesto que estas darán inicio o fin a las transformaciones de fases e incluso en algunas ocasiones estas definen los límites de transformación, las cuales dependerán del proceso que se lleve a cabo, es decir calentamiento o enfriamiento. Es por eso que es común encontrar diagramas que incluyen una nomenclatura generalizada para el estudio de los mismos. A continuación, se muestra la ubicación de dichos puntos en la Figura 3.

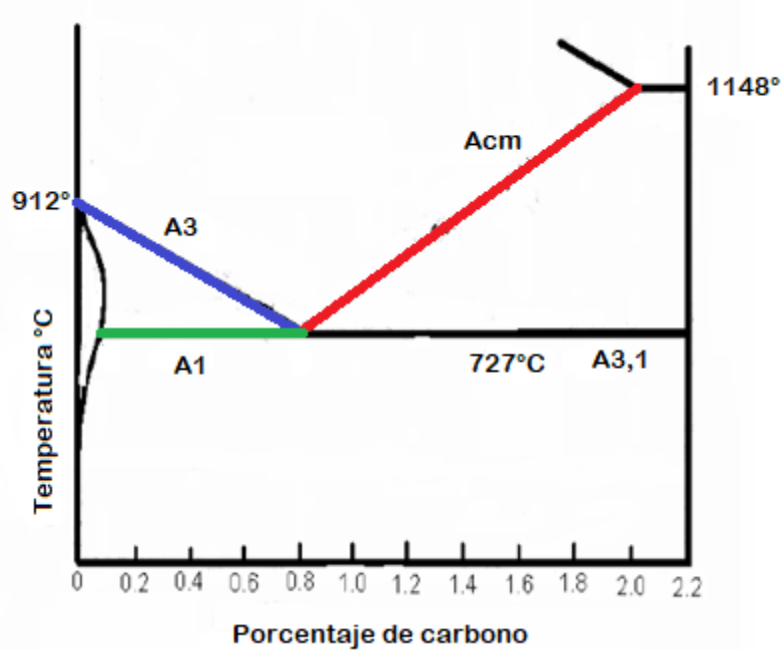


Figura 3. Temperaturas críticas en los aceros. [7]

La línea A₁ señalada de color verde, marca el fin de la transformación de la austenita a ferrita y perlita cuando se encuentra en enfriamiento en la zona de los hipoeutectoides. También se le conoce como la línea de temperatura crítica inferior.

La línea A₃ señalada de color azul, o también conocida como línea de temperatura crítica superior, marca el inicio de la transformación de austenita a ferrita cuando se habla de un enfriamiento.

La línea A_{cm} señalada de color rojo, marca el inicio de la transformación de la austenita a cementita. También se le conoce como la línea de temperatura crítica superior en la zona de los hipereutectoides.

Por último, se tiene a la línea A_{3,1} a esta línea también se le conoce como línea de temperatura crítica inferior, pero en la zona de los hipereutectoides. Entonces esta marca el final de la transformación de la austenita en perlita cuando se tiene un enfriamiento.

Adicionalmente se suele agregar un subíndice *c* o *r* (que derivan del francés *chauffage* y *refroidissement*, cuya traducción es calentamiento y enfriamiento respectivamente), los cuales se usan para indicar un corrimiento de las temperaturas a las cuales ocurre la

transformación, debido al tiempo requerido para la difusión o precipitación, y al hecho de que es impráctico aproximarse a un calentamiento o enfriamiento infinitamente lentos. [7]

A continuación, en la Tabla 2 se muestra la característica de cada punto con los subíndices correspondientes a cada transformación.

Tabla 2. Características de las temperaturas de transformación de fase utilizadas en los tratamientos térmicos. [9]

Temperatura de transformación: aquella a la que ocurren cambios de fase; algunas veces define los límites de un rango de transformación.
A_{cm}. En aceros hipereutectoides, límite de solubilidad de carbono en la austenita.
A_{c1}. Temperatura a la cual comienza a formarse austenita durante el calentamiento.
A_{c3}. Temperatura a la cual se completa la transformación de ferrita en austenita durante el calentamiento.
A_{ecm}, A_{e1}, A_{e3}. Temperaturas de cambio de fase en equilibrio.
A_{rcm}. En aceros hipereutectoides, temperatura a la que comienza la precipitación de cementita durante el enfriamiento.
A_{r1}. Temperatura a la cual se completa la transformación de austenita a ferrita o ferrita más cementita durante el enfriamiento.
A_{r3}. Temperatura a la cual la austenita comienza a transformar en ferrita durante el enfriamiento.
A_{r4}. Temperatura a la cual la ferrita- δ se transforma a austenita durante el enfriamiento.
M_s. Temperatura a la cual comienza la transformación de austenita a martensita durante el enfriamiento.
M_f. Temperatura a la cual finaliza la transformación de austenita a martensita durante el enfriamiento.

1.1.3 Transformaciones de fase en el calentamiento y enfriamiento de los aceros.

Transformaciones de fases en el calentamiento.

- Transformación Perlita – Austenita. Esta transformación se da cuando la perlita es calentada a un ritmo lento, puesto que si no se hace de esta manera se puede tener complicaciones en la transformación, tales como un retraso en el cambio de fase e incluso un sobrecalentamiento.

La transformación se caracteriza por la formación de austenita y la desaparición de la perlita. Para homogeneizar la composición química después que ocurra la transformación es necesario dar un tiempo de mantenimiento para que mediante los procesos difusivos la composición en carbono de la misma sea la constante en toda la austenita. [10]

- Transformación Perlita – Esferoidita. Si un acero con microestructura perlítica se calienta hasta una temperatura inferior a la eutectoide durante un período de tiempo largo, se forma una nueva microestructura denominada esferoidita, cementita globular o esferoidal. Las partículas de Fe_3C aparecen como esferas incrustadas en una matriz continua de fase α , en lugar de las láminas alternadas de ferrita y cementita de la perlita o de las partículas alargadas de cementita en una matriz ferrítica como es el caso de la bainita. Esta transformación tiene lugar mediante difusión del carbono sin cambiar la composición o las cantidades relativas de fases ferrita y cementita. La fuerza impulsora de esta transformación radica en la disminución del límite de fase $\alpha - Fe_3C$. Cabe destacar que la cinética de la formación de la esferoidita no está incluida en los diagramas de transformación isotérmica. [3]

Transformaciones de fases en el enfriamiento.

- Transformación Austenita – Perlita. Si un acero de composición eutectoide es enfriado por debajo de la temperatura eutectoide, entonces se puede transformar de austenita a perlita. El principio de la transformación da lugar en el límite de grano austenítico y continua hacia el interior del grano dejando partículas laminares a su paso, esto porque los átomos de carbono necesitan difundir la distancia mínima dentro de esta estructura. Los límites de grano en forma de esquina, seguidos de bordes de grano, límites de grano e inclusiones son los lugares donde se favorece a transformación. La región en la cual se encuentra la perlita está comprendida entre la temperatura eutectoide ($727^{\circ}C$). En las zonas cercana a la temperatura eutectoide, el subenfriamiento del material es pequeño, por lo cual se requieren de mayores tiempos para la formación de núcleos estables de ferrita y cementita. Sin embargo, una vez que el compuesto comienza a crecer, las altas temperaturas

favorecen la difusión por lo cual se forma la denominada ferrita gruesa. Mientras menor es la temperatura de transformación, se favorece la nucleación de las componentes de la perlita. Esta combinación de factores hace que las láminas características de la perlita tengan un menor grosor. Aún cuando en estas condiciones la velocidad de crecimiento se ve disminuida, el aumento de en la velocidad de nucleación hace que el tiempo de transformación total sea menor. [3][11]

- Transformación Austenita – Bainita. En la transformación de la austenita se forma, además de la perlita, un constituyente denominado bainita. Esta consta de las fases ferrita y cementita y en su formación intervienen procesos de difusión. La bainita forma agujas o placas, dependiendo de la temperatura de transformación. La fase bainita se encuentra entre la temperatura de la nariz del diagrama TTT 540°C y hasta 215°C aproximadamente. La velocidad de nucleación y difusión disminuyen haciendo que nuevamente la zona de transformación se mueva hacia la izquierda del diagrama. Las transformaciones perlítica y bainítica compiten entre sí y sólo una parte de una aleación se puede transformar en perlita o en bainita; la transformación en otro microconstituyente sólo es posible volviendo a calentar hasta formar austenita. [3]
- Transformación Austenita – Martensita. La martensita es un compuesto presente en el rango de temperatura (215°C, -20°C). esta transformación es diferente en varios aspectos con las vistas anteriormente. Para llevar a cabo esta transformación es necesario enfriar rápidamente el acero desde la zona austenítica, hasta una temperatura inferior a 150°C. Tratándose de una fase de no equilibrio, la martensita no aparece en el diagrama de fases hierro-carburo de hierro, sin embargo, esta transformación se representa en el diagrama de transformación isotérmica. Puesto que la transformación martensítica es instantánea y en ausencia de difusión, presenta en este diagrama unas características distintas que las de las reacciones perlítica y bainítica. [7,11]

1.1.4 Influencia de las impurezas en el comportamiento mecánico de los aceros.

Las impurezas se hallan en los aceros y fundiciones como consecuencia de encontrarse en los minerales de Fe, en los combustibles metalúrgicos o en los fundentes que se utilizan en los procesos de fusión. Son perjudiciales para las propiedades mecánicas finales de la aleación, y se procura por tanto eliminarlas o reducir su contenido. En aquellos casos en que resulta imposible técnicamente la eliminación, o cuando la misma es demasiado costosa desde el punto de vista económico, se admite su presencia hasta ciertas cantidades. Estos límites están fijados en las normas, y se ajustan a niveles máximos permisibles. [9].

La adición de otros elementos de aleación (Cr, Ni, Ti, etc.) cambia drásticamente el diagrama de fases binario hierro-carburo de hierro. La magnitud de las alteraciones depende del elemento de aleación y de su concentración. Uno de estos importantes cambios es el desplazamiento de la posición del eutectoide con respecto a la temperatura y a la concentración de carbono. [8]

Dentro de estas impurezas dos son las más comunes, primeramente se tiene al azufre, el cual al estar presente en el acero hace que, en conjunto con la austenita da lugar a un eutéctico con un bajo punto de fusión, el cual provoca a su vez porosidad dentro del material. Una de las posibles soluciones a esta impureza es agregar manganeso para que este genere MnS, con lo cual se garantiza una menor porosidad. Y la segunda impureza es el fósforo, este elemento se disuelve en la ferrita, el cual ocasiona la fragilidad del material puesto que forma fosfuros de hierro que aparecen en los bordes de grano del acero, con esto también se reduce la ductilidad y la tenacidad.

1.2 Diagrama Temperatura–Tiempo-Transformación (DiagramaTTT).

Estos diagramas grafican las condiciones temperatura-tiempo en que ocurre la transformación de la austenita para cada tipo de acero. Su principal uso es el de obtener información que va relacionada con las fases presentes después de un enfriamiento, así mismo el tiempo de inicio y fin de una transformación y adicionalmente se puede predecir

la dureza aproximada como resultado del proceso que se lleve a cabo (tratamientos térmicos).

Los diagramas TTT se obtienen utilizando pequeñas probetas de acero, las cuales se austenitizan y se templean en un baño de sales de plomo líquido a temperatura fija y constante entre A_1 y M_s , después de tiempos diferentes, se sacan las probetas del baño y se templean en agua (a temperatura ambiente), de modo que la austenita no transformada aún, se transforme en martensita. De esta forma se puede evaluar metalográficamente el porcentaje de austenita transformada en función de la temperatura y el tiempo. [1] De esta última prueba se representa el grado de transformación de la austenita en una gráfica logarítmica para el tiempo que transcurrió, formando así una curva que en muchas ocasiones se consideran "S", tal como se muestra en la Figura 4.

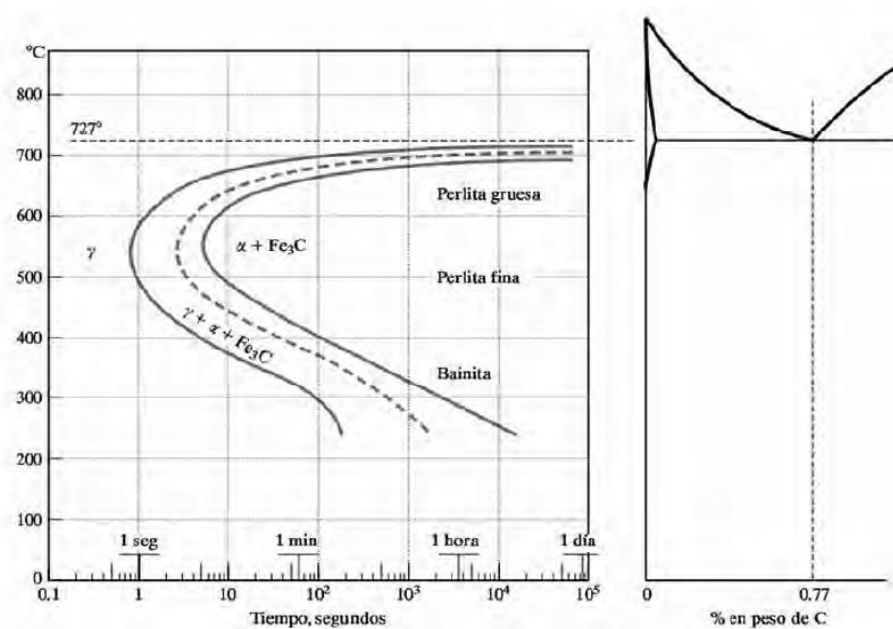


Figura 4. Diagrama TTT para un acero eutectoide en comparación con el diagrama de fases Fe-Fe₃C [2]

En estos diagramas como se puede observar se encuentran las transformaciones que dan lugar a la bainita, la perlita y martensita, las cuales se obtendrán dependiendo de la velocidad a la que se realice el enfriamiento.

1.3 Termodinámica y cinética en la metalurgia de los aceros.

Ahora que se tiene pleno conocimiento de las transformaciones del acero, es necesario conocer los requerimientos termodinámicos que implica su transformación, con lo cual se logra obtener un aproximado de los valores implicados durante su calentamiento, lo cual es importante debido a que con esto se puede diseñar de manera más predictiva los procesos de metalurgia. A continuación, se muestra un ejemplo de las ecuaciones que se emplean para obtener dichos valores, para lo cual se empleará un caso hipotético, en donde se pretende saber el calor requerido para llegar a la temperatura de austenización con una masa de 10 kg Fe.

$$\Delta H_{Fe\alpha \rightarrow Fe\gamma} = n \left[\int_{T_{amb}}^{1033} C_{p_{Fe\alpha}} dT + H_{Fe\alpha \rightarrow Fe\beta}^0 + \int_{1033}^{1183} C_{p_{Fe\beta}} dT + H_{Fe\beta \rightarrow Fe\gamma}^0 + \int_{1183}^{1233} C_{p_{Fe\gamma}} dT \right]$$

(Ec 1)

Entonces para el Cp (capacidad calorífica) de cada fase se tiene los siguientes modelos

$$C_{p_{Fe\alpha}} = 12.55 + 31.71 \times 10^{-3} T + 2.51 \times 10^{-5} T^{-2} \left[\frac{J}{mol * K} \right]$$

(Ec 2)

$$C_{p_{Fe\beta}} = 46.57 \left[\frac{J}{mol * K} \right]$$

$$C_{p_{Fe\gamma}} = 24.27 + 8.37 \times 10^{-3} T \left[\frac{J}{mol * K} \right]$$

(Ec 3)

Mientras que para H^0 se tiene los siguientes valores

$$H^0 \rightarrow Fe\alpha \rightarrow Fe\beta = 1364 \left[\frac{J}{mol} \right]$$

$$H^0 \rightarrow Fe\beta \rightarrow Fe\gamma = 900 \left[\frac{J}{mol} \right]$$

Por lo tanto, se sustituyen en la ecuación (Ec1), y considerando n=1 [mol], se tiene lo siguiente:

$$\Delta H_{Fe\alpha \rightarrow Fe\gamma} = 1 * \left[\int_{298}^{1033} (12.55 + 31.71x10^{-3}T + 2.51x10^{-5}T^2)dT + 1364 \right. \\ \left. + \int_{1033}^{1183} (46.57)dT + 900 + \int_{1183}^{1233} (24.27 + 8.37x10^{-3}T)dT \right]$$

Resolviendo la integral anterior se tiene:

$$\Delta H_{Fe\alpha \rightarrow Fe\gamma} = 12.55(1033 - 298) + 31.71x10^{-3} \left(\frac{1033^2 - 298^2}{2} \right) - 2.51x10^{-5} \left(\frac{1}{1083} - \frac{1}{298} \right) \\ + 1364 + 46.57(1183 - 1033) + 900 + 24.27(1233 - 1183) \\ + 8.37x10^{-3} \left(\frac{1233^2 - 1183^2}{2} \right) \\ \Delta H_{Fe\alpha \rightarrow Fe\gamma} = 36302.81 \left[\frac{J}{mol} \right]$$

Entonces para saber la entalpia necesaria para un proceso de calentamiento se realiza lo siguiente.

$$P_{M_{Fe}} = 55.847 \frac{gr}{mol}$$

Realizando la conversión

$$36302.81 \left[\frac{J}{mol_{Fe}} \right] \left(\frac{1 mol_{Fe}}{55.847 \frac{gr}{Fe}} \right) \left(\frac{1000 gr_{Fe}}{1 Kg_{Fe}} \right) = 650040.47 \left[\frac{J}{kg} \right]$$

Como se supone que el proceso se está haciendo para una masa de 10 kg de Fe entonces solo resta multiplicar.

$$\Delta H_{Fe\alpha \rightarrow Fe\gamma} = \left(650040.47 \left[\frac{J}{kg} \right] \right) (10kg)$$

$$\Delta H_{Fe\alpha \rightarrow Fe\gamma} = 6500404.7 [J]$$

Finalmente, si se quiere saber la cantidad o el volumen de CH₄ que se emplearía para calentar esta masa, solo basta con realizar las siguientes operaciones.

$$1Kg CH_4(\text{poder calorífico del } CH_4) = 4600 [KJ]; \rho_{CH_4} = 0.657 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$\frac{6500404.7}{1kgCH_4} \rightarrow 1.4131kgCH_4$$

$$V_{CH_4} = \rho * m = 0.657 * 1.4131$$

$$V_{CH_4} = \mathbf{0.9284 m^3} \text{ ó } \mathbf{928.4 [L]}$$

El resultado del planteamiento anterior da como resultado la cantidad de combustible requerido para lograr llevar al hierro a una temperatura de austenización. En donde se observa que el volumen es bastante considerable y por tanto puede generar un costo alto. Sin embargo, para tener mayor certeza de la hipótesis anterior se debe analizar los demás sistemas de calentamiento existentes y con este elegir el que mejor beneficio tenga.

1.4 Tratamientos térmicos convencionales en aceros.

Se puede entender como un tratamiento térmico al proceso de calentar y enfriar una aleación de manera controlada en un intervalo de tiempo definido, con el objetivo de modificar la microestructura para un fin deseado.

El tiempo y la temperatura son los factores principales y hay que fijarlos siempre de antemano, de acuerdo con la composición del acero, la forma y el tamaño de las piezas y las características que se desean obtener. [6]

Los tratamientos térmicos del acero se basan en la aplicación de las transformaciones estructurales que experimenta (transformaciones alotrópicas) y de los procesos de recristalización y de difusión. Todos los procesos básicos de tratamientos térmicos para aceros incluyen la transformación o descomposición de la austenita. [1]

Otro aspecto que también comparten los tratamientos térmicos convencionales es la metodología que se emplea en el proceso, es decir que estos tratamientos constan de etapas que son recurrentes, las cuales se definen a continuación:

- Calentamiento

- Mantenimiento de la temperatura constante
- Enfriamiento

1.4.1 Tratamiento de temple.

El temple involucra el proceso de calentar a los aceros de 30 a 50°C más de su temperatura de austenización, y mantener esta temperatura durante un cierto intervalo de tiempo con el fin de homogenizar la temperatura en todo el cuerpo, para que posteriormente sean enfriados de manera continua (los medios de enfriamiento comúnmente usados son: aceite, agua y agua con sales), hasta llevarlos a una temperatura por debajo del inicio de la transformación de la martensita (M_s), cabe mencionar que la velocidad de enfriamiento debe ser mayor que la velocidad crítica de temple, con el fin de evitar la presencia de otra transformación (evitar la nariz de las curvas “S”). de tal manera que la microestructura esperada da lugar a martensita pura. El propósito de este tratamiento es obtener para cada composición de acero, la dureza máxima.

El proceso se considera relativamente sencillo, sin embargo, este puede tener variaciones debido al enfriamiento, dado que este en la mayoría de los casos no es continuo y este se debe a dos razones, la primera es debido al medio de enfriamiento (choque térmico y generación de burbujas debido al punto de fusión del medio de enfriamiento, lo que hacen que el enfriamiento se haga más lento) y la segunda es debida al gradiente de temperaturas que se forman en el cuerpo de la pieza de acero (la superficie de contacto con el medio de enfriamiento logra disminuir más rápido su temperatura que en el centro de la misma). Es por eso que es posible obtener una variación en la microestructura y propiedades según sean las características de la muestra y las condiciones del tratamiento térmico.

1.4.2 Tratamiento de revenido.

Es un proceso el cual tiene origen después de haber realizado un temple. Donde el material es calentado por debajo de la temperatura crítica A_{C1} y enfriado en un intervalo deseado, principalmente para incrementar la ductilidad, tenacidad, eliminar las tensiones creadas en el temple y mejorar la estabilidad dimensional, dejando al acero con la dureza o resistencia

deseada. Las variables asociadas con el revenido que afectan la microestructura y propiedades mecánicas son: temperatura de revenido, tiempo de permanencia, intervalo de enfriamiento y composición química del acero. [16]

En este tratamiento es común encontrar diferentes tipos de revenido, con el fin de obtener las propiedades deseadas.

- Revenido Bajo: Se realiza en el intervalo de temperatura de 150°C a 250°C. No disminuye la dureza, pero si las tensiones internas y parte de la austenita residual.
- Revenido Medio: Se realiza a 350 – 450°C. Disminuye la dureza notablemente y se eleva la tenacidad. Se obtiene una estructura de tronstita de revenido.
- Revenido Alto: Se realiza a 500°C – 650°C. En este proceso, la martensita se transforma en sorbita de revenido. Esta estructura garantiza una mejor combinación de resistencia y plasticidad del acero. Como consecuencia de esto se eleva notablemente la resistencia con la misma dureza. [10]

1.4.3 Tratamiento de recocido.

El recocido es un proceso que consiste en calentar el acero a una temperatura dada y mantenerla por un periodo de tiempo, para que finalmente se realice un enfriamiento lento dentro del horno. El tiempo de recocido debe ser suficientemente largo para permitir la transformación. La temperatura de recocido también es importante; puesto que se acelera al aumentar la temperatura, ya que representa un proceso de difusión. En general este tratamiento se realiza para eliminar tensiones; incrementar la plasticidad, la ductilidad y la tenacidad. [3]

Dentro de este tratamiento térmico se puede encontrar diferentes tipos o clasificaciones y estos dependerán del rango de temperatura a la que se realice el proceso.

- Recocido completo: Elimina las estructuras indeseables, además afina el grano cuando ha crecido producto de un mal tratamiento. Y comúnmente se utiliza para aceros hipoeutectoides.
- Recocido incompleto: Elimina tensiones, recristaliza la perlita y es considerado el recocido más económico.

- Recocido de globulización: Mejora la maquinabilidad en los aceros eutectoides e hipereutectoides.
- Recocido de recristalización: Disminuye tensiones y elimina la acritud.
- Recocido de Homogenización: Elimina la segregación química y cristalina. Además, se obtiene grano grueso. Pero posterior a este proceso es necesario realizar un recocido completo posterior.
- Recocido isotérmico: se emplea para economizar tiempo. Se emplea mucho en los aceros aleados. Se mantiene en baños de sales a temperaturas menores que A_1 hasta que la descomposición de la austenita se produzca y después se enfría al aire.

1.4.4 Tratamiento de normalizado.

El normalizado es el proceso donde se calienta al acero de 30 a 50°C por encima de la temperatura crítica A_3 , donde se mantiene la temperatura por un tiempo determinado, para que después se realice un enfriamiento al aire, hasta llegar a la temperatura ambiente. Este tratamiento tiene como objetivo eliminar o disminuir las tensiones internas y obtener una distribución uniforme del carbono. Además, se puede considerar como un proceso previo a un temple y revenido o simplemente como un tratamiento final

1.5 Aplicaciones de la transferencia de calor en la determinación de parámetros de los tratamientos térmicos.

La transferencia de calor es una rama de la termodinámica que estudia la rapidez y la razón en cómo se conduce el calor a diferentes cuerpos, con la finalidad de poder controlar o predecir ciertos parámetros que están presentes cuando un sistema está o no en equilibrio, esto mediante una serie de ecuaciones empíricas, que son resultado de las diferentes formas en las que el calor se puede transmitir (conducción, convección y radiación).

Es por eso que este tema juega un papel relevante en los tratamientos térmicos, puesto que, al utilizar uno de estos modelos matemáticos es posible determinar los parámetros involucrados en el desarrollo de los mismos, por ejemplo, se puede calcular el tiempo que requiere un acero para llegar a la temperatura de austenización. Así mismo se pueden determinar parámetros durante todo el proceso.

Analizando con mayor profundidad a los tratamientos térmicos se nota que la mayor forma en que se transmite el calor durante su proceso, es mediante conducción y convección. Es por eso que el peso de todos los parámetros a calcular caerá sobre estas las dos leyes y sus derivados (estado transitorio) que caracterizan a estas formas de transferencia de calor, y es por eso que a continuación, se muestran dichas leyes y ecuaciones.

Ley de Fourier para la conducción de calor: *la razón de la conducción de calor a través de una capa plana es proporcional a la diferencia de temperatura a través de ésta y al área de transferencia de calor, pero es inversamente proporcional al espesor de esa capa.* [18]

$$\dot{Q}_{cond} = -KA \left(\frac{dT}{dx} \right)$$

(Ec 4)

Ley de enfriamiento de Newton para convección: *la rapidez con la que cambia la temperatura de un cuerpo es proporcional a la diferencia entre la temperatura del cuerpo y la del medio que lo rodea.*

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s \left(\frac{dT}{dx} \right)$$

(Ec 5)

Capítulo 2. Planteamiento y desarrollo de la investigación.

2.1 Caracterización de los aceros SAE 1018 y 1045.

Para comenzar el desarrollo de la investigación, es necesario conocer a mayor profundidad los materiales con los que se realiza la parte experimental, esto con el fin de obtener los parámetros que garanticen el correcto diseño de los tratamientos térmicos. Es por eso que, en esta sección se presentan las características físicas y químicas de los materiales en cuestión.

2.1.1 Acero SAE 1018.

El acero SAE 1018 es un acero con bajo contenido de carbono que ofrece un buen equilibrio de tenacidad, resistencia y ductilidad. Es el grado de acero más comúnmente disponible en todo el mundo, aunque sus propiedades mecánicas no son únicas. Se puede formar, mecanizar, soldar y fabricar fácilmente. Adicionalmente tiene una excelente soldabilidad y produce una carcasa uniforme y más dura, además es considerado como el mejor acero para piezas cementadas. [19]

Algunas de las aplicaciones que tiene este tipo de acero son: operaciones de deformación plástica como remachando y extrusión. También es usado en componentes de maquinaria debido a su facilidad para conformarlo y soldarlo. Piezas típicas son los pines, cuñas, remaches, rodillos, piñones, pesadores, tornillos y aplicaciones de lámina. [20]

En las tablas 3 y 4 se observan las propiedades mecánicas del acero SAE 1018.

Tabla 3. Composición química acero 1018. [21]

Composición química										
Elemento	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Sn
Porcentaje	0.17	0.85	0.22	0.01	0.02	0.03	0.02	0.0	0.04	0.006

Tabla 4. Propiedades mecánicas acero 1018. [20]

Propiedades mecánicas						
Dureza (HRB)	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Esfuerzo máximo (MPa)	Elongación máxima (%)	Reducción de área (%)	Módulo de elasticidad (GPa)	Maquinabilidad (%)
75.3	370	440	15	40	205	76

2.1.2 Acero SAE 1045.

El acero SAE 1045 posee un mediano contenido de carbono y es ampliamente utilizado en elementos estructurales que requieran mediana resistencia mecánica y tenacidad a bajo costo. Además, presenta una baja soldabilidad, buena maquinabilidad y excelente forjabilidad. [22]

Los usos principales para este acero son: piñones, cuñas, ejes, tornillos, partes de maquinaria, herramientas agrícolas y remaches. [22]

En las tablas 5 y 6, se observan las propiedades del acero SAE 1045.

Tabla 5. Composición química acero 1045. [23]

Composición química	
Elemento	Porcentaje
C	0.43
Mn	0.77
P	0.002
S	0.016
Si	0.192
Al	0.002
Nb	0.002
Cu	0.174
Ni	0.072
Cr	0.052
V	0.001
Mo	0.019
Ti	0.001

Tabla 6. Propiedades mecánicas acero 1045. [24]

Propiedades mecánicas						
Dureza (HRB)	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Esfuerzo máximo (MPa)	Elongación máxima (%)	Reducción de área (%)	Módulo de elasticidad (GPa)	Maquinabilidad (%)
93	310	565	19	40	207	64

2.2 Determinación de las temperaturas Intercríticas.

Los elementos de aleación tienen gran influencia en las propiedades del material, puesto que estas son capaces de modificar de manera favorable o desfavorable, según sea el elemento y el porcentaje en que se encuentre contenido en el acero. Una de los cambios que pueden tener estos elementos de aleación en el acero es la modificación de las temperaturas intercríticas, con lo cual las transformaciones de fases se ven desplazadas en el rango de temperatura, estas se pueden observar a través de los diagramas de fase y pueden ser calculadas por medio de ecuaciones empíricas que a continuación se presentan: [25,26]

$$\begin{aligned}
 A_{c_1}(\text{°C}) = & 723 - 7.08Mn + 37.7Si + 18.1Cr + 44.2Mo + 8.95Ni + 50.1V + 21.7Al + 3.18W + 297S \\
 & + 830N - 11.5Si + 14.0MnSi - 3.10SiCr - 57.9CMo - 15.5MnMo - 5.28C Ni \\
 & - 6.0MnNi + 6.77SiNi - 0.80CrNi - 27.4CV + 30.8MoV - 0.84Cr^2 - 3.46Mo^2 \\
 & - 0.46Ni^2 - 28V^2
 \end{aligned}$$

(Ec 6)

$$\begin{aligned}
 A_{c_3}(\text{°C}) = & 912 - 203C^{0.5} + 15.2Ni + 44.7Si - 104V + 31.5Mo + 13.1W - 30Mn - 11Cr - 20Cu \\
 & + 700P + 400Al + 120As + 400Ti
 \end{aligned}$$

(Ec 7)

$$M_s(\text{°C}) = 512 - 453C - 16.9Ni + 15Cr - 9.5Mo + 217C^2 - 71.5CMn - 67.6CCr$$

(Ec 8)

Para el caso de los aceros que se estudian en esta investigación, se tienen las siguientes temperaturas Intercríticas de acuerdo a su composición mencionada anteriormente.

Acero 1018.

$$\begin{aligned}Ac_1(^{\circ}C) = & 723 - 7.08(0.85) + 37.7(0.22) + 18.1(0.03) + 44.2(0) + 8.95(0.02) + 50.1(0) + 21.7(0) \\ & + 3.18(0) + 297(0.02) + 830(0) - 11.5(0.22) + 14.0(0.85)(0.22) - 3.10(0.22)(0.03) \\ & - 57.9(0.17)(0) - 15.5(0.85)(0) - 5.28(0.17)(0.02) - 6.0(0.85)(0.02) \\ & + 6.77(0.22)(0.02) - 0.80(0.03)(0.02) - 27.4(0.17)(0) + 30.8(0)(0) - 0.84(0.03^2) \\ & - 3.46(0^2) - 0.46(0.02^2) - 28(0^2)\end{aligned}$$

$$Ac_1(^{\circ}C) = 731.914 [^{\circ}C]$$

$$\begin{aligned}Ac_3(^{\circ}C) = & 912 - 203(0.17)^{0.5} + 15.2(0.02) + 44.7(0.22) - 104(0) + 31.5(0) + 13.1(0) - 30(0.85) \\ & - 11(0.03) - 20(0.04) + 700(0.01) + 400(0) + 120(0) + 400(0)\end{aligned}$$

$$Ac_3(^{\circ}C) = 818.81 [^{\circ}C]$$

La temperatura de A_{c3} indica el inicio de la transformación de la austenita teóricamente, sin embargo, en la literatura se puede encontrar que para garantizar dicha transformación en una aplicación real es recomendable elevar esta temperatura entre 30 a 50°C más, con lo cual se tendrá plena certeza de que esta se cumple. Entonces con fines prácticos de esta investigación, a esta temperatura se le denominará *set point*. Mencionado lo anterior, se tiene entonces:

$$Set\ Point\ (^{\circ}C) = 868.81 [^{\circ}C]$$

Finalmente, se obtiene el valor de la temperatura de M_s :

$$\begin{aligned}M_s(^{\circ}C) = & 512 - 453(0.17) - 16.9(0.02) + 15(0.03) - 9.5(0) + 217(0.17)^2 - 71.5(0.17)(0.85) \\ & - 67.6(0.17)(0.03)\end{aligned}$$

$$M_s(^{\circ}C) = 512 - 77.01 - 0.338 + 0.45 + 6.27 - 10.33 - 0.335$$

$$M_s(^{\circ}C) = 430.71 [^{\circ}C]$$

En la tabla 7 se observa un resumen de los valores de las temperaturas previamente calculadas.

Tabla 7. Temperaturas Intercríticas acero SAE 1018

Temperaturas Intercríticas acero SAE 1018			
A_{c1}	A_{c3}	Set Point	M_s
731.914	818.81	868.81	430.71

Acero 1045.

De la misma forma en que se efectuaron las operaciones para calcular las temperaturas Intercríticas del acero SAE 1018, ahora se hace para el acero SAE 1045, por lo cual solo se muestran los resultados en la tabla 8.

Tabla 8. Temperaturas Intercríticas acero SAE 1045

Temperaturas Intercríticas acero SAE 1045			
A_{c1}	A_{c3}	Set Point	M_s
730.77	764.5	814.5	331.53

2.3 Efecto de la descarburación por difusión del carbono (segunda ley de Fick).

Como ya se sabe, los tratamientos térmicos necesitan un proceso de calentamiento para realizar la transformación de fase requerida, para la obtención de las propiedades mecánicas solicitadas. Si bien ya se mencionó que los elementos de aleación pueden modificar estos rangos de temperatura y que estos a su vez dependerán del porcentaje en que se encuentren en el acero, existe otro fenómeno del cual no se ha hablado, y este está relacionado al movimiento de los átomos dentro del material cuando este se expone a una temperatura dada. Este puede ser un problema debido a que puede presentar modificaciones en las propiedades mecánicas del material, en especial se habla de un proceso de descarburación y por ende una pérdida de dureza al final del tratamiento térmico. Es por eso que este apartado se explica de mejor manera que ocurre con este fenómeno y se calculan los efectos que se tendrán durante el proceso de los TT.

La difusión es el movimiento de los átomos en un material. Los átomos se mueven de una manera predecible, tratando de eliminar diferencias de concentración y de producir una composición homogénea y uniforme. El movimiento de los átomos es necesario para distintos tratamientos que se llevan a cabo sobre los materiales. Para que se logre realizar un tratamiento térmico es necesaria la difusión. Si comprende cómo se transfiere la masa mediante la difusión, se pueden diseñar técnicas de procesamiento de materiales. [15]

A nivel atómico, la difusión consiste en la migración de los átomos de un sitio de la red a otro. En los materiales sólidos, los átomos están en continuo movimiento, cambian rápidamente de posición. La movilidad atómica exige dos condiciones: 1) un lugar vecino vacío, y 2) el átomo debe tener suficiente energía como para romper los enlaces con los átomos vecinos y distorsionar la red durante el desplazamiento. Esta energía es de naturaleza vibratoria. A una temperatura determinada, alguna pequeña fracción del número total de átomos es capaz de difundir debido a la magnitud de su energía vibratoria. Esta fracción aumenta al ascender la temperatura. [3]

La mayoría de las situaciones prácticas de difusión son en estado no estacionario. En una zona determinada del sólido, el flujo difusivo y el gradiente de difusión varían con el tiempo, generando acumulación o agotamiento de las sustancias que difunden. Y esta se puede aproximar mediante la siguiente ecuación.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right)$$

(Ec 9)

A esta ecuación se le conoce como la segunda ley de Fick, la cual describe el estado dinámico de la difusión de los átomos. Como se observa esta es una ecuación diferencial, la cual a partir de las siguientes hipótesis y condiciones de frontera que describe el autor William D [3], establece lo siguiente:

1. Antes de la difusión, todos los átomos de soluto están uniformemente distribuidos en el sólido a concentración C_0 .
2. El valor de x en la superficie es cero y aumenta con la distancia dentro del sólido.
3. El tiempo se toma igual a cero en el instante inmediatamente antes de empezar la difusión.

Estas condiciones límite son:

Para $t = 0$, $C = C_0$ a $0 \leq x \leq \infty$

Para $t > 0$, $C = C_s$ (la concentración superficial constante) $x \approx 0$

$C = C_0$ a $x = \infty$

Aplicando las condiciones límites, se obtiene la siguiente ecuación.

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{ferr}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

(Ec 10)

Donde se tiene que:

- C_x : concentración del elemento a la distancia x de la superficie en el tiempo t .
- C_s : concentración inicial uniforme del elemento sólido.
- C_0 : concentración superficial del elemento del gas que difunde en la superficie.
- x : distancia desde la superficie.
- D : coeficiente de difusión.
- t : tiempo.

A continuación, se muestra la situación que presentarían los aceros en cuestión para el caso del calentamiento en los procesos de tratamientos térmicos. Como ejemplo de aplicación se tomará al acero 1045, el cual tiene un contenido de 0.43% C y este se someterá a una temperatura de 815°C, y se espera encontrar la distancia para la cual se tenga una concentración de 0.4%.

- C_x : 0.4%
- C_s : 0%
- C_0 : 0.43%
- x : es lo que se requiere calcular.
- D : $2.94 \times 10^{-12} [m^2/s]$.
- t : 3600 [s].

Entonces se efectúan las operaciones necesarias.

$$\frac{0.4 - 0.43}{0 - 0.43} = 1 - ferr\left(\frac{x}{2\sqrt{(2.94E - 12)(3600)}}\right)$$
$$0.93 = ferr\left(\frac{x}{205.76E - 6}\right)$$

Ahora se busca el valor en tablas para obtener el valor correspondiente.

Tabla 9. Valores de la función error acero SAE 1045. [3]

Z	Ferr(Z)
1.2	0.9103
z	0.93
1.3	0.9340

El valor que corresponde a z es de z=1.283

Por lo tanto, se tiene:

$$\frac{x}{205.76E - 6} = 1.283$$

Despejando x:

$$x = 0.264E - 3 [m] \text{ ó } 0.264 [mm]$$

Análogamente se realizan los mismos cálculos para el acero SAE 1018, del cual se muestran los resultados a continuación

Tabla 10. Valores de la función error acero SAE 1018. [3]

Z	Ferr(Z)
1.1	0.8802
z	0.8823
1.2	0.9103

$$x = 0.261E - 3 [m] \text{ ó } 0.261 [mm]$$

2.4 Determinación de los parámetros de los tratamientos térmicos convencionales.

Para conocer las ecuaciones que describen el comportamiento del material durante los tratamientos térmicos, es necesario identificar las herramientas de estudio con las cuales se seguirá su análisis. Como primer punto se tiene que saber que el estudio que se plantea realizar se encuentra en un estado transitorio, es decir que este dependerá varias variables dependientes e independientes, sin embargo, lo que más interesa en los tratamientos térmicos es establecer las variables que están asociadas a los siguientes temas: temperatura y volumen de control. En un segundo caso se tiene que conocer el sistema de solución dado la primera condición, para este caso es específico se utiliza “el análisis de parámetros concentrados, en los cuales la temperatura de un cuerpo varía con el tiempo, pero permanece uniforme en cualquier instante. En seguida, se considera la variación de la temperatura con el tiempo, así como con la posición para problemas unidimensionales de conducción de calor, como los asociados con una pared plana grande, un cilindro largo, una esfera y un medio semiinfinito, usando diagramas de temperatura transitoria y soluciones analíticas”. [18]

Habiendo mencionado lo anterior, se puede determinar de manera general lo que se busca en el análisis.

$$\begin{array}{l} \text{Transferencia de calor hacia el cuerpo} \\ \text{durante dt} \end{array} = \begin{array}{l} \text{El incremento de la energía del cuerpo} \\ \text{durante el dt} \end{array}$$

Matemáticamente se puede expresar lo anterior con la siguiente ecuación (Ec11), la cual es resultado de un análisis de transferencia de calor. Esta ecuación se puede verificar paso a paso en el libro del autor Cengel [18], puesto que no es el fin de este apartado.

$$\frac{T_0 - T_\infty}{T_i - T_\infty} = A_1 e^{-\lambda_1^2 \tau}$$

(Ec 11)

Donde;

T_0 = Temperatura al centro del cilindro [°C]

T_∞ = Temperatura objetivo [°C]

T_i = temperatura inicial [°C]

A_1 y λ_1 = constantes en función del número de Biot [u]

τ = Número de Fourier [u]

Esta ecuación determina la temperatura del centro de un cilindro, una esfera y una placa, sin embargo, el cambio se ve reflejado en el valor que toman las variables A_1 y λ_1 , los cuales corresponden al valor asociado de Biot y de " τ " que está asociado al número de Fourier, ambos números son adimensionales.

- Número de Biot

El número de Biot es la razón de la resistencia interna de un cuerpo a la conducción de calor con respecto a su resistencia externa a la convección de calor. Por lo tanto, un número pequeño de Biot representa poca resistencia a la conducción del calor y, por lo tanto, gradientes pequeños de temperatura dentro del cuerpo. [18]

En el análisis de sistemas concentrados se supone una distribución uniforme de temperatura en todo el cuerpo, el cual es el caso sólo cuando la resistencia térmica de éste a la conducción de calor (la resistencia a la conducción) sea cero. Por consiguiente, el análisis de sistemas concentrados es exacto cuando $Bi = 0$ y aproximado cuando $Bi > 0$.

Sin embargo, cuando $Bi < 0.1$, el error en suponer que la temperatura dentro del cuerpo es uniforme resulta despreciable [18]

El número de Biot se puede expresar de la siguiente manera:

$$Bi = \frac{hL_c}{k}$$

(Ec 12)

Donde;

h = coeficiente por convección.

k = coeficiente por conducción

L_c = longitud característica.

$$L_c = \frac{V}{A_s}$$

(Ec 13)

- Número de Fourier

El número de Fourier es una medida del calor conducido a través de un cuerpo en relación con el calor almacenado. Por lo que, un valor grande del número de Fourier indica una propagación más rápida del calor a través del cuerpo. [18]

Así como el número de Biot, para que el número de Fourier sea aplicable en el análisis de parámetros concentrados, es necesario que este sea $Fo > 0.2$.

Este número adimensional se puede expresar de la siguiente manera:

$$Fo = \tau = \frac{\alpha t}{L_c^2}$$

(Ec 14)

Donde;

α = difusividad térmica del material.

t = tiempo.

L_c = longitud característica.

Una vez definidas las ecuaciones que se utilizan para realizar el análisis de los tratamientos térmicos, es necesario mencionar que el desarrollo solo se hará para un solo material, con el fin de evitar ser repetitivos, pero en sí el proceso que se realiza es con la misma metodología para ambos materiales. En este caso se trabajará con el acero SAE 1045, y solo se mostrarán los resultados del acero SAE1018.

Después de haber mencionado lo anterior se determina la configuración de las probetas empleadas para la aplicación de los cálculos y posteriormente para los tratamientos térmicos.

A continuación, se muestra las dimensiones de la probeta:

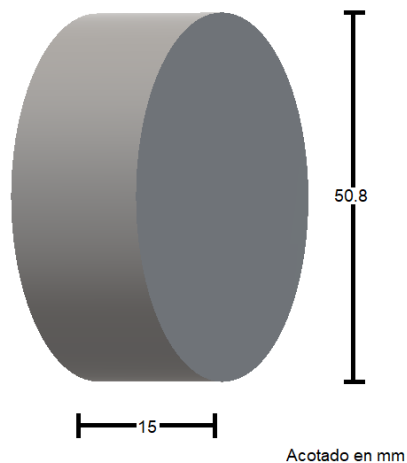


Figura 5. Dimensiones del disco de acero

2.4.1 Determinación de los parámetros de temple y revenido.

Como se ha mencionado, el material empleado para realizar los cálculos es el acero SAE 1045, es por eso que a continuación en la tabla 11 se muestran las propiedades del material requeridas para efectuar las operaciones.

Tabla 11. Propiedades acero SAE 1045 [18].

Propiedad	Nomenclatura	Cantidad
Densidad	ρ	7850 $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$
Difusividad térmica [0-600°C]	α	1.28E-5 $\left[\frac{m^2}{s}\right]$
Difusividad térmica [600-815°C]	α	8.196E-6 $\left[\frac{m^2}{s}\right]$
Difusividad térmica [815-50°C]	α	8.98E-6 $\left[\frac{m^2}{s}\right]$
Conductividad térmica	k	48.9 $\left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C}\right]$
Coefficiente de transferencia de calor por convección del horno	h	80 $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right]$
Coefficiente de transferencia de calor por convección del aceite	h	128 $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right]$
Coefficiente de transferencia de calor por convección del aire	h	20 $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right]$
Coefficiente de transferencia de calor por convección del aire (forzada)	h	180 $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right]$

I. Temple

a. Pre calentamiento

Con fines de reducir las tensiones internas del material por fisuras debidas a las tensiones que causará el calentamiento del mismo, se empleó un proceso de pre calentamiento, en la zona de recristalización del acero, el cual tiene lugar en el rango de temperaturas de 550 a 650°C, para este caso se utilizó un valor intermedio, es decir 600°C.

Entonces, dadas las condiciones se puede plantear el problema de la siguiente manera, de tal forma que se garantice que la temperatura sea homogénea en todo el volumen del acero:

Como se observa en la Figura 6, este problema se puede solucionar si se considera dos condiciones en el proceso de calentamiento (pared y cilindro), entonces el desarrollo queda de la siguiente manera empleando la ecuación 11.

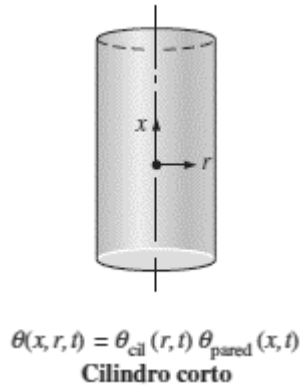


Figura 6. Interpretación del problema. [18]

$$\frac{T_0 - T_\infty}{T_i - T_\infty} = (A_1 e^{-\lambda_1^2 \tau})_{pared} (A_2 e^{-\lambda_2^2 \tau})_{cilindro}$$

(Ec 15)

Como se observa la ecuación final tiene como resultado el producto de las dos consideraciones, muestra que para el desarrollo de la ecuación se deben encontrar cuatro variables asociadas al número de Biot y por ende dos longitudes características que se muestran a continuación:

- Longitud característica para pared:

Como el problema que se tiene es que se debe conocer la temperatura del centro del material, la longitud característica está determinada por la medida media de la longitud del cilindro, es decir:

$$Lc = \frac{15}{2} = 7.5 [mm]$$

- Longitud característica del cilindro:

Utilizando la misma lógica que en el caso anterior se tiene los siguiente:

$$rc = \frac{50.8}{2} = 25.4 [mm]$$

Nótese que cuando se habla de un cilindro la longitud característica está dada por su radio.

Al tener definidas las longitudes características, es necesario obtener los valores de Biot para ambos casos, así como sus respectivos parámetros de A y λ .

- Biot para pared

Tomando la ecuación 12, se tiene:

$$Bi = \frac{hL_c}{k} = \frac{80 * 0.0075}{48.9} = 0.01227$$

$$Bi = 0.01227 < 0.1 \text{ (aplica el criterio)}$$

Ahora se busca el valor de Biot dentro de las tablas

Tabla 12. Valores de las constantes λ y A, asociados al Biot calculado. [18]

Pared plana		
Biot	λ	A
0.01	0.0998	1.0017
0.01227	0.1092	1.0021
0.02	0.141	1.033

- Biot para cilindro

Tomando la ecuación 12, se tiene:

$$Bi = \frac{hr_c}{k} = \frac{80 * 0.0254}{48.9} = 0.04155$$

$$Bi = 0.04155 < 0.1 \text{ (aplica el criterio)}$$

Nuevamente se busca el valor en las tablas.

Tabla 13. Valores de las constantes λ y A , asociados al Biot calculado. [18]

Cilindro		
Biot	λ	A
0.04	0.2814	1.0099
0.04155	0.2862	1.01028
0.06	0.3438	1.0148

En esta parte del cálculo, se tienen los valores necesarios para sustituir en la ecuación principal.

$T_i = 20^\circ\text{C}$ (temperatura ambiente a la que se encuentra el material)

$T_\infty = 600^\circ\text{C}$ (temperatura final o temperatura objetivo)

$T_0 = 600^\circ\text{C}$ (temperatura que se debe tener al centro del material)

Entonces, se tiene lo siguiente:

$$\frac{600 - 600}{20 - 600} = \left(1.0021e^{-(0.1092^2)\left(\frac{1.28E-05t}{0.0075^2}\right)} \right)_{pared} \left(1.01028e^{-(0.2862^2)\left(\frac{1.28E-05t}{0.0254^2}\right)} \right)_{cilindro}$$

A partir de esta ecuación se puede dar una solución en función del tiempo, la cual puede desarrollarse de manera algebraica o simplemente utilizar algún software tal como *Wolfram Mathematica*®. Sin embargo, esta ecuación que se plantea con estos valores genera un número indeterminado de soluciones validas, por lo que no es posible determinar cuál es el verdadero tiempo en que se cumple la condición, es por eso que el valor objetivo se cambia de tal manera que numerador sea diferente de cero. Con el fin de no alejarse del valor objetivo se determinará que el cambio solo se vea reflejado 0.5°C menos que la propuesta inicial, es decir 599.5°C , entonces se tiene lo siguiente.

$$\frac{599.5 - 600}{20 - 600} = \left(1.0021e^{-(0.1092^2)\left(\frac{1.28E-05t}{0.0075^2}\right)} \right)_{pared} \left(1.01028e^{-(0.2862^2)\left(\frac{1.28E-05t}{0.0254^2}\right)} \right)_{cilindro}$$

$$t = 1629.20 [s] \text{ ó } 27.15 [min]$$

Tiempo requerido para calentar desde la temperatura ambiente hasta 600°C (temperatura de precalentamiento).

Nótese que después de este valor de tiempo para la misma condición la temperatura seguirá siendo constante, es decir 600°C. así mismo a partir de la ecuación se puede obtener un perfil de temperatura contra tiempo si esta se va modificando de manera gradual. De hecho, esta última idea es empleada para el diseño final del tratamiento.

b. Calentamiento

Para obtener el tiempo de calentamiento del acero SAE 1045 hasta la temperatura de A3 o set point se realizan las mismas operaciones que en precalentamiento, sin embargo, el único parámetro que cambia es el calor específico, y por ende la difusividad térmica.

$T_i = 600^\circ\text{C}$ (temperatura a la que se encuentra el material)

$T_\infty = 815^\circ\text{C}$ (temperatura final o temperatura objetivo)

$T_0 = 814.5^\circ\text{C}$ (temperatura que se debe tener al centro del material)

Por lo tanto:

$$\frac{814.5 - 815}{600 - 815} = \left(1.0021e^{-(0.1092^2)\left(\frac{8.196E-06t}{0.0075^2}\right)} \right)_{pared} \left(1.01028e^{-(0.2862^2)\left(\frac{8.196E-05t}{0.0254^2}\right)} \right)_{cilindro}$$

$$t = 2187.1654 [s] \text{ ó } 36.453 [min]$$

Tiempo requerido para elevar la temperatura de 600°C a 815°C (temperatura de set point).

c. Enfriamiento

Para este paso se plantea ocupar como fluido de enfriamiento aceite, el cual tiene un coeficiente de transferencia de calor por convección de $128W/(m^2\text{°C})$, además se plantea que para este proceso solo es necesario conocer la temperatura en la superficie, puesto que con esta se garantiza una temperatura en donde la probeta se pueda manipular con las manos sin sufrir daño alguno y posteriormente pasar al siguiente tratamiento (revenido). Es por eso que esta parte la ecuación que se emplea solo se considera la parte de cilindro:

$$\frac{T_0 - T_\infty}{T_i - T_\infty} = A_1 e^{-\lambda_1^2 \tau}$$

(Ec 16)

Donde las variables tienen los siguientes valores

$T_i = 815\text{°C}$ (temperatura a la que se encuentra el material)

$T_\infty = 25\text{°C}$ (temperatura final o temperatura objetivo)

$T_0 = 26\text{°C}$ (temperatura que se debe tener en la superficie del material)

$$Bi = \frac{hr_c}{k} = \frac{128 * 0.0254}{48.9} = 0.0665$$

$$Bi = 0.0665 < 0.1 \text{ (aplica el criterio)}$$

Nuevamente se busca el valor en las tablas.

Tabla 14. Valores de las constantes λ y A , asociados al Biot calculado. [18]

Cilindro		
Biot	λ	A
0.06	0.3438	1.0148
0.0665	0.3607	1.0164
0.08	0.3960	1.0197

Los valores en la ecuación.

$$\frac{26 - 25}{815 - 25} = 1.0164e^{-(0.3607^2)\tau}$$

$$\tau = \frac{\ln\left(\frac{26 - 25}{(815 - 25)(1.0164)}\right)}{-(0.3607^2)} = 51.41$$

Por lo tanto, ocupando la definición de τ se obtiene el tiempo.

$$\tau = \frac{at}{r_c^2} = 51.41$$

$$t = \frac{51.41(0.0254^2)}{8.98E - 6}$$

$$t = 3693.50 [s] \text{ ó } 61.56 [min]$$

Tiempo requerido para enfriar la pieza (temperatura ambiente).

Con el fin de tener variantes en el proceso de temple, se investigan los diferentes efectos en las propiedades mecánicas debidos a dos tipos de revenido; para este caso se emplearán revenido alto y revenido bajo.

II. Revenido alto

a. Calentamiento.

Nuevamente se emplea la ecuación 15, para conocer el tiempo en el que la probeta alcanzará una temperatura homogenización, en este caso como se menciona un revenido alto la temperatura elegida es de 550°C. Por lo que los parámetros quedan de la siguiente manera:

Ti = 25°C (temperatura a la que se encuentra el material)

T∞ = 550°C (temperatura final o temperatura objetivo)

T0 = 549.5°C (temperatura que se debe tener al centro del material)

Para los números adimensionales se emplearán los mismos valores que en el precalentamiento del temple, puesto que los parámetros del material son los mismos.

Tabla 15. Valores de las constantes λ y A, asociados al Biot calculado. [18]

Pared plana		
Biot	λ	A
0.01	0.0998	1.0017
0.01227	0.1092	1.0021
0.02	0.141	1.033

Cilindro		
Biot	λ	A
0.04	0.2814	1.0099
0.04155	0.2862	1.01028
0.06	0.3438	1.0148

$$\frac{549.5 - 550}{25 - 550} = \left(1.0021 e^{-(0.1092^2) \left(\frac{1.28E-05t}{0.0075^2} \right)} \right)_{pared} \left(1.01028 e^{-(0.2862^2) \left(\frac{1.28E-05t}{0.0254^2} \right)} \right)_{cilindro}$$

Resolviendo la ecuación se tiene:

$$t = 1606.24 [s] \text{ ó } 26.77 [min]$$

Temperatura para calentar la pieza en el revenido alto.

b. Enfriamiento.

Ahora, se pasa al proceso de enfriamiento, el cual se realizó en una atmosfera de aire a temperatura ambiente; por lo que se sigue empleando la misma ecuación (Ec16), sin embargo, lo único que cambia es el coeficiente de transferencia de calor por convección del aire y por ende los valores del número de Biot.

Ti = 550°C (temperatura a la que se encuentra el material)

$T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$ (temperatura final o temperatura objetivo)

$T_0 = 25.5^{\circ}\text{C}$ (temperatura que se debe tener al centro del material).

- Biot para pared

Tomando la ecuación 12, se tiene:

$$Bi = \frac{hL_c}{k} = \frac{20 * 0.0075}{48.9} = 0.0031$$

$$Bi = 0.0031 < 0.1 \text{ (aplica el criterio)}$$

Como el valor es demasiado pequeño y no aparecen en las tablas, se decide tomar el valor próximo más cercano, es decir 0.01, teniendo en cuenta que se puede tener un error en la aproximación, sin embargo, este será verificado en la parte experimental.

Tabla 16. Valores de las constantes λ y A , asociados al Biot calculado. [18]

Pared plana		
Biot	λ	A
0.01	0.0998	1.0017

- Biot para cilindro

Tomando la ecuación 12, se tiene:

$$Bi = \frac{hr_c}{k} = \frac{20 * 0.0254}{48.9} = 0.0104$$

$$Bi = 0.0104 < 0.1 \text{ (aplica el criterio)}$$

Nuevamente se busca el valor en las tablas.

Tabla 17. Valores de las constantes λ y A , asociados al Biot calculado. [18]

Cilindro		
Biot	λ	A
0.01	0.1412	1.0025
0.0104	0.1434	1.002
0.02	0.1995	1.005

Entonces, se tiene lo siguiente:

$$\frac{25.5 - 25}{550 - 25} = \left(1.0017 e^{-\left(0.0998^2\right)\left(\frac{8.98E-06t}{0.0075^2}\right)} \right)_{pared} \left(1.002 e^{-\left(0.1434^2\right)\left(\frac{8.98E-06t}{0.0254^2}\right)} \right)_{cilindro}$$

Resolviendo para t:

$$t = 3709.58 [s] \text{ ó } 61.83 [min]$$

Tiempo de enfriamiento en el revenido alto.

III. Revenido bajo

a. Calentamiento

Una vez más se emplea la ecuación 15, con la única modificación de que en esta cambiará la temperatura a la cual se calentará la probeta. Para este caso la temperatura seleccionada es de 250°C.

$T_i = 20^\circ\text{C}$ (temperatura a la que se encuentra el material)

$T_\infty = 250^\circ\text{C}$ (temperatura final o temperatura objetivo)

$T_0 = 249.5^\circ\text{C}$ (temperatura que se debe tener al centro del material).

Nuevamente se emplean los mismos números adimensionales que en el revenido alto

Tabla 18. Valores de las constantes λ y A , asociados al Biot calculado. [18]

Pared plana		
Biot	λ	A
0.01	0.0998	1.0017
0.01227	0.1092	1.0021
0.02	0.141	1.033

Cilindro		
Biot	λ	A
0.04	0.2814	1.0099
0.04155	0.2862	1.01028
0.06	0.3438	1.0148

$$\frac{249.5 - 250}{20 - 250} = \left(1.0021 e^{-(0.1092^2) \left(\frac{1.28E-05t}{0.0075^2} \right)} \right)_{pared} \left(1.01028 e^{-(0.2862^2) \left(\frac{1.28E-05t}{0.0254^2} \right)} \right)_{cilindro}$$

Resolviendo la ecuación se tiene:

$$t = 1416.014 [s] \text{ ó } 23.60 [min]$$

Tiempo necesario en el enfriamiento en el revenido bajo.

b. Enfriamiento

Finalmente se realiza el mismo proceso que el enfriamiento del revenido alto, por lo que solo se muestra el valor del tiempo.

$$t = 3257.99 [s] \text{ ó } 54.28 [min]$$

Tiempo de enfriamiento en el revenido bajo.

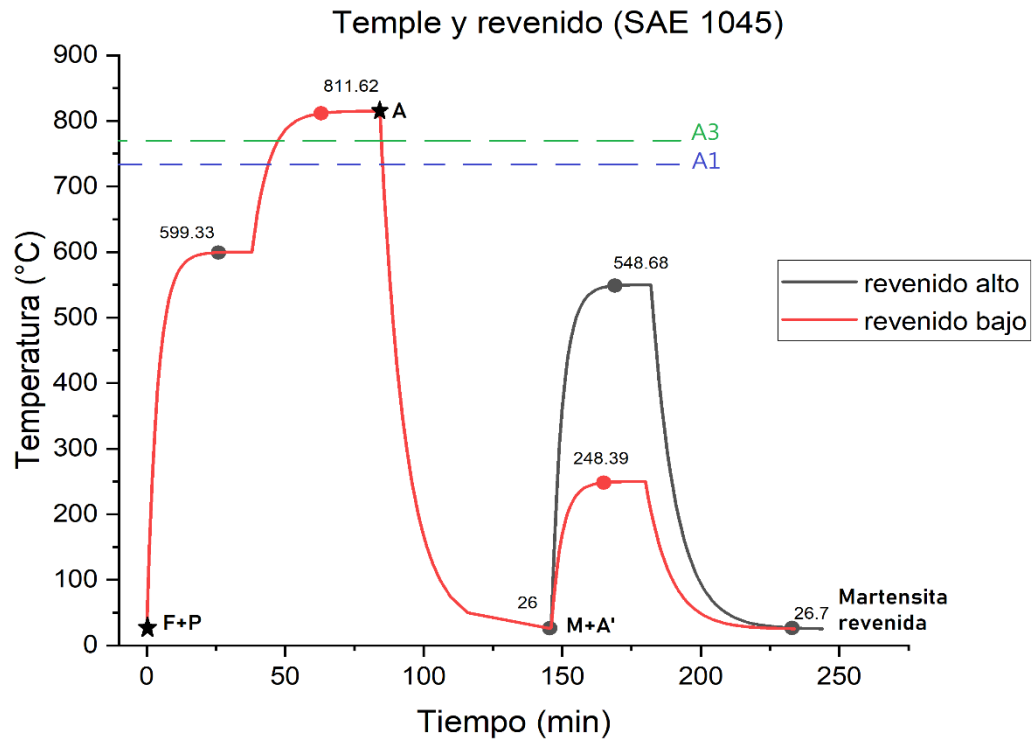
- Diseño del tratamiento

Como se había mencionado, a partir de las ecuaciones planteadas se puede obtener un perfil de temperatura versus tiempo, debido a que la ecuación se puede adaptar a las diferentes temperaturas y esta nos dará el tiempo que se requiere para llegar a dicho punto. Es por eso que a continuación se muestra el diseño de los tratamientos para ambos aceros, así como una hipótesis dada su interpretación en el diagrama TTT.

En la gráfica 1 y 2, se observan las curvas de calentamiento en función del tiempo requerido para llegar a una temperatura dada, mientras que en la figura 7 y 8, se tiene el diseño del tratamiento, en donde se observan las transformaciones de fase que se llevarán a cabo

durante el tratamiento térmico, con lo cual se podrá predecir la microestructura final, así mismo, se puede aproximar el valor de la dureza.

Es importante mencionar hasta este punto, que si bien se sabe que en los aceros de bajo carbono no es posible realizar el tratamiento térmico de temple debido a su contenido de carbono, este quedará en esta investigación a manera de verificación.



Gráfica 1. Representación esquemática de la secuencia del tratamiento térmico temple y revenido (alto y bajo) del acero SAE 1045.

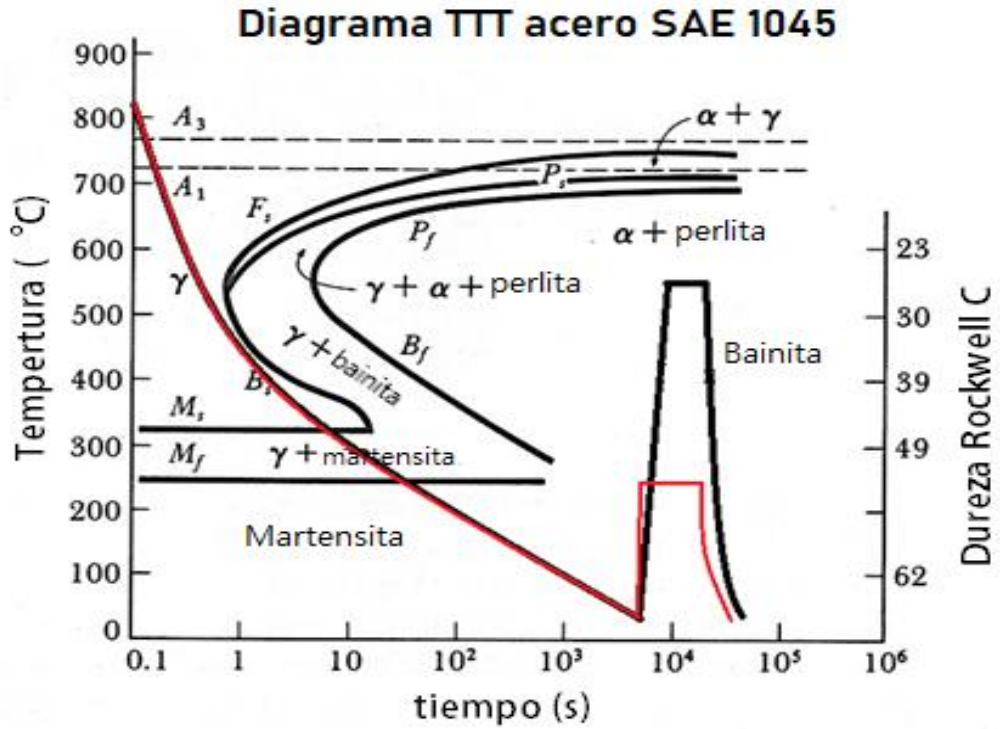
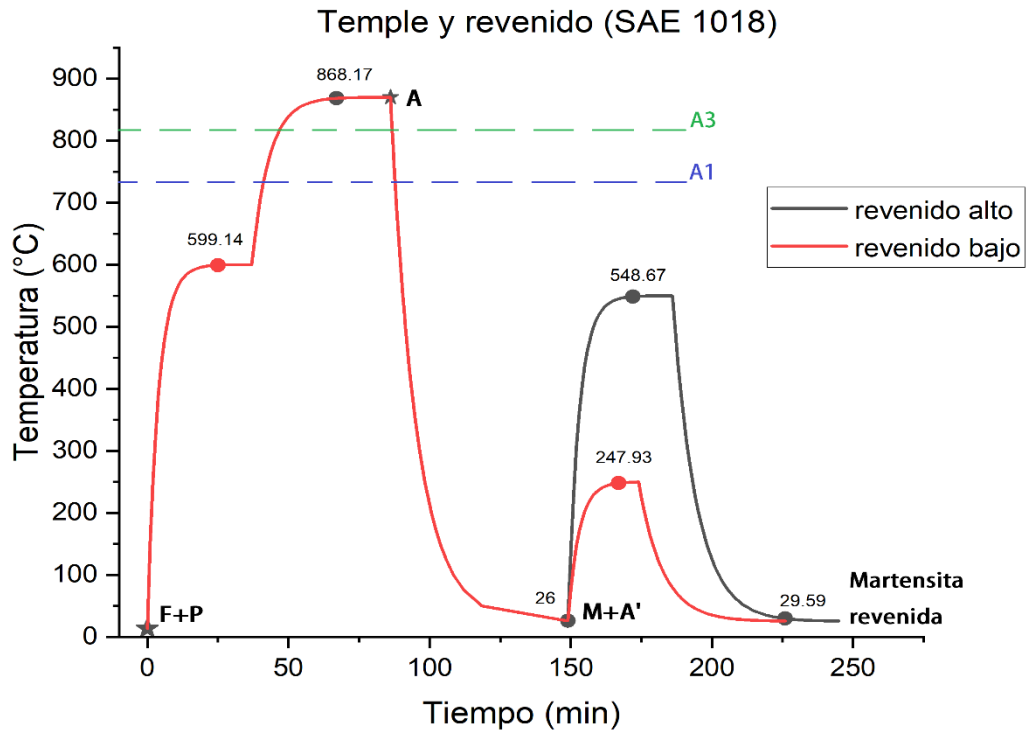


Figura 7. Aplicación del temple y revenido (alto y bajo) en el diagrama TTT. Con este tratamiento se espera una dureza aproximada de 25 a 30 HRC para el revenido alto, mientras que en el revenido bajo de 50 a 55 HRC, y se espera una microestructura principalmente formada por sorbita y martensita revenida respectivamente.



Gráfica 2. Representación esquemática de la secuencia del tratamiento térmico temple y revenido (alto y bajo) del acero SAE 1018.

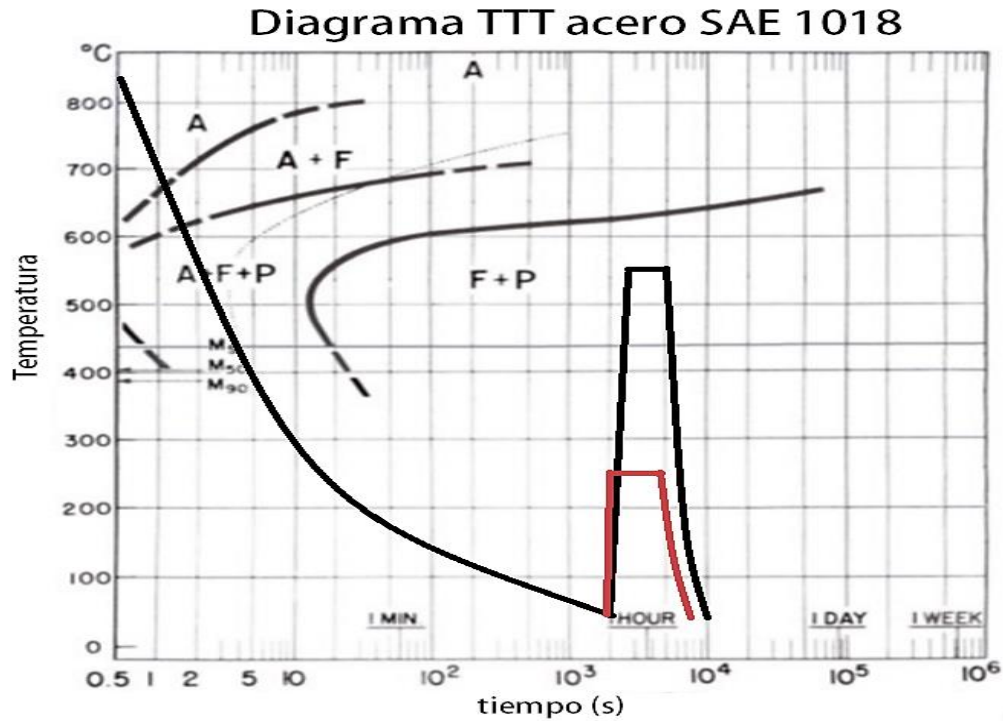


Figura 8. Aplicación del temple y revenido (alto y bajo) en el diagrama TTT. Con este tratamiento se espera una dureza aproximada de 90 a 100 HRB para el revenido alto, mientras que en el revenido bajo de 30 a 35 HRC, y se espera una microestructura principalmente formada por sorbita y martensita revenida respectivamente.

2.4.2 Determinación de los parámetros de normalizado.

Para la determinación de los parámetros de este tratamiento se retoman los datos antes calculados en el temple, puesto que el tratamiento de normalizado tiene como característica de proceso calentar de 30 a 50 °C por encima de la temperatura de A_{c3} . Esto solo aplica para la parte de precalentamiento y calentamiento. Es por eso que en este apartado solo se realiza el cálculo para la parte de enfriamiento, en donde se tomaran dos condiciones de medio de enfriamiento con el fin de comparar los efectos que se ocasionan si se modifica en el proceso.

- I. Enfriamiento
 - a. Convección natural

Para esta condición será necesario hacer uso nuevamente de la ecuación Ec15, por lo tanto, se tiene lo siguiente:

T_i = 815°C (temperatura a la que se encuentra el material)

T_∞ = 25°C (temperatura final o temperatura objetivo)

T₀ = 25°C (temperatura que se debe tener al centro del material).

Recordando que en este caso se emplea el coeficiente por convección natural del aire, se emplean nuevamente los mismos números adimensionales que se ocuparon en el enfriamiento de los revenidos, solamente cambiando los valores de la temperatura en la ecuación, es decir:

Tabla 19. Valores de las constantes λ y A, asociados al Biot calculado. [18]

Pared plana		
Biot	λ	A
0.01	0.0998	1.0017

Cilindro		
Biot	λ	A
0.01	0.1412	1.0025
0.0104	0.1434	1.002
0.02	0.1995	1.005

Entonces, se tiene lo siguiente:

$$\frac{25.5 - 25}{815 - 25} = \left(1.0017 e^{-(0.0998^2) \left(\frac{8.98E-06t}{0.0075^2} \right)} \right)_{pared} \left(1.002 e^{-(0.1434^2) \left(\frac{8.98E-06t}{0.0254^2} \right)} \right)_{cilindro}$$

Resolviendo para t:

$$t = 3927.37 [s] \text{ ó } 64.46 [min]$$

Temperatura de enfriamiento del normalizado por convección natural.

b. Convección forzada

Para determinar el tiempo requerido para enfriar la probeta una vez salida del horno por medio de una convección forzada, se puede recurrir a dos tipos de análisis, el primero es

bajo la misma ecuación que se ha empleado durante todos los cálculos anteriores y en segunda instancia se puede hacer uso de un análisis de convección externa forzada. Ambas aproximaciones son válidas y la variación entre ambas soluciones es mínima (siendo la primera la que tiene mayor precisión). Por esta razón en este cálculo se muestra el segundo caso con el fin de mostrar una alternativa a los cálculos.

Se comienza buscando los valores del medio de enfriamiento a la temperatura del ambiente [25°C], así como los valores de la temperatura a la que se encuentra el material. Para este problema se utilizan las tablas del libro de termodinámica del autor Cengel.

Para el problema se plantea lo siguiente: durante el enfriamiento, la temperatura superficial del cilindro está cambiando. Por lo tanto, también cambiará el coeficiente de transferencia de calor por convección entre el cilindro y el aire. Para evitar esta complejidad, en la evaluación del coeficiente de transferencia de calor, se toma la temperatura superficial del cilindro como constante a la temperatura promedio de $(815 + 25) / 2 = 420^\circ\text{C}$ y se usa el valor obtenido para todo el proceso de enfriamiento.

Por lo tanto, se tienen los siguientes datos en la tabla 20:

Tabla 20. Valores de las propiedades del aire a 25°C. [18]

Propiedad	Dato
Viscosidad dinámica del aire [$\mu_{s@420}$]	33.226E-6 kg/m*s
Conductividad térmica [k]	0.02551 W/m*K
Viscosidad dinámica del aire [$\mu_{s@25}$]	18.49E-6 kg/m*s
Viscosidad cinemática del aire [$\nu_{s@25}$]	15.62E-6 m ² /s
Número de Prandtl [Pr]	0.7296

Primeramente, se calcula el número de Reynolds, para lo cual se estima una velocidad del flujo de aire de 10 m/s.

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{(10)(0.0508)}{15.62E-6} = 32.522E3 [U]$$

Este valor de Reynolds indica que el flujo del fluido es turbulento, dado que $Re > 4000$.

Ahora se calcula el número de Nusselt.

$$Nu = \frac{hD}{k} = 0.3 + \frac{0.62Re^{\frac{1}{2}}Pr^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + (0.4/Pr)^{\frac{2}{3}}\right]^{\frac{1}{4}}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{\frac{5}{8}}\right]^{\frac{4}{5}}$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = 0.3 + \frac{0.62(32.522E3)^{\frac{1}{2}}(0.7296)^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + (0.4/0.7296)^{\frac{2}{3}}\right]^{\frac{1}{4}}} \left[1 + \left(\frac{32.522E3}{282000}\right)^{\frac{5}{8}}\right]^{\frac{4}{5}} = 106.78 [U]$$

El número adimensional de Nusselt, mide el aumento de la transmisión de calor desde una superficie por la que un fluido circula.

De este número se puede obtener el valor de h, es decir el coeficiente de transferencia de calor por convección.

$$h = \frac{k}{D} Nu = \frac{0.02551}{0.0508} (106.78) = 53.62 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

Con el fin de estimar el tiempo de enfriamiento del cilindro desde 815°C hasta 25°C, se determina la razón promedio de la transferencia de calor a partir de la ley de Newton de enfriamiento, mediante la temperatura superficial promedio. Es decir,

$$A_s = \pi DL = \pi(0.0508)(0.015) = 2.394E - 3 [m^2]$$

$$\dot{Q}_{prom} = hA_s(T_{s,prom} - T_{\infty}) = (53.62)(2.394E - 3)(420 - 25) = 50.705 [J]$$

En seguida se determina el calor total transferido desde el cilindro, el cual es simplemente el cambio en la energía de ésta conforme se enfría desde 815°C hasta 25°C:

$$m = \rho V = \rho \pi r^2 L = (7850)(\pi)(0.0254^2)(0.015) = 0.2387 [Kg]$$

$$Q_{total} = mc_p(T_2 - T_1) = (0.2387)(694)(815 - 25) = 130.87E3$$

Por último, se determina el tiempo al dividir la transferencia de calor total entre la transferencia de calor promedio.

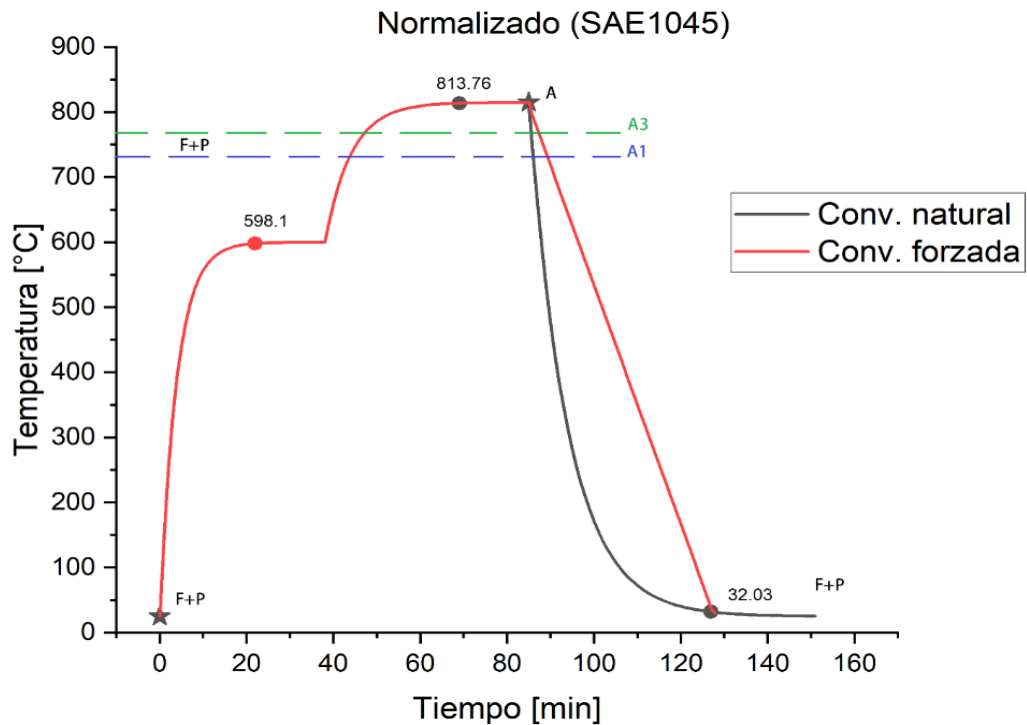
$$\Delta t \approx \frac{Q_{total}}{\dot{Q}_{prom}} = \frac{130.87E3}{50.705}$$

$$\Delta t \approx 2581.01 [s] \text{ ó } 43.02 [min]$$

Si el cálculo se realiza con el primer análisis, el resultado obtenido es de **45 min**. Tal como se mencionó el valor obtenido no tiene mucha variación.

- Diseño del tratamiento

A continuación, se muestra el diseño del tratamiento térmico de normalizado para ambos tipos de acero.



Gráfica 3. Representación esquemática de la secuencia del tratamiento térmico de normalizado a diferentes tipos de convección (natural y forzada) del acero SAE 1045.

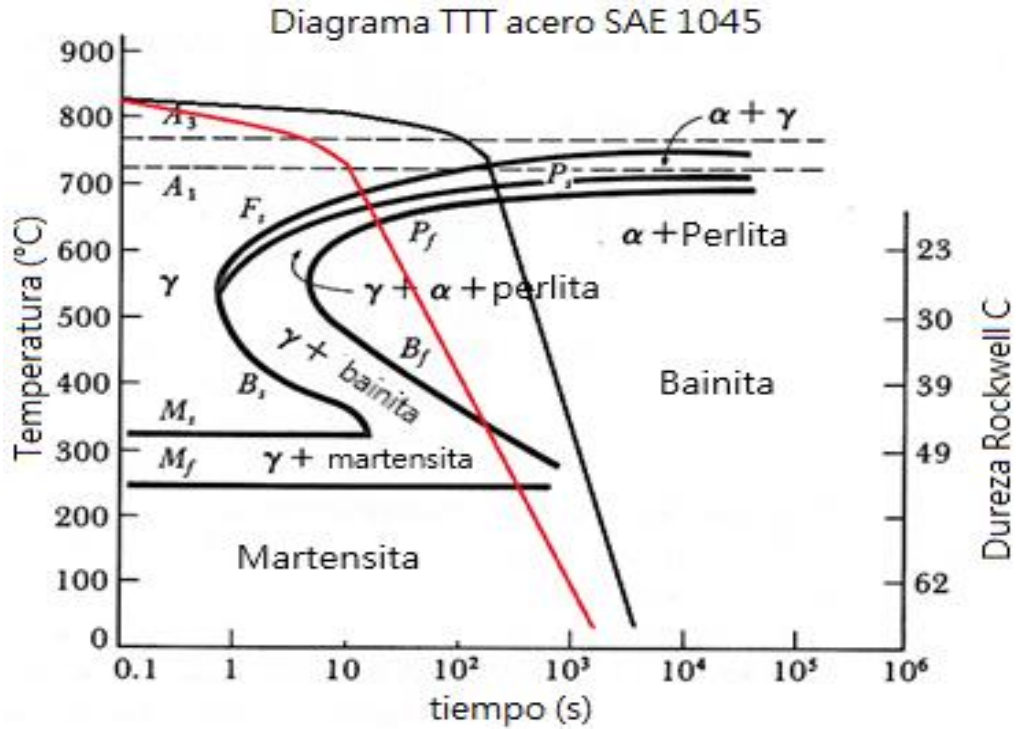
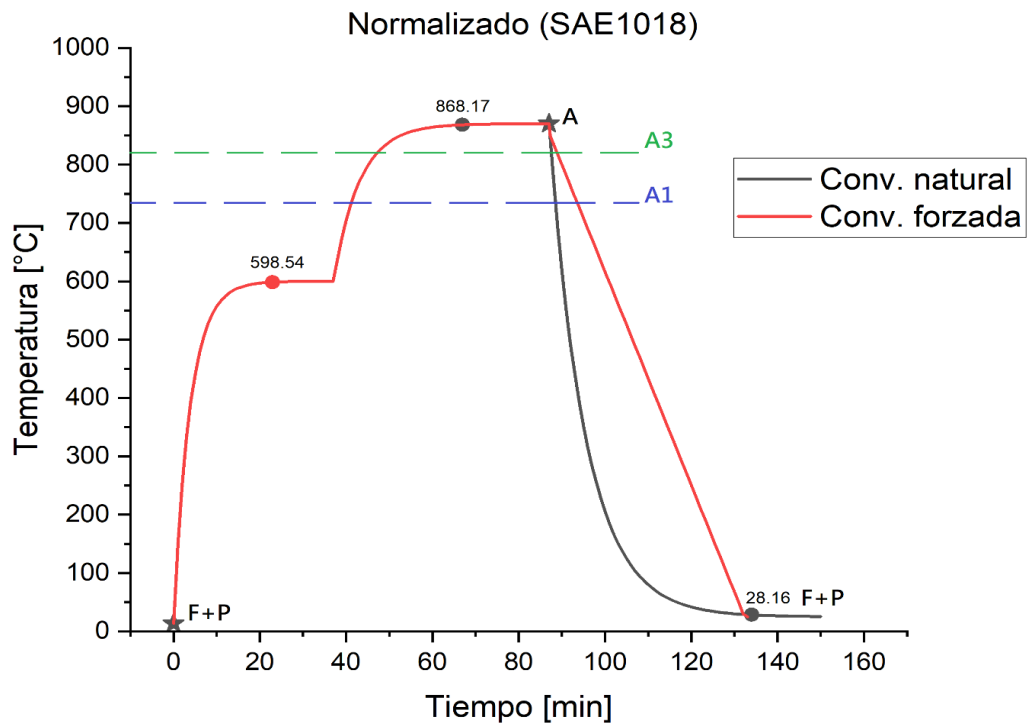


Figura 9. Aplicación del normalizado (natural y forzada) en el diagrama TTT. Con este tratamiento se espera una dureza aproximada de 20 a 21 HRC y de 22 a 23 HRC respectivamente. Adicionalmente se espera una microestructura de perlita y ferrita para ambos casos.



Gráfica 4. Representación esquemática de la secuencia del tratamiento térmico de normalizado a diferentes tipos de convección (natural y forzada) del acero SAE 1018.

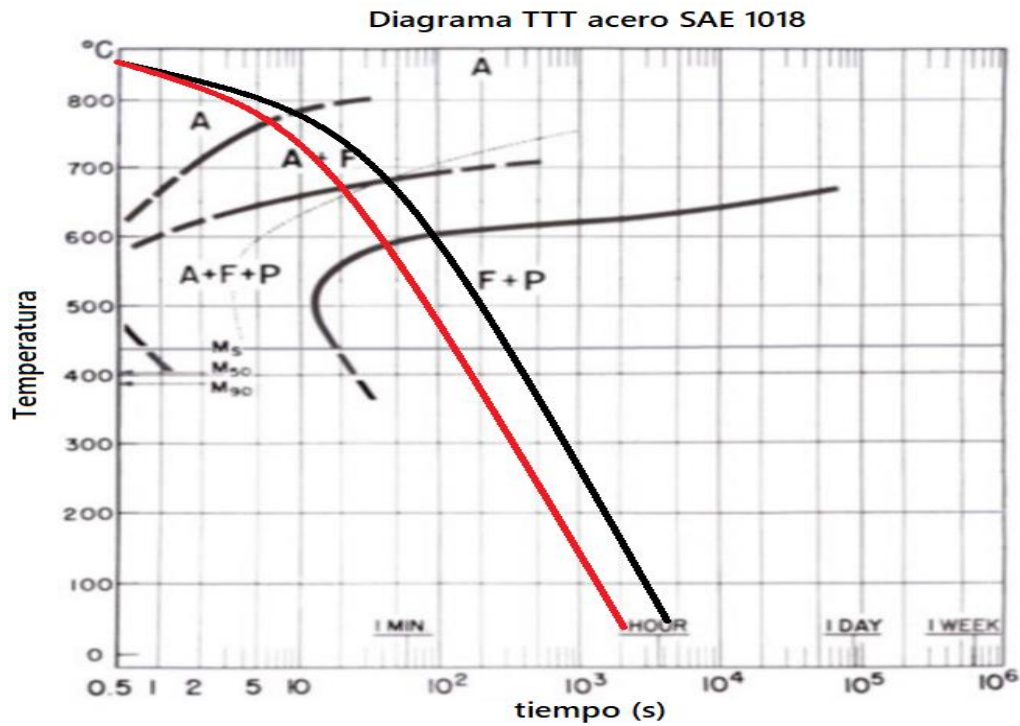


Figura 40. Aplicación del normalizado (natural y forzada) en el diagrama TTT. Con este tratamiento se espera una dureza aproximada de 80 a 85 HRB y de 86 a 90 HRB respectivamente. Adicionalmente se espera una microestructura de perlita y ferrita para ambos casos.

2.4.3 Determinación de los parámetros de recocido.

Como último tratamiento térmico de la investigación se desarrollan los cálculos para la determinación de los parámetros de un recocido. Para este caso se efectuarán un recocido completo y uno incompleto, con la finalidad de mostrar las diferencias que existe entre ellos.

I. Calentamiento

a. Completo

Dada la literatura se puede encontrar que el rango de temperatura para este tratamiento va de los 30 a 50 °C por encima de la temperatura intercrítica A₃, es decir la misma temperatura que ya se ha calculado para los procesos anteriores. Es por eso que solo se muestra el resultado, pero en sí, el proceso para el cálculo es el mismo.

$$\frac{814.5 - 815}{25 - 815} = \left(1.0021e^{-(0.1092^2)\left(\frac{8.196E-06t}{0.0075^2}\right)} \right)_{pared} \left(1.01028e^{-(0.2862^2)\left(\frac{8.196E-05t}{0.0254^2}\right)} \right)_{cilindro}$$

$$t = 2187.1654 [s] \text{ ó } 36.453 [min]$$

Tiempo requerido para realizar el recocido completo

Ahora, se calcula el tiempo de mantenimiento durante esta temperatura, la cual se basa en lo que se puede encontrar en la literatura, se menciona que el tiempo va desde las 3 y 4 horas [27], pero que esta dependerá siempre del espesor y del material. Como no es posible obtener el tiempo de mantenimiento a través de un cálculo, se tomará el tiempo de 3 horas, puesto que se piensa que es suficiente para las probetas en cuestión.

b. Incompleto

Para el recocido incompleto, se tiene que la temperatura en que se efectúa dicho tratamiento es en el rango de los 600 a 700°C, para este caso se plantea ocupar la temperatura intermedia entre los dos valores, es decir 650°C, entonces bajo esta condición, el cálculo quedó de la siguiente manera.

$T_i = 20^\circ\text{C}$ (temperatura ambiente a la que se encuentra el material)

$T_\infty = 650^\circ\text{C}$ (temperatura final o temperatura objetivo)

$T_0 = 650^\circ\text{C}$ (temperatura que se debe tener al centro del material)

Tabla 21. Valores de las constantes λ y A , asociados al Biot calculado. [18]

Pared plana			Cilindro		
Biot	λ	A	Biot	λ	A
0.01	0.0998	1.0017	0.04	0.2814	1.0099
0.01227	0.1092	1.0021	0.04155	0.2862	1.01028
0.02	0.141	1.033	0.06	0.3438	1.0148

Entonces, se tiene lo siguiente:

$$\frac{649.5 - 650}{25 - 650} = \left(1.0021 e^{-(0.1092^2) \left(\frac{1.28E-05t}{0.0075^2} \right)} \right)_{pared} \left(1.01028 e^{-(0.2862^2) \left(\frac{1.28E-05t}{0.0254^2} \right)} \right)_{cilindro}$$

Resolviendo para la ecuación.

$$t = 1646.43 [s] \text{ ó } 27.44 [min]$$

Al igual que el caso anterior, el tiempo de mantenimiento se estima en 3 horas, debido al mismo criterio.

II. Enfriamiento

Para comenzar los cálculos requeridos para obtener el tiempo de enfriamiento del recocido, es necesario definir una nueva variante de la ecuación que se ha planteado durante todo el desarrollo de la investigación, la cual tiene lugar cuando se tiene un análisis de sistemas concentrados, en donde se mantiene una temperatura constante en alguno de sus extremos. Esto debido a que este tratamiento se caracteriza por un enfriamiento lento dentro del horno, por lo cual se tiene la condición de que las paredes internas del horno se encuentran a la misma temperatura que el material que contienen, mientras que las paredes exteriores se encuentran a la temperatura del medio ambiente. Es decir, la temperatura interna estará cambiando hasta que haya un equilibrio térmico con la temperatura exterior, la cual se mantendrá constante (condición ideal, pero válida para el análisis).

A continuación, se muestra la ecuación:

$$\frac{T_x - T_\infty}{T_i - T_\infty} = e^{-bt}$$

(Ec 17)

Donde b, se define de la siguiente manera:

$$b = \frac{h}{\rho c_p L_c}$$

(Ec 18)

a. Completo

Entonces solo será necesario sustituir los valores en la ecuación que previamente se ha definido.

$T_i = 815^\circ\text{C}$ (temperatura a la que se encuentra el material)

$T_x = 26^\circ\text{C}$ (temperatura final o temperatura objetivo)

$T_\infty = 25^\circ\text{C}$ (temperatura de la superficie).

Adicionalmente se considera que el horno tiene paredes de alúmina de 20 cm de espesor es decir (20 x 20 x 20 [cm]), con una conductividad térmica de $k=2.3$ [W/mK], $C_p=835$ [J/KgK] y $\rho = 3010$ [Kg/m³], mientras que el coeficiente de transferencia de calor por convección se estima de $h=5$ [W/m²K].

Primeramente, se calcula la longitud característica, así como el número de Biot para saber si se cumple la condición ($Biot < 0.1$).

$$L_c = \frac{V}{A_s} = \frac{(0.2)^3}{3(2(0.2 * 0.2))} = \frac{0.008}{0.24} = 0.033 \text{ [m]}$$

$$Bi = \frac{hL_c}{k} = \frac{5 * 0.033}{2.3} = 0.072$$

$$Bi = 0.072 < 0.1 \text{ (aplica el criterio)}$$

Como el criterio es aplicable, se procede a sustituir los valores en la ecuación Ec18.

$$b = \frac{h}{\rho c_p L_c} = \frac{5}{3010 * 835 * 0.033} = 60.2841E - 6$$

$$\frac{T_x - T_\infty}{T_i - T_\infty} = e^{-bt} \rightarrow t = -\frac{1}{b} \ln\left(\frac{T_x - T_\infty}{T_i - T_\infty}\right) = -\frac{1}{60.2841E-6} \ln\left(\frac{26 - 25}{815 - 25}\right)$$

Resolviendo la ecuación, se tiene:

$$t = 110676.42 [s] \text{ ó } 30.74 \text{ horas}$$

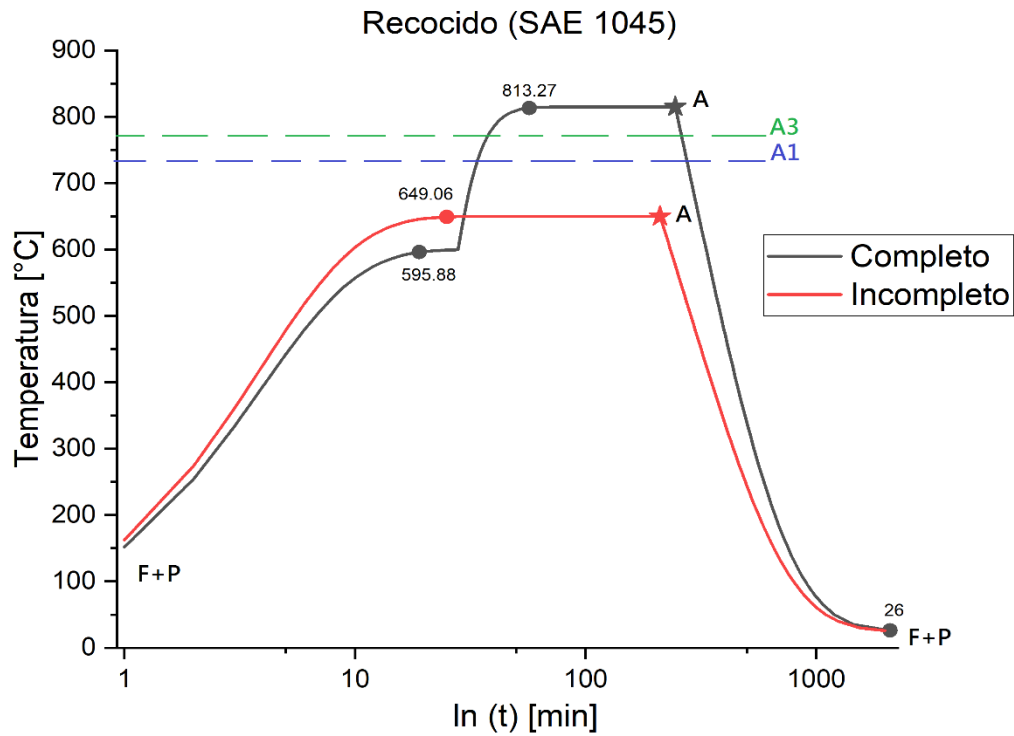
b. Incompleto

Para el proceso de enfriamiento del recocido incompleto, los cálculos para la obtención del tiempo de enfriamiento son análogos, simplemente se cambia el valor de la temperatura inicial, que para este caso sería de 650°C, es por esta razón que en este apartado solo se muestra el resultado de la solución de la ecuación.

$$t = 106790.13 [s] \text{ ó } 29.66 \text{ horas}$$

- Diseño del tratamiento

Ahora se muestra el diseño del tratamiento de recocido para ambos aceros, en la cual se menciona la microestructura esperada y la dureza aproximada.



Gráfica 5. Representación esquemática de la secuencia del tratamiento térmico de recocido a diferentes temperaturas (completo e incompleto) del acero SAE 1045.

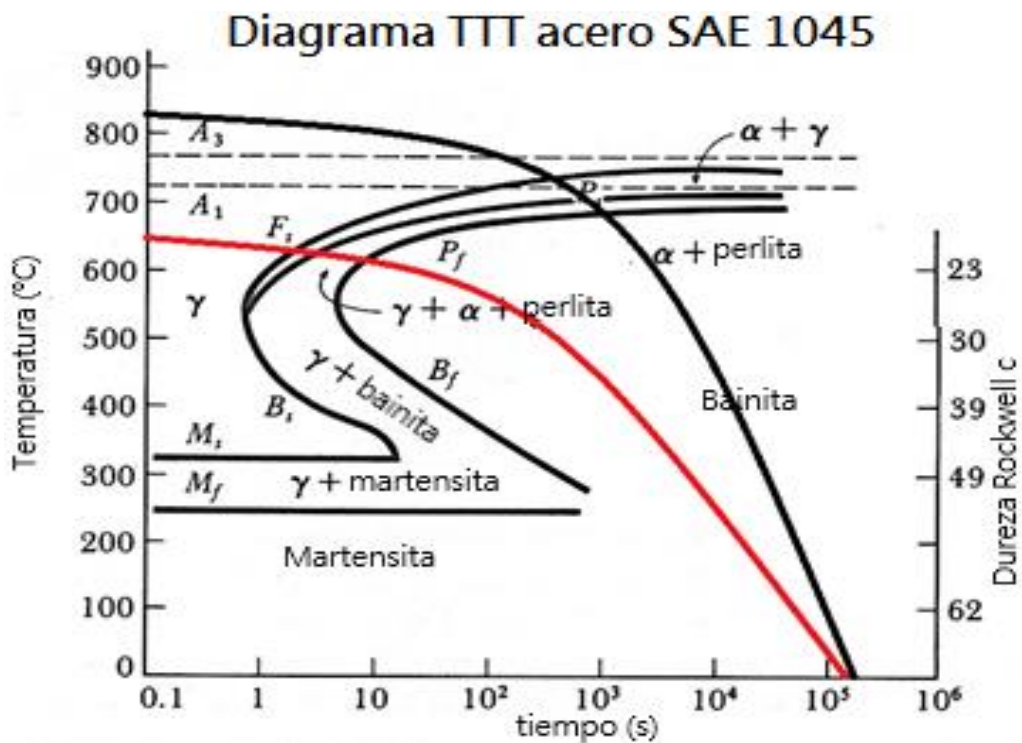
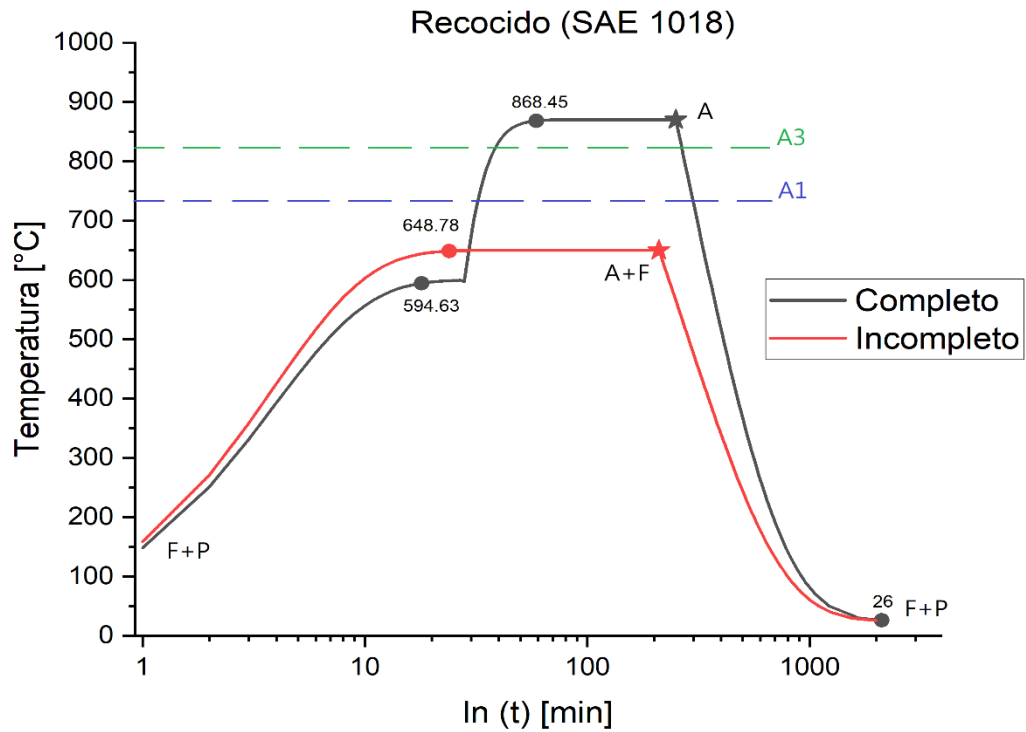


Figura 51. Aplicación del recocido (completo e incompleto) en el diagrama TTT. Con este tratamiento se espera una dureza aproximada de 20 a 23 HRC y de 23 a 25 HRC respectivamente. Adicionalmente se espera una microestructura de perlita y ferrita para ambos casos.



Gráfica 6. Representación esquemática de la secuencia del tratamiento térmico de recocido a diferentes temperaturas (completo e incompleto) del acero SAE 1018.

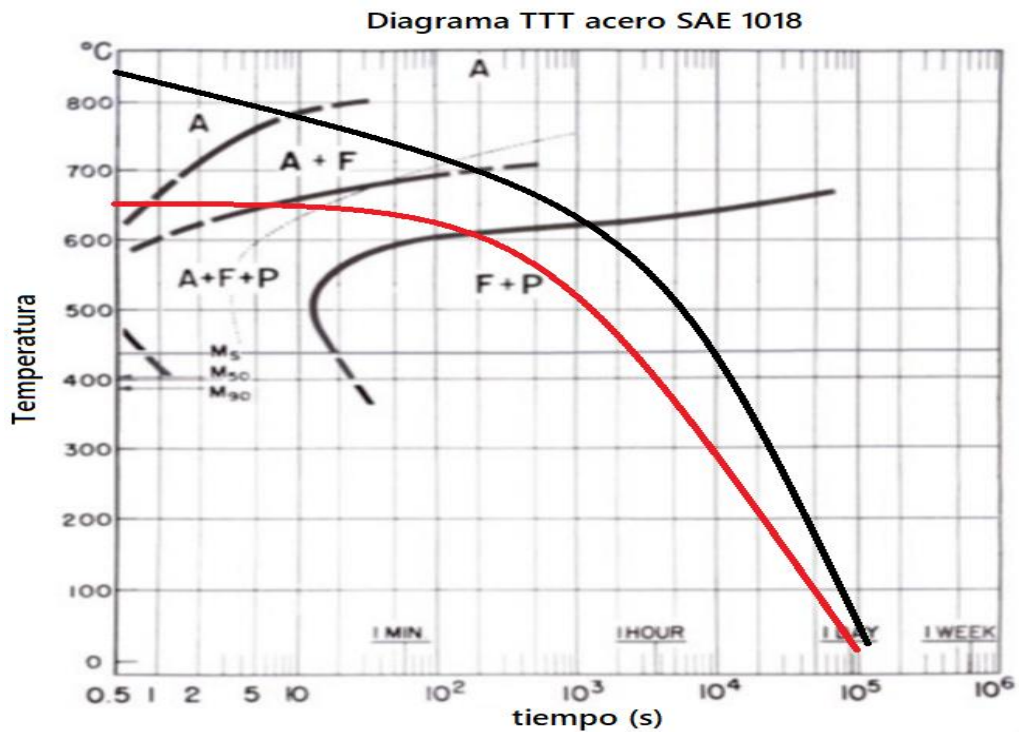


Figura 62. Aplicación del recocido (completo e incompleto) en el diagrama TTT. Con este tratamiento se espera una dureza aproximada de 76 a 78 HRB y de 84 a 86 HRB respectivamente. Adicionalmente se espera una microestructura de perlita y ferrita para ambos casos.

Capítulo 3. Metodología.

3.1 Obtención del material.

El material requerido para el desarrollo de esta investigación fue adquirido a partir de la aportación de la empresa *Carpenter Aceros Fortuna®*, la cual donó dos redondos de acero SAE 1018 y 1045 de 2" de diámetro y 1.5 [m] de longitud (ver figura 13).



Figura 73. Redondos de acero A. SAE1018, B. SAE 1045. Diámetro de 2" y longitud de 1.5 [m].

En la página de la empresa [28], se muestran algunos datos e información técnica de dichos materiales, sin embargo, no proporciona datos relevantes que puedan ocuparse como referencia en la investigación, por ello es necesario realizar algunas pruebas previas de caracterización para comparar con las propiedades que se obtienen después de realizar los tratamientos térmicos.

3.2 Preparación de las probetas.

Ahora que se conoce las características de los materiales a trabajar, se continúa realizando una matriz de configuración (ver tabla 22), a fin de conocer la cantidad necesaria de muestras que se requieren para realizar todas las pruebas.

Tabla 22. Matriz de configuración

Prueba	Variación del TT	Acero SAE 1018		Acero SAE 1018	
		Muestra	Muestra	Muestra	Muestra
		A	B	A	B
Caracterización inicial	No aplica	1	1	1	1
Difusión	No aplica	2	2	2	2
Temple y revenido	Alto	1	1	1	1
	Bajo	1	1	1	1
Normalizado	Natural	1	1	1	1
	Forzado	1	1	1	1
Recocido	Completo	1	1	1	1
	Incompleto	1	1	1	1
Suma		9	9	9	9
Total (para tres pruebas)		36x3=108			

La matriz de configuración determina que las probetas totales para realizar la investigación serán de 108, en la cual solo se consideran tres muestras para cada prueba, esto con el fin de rectificar que el desarrollo del proceso se hizo de manera adecuada.

3.2.1 Corte.

Después de obtener la cantidad necesaria de probetas o muestras a utilizar para las pruebas posteriores, se realizó el corte de cada una de ellas, presentando las dimensiones que se plantearon en la sección de los cálculos de esta investigación (cilindros cortos de 2" de diámetro y una altura de 1.5 cm). Para poder llevar a cabo este paso, se hizo uso de una tronadora o cortadora con disco de corte abrasivo.

Cabe mencionar que, aunque el corte se hizo de manera controlada, es decir midiendo e identificando el área de corte, este se vio modificado debido a varios factores durante el proceso, por lo que la dimensión de altura o espesor tuvo una variación de lo que ya se tenía contemplado, sin embargo, esta dimensión no rebaso más allá de algunos milímetros (promedio de +/- 0.3).



Figura 84 Probetas – Muestras

3.2.2 Desbaste.

Una vez cortados los discos, se procedió a realizar el desbaste en una de las caras de estos, con el fin de preparar la superficie y de esta manera realizar la metalografía.

En este proceso se realizó lo siguiente: dado que las líneas de corte del disco abrasivo estaban demasiado marcadas se procedió a llevarlas al esmeril de banco, con lo cual se obtuvo un rayado uniforme y menos agresivo (menos profundo y con un solo plano). Posteriormente se procedió a realizar el trabajo de lijado, comenzando con un desbaste grueso utilizando una lija del número 80 (80 granos por pulgada lineal), posteriormente se utilizó una del número 120, 180 y finalmente de 220. Cabe señalar que para que el proceso se realice adecuadamente, el lijado debe de realizarse de manera perpendicular a las líneas desbaste anterior.

Una vez conseguido el desbaste grueso, se realizó el desbaste fino. Para este proceso fue necesario utilizar las lijadoras metalográficas que se ubican en los laboratorios y talleres de ingeniería mecánica en la Facultad de Ingeniería (UNAM), en donde se siguió el mismo proceso anterior de lijado, pasando por las lijas, 240, 320, 500, 800, 1000, 1200, 1500 y 2000. Una vez terminado el proceso en todas las probetas, se podía observar un acabado uniforme y las líneas de desbaste eran poco perceptibles, por lo que el siguiente paso fue realizar el pulido de las probetas.

3.2.3 Pulido.

Para realizar el pulido de las muestras, consistió en dos etapas, el pulido grueso y el pulido fino. El primero de ellos se nombra así dado al material usado para dar el acabado, en este caso se habla de alúmina gris, que tiene la característica de ser un polvo del color grisáceo y que tienen la dimensión promedio de 20 micras de diámetro. Mientras que el pulido fino se caracteriza por el uso de alúmina blanca, en donde se puede obtener dimensiones promedio de 0.5 micras de diámetro. La manera de uso de ambas alúminas se basa en realizar una mezcla de las alúminas con una cierta cantidad de agua, para que posteriormente esta se aplique en un paño para pulido metalográfico, el cual está montado en una pulidora.

El principio de pulido es similar al del desbaste, puesto que al realizar el proceso se debe verificar que se haga de tal manera que las líneas de lijado queden de manera perpendicular a las del pulido, y cuando estas se hayan eliminado se procede a cambiar al siguiente pulido, hasta llegar a un acabado espejo.

Para poder realizar este proceso se tuvo que hacer uso nuevamente de las instalaciones de los laboratorios de la Facultad de Ingeniería (UNAM).

Finalmente, para terminar este proceso se recomienda enjuagar con agua la muestra y posteriormente aplicar un poco de alcohol para evitar la corrosión de las piezas que ya han sido pulidas.

3.3 Caracterización del material base.

Para realizar el análisis metalográfico, primeramente, se realizó un ataque químico a las muestras. En este caso se utilizó una solución de nital al 5%. [31]

Para esto se prepara la cara previamente pulida (limpiar de cualquier partícula contaminante), y con un gotero se aplica una gota de la solución (nital 5%) en dicha cara y posteriormente enjuagar con agua y alcohol, finalmente se seca a través de una pistola de aire caliente y se lleva al microscopio. Para este caso se determinó de manera experimental que el tiempo requerido de espera una vez aplicado la solución en el material para tener una buena revelación de la composición del mismo fue de 6 segundos.



Figura 159. Microscopio metalográfico eclipse.

Después de observar la microestructura de las muestras, se procede a obtener el valor de durezas, para el cual se hizo uso de un durómetro mitutoyo®.

Para este caso se ocuparon escalas Rockwell B y C, puesto que los rangos de durezas esperadas en estos materiales se encontraban en dichas escalas.



Figura 16. Durómetro mitutoyo.

3.4 Efecto del descarburizado.

Seguido de los pasos anteriores, se efectuaron pruebas que determinaran el efecto de la descarburización, para lo cual se realizó una prueba directamente en el horno, en donde ambos materiales fueron llevados a su temperatura Ac3 y después se enfriaron en agua común. Posteriormente estas muestras se tuvieron que volver a pulir debido a la capa de óxido que se forma al salir del horno, seguido de un ataque químico y finalmente un análisis metalográfico, con este último se buscó determinar la distancia promedio de la capa de carbono que se formó en la superficie de las probetas.

Después de lo anterior, las probetas fueron llevadas al durómetro, esto con el fin de apreciar el efecto que se tuvo la descarburización. En donde se obtuvo el perfil de durezas desde el centro del material hasta la periferia de la circunferencia.

3.4.1 Cobrizado.

Ahora que se tenía en cuenta que la descarburización era un fenómeno que podría afectar en las propiedades mecánicas de las muestras cuando estas fueran tratadas térmicamente, se procedió a generar un recubrimiento que las protegiera, por lo que se aplicó un proceso de cobrizado a fin de generar un depósito de cobre en la superficie de las probetas.

Para poder llevar a cabo dicho proceso, se utilizó sulfato de cobre y agua destilada, en donde a partir de generar una solución sobresaturada de dichos elementos, se obtuvo la solución adecuada para sumergir las probetas.

Las probetas antes de ser sumergidas fueron limpiadas perfectamente de cualquier contaminante, puesto que esto podría generar un mal recubrimiento en la superficie, además cabe mencionar que estas fueron sumergidas una a la vez y con un tiempo controlado (15 segundos), con el fin de mantener un espesor constante en la superficie.

Finalmente, para analizar si el recubrimiento había sido correcto y funcional, se volvieron a realizar pruebas de metalografía y de durezas en las muestras.



Figura 17. Probetas posteriores al proceso de cobrizado.

3.5 Metodología de los tratamientos térmicos.

Para el desarrollo de los tratamientos térmicos se hizo nuevamente uso de las instalaciones de la facultad de ingeniería (UNAM), en donde mediante el uso de los hornos se pudieron efectuar todos los tratamientos térmicos.

3.5.1 Temple y revenido.

El proceso para realizar este tratamiento térmico fue el siguiente: primeramente, se colocaron las probetas dentro del horno, para que posteriormente este se encendiera, en donde la primera parte del tratamiento era realizar un precalentamiento, por lo cual este se configuró para que llegara a una temperatura de 600°C. Una vez llegado a esta temperatura se mantuvo por un tiempo de 10 min (en ambos materiales). Posteriormente se incrementó la temperatura en el horno, de tal manera que este alcanzara el valor de *set point*, y se mantuvo durante el tiempo que marcaba el diseño del tratamiento (20 min). Cumpliendo con los tiempos establecidos, el horno se apagó y las probetas fueron sacadas del mismo, las cuales inmediatamente fueron sumergidas en un recipiente de aceite (IBERTEMP LS) para llevar a cabo el temple.

Después de haber realizado el proceso de temple y haber obtenido que las temperaturas de las probetas igualaran la del medio ambiente (25°C), se realizó el proceso, de revenido, para este caso se volvió a emplear el mismo horno, cambiando los parámetros de la temperatura según fuera el caso (revenido alto a 550°C o revenido bajo a 250°C). Una vez completado los tiempos establecidos dentro del horno, las probetas fueron retiradas, pero en este caso el medio de enfriamiento fue a través de una convección natural con el aire que se encontraba en el ambiente.

Finalmente, al tener todas las probetas tratadas térmicamente, se prepararon nuevamente cada una de ellas para realizar la caracterización correspondiente y así, comparar los efectos que se tuvieron en cuanto al material base.

3.5.2 Normalizado.

Para el tratamiento de normalizado los pasos a seguir fueron igual al del temple en cuanto el precalentamiento y el calentamiento hasta la temperatura del set point. Sin embargo, para el enfriamiento se toma una ruta diferente, puesto que como ya se había analizado en el diseño del tratamiento, se tomaron dos alternativas para realizar este proceso, convección forzada y convección natural. Para el primer evento las probetas fueron retiradas del horno y se depositaron en una superficie en donde ya se encontraba una pistola de aire encendida con las siguientes características; velocidad de flujo de aire aproximadamente a 10 m/s y una temperatura del fluido de 30 °C, cabe mencionar que las probetas fueron acomodadas de tal manera que el flujo de aire fuera lo más proporcional posible para cada una de ellas. Ahora bien, para el segundo evento la metodología solo fue retirar las probetas y colocarlas en una superficie donde existiera un ambiente tranquilo y que mantuviera la temperatura del ambiente lo más constante posible.

Finalmente, las probetas se prepararon nuevamente para realizar las pruebas de caracterización.

3.5.3 Recocido.

Por último, se realizó el tratamiento de recocido, el cual a diferencia de los otros tratamientos el proceso es totalmente diferente, puesto que este se llevó a cabo de la siguiente manera.

Para el recocido completo, las probetas fueron ingresadas al horno y llevadas directamente a la temperatura de set point, en donde una vez llegado a dicha temperatura se mantuvieron por un tiempo de 3 horas, para que posteriormente el horno se apagara manteniendo las probetas dentro del mismo. Esto a la vez permitió conocer la temperatura a la que se encontraban las probetas dado que el horno no daba la lectura de la temperatura que se encontraba en su interior.

Para el recocido incompleto, el proceso fue similar al del recocido completo, sin embargo, la temperatura a la que se llevaron las probetas en este caso fue de 650°C, la cual también se mantuvo por un lapso de 3 horas y posteriormente se apagó el horno manteniendo las probetas en su interior.

Una vez alcanzado el equilibrio térmico entre el interior del horno y el medio ambiente en las dos pruebas, las probetas fueron retiradas del horno y posteriormente se prepararon para realizarles las pruebas requeridas para su caracterización.

Capítulo 4. Análisis de resultados

Ahora que se han realizado todas las pruebas necesarias para esta investigación, se requiere determinar los efectos que se obtuvieron en cuanto a las propiedades de los materiales empleados a partir del diseño de cada uno de los tratamientos planteados. Es por eso que en esta sección se estudia y se analizan los cambios microestructurales y de dureza, que se obtuvieron después de realizar los tratamientos térmicos.

4.1 Caracterización del material base.

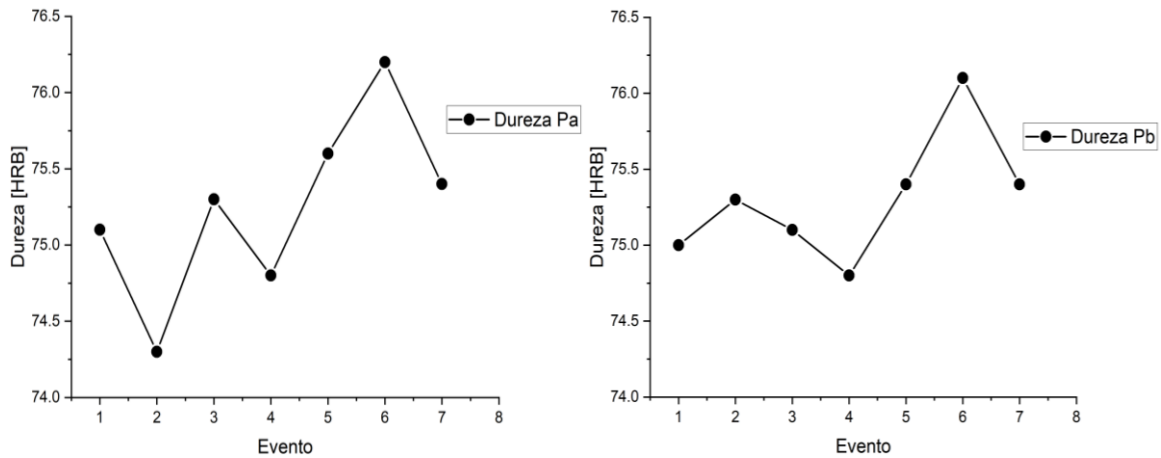
Como se mencionó durante el capítulo de la metodología, el material base se tuvo que caracterizar debido a que en la ficha técnica de ambos materiales no contaba con una información completa. Es por eso que durante el desarrollo de la investigación se tuvo que realizar las pruebas necesarias a estos materiales, para que al final se pudiera tener una referencia en cuanto a las modificaciones obtenidas. Una de estas pruebas fueron ensayos de dureza, para lo cual se tomaron siete lecturas a lo largo de la superficie, estas contaron con la distribución mostrada en la figura 18.



Figura 18. Distribución de los ensayos de dureza en las probetas (dimensiones en mm).

4.1.1 Acero SAE 1018.

A continuación, se muestran los resultados del análisis de la dureza superficial de las probetas, la cual se realizó de tal manera de obtener un perfil de durezas desde el centro del redondo a la periferia del mismo. Para este análisis se hizo un muestreo de 7 eventos.



Gráfica 7. Perfil de durezas acero SAE 1018, de lado izquierdo se tiene los resultados de la probeta 1 y de lado derecho el de la probeta 2.

Los resultados de la prueba de dureza en ambas probetas son muy similares, puesto que ambas comparten un rango de dureza que van de los 74 a los 76 HRB, teniendo un promedio de 75.2 y 75.3 HRB respectivamente. Dichos valores están dentro del rango de dureza que caracterizan a este tipo de acero.

Se llevo a cabo la metalografía para observar la microestructura del acero en cuestión. Donde prueba se pudo observar que las microestructuras de las muestras utilizadas compartían una composición en común, es por eso que a continuación solo se muestra el resultado de una de ellas.

Adicional se realizó un análisis digital para cada microestructura, esto para conocer la composición de las fases presentes en el material. Para obtener estos resultados se hizo uso del software libre llamado Fiji, el cual es un procesador de imágenes que, a partir de un análisis de píxeles, es capaz de determinar el porcentaje de colores que se tienen en la imagen lo cual obtiene fracciones de área.

En la Figura 19, se muestra la microestructura obtenida del acero, en donde se visualizan una composición formada a partir de dos fases, las cuales se identifican dadas sus características cualitativas en perlita y ferrita. Siendo la última la que tiene mayor presencia en el material, con una aportación de 66.1%. Dicha microestructura va de acuerdo a la cantidad de porcentaje de carbono que se encuentra en el acero.

- *Microestructura*

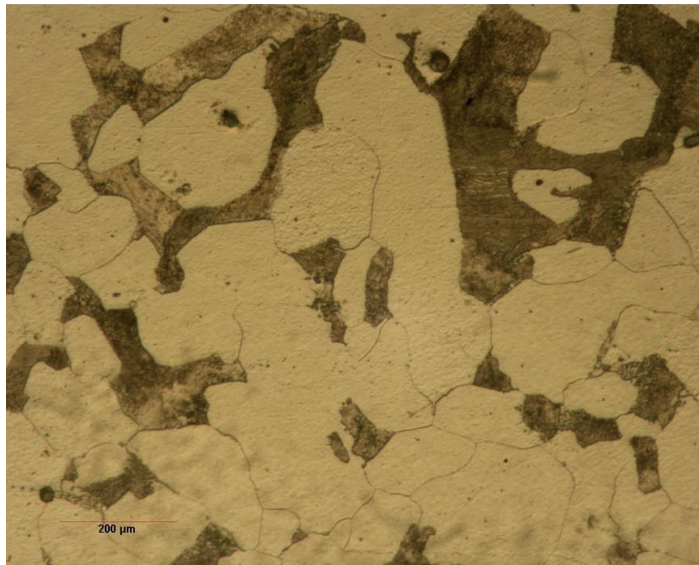
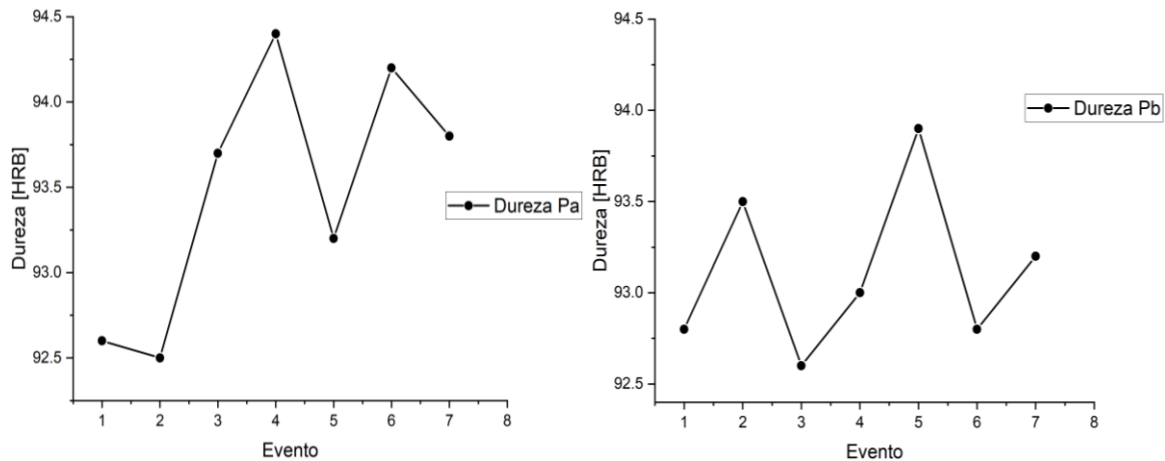


Figura 1910. Acero 1018 sin tratamiento térmico. La estructura es perlita (zona oscura) en una matriz de ferrita (zona blanca). En una composición de 33.9% de perlita y 66.1% de ferrita (en volumen). Atacado con Nital. 500X

4.1.2 Acero SAE 1045.

Para el acero SAE 1045, el proceso fue el mismo que en el caso anterior, a continuación, se muestran los resultados obtenidos de las pruebas realizadas.

Como resultado de la prueba de dureza, se puede analizar un comportamiento parcialmente uniforme o constante de la dureza a lo largo de la superficie de las muestras, dado que los valores obtenidos van de un rango de 92 a 94 HRB, con un promedio de 93.11 HRB. Estos valores obtenidos al igual que en el caso anterior corresponden al tipo de material en estudio, puesto que comercialmente se puede encontrar desde los 88 y hasta los 96 HRB. [30]



Gráfica 8. Perfil de durezas acero SAE 1045, de lado izquierdo se tiene los resultados de la probeta 1 y de lado derecho el de la probeta 2.

En la microestructura del acero se puede identificar una composición formada principalmente por dos fases, perlita y ferrita, pero en este caso se observa que las proporciones son diferentes a comparación del caso anterior. Ya que en este caso se tiene una mayor presencia de ferrita que de perlita. Esto se debe principalmente al contenido de carbono que se encuentra en el acero.

- *Microestructura*

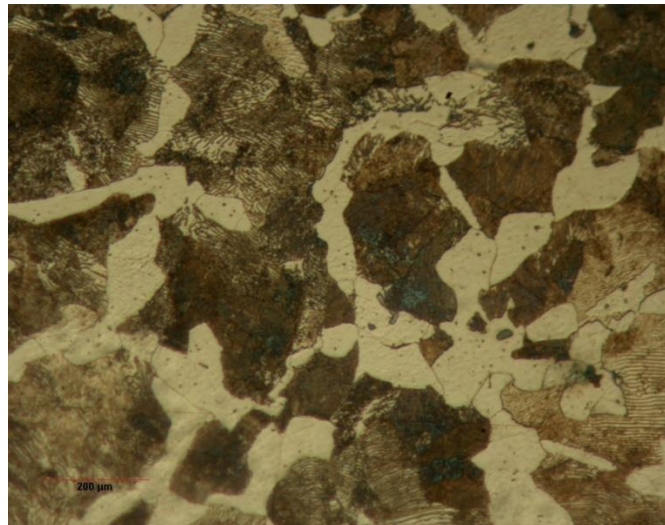


Figura 2011. Acero 1045 sin tratamiento térmico. La estructura es perlita (zona oscura) en una matriz de ferrita (zona blanca). En una composición de 64% de perlita y 36% de ferrita. Atacado con Nital. 500X

4.2 Efecto de la descarburización y cobrizado.

Primeramente, se muestran las probetas sin recubrimiento, a fin de visualizar el efecto de la descarburización y así comparar los resultados tanto teóricos como prácticos.

Cabe recordar que para poder obtener los resultados que a continuación se muestran, las probetas fueron sometidas a un templado, por lo que estas fueron llevadas a una temperatura superior de A_{c3} y enfriadas en un medio líquido. Posteriormente se obtuvo la microestructura y adicionalmente se realizó una prueba de dureza, para comprobar el efecto de dicho fenómeno.

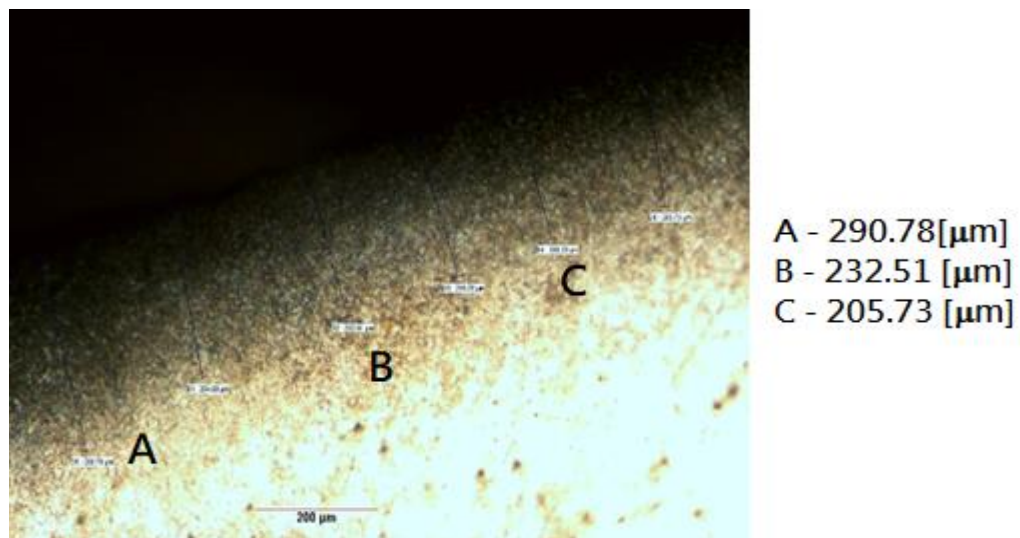


Figura 121. Efecto de la descarburización a 870°C en acero SAE 1018. 500X.

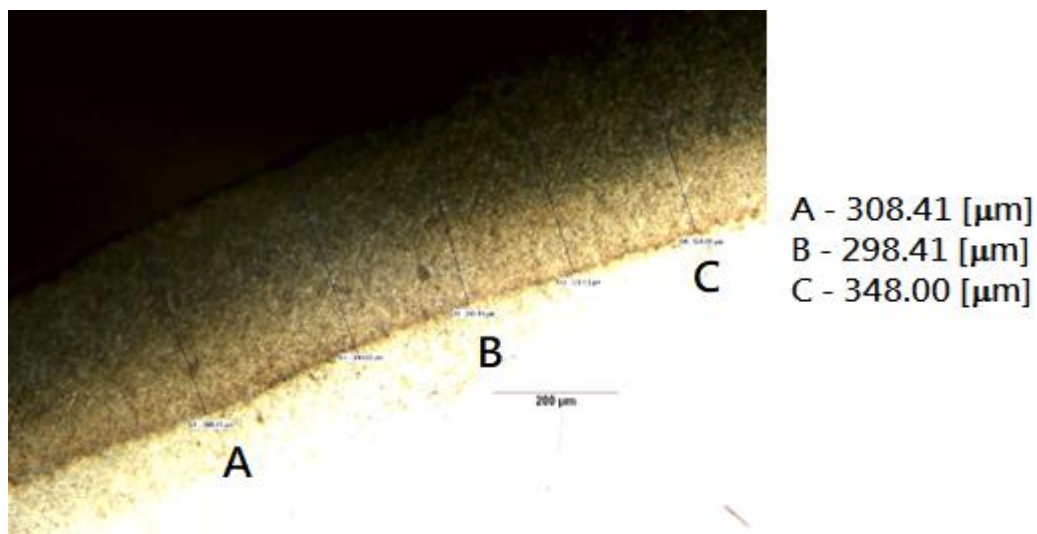


Figura 132. Efecto de la descarburización a 815°C en acero SAE 1045. 500X.

A partir de obtener la microestructura de ambos materiales sin recubrimiento y mediante un análisis por software, se pudo determinar la distancia para la cual el fenómeno de la descarburización tendría efecto en la superficie de las probetas. Como resultado de este análisis se pudo determinar que, la distribución de la franja de la descarburización, se mantiene parcialmente constante en la toda superficie de las probetas, de tal manera que se puede obtener un valor medio para cada material, en el caso del acero SAE 1018 se puede apreciar una distancia promedio de 234 μm , mientras que en el acero SAE 1045 se tiene un promedio de 319 μm . Si estos valores se logran comparar con los obtenidos de manera teórica, se puede determinar que el error es mínimo y por lo tanto es válido siempre y cuando tenga conocimiento de los parámetros del proceso. Para tener más claro que tan alejado es el valor teórico del valor práctico se puede consultar la siguiente tabla.

Tabla 23. Resultados teóricos y prácticos de la descarburización de los aceros SAE 1018 y 1045.

Acero	Distancia teórica [mm]	Distancia práctica [mm]	%Error relativo
1018	0.261	0.234	11.54
1045	0.264	0.319	17.24

Una vez analizado los resultados de las primeras pruebas, se continúa mostrando lo obtenido para el segundo caso.

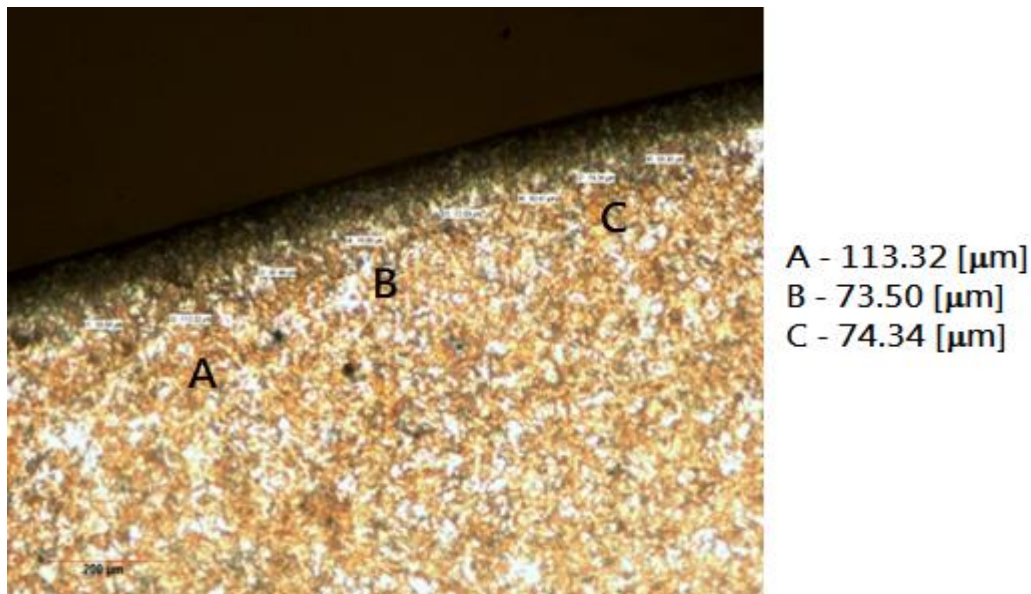


Figura 23. Efecto del cobrizado en acero SAE 1018 a 500X.

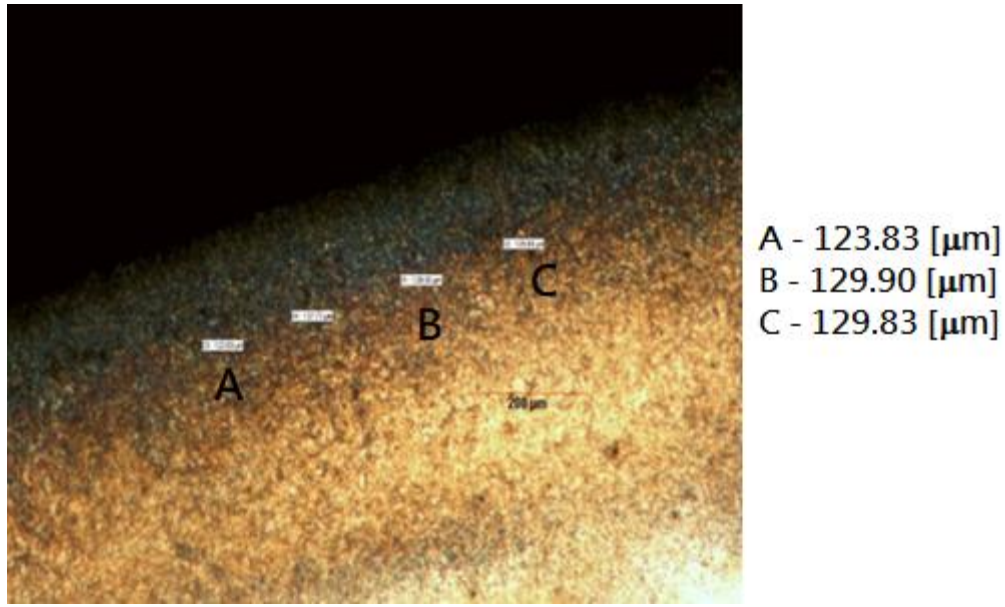


Figura 24. Efecto del cobrizado en acero SAE 1045 a 500X.

Como resultado de la microestructura de ambos aceros y mediante el análisis digital de cada uno, se determinó las distancias del fenómeno de descarburización presentado en las probetas. En donde a diferencia de la primera prueba se notó que la franja formada en la superficie de las probetas, lo cual se atribuye a la correcta aplicación del cobrizado, puesto que la hipótesis es de que el espesor del recubrimiento varía a lo largo de la superficie de las probetas, Probablemente se debió al tiempo en que las probetas estuvieron sumergidas en la solución de sulfato de cobre, o incluso también se puede considerar que el recubrimiento es poroso debido a agentes contaminantes presentes en la superficie de las probetas. Es por esta razón que para el análisis se consideró tomar el muestreo donde el espesor de dicha franja fuera lo mayormente uniforme.

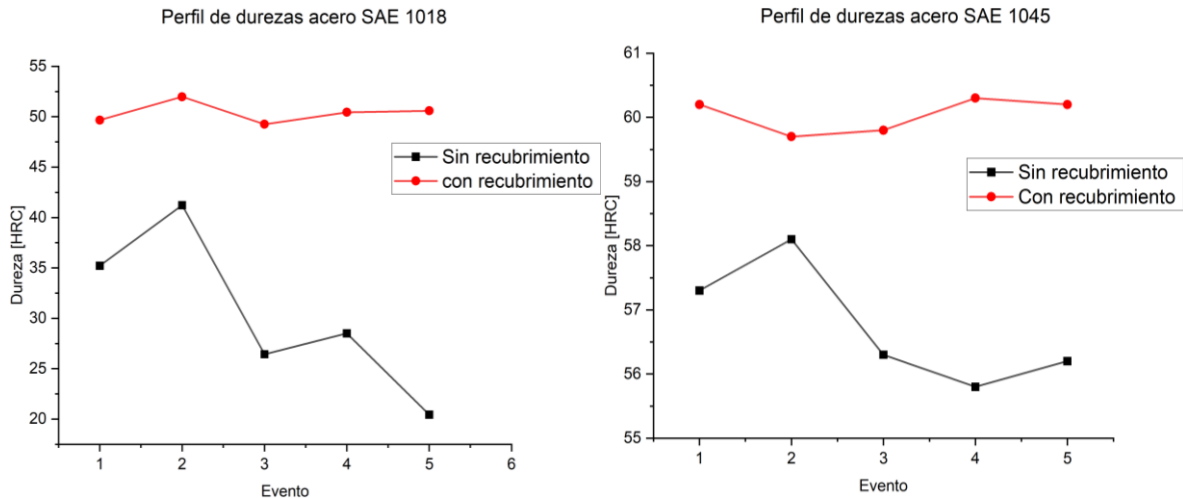
Como resultado de esta prueba, los datos obtenidos favorecieron al desarrollo de la investigación, ya que se reduce el espesor de la descarburización. El valor promedio fue 82.85 [μm] para el acero SAE 1018 y de 127.82 [μm], para el acero SAE 1045. A continuación, se muestra la tabla de la descarburización obtenida para ambos aceros.

Tabla 24. Efecto del cobrizado en la descarburización.

Acero	Distancia sin cobrizado [mm]	Distancia con cobrizado [mm]	% Decremento de la descarburización
1018	0.234	0.08285	64.59
1045	0.319	0.12783	59.92

Los resultados obtenidos permiten que los materiales tengan un buen comportamiento ante los cambios de temperatura, garantizado que las propiedades mecánicas puedan conservarse y potencializadas a partir de un tratamiento térmico.

Los ensayos de dureza permitieron reafirmar los resultados previamente obtenidos. Como se observan en las siguientes gráficas.



Gráfica 9. Perfil de durezas de los aceros SAE 1018 y 1045 con y sin cobrizado después de temple.

Analizando los perfiles de dureza de ambos materiales, se observa que los valores obtenidos en las probetas sin recubrimiento presentan un comportamiento no uniforme, ya que varía su dureza a lo largo de su superficie, cabe señalar que la mayor dureza se encuentra en centro del material, 41.2HRC para el acero SAE1018 y 58.1HRC para el acero SAE 1045. Mientras que en la periferia se registraron los valores más bajos, 20.4 y 55.8HRC respectivamente. Al aplicar cobrizado a las probetas la situación cambia, puesto que los valores de la dureza se mantienen constantes a lo largo de la superficie.

Por ello se puede reafirmar que el cobrizado funciona en contra de la descarburización, garantizado una menor pérdida de propiedades mecánicas. En la tabla 25 se puede ver la pérdida de dureza de las probetas cuando estas no están cobrizadas.

Tabla 25. Efecto del cobrizado en la dureza de los aceros SAE 1018 y 1045I.

Acero	Dureza promedio sin cobrizado [HRC]	Dureza promedio con cobrizado [HRC]	%Pérdida de dureza
1018	30.36	50.38	39.74
1045	56.74	60.04	5.50

4.3 Resultado del temple y revenido.

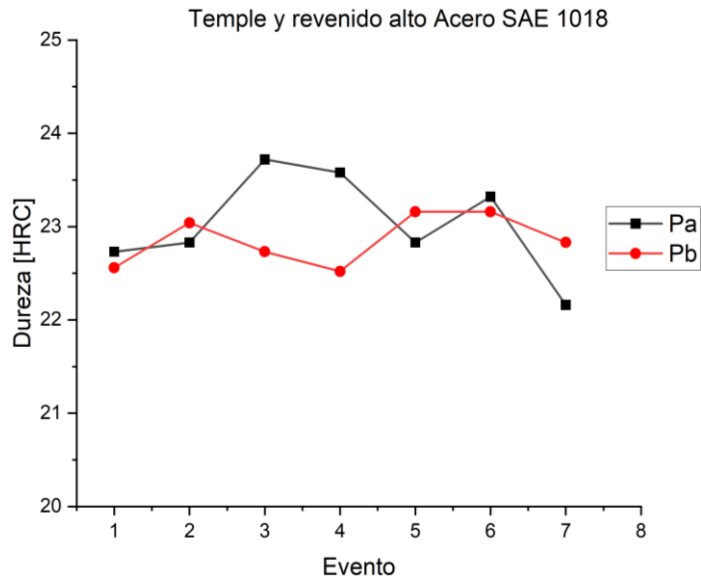
4.3.1 Acero SAE 1018.

Como resultado del tratamiento térmico de temple y revenido aplicado en el acero SAE 1018 con base al diseño previamente planteado y tomando en cuenta las dos variantes que se propusieron (revenido alto y bajo), se obtuvieron los siguientes análisis.

Comenzando por la prueba de revenido alto, se tiene que la microestructura obtenida y que se muestra en la figura 25, se caracteriza por ser una composición formada principalmente por ferrita de Widmanstätten, sin embargo, también es posible observar en menor porcentaje martensita revenida. Si se toma en cuenta la microestructura predominante en el material se puede entender que la elevada velocidad de enfriamiento afecta a la nucleación y crecimiento de la ferrita primaria originada a partir de la austenita. La cual nuclea en los límites de grano y crece en forma de agujas hacia el interior de los granos de austenita.



Figura 25. Microestructura del acero SAE 1018 con tratamiento térmico de temple y revenido alto (550°C). En la figura de la izquierda se tiene el resultado de la probeta A y de lado derecho el de la probeta B, en ambos casos se observa una microestructura formada principalmente por ferrita Widmanstätten y martensita revenida. Tomadas a 500X y atacadas con nital al 5%.



Gráfica 10. Perfil de durezas acero SAE 1018 templado y revenido (alto).

Siguiendo con el análisis de dureza del material en cuestión, se observa que las durezas obtenidas para ambos casos presentan una distribución similar, además de que se comportan de una manera casi constante a lo largo de su superficie. Teniendo valores promedios para la probeta A de 23.02 [HRC] y de 22.85 [HRC] para la probeta B. El valor de la dureza disminuye en comparación con el tratamiento de temple (ver tabla 25), lo cual es característico del revenido.

Ahora se analiza la segunda variante del tratamiento, es decir el tratamiento térmico de temple y revenido bajo. Para el cual se tiene la siguiente micrografía (figura 26), en donde se observa una microestructura formada por bainita, ferrita de Widmanstätten y de martensita revenida. Mientras que en su dureza el rango de valores en que se encuentra es de los 37 a 39 [HRC], la cual se distribuye de manera parcialmente homogénea en toda la superficie de las probetas, teniendo valores promedio de 38.17 y de 38.57 [HRC] para las probetas (A, B) respectivamente. Tal como el caso anterior, la dureza se ve disminuida al aplicar este tratamiento, lo cual es totalmente normal después de aplicar un revenido, sin embargo, la dureza en este caso (revenido bajo), es superior al del revenido alto.

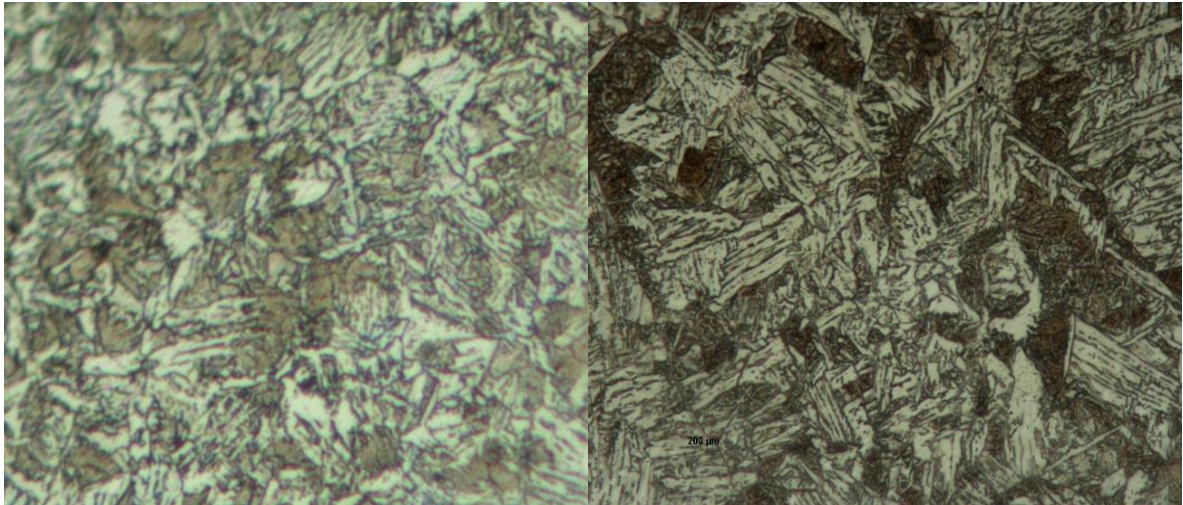
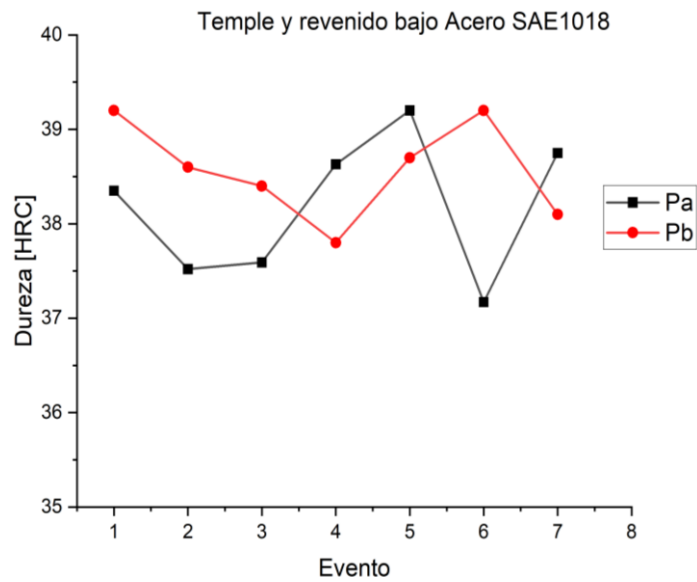


Figura 26. Microestructura del acero SAE 1018 con tratamiento térmico de temple y revenido bajo (250°C). En la figura de la izquierda se tiene el resultado de la probeta A y de lado derecho el de la probeta B, en ambos casos se observa una microestructura formada por bainita, ferrita Widmanstätten y martensita revenida. Tomadas a 500X y atacadas con nital al 5%.



Gráfica 11. Perfil de durezas acero SAE 1018 templado y revenido (bajo).

4.3.2 Acero SAE 1045.

Continuando con el análisis del tratamiento de temple y revenido, se estudian los resultados obtenidos para el acero SAE 1045.

Para el revenido alto de dicho material, se tienen los siguientes resultados que a continuación se muestran.

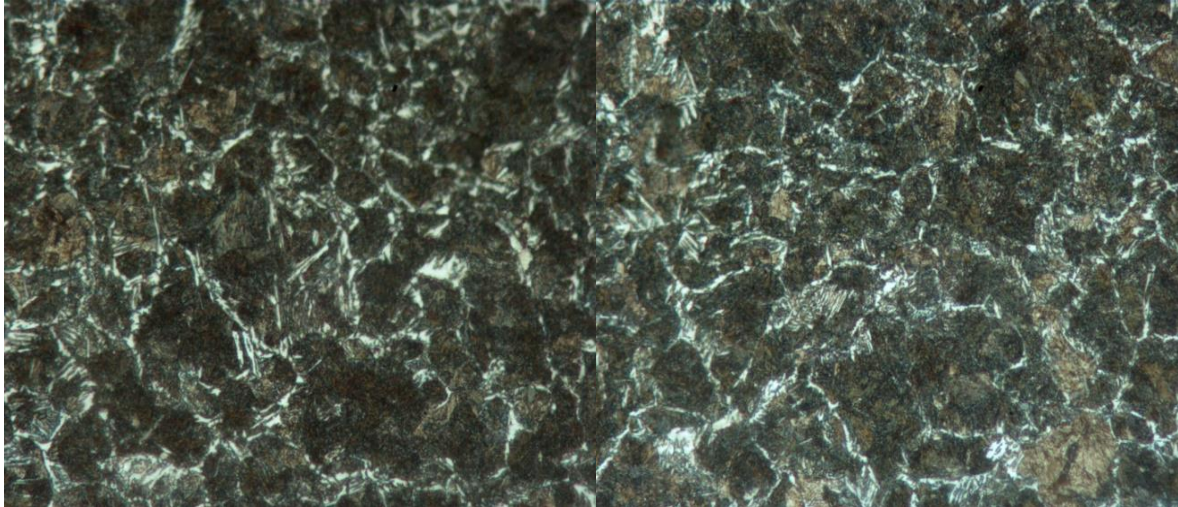
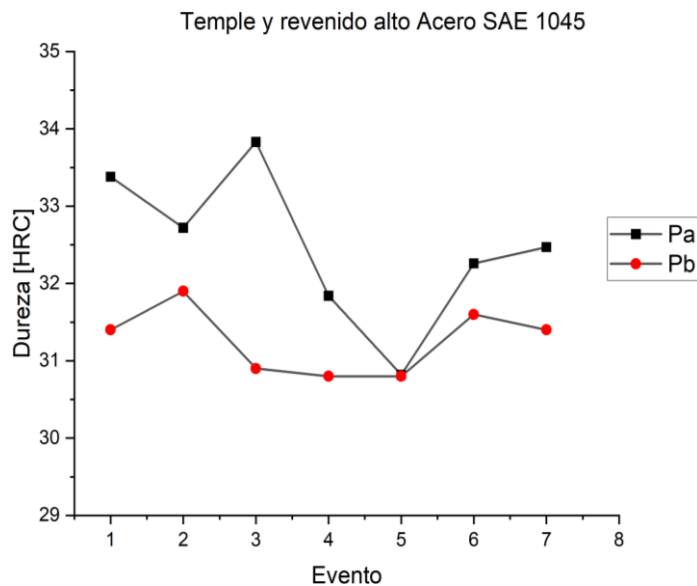


Figura 27. Microestructura del acero SAE 1045 con tratamiento térmico de temple y revenido alto (550°C). En la figura de la izquierda se tiene el resultado de la probeta A y de lado derecho el de la probeta B, en ambos casos se observa una microestructura formada principalmente por martensita revenida y en menor proporción por bainita. Tomadas a 500X y atacadas con nital al 5%.

En la figura 27, se puede observar la microestructura obtenida después de aplicar un revenido alto, en la cual se aprecia una composición formada principalmente por martensita revenida, así mismo, también se puede encontrar en menor proporción la estructura de bainita, ambas microestructuras son comunes de encontrar en este tipo de tratamiento.

Pasando al tema de dureza, se puede encontrar una distribución poco homogénea para la probeta A, la cual se puede atribuir a una falla en el recubrimiento de la probeta, tal como un espesor no uniforme o un espesor insuficiente e incluso se puede hablar de poros en el recubrimiento. Sin embargo, aun teniendo estas posibles alteraciones, se observa que a dureza tiene un rango de valores que van desde 30 a los 33 [HRC], teniendo un promedio de 32.47 [HRC]. Caso contrario en la probeta B, en donde se manifiesta una distribución más homogénea en su superficie, teniendo un promedio de dureza de 31.25 [HRC]. Tal como se ha mencionado en los casos anteriores la dureza disminuye en comparación de solo realizar un temple.



Gráfica 12. Perfil de durezas acero SAE 1045 templado y revenido (alto).

Por último, se tiene el temple y revenido bajo del acero SAE 1045, el cual presenta una microestructura formada principalmente por martensita revenida y bainita inferior. En estas micrografías se observa una diferencia en las probetas y esta es en el porcentaje entre estas dos composiciones que se han mencionado, puesto que en la probeta A se puede apreciar una mayor porción de martensita revenida que bainita, en cambio en la micrografía de la probeta B es una proporción más equilibrada entre ambas estructuras. Sin embargo, se creé que esto solo se debe a la sección en donde se tomó la imagen, por lo que se considera que estas microestructuras pueden coincidir en algún otro punto dentro de las probetas.

Siguiendo con el análisis de dureza de las probetas, se tiene que el perfil de durezas que proporcionan en ambos casos es similar, pero no son del todo uniforme, principalmente en el centro y la periferia, puesto que estas son las ubicaciones en donde se encuentran los valores máximos y mínimos respectivamente. Sin embargo, al obtener el valor promedio en ambos casos (54.97 y 55.57 [HRC] respectivamente), estos valores que se mencionan no están tan sesgados.

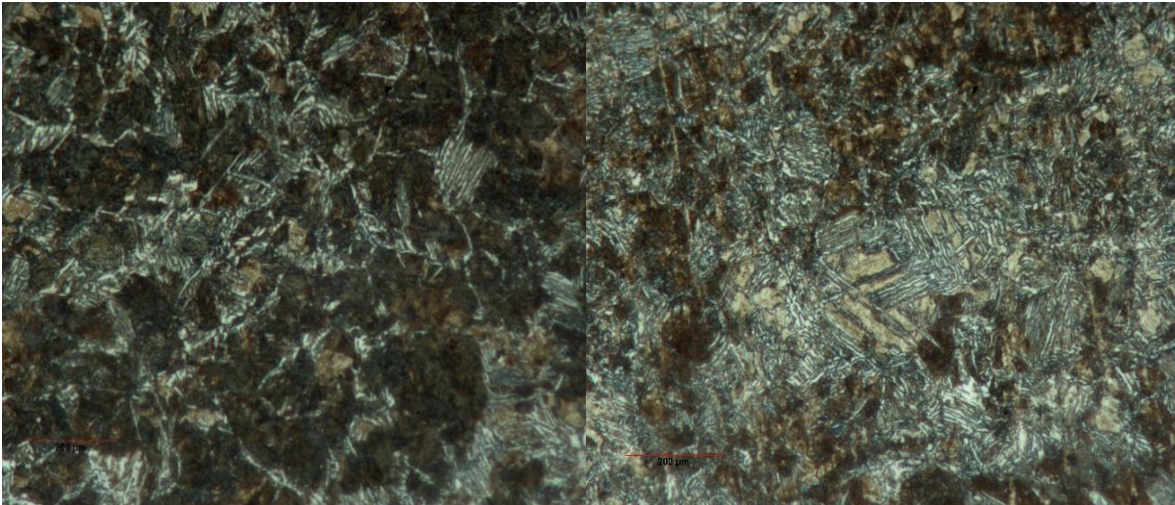
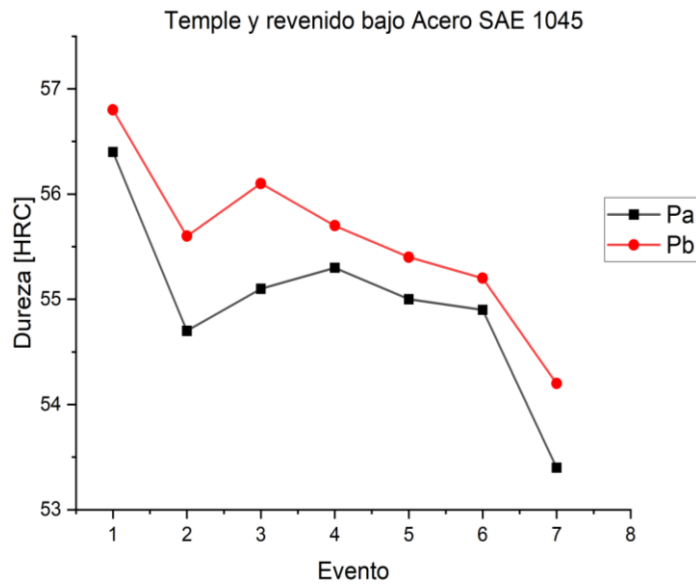


Figura 28. Microestructura del acero SAE 1045 con tratamiento térmico de temple y revenido bajo (250°C). En la figura de la izquierda se tiene el resultado de la probeta A y de lado derecho el de la probeta B, en ambos casos se observa una microestructura formada principalmente por martensita revenida y bainita. Tomadas a 500X y atacadas con nital al 5%.



Gráfica 13. Perfil de durezas acero SAE 1045 templado y revenido (bajo).

Analizando los resultados en el tratamiento de temple y revenido de ambos aceros, se determina que los efectos obtenidos a partir de un revenido alto tienen un impacto en la magnitud de la dureza en comparación a un proceso de temple, lo cual es totalmente normal debido al cambio microestructural que se efectúa en el proceso, pasando de martensita a

sorbita, esta última garantiza una mejor combinación de resistencia y tenacidad en acero, sin embargo, la dureza se ve disminuida teniendo un valor aproximado que va desde los 20 a los 40 HRC. En tanto al revenido bajo se tiene que el cambio microestructura va de martensita a ferrita y bainita, lo cual hace que la ductilidad aumente ligeramente, pero la tenacidad se siga manteniendo baja, con lo que hace que la dureza se vea poco afectada, decrementos de 5 a 10 unidades de dureza. En los resultados de esta investigación se aprecia que los valores de dureza para ambas aleaciones corresponden a los tratamientos aplicados, sin embargo, la pérdida de dureza es considerable cuando se comparan los mismos tratamientos en los dos materiales, y esto se debe principalmente a la composición de los aceros, puesto que al tener un acero de medio carbono, se tiene un mayor porcentaje de los elementos de aleación en comparación con un acero de bajo carbono. Otro aspecto a considerar son las microestructuras obtenidas, en específico del acero SAE 1018, ya que como se había mencionado anteriormente esta aleación al contener un bajo contenido de carbono no es posible obtener una estructura martensítica y por tanto al efectuar un revenido la microestructura resultante no está plenamente definida.

4.4 Resultado normalizado.

4.4.1 Acero SAE 1018.

Ahora se continúa con el análisis de los resultados obtenidos después de haber realizado el tratamiento térmico de normalizado en sus dos variantes que se emplearon para el proceso (convección natural y convección forzada).

Comenzado por el análisis del normalizado con enfriamiento por convección natural, se tiene la siguiente microestructura del material (ver figura 29). En esta micrografía se puede observar una composición formada por ferrita y perlita principalmente, en donde se visualiza que la ferrita predomina, además se encuentra que el tamaño de grano de la ferrita es inferior en comparación de la micrografía del material de llegada (ver figura 19), lo cual era de esperarse dado que son de las principales características del proceso.

Siguiendo con el análisis de dureza, se observa un perfil de durezas que se comporta casi homogénea en la mayoría de su superficie, excepto en el centro y en la periferia, las razones posibles para que se den estas diferencias en las medidas pueden ser las mismas que se

mencionaron en el caso anterior. Para esta prueba se obtuvieron valores promedios de 75.6 y 76.97 [HRB].

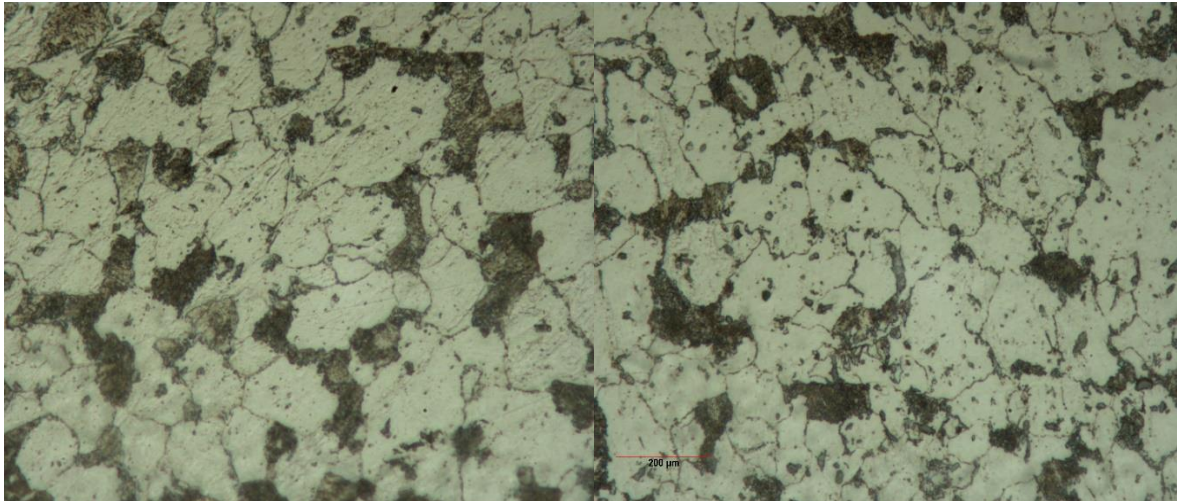
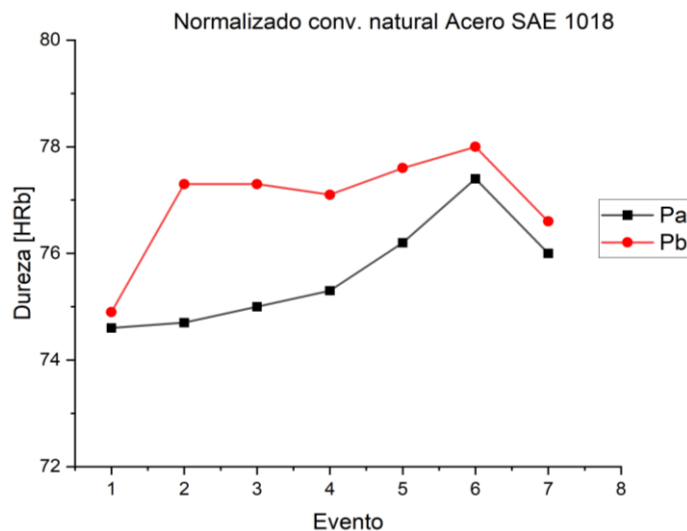


Figura 29. Microestructura del acero 1018 con tratamiento térmico de normalizado enfriado por convección natural. La estructura es perlita (zona oscura) en una matriz de ferrita (zona blanca). En una composición de 45.3% de perlita y 54.7% de ferrita para la probeta A y 31.6% de perlita y 68.4% de ferrita para la probeta B. Atacado con Nital al 5%, a 500X.



Gráfica 14. Perfil de durezas acero SAE 1018 normalizado y enfriado por convección natural.

Para el normalizado enfriado por convección forzada, se obtuvieron las siguientes micrografías (figura 30), en las cuales se observa al igual que en el caso anterior una microestructura formada principalmente por ferrita y perlita, sin embargo, en esta variante se identifica que la perlita predomina en la muestra, teniendo un tamaño de grano superior

a la de la ferrita y con un mayor porcentaje. Analizando las micrografías por medio de un procesador de imágenes (*Fiji*), se puede obtener las proporciones que se tienen para cada microestructura. Con este análisis se puede obtener que para la probeta A se tiene una proporción de 74.7% de perlita y 25.3 de ferrita, mientras que para la probeta B de 80.9% y 19.1% respectivamente.

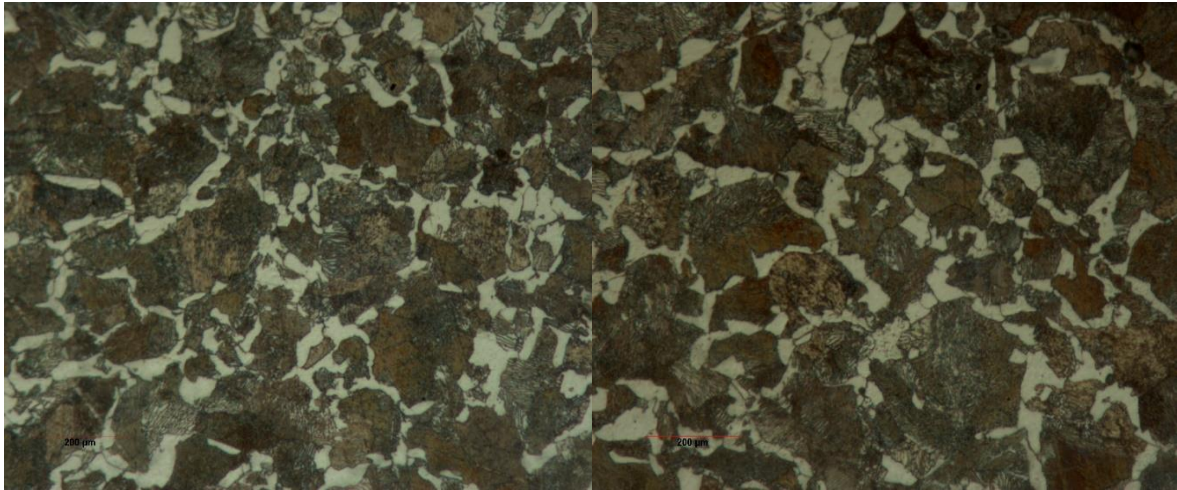
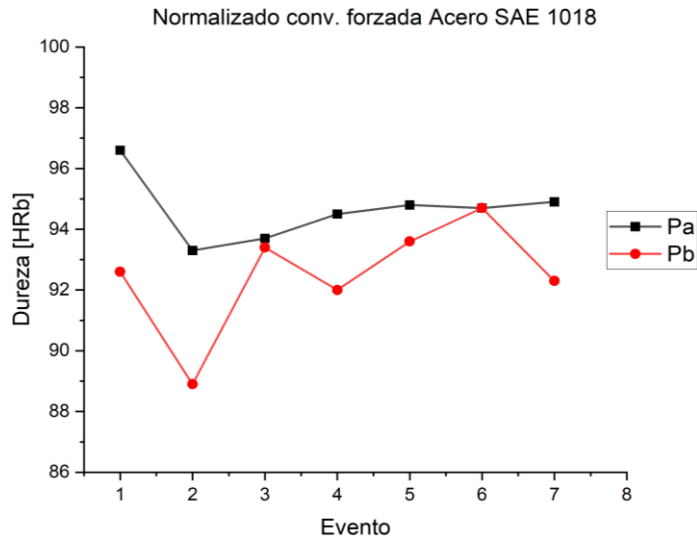


Figura 30. Microestructura del acero 1018 con tratamiento térmico de normalizado enfriado por convección forzada. La estructura es perlita (zona oscura) en una matriz de ferrita (zona blanca). Atacado con Nital al 5%, a 500X.

Siguiendo con el análisis del perfil de durezas del material, se determina que el comportamiento a lo largo de la superficie de la probeta A se muestra uniforme, teniendo un valor promedio de 94.6 [HRB], caso contrario en la probeta B, la cual se presenta con un comportamiento desordenado, lo que ocasiona que el valor medio (92.5 [HRB]), se vea reducido en comparación de la probeta B.



Gráfica 15. Perfil de durezas acero SAE 1018 normalizado y enfriado por convección forzada.

4.4.2 Acero SAE 1045.

Continuando con este tratamiento en el acero SAE 1045 con enfriamiento por convección natural, se tiene que la micrografía obtenida corresponde nuevamente a una microestructura de perlita y ferrita, tal como en el caso del acero SAE 1018. En donde se puede identificar que la ferrita es la base principal de la misma, también se observa una disminución en el tamaño de grano en comparación con el material sin tratamiento. Realizando una vez más el análisis por imágenes, se determinó que las proporciones dentro de las micrografías corresponde a 60.9% de ferrita y 39.1% de perlita para la probeta A y de 54.8% y 45.2% para la probeta B respectivamente.

En cuanto a la dureza obtenida para estas probetas, se tiene un comportamiento disperso, puesto que como se puede apreciar en la gráfica 14, los valores obtenidos para cada muestra varían a lo largo de su superficie, sin embargo, se puede ver un patrón similar en ambas, dado que los valores máximos y mínimos se encuentran en la misma área en donde se tomó la medición. Pero pese a estas variaciones, se obtuvo el valor promedio más cercano entre ambas muestras de todas las pruebas anteriores, con un valor de 77.04 y 77.42 [HRB].

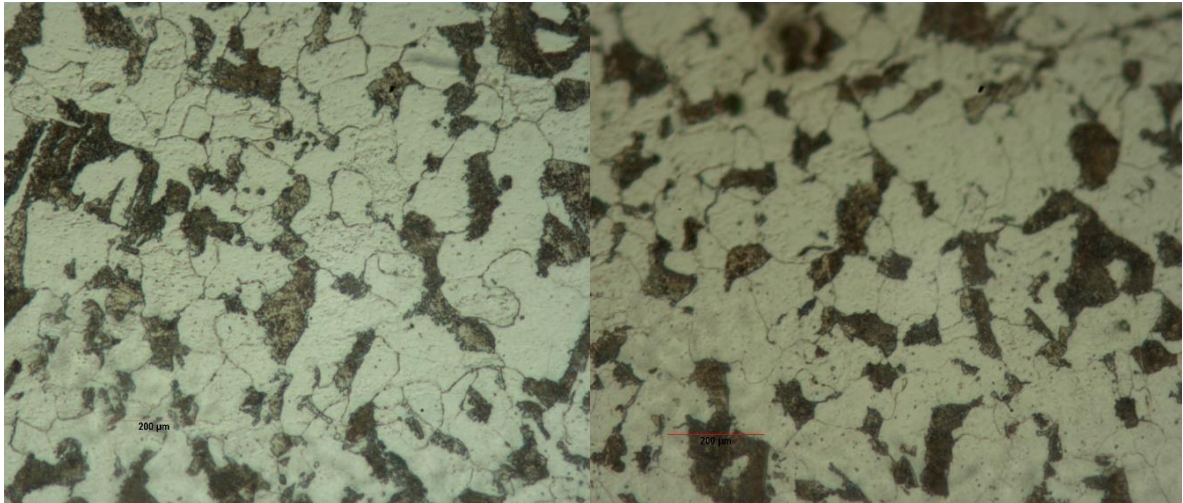
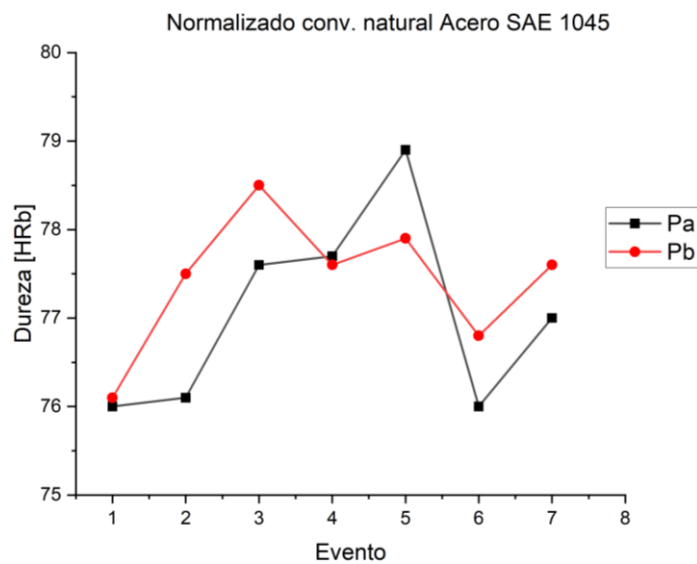


Figura 31. Microestructura del acero 1045 con tratamiento térmico de normalizado enfriado por convección natural. La estructura es perlita (zona oscura) y ferrita (zona blanca). Atacado con Nital al 5%, a 500X.



Gráfica 16. Perfil de durezas acero SAE 1045 normalizado y enfriado por convección natural.

Pasando a la siguiente prueba (normalizado con convección forzada), y observando los resultados obtenidos, se identificó que las micrografías de las muestras dan como resultado una microestructura similar a la anterior, es decir de perlita y ferrita, sin embargo, esta la composición es más balanceada y por tanto es difícil a simple vista mencionar que estructura predomina. Esto es posible solucionarlo con un análisis digital, el cual proporciona que los porcentajes de ambas microestructuras es el siguiente; 65.7% de perlita y 34.3% de ferrita para la probeta A y 61.9% de perlita y 38.1% de ferrita para la probeta B.

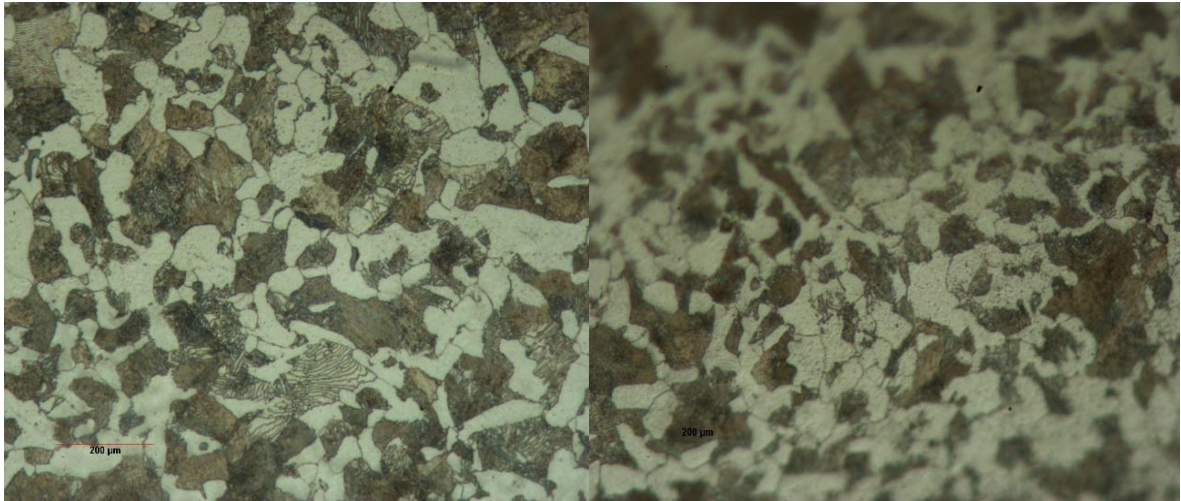
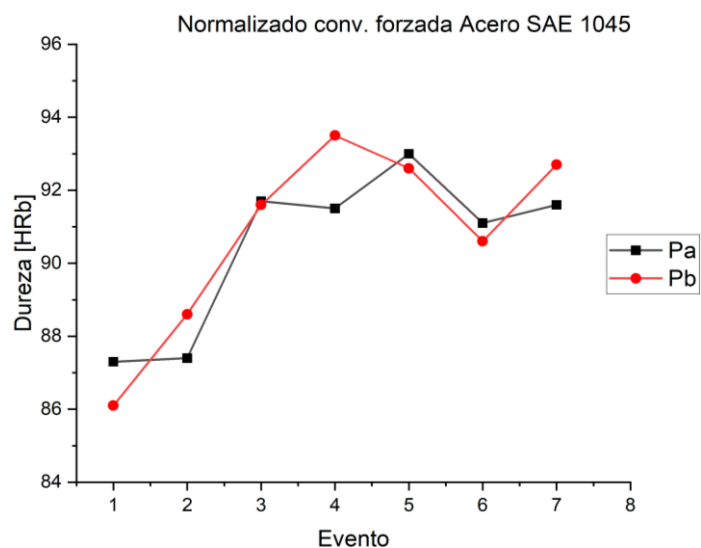


Figura 32. Microestructura del acero 1045 con tratamiento térmico de normalizado enfriado por convección forzada. La estructura es perlita (zona oscura) y ferrita (zona blanca). Atacado con Nital al 5%, a 500X.

Dando seguimiento a la dureza de las probetas, se encontró un perfil que varía a lo largo de la superficie de las muestras, en las cuales se obtuvieron valores desde 86 a 92 [HRB]. En donde se identificó que la parte central de las muestras son las más afectadas, mientras que fuera de esta zona los valores se comportan de una manera más constante. Estas variaciones se consideran como resultado a una falla en el recubrimiento, tal como ya se había mencionado anteriormente. Habiendo dicho lo anterior y teniendo en cuenta lo mencionado, se logra obtener una media de 90.51 y 90.81 [HRB] respectivamente para cada probeta.



Gráfica 17. Perfil de durezas acero SAE 1045 normalizado y enfriado por convección forzada.

4.5 Resultado recocido.

4.5.1 Acero SAE 1018.

Continuando con el ultimo tratamiento térmico realizado en esta investigación, se tienen los resultados obtenidos de las dos variantes efectuadas para este material.

Comenzando con el recocido completo, se nota que el resultado obtenido muestra una microestructura formada principalmente por ferrita, pero además se aprecia en menor proporción perlita. Caso similar al de material base y al que fue normalizado, sin embargo, existe una diferencia en el tamaño de los granos, puesto que, el tamaño de estos es más grandes que en material normalizado, pero más pequeños que en el material base. Además de que el porcentaje de ferrita es mayor que en los casos anteriores (probeta A -> 68% de ferrita y 32% de perlita, probeta B -> 71.2% ferrita y 28.8% perlita).

En el análisis de dureza, se aprecia un comportamiento parcialmente homogéneo a lo largo de la superficie de las muestras, teniendo valores promedios de 72.6 y 73.15 [HRB] respectivamente.

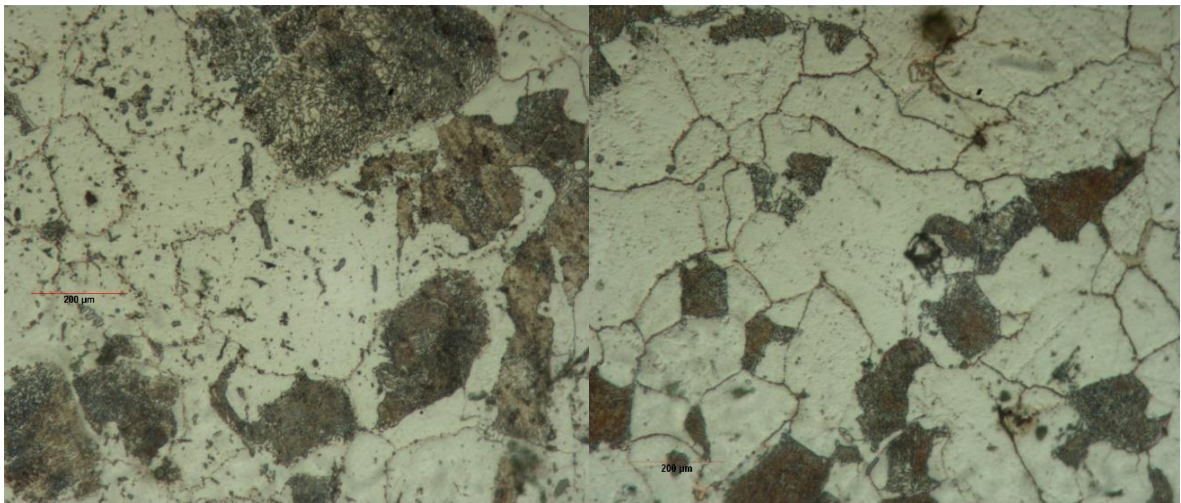
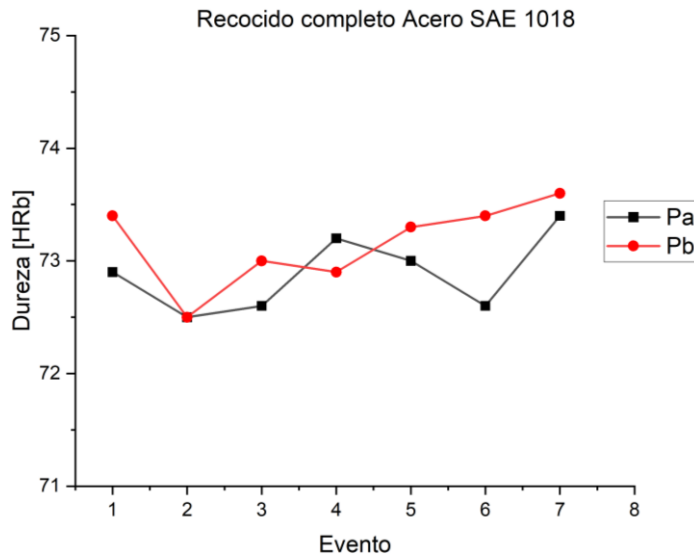


Figura 33. Microestructura del acero 1018 con tratamiento térmico de recocido completo. La estructura es ferrita (zona blanca) y perlita (zona oscura). Atacado con Nital al 5%, a 500X.



Gráfica 18. Perfil de durezas acero SAE 1018 con recocido completo.

Para terminar con el análisis de acero SAE 1018, se muestran los resultados para el recocido incompleto, en el cual se observan las siguientes micrografías (ver figura 34), en donde se puede ver que las principales microestructuras que se encuentran presentes en el material son ferrita y perlita. Para este caso se visualiza una estructura en la que se nota que el tamaño de grano es más pequeño que en el caso anterior (afinado de grano), así mismo, se tiene que la presencia de perlita esta mejor distribuida dentro de la misma. Esto último se ve reflejado en la proporción de cada microestructura, dado que se tiene 76% de ferrita y 24% de perlita para la probeta A y 70% y 30% para la probeta B respectivamente.

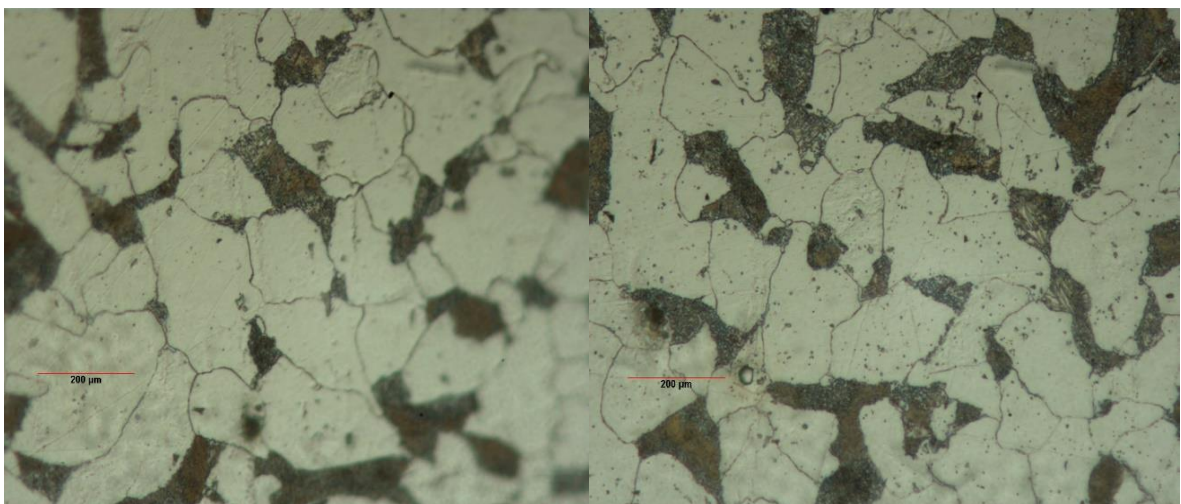
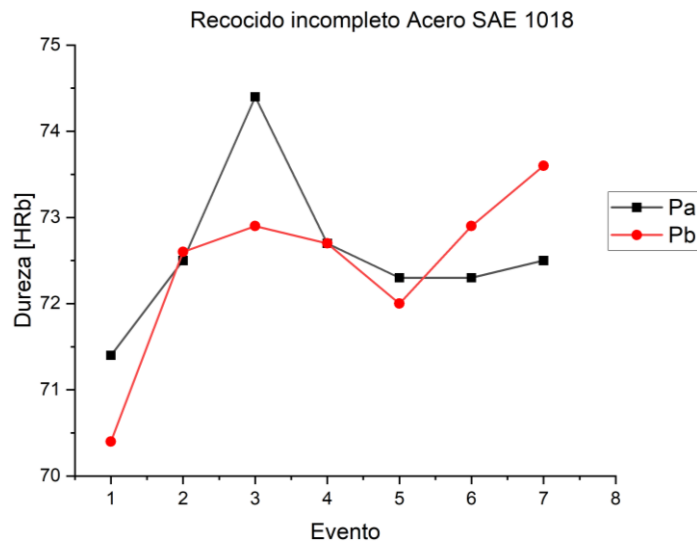


Figura 34. Microestructura del acero 1018 con tratamiento térmico de recocido incompleto. La estructura es ferrita (zona blanca) y perlita (zona oscura). Atacado con Nital al 5%, a 500X.

Finalmente se tiene el análisis del perfil de durezas, en el cual se determinó que existe un comportamiento poco homogéneo, dado que algunos valores salen del promedio, lo cual genera una desviación ante el resultado final. Nuevamente se observa que estos valores se generan en el centro y orilla del material, mientras que en los valores centrales a estas dos puntas se manifiestan de una manera más constante. Aún así, se tienen los siguientes valores promedios, para la probeta A 72.58 [HRB] y 72.44 [HRB] para la probeta B.



Gráfica 19. Perfil de durezas acero SAE 1018 con recocido incompleto.

4.5.2 Acero SAE 1045.

Analizando el último tratamiento térmico para el acero SAE 1045, se tienen los siguientes resultados:

Para el recocido completo a partir de las micrográficas se observa una microestructura formada principalmente por perlita y ferrita, tal como en el normalizado. Sin embargo, se nota una diferencia reflejada en el tamaño de grano, puesto que en este tratamiento el tamaño es más grande, pero a la vez más pequeño que el que se tiene en el material base. En tanto a su proporción de cada microestructura se puede encontrar la siguiente distribución: 62.5% de perlita y 37.5% de ferrita para la probeta A, mientras que para la probeta B se tiene 72% de perlita y 28% de ferrita.

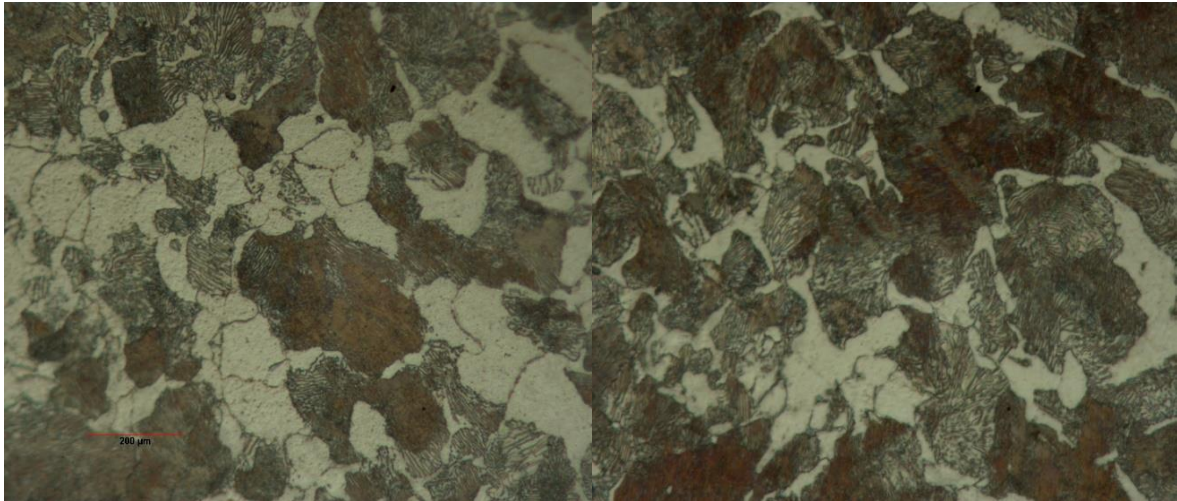
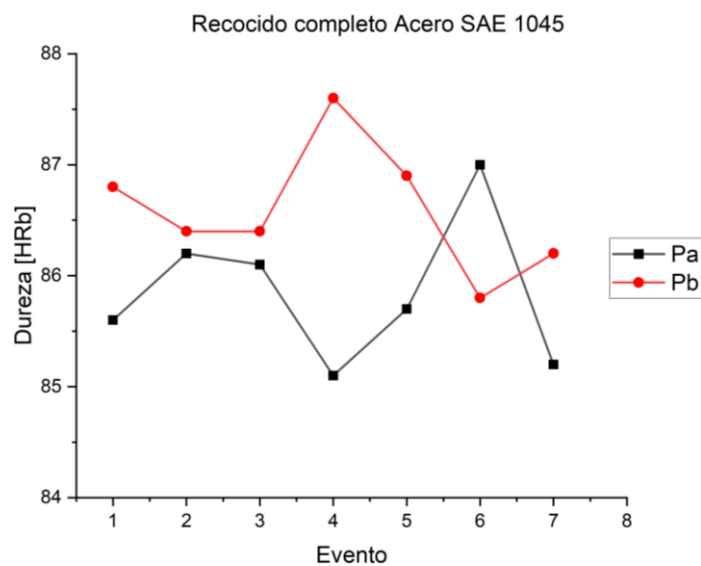


Figura 35. Microestructura del acero 1045 con tratamiento térmico de recocido completo. La estructura es ferrita (zona blanca) y perlita (zona oscura). Atacado con Nital al 5%, a 500X.

Para el perfil de dureza, se tiene un comportamiento no uniforme, tal como se observa en la gráfica 17, en donde los valores varían en la mayoría del cuerpo de la muestra, sin embargo, estos solo se ven reflejados en 1 o 2 unidades de dureza, por lo que el valor promedio no se desvía de los valores más frecuentes, teniendo 84.98 y 86.58 [HRB] como valores medios.



Gráfica 20. Perfil de durezas acero SAE 1045 con recocido completo.

Finalmente, para concluir con los resultados obtenidos de la investigación, se muestra el análisis que se da en el recocido incompleto del acero SAE 1045, el cual a partir de su micrografía se determinó que su microestructura está compuesta principalmente por perlita y en menor proporción por ferrita, algo similar como en el caso anterior, sin embargo, se nota una diferencia nuevamente en el tamaño de grano, puesto que en este caso se tiene un tamaño más grande.

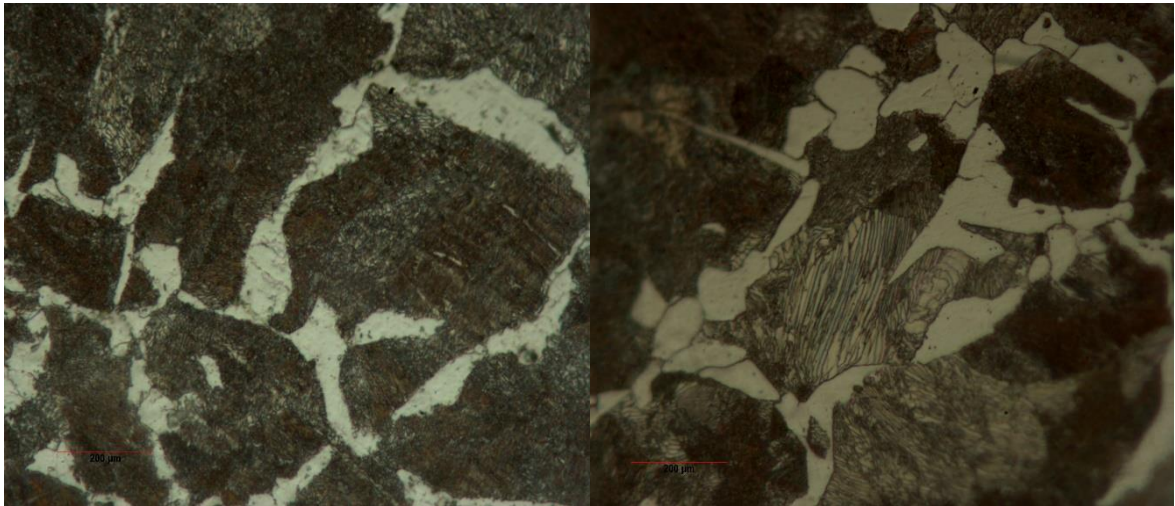
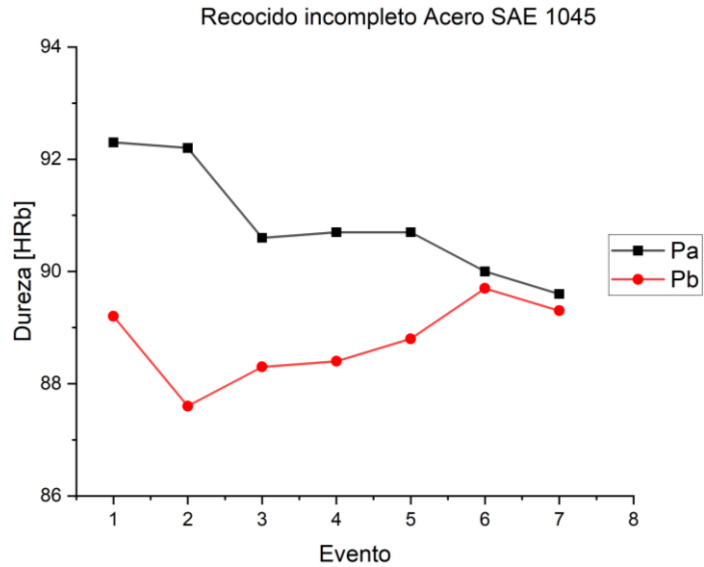


Figura 36. Microestructura del acero 1045 con tratamiento térmico de recocido incompleto. La estructura es perlita (zona oscura) en una matriz de ferrita (zona blanca). En una composición de 81.6% de perlita y 18.4% de ferrita para la probeta A y 78.7% de perlita y 21.3% de ferrita para la probeta B. Atacado con Nital al 5%, a 500X.

Ahora se estudia el perfil de dureza obtenido, el cual muestra una variación en los valores medidos, principalmente en el centro del material, puesto que es ahí donde se observan los picos más altos, fuera de esa zona el comportamiento se hace más homogéneo hasta la periferia. Como resultado de lo anterior, se tiene un valor promedio de 90.87 [HRB] para la probeta A y 88.5 [HRB] para la probeta B.



Gráfica 21. Perfil de durezas acero SAE 1045 con recocido completo.

Como resultado de los tratamientos térmicos de recocido y normalizado, se puede decir que la diferencia entre cada uno de ellos se encuentra en la microestructura, si bien en ambos tratamientos se obtiene perlita y ferrita, la composición y su tamaño de grano son diferentes, lo cual hace que sus propiedades mecánicas cambien de tal forma que cuando se aplica un recocido el tamaño de grano crece ocasionando reducción en la dureza, pero aumenta su ductilidad. Mientras que en el normalizado se obtiene un tamaño de grano fino, con lo cual para aceros con bajo contenido de carbono no aleados no existe mucha diferencia entre el normalizado y el recocido, pero para aceros de contenido medio (entre 0,3 – 0,5%C) la diferencia de propiedades es mayor que en el caso anterior, ya que el normalizado le da más dureza.

4.6 Matriz de comparación de resultados.

En la tabla 26 se muestran los resultados obtenidos en este trabajo de investigación.

Tabla 26. Matriz de comparación de resultados.

Acero SAE 1018					
Tratamiento	Variante	Microestructura esperada	Microestructura obtenida	Dureza Rockwell esperada	Dureza Rockwell obtenida
Temple y revenido	Alto	Sorbita	Ferrita Widmanstätten y martensita revenida	90-100 HRB	22.8-23 HRC
	Bajo	Martensita revenida	Bainita, ferrita Widmanstätten y martensita revenida	30-35 HRC	38.1-38.5 HRC
Normalizado	Convección Natural	Perlita y ferrita	Perlita y ferrita	80-85 HRB	75.6-77HRB
	Convección forzada	Perlita y ferrita	Perlita y ferrita	86-90 HRB	93-95 HRB
Recocido	Completo	Perlita y ferrita	Perlita y ferrita	76-78 HRB	72-73 HRB
	Incompleto	Perlita y ferrita	Perlita y ferrita	84-86 HRB	72-73 HRB
Acero SAE 1045					
Tratamiento	Variante	Microestructura esperada	Microestructura obtenida	Dureza Rockwell esperada	Dureza Rockwell obtenida
Temple y revenido	Alto	Sorbita	Martensita revenida y en menor proporción bainita	25-30 HRC	31-32 HRC
	Bajo	Martensita revenida	Martensita revenida y bainita	50-55 HRC	55-56 HRC
Normalizado	Convección Natural	Perlita y ferrita	Perlita y ferrita	20-21 HRC	77-77.4 HRB
	Convección forzada	Perlita y ferrita	Perlita y ferrita	22-23 HRC	90.5-90.8 HRB
Recocido	Completo	Perlita y ferrita	Perlita y ferrita	20-23HRC	85-86.5 HRB
	Incompleto	Perlita y ferrita	Perlita y ferrita	23-25 HRC	89-91 HRB

Con base a lo obtenido en la investigación, se determina que el uso de los diagramas TTT en el diseño de un tratamiento térmico es de suma importancia, ya que estos aproximan de manera adecuada la microestructura resultante, así como los tiempos requerido para que se lleve a cabo cada transformación, sin embargo, en términos de estimación de dureza, se considera que estos diagramas no son determinantes, debido a que manejan escalas que no tienen un rango definido, por lo cual se sugiere una aproximación a partir de ecuaciones. En tanto a la aplicación de transferencia de calor para la determinación de los parámetros de operación de los tratamientos térmicos, se considera apropiada debido a que garantizan las transformaciones de fase requeridas en cada etapa del proceso, con lo cual se obtiene las propiedades mecánicas deseadas y la microestructura esperada, así mismo se tiene una mayor certeza del resultado ya que el análisis contempla un número importante de variables del proceso que van desde la composición del material a trabajar hasta el equipo que se empleará, lo cual optimiza el proceso y a su vez reduce el uso de energía y recursos.

Conclusiones

Con el trabajo de investigación que se desarrolló, se determinó de manera teórica las temperaturas intercríticas, así como los parámetros requeridos para realizar los tratamientos térmicos de temple y revenido, recocido y normalizado de los aceros SAE 1018 y 1045, donde se observaron las semejanzas y diferencias al ser comparadas en la práctica.

Se obtuvieron los valores de las temperaturas intercríticas empleando ecuaciones que se pueden encontrar en la literatura obteniendo las siguientes temperaturas para el acero SAE 1018, $A_1=731.9^{\circ}\text{C}$, $A_3=818.8^{\circ}\text{C}$ y $M_s=430.7^{\circ}\text{C}$, mientras que para el acero SAE 1045 se determinó que $A_1=730.7^{\circ}\text{C}$, $A_3=764.5^{\circ}\text{C}$ y $M_s=331.5^{\circ}\text{C}$, las cuales al ser comparadas con la información obtenida de los diagramas de fases y diagramas TTT de estas aleaciones son similares. Así mismo se determinó la temperatura para el set point de cada material: 868.8 y 814.5°C , con la que se garantiza la transformación de fase austenítica para los SAE 1018 y 1045 respectivamente.

Se establecieron los tiempos requeridos para cada etapa del proceso y para cada uno de los tratamientos térmicos, que son el resultado de un análisis por transferencia de calor en un sistema de conducción transitorio, los cuales en comparación con los diagramas TTT cumplen efectivamente con los tiempos de las transformaciones de fase requeridas para cada proceso.

Se determinó la influencia de la descarburización para cada uno de las aleaciones de manera teórica a partir de las leyes de Fick y se corroboró de manera experimental, obteniendo una aproximación del 88.5% para el acero 1018 y 82.8% para el 1045. En donde a partir del cobrizado se redujo el impacto de este fenómeno en un 64.6% y 59.9% respectivamente, así mismo se disminuyó la pérdida de dureza debida a la descarburización, en 39.7% para el acero SAE 1018 y del 5.5% para el acero SAE 1045.

En el tratamiento de temple y revenido alto para el acero SAE 1018 los resultados obtenidos indican que esta aleación presentó una microestructura de matriz ferrítica y en pequeña proporción de martensita revenida, registrando una dureza promedio de 22.9 [HRC]. Mientras que, al realizarse un revenido bajo, la microestructura presenta una matriz bainítica, con pequeñas proporciones de ferrita y martensita revenida, la dureza promedio 38.3 [HRC].

En el proceso de normalizado para el acero SAE 1018, los resultados obtenidos por convección natural, muestran una microestructura formada por perlita en una matriz de ferrita, con una composición de aproximada de 40% y 60% respectivamente, mientras que su dureza promedio es de 76.2 [HRB]. Para el normalizado por convección forzada la microestructura observada es similar a la de convección natural, sin embargo, para este caso se observó que la composición está repartida en un 75% de perlita y 25% de ferrita. Donde, su dureza promedio se encuentra en 93.6 [HRB].

Para el tratamiento de recocido del acero SAE 1018, se observó que tanto en el recocido completo e incompleto, muestran una microestructura formada por perlita y ferrita, donde la diferencia radica únicamente en el tamaño de grano, puesto que para el recocido completo se tiene un grano de ferrita más grande que el recocido incompleto, sin embargo, la dureza de ambos procesos tiende al valor de 72.5 [HRB].

Los resultados del acero 1045 para el tratamiento de temple y revenido alto y bajo comparten una microestructura similar formada principalmente por martensita revenida y en menor proporción por bainita. Sin embargo, su dureza es diferente, dado que para el revenido alto se tiene una dureza promedio de 31.8[HRC] y en el revenido bajo de 55.2 [HRC].

En el tratamiento de normalizado para el acero SAE 1045, se obtuvo que tanto en el normalizado por convección natural y forzada se encontró una estructura de perlita y ferrita, con las siguientes proporciones 55% de perlita y 45% de ferrita para la convección natural, mientras que para la convección forzada se obtuvo 65% y 35% respectivamente. Sin embargo, es su dureza se nota un cambio importante, ya que para el normalizado por convección natural se obtuvo una dureza promedio de 77.2 [HRB] y para la convección forzada de 90.66 [HRB].

Para el tratamiento de recocido del acero SAE 1045, se observó una microestructura similar al recocido del acero 1018, ya que en ambas pruebas se obtiene una estructura de perlita y ferrita, en las cuales nuevamente se observa la diferencia del tamaño de grano y la proporción con la que se encuentran, aproximadamente 70% de perlita y 30% de ferrita. Lo cual genera una dureza promedio de 86.2 [HRB] para un recocido completo y 89.8 [HRB].

Finalmente, cabe señalar que la metodología empleada en esta investigación es funcional para la creación de las rutas adecuadas en el diseño de un tratamiento térmico, con las cuales se pueden obtener aproximaciones válidas para el mejoramiento de las propiedades

mecánicas de los materiales, debido a que consideran el mayor número de variables involucradas en el proceso, por lo que la optimización de cada uno de estos es considerable en cuanto al uso de recursos.

Perspectivas

Los resultados obtenidos a partir del desarrollo de esta investigación pueden ser la base de futuros trabajos que lleven un mismo fin o que busquen la mejora de los tratamientos térmicos o bien, cuando se requiera trazar una ruta de trabajo, así mismo esta puede ser empleada como manual para la determinación de las condiciones de operación que se requieran para una aleación similar, contando con la certeza de que se obtendrán resultados acordes a lo planteado.

Dándole un enfoque académico, esta tesis puede brindar herramientas que resulten útiles en la comprensión de los tratamientos térmicos y se genere un mejor entendimiento de los mismos, además, el planteamiento matemático y el desarrollo de la metodología pueden ser utilizados a fin de encontrar una aplicación práctica dentro del desarrollo de su formación.

Por otro lado, esta investigación puede tener una aplicación industrial, en la cual se busque mejorar el proceso y sobre todo una reducción de recursos en el desarrollo de cualquiera de estos tratamientos térmicos, puesto que como ya se analizó en este trabajo, se puede tener un ahorro de energía en comparación de lo que dicta la literatura, lo cual en un proceso continuo o de producción en línea llevaría a un decremento de gastos y por ende una mejor ganancia económica.

Bibliografía

1. Castillo Rodríguez, F. J., & Reyes Solís, A. (2012). Aceros estructuras y tratamientos térmicos. *Cuautlitlan: Universidad Nacional Autónoma de México*.
2. Shackelford, J. F., Güemes, A., Comas, N. M., & Martín, M. P. (2005). Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros (6.a ed.). Pearson Educación.
3. Callister, W. D., Molera, P., & Anglada, M. (2002). Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. Volumen I (1.a ed.). Editorial Reverte.
4. World Steel Association. (2016). World Steel Association, Markets. Recuperado 9 de enero de 2022, de <https://www.worldsteel.org/>
5. S.A. PRINCIPIOS GENERALES DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS ACEROS. En Metalografía y Tratamientos Térmicos (pp. 1–11), recuperado de https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/4-PRINCIPIOS_GENERALES_DE_LOS_TT_v2.pdf
6. Barreiro, A. J. (1949). Tratamientos térmicos de los aceros. Dossat.
7. Castillo Rodríguez, F. (2015). LABORATORIO DE TECNOLOGÍA DE MATERIALES. TECNOLOGÍA DE MATERIALES. *Cuautlitlan: Universidad Nacional Autónoma de México*.
8. Callister, W. D. (2000). Fundamentals of Materials Science and Engineering. John Wiley & Sons, Inc.
9. Yu Lajtin, M. (1973). Principios generales de los tratamientos térmicos de los aceros. Metalografía y tratamientos térmicos, recuperado de https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/4-PRINCIPIOS_GENERALES_DE_LOS_TT_v2.pdf
10. Torres, E. (2004). Apuntes acerca del tratamiento térmico y la clasificación general de los aceros. Universidad de matanzas. Recuperado de: <http://monografias.umcc.cu/monos/2004/quimec/um04qm02.pdf>
11. Aleaciones Fe-C. (s. f.). Polo Universitario de Tecnología Avanzada. Recuperado 20 de febrero de 2022, de http://www.punta.unam.mx/fi_papime_pe1000720/pdfs/aleacionesfec.pdf
12. Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. (5.ª ed.). Pearson Educación.
13. Ñaupari, L. C. (2007). Sistema para obtener balances de carga e índices de productividad en la fundición de coladas de metal aplicado en el área de costos de producción. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

14. Belzunce, F. (2001). Aceros y fundiciones: estructuras, transformaciones, tratamientos térmicos y aplicaciones. Oviedo: Universidad de Oviedo.
15. Askeland, D. R., & García, G. S. (1998). Ciencia e ingeniería de los materiales (3.a ed.). International Thomson Editores.
16. ARREOLA, R. (2011). EFECTO DE LA DEFORMACIÓN EN FRIO SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS: DIN 32CrMoV12 10, AISI 4340 Y AISI 8620. Instituto Politécnico Nacional.
17. I.Q.Msc. Johnny F. Obando. (2006). Subcero y Criogénico. Innovación & Desarrollo. Tratamientos Ferrotérmicos SAS. Recuperado de <https://www.yumpu.com/es/document/read/14758402/subcero-y-criogenico-revista-metal-actual>
18. Yunus A. çengel, & Ghajar, A. J. (2011). Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones. (4.a ed.). McGraw-Hill Education.
19. W. (s. f.). *1018 Steel*. Acero Waldun. Recuperado 27 de marzo de 2022, de <https://waldunsteel.com/es/products/1018-steel/>
20. Vazbros Plásticos y Metales Industriales en Reynosa, México. (s. f.). Acero AISI-SAE 1018 cold rolled. VAZBROS - Plásticos y Metales para la Industria de México. Recuperado 27 de marzo de 2022, de <https://www.vazbros.com/materiales/acero-aisi-sae-1018-cold-rolled/>
21. Barrera, D., Calderón, P., & Bohórquez, C. (2014). Influencia del temple desde temperaturas intercríticas y el revenido en las propiedades mecánicas de tensión y dureza en un acero AISI-SAE 1018. *Tekhnê*, 11(1), 27-34.
22. Acero 1045. (s. f.). IIRSACERO. Recuperado 27 de marzo de 2022, de <http://iirsacero.com.mx/acero-1045/>
23. Sabogal Soto, E. A., Rodríguez Martínez, A. J., & Moreno Camacho, J. A. (2014). Caracterización Microestructural de un acero aisisae 1045 tratado térmicamente en el intervalo intercrítico.
24. Axxecol. (s. f.). *ACERO 1045*. Axxecol S.A. Recuperado 2 de abril de 2022, de http://www.axxecol.com/documents/axxecol/Axxecol_1045.pdf
25. Kasatkin, O. G., Vinokur, B. B., & Pilyushenko, V. L. (1984). Calculation models for determining the critical points of steel. *Metal Science and Heat Treatment*, 26(1), 27–31. doi:10.1007/bf00712859
26. Gur, C. H., & Pan, J. (2008). Handbook of thermal process modeling steels. CRC Press.
27. Wenghöfer, F. (2016). Glühen, Härten, Anlassen (1.a ed.). Instituto de Desarrollo Profesional, e.V [https://ftpmirror.your.org/pub/misc/cd3wd/1003/me_annealing_hardening_tempering_gtz077ce_en_139320 .pdf](https://ftpmirror.your.org/pub/misc/cd3wd/1003/me_annealing_hardening_tempering_gtz077ce_en_139320.pdf)

28. Carpenter. (s. f.). *Carpenter Aceros Fortuna*. Carpenter Technology. Recuperado 18 de abril de 2022, de <https://acerosfortuna.com.mx/>
29. UCM. (s. f.). *AC1 | Proyecto de Innovación Atlas Metalográfico*. Proyecto de Innovación Atlas Metalográfico. Recuperado 10 de julio de 2022, de <https://www.ucm.es/atlasmetalografico/ac1>
30. Cia. General de Aceros S.A. (2021). Acero AISI / SAE 1045. Recuperado 10 de julio de 2022, de <https://www.cga.com.co/producto/acero-aisi-sae-1045/>
31. Protocolo, M. (2011). Curso de Materiales. Laboratorio de producción. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Edición.