

INFLUENCIA DEL TIEMPO DE REVENIDO EN LAS PROPIEDADES DE TENSIÓN Y  
DUREZA DE UN ACERO SAE 1045 TEMPLADO DESDE TEMPERATURAS  
INTERCRÍTICAS Y DIFERENTES TIEMPOS DE REVENIDO

JHOAN FERNANDO CASTAÑEDA VARGAS

20131375045

JAYSON SILVA URUEÑA

20131375071

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD TECNOLÓGICA

INGENIERÍA MECÁNICA

BOGOTÁ

2015

INFLUENCIA DEL TIEMPO DE REVENIDO EN LAS PROPIEDADES DE TENSIÓN Y  
DUREZA DE UN ACERO SAE 1045 TEMPLADO DESDE TEMPERATURAS  
INTERCRÍTICAS Y DIFERENTES TIEMPOS DE REVENIDO

JHOAN FERNANDO CASTAÑEDA VARGAS

JAYSON SILVA URUEÑA

PROYECTO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

PRESENTADO A:

PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERÍA MECÁNICA

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD TECNOLÓGICA

TECNOLOGÍA MECÁNICA

BOGOTÁ

2015

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>ASPECTOS CIENTÍFICOS</b> .....	<b>5</b>
2.1	Problema y objetivos de la investigación .....	5
2.2	Antecedentes y revisión de conocimientos disponibles .....	5
2.3	Justificación.....	7
2.4	Formulación clara y precisa del problema de la investigación .....	9
2.5	Tipo de investigación.....	9
2.6	Limitaciones.....	9
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS QUE SE PRETENDEN LOGRAR CON LA INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>9</b>
3.1	Objetivo general .....	9
3.2	Objetivos específicos .....	9
<b>4</b>	<b>METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>10</b>
5.1	Tratamientos térmicos.....	10
5.2	Factores de Importancia en un Tratamiento Térmico.....	10
5.3	Transformaciones de fase.....	12
5.4	Temple .....	13
5.5	Revenido.....	14
5.5.1	Revenido rápido.....	15
5.6	Curva de la “s” .....	16
5.7	Acero SAE 1045 .....	17
5.7.1	Características de empleo .....	17
5.7.2	Propiedades físicas .....	18
5.7.3	Banda de templabilidad .....	19

5.7.4	Tratamientos térmicos .....	19
5.7.5	Diagrama de revenido.....	20
5.7.6	Maquinabilidad .....	20
5.7.7	Conformabilidad.....	21
5.7.8	Soldabilidad .....	21
5.7.9	Aplicaciones .....	21
<b>6</b>	<b>PROCEDIMIENTO Y TÉCNICAS PARA LA RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN</b>	
	<b>21</b>	
<b>7</b>	<b>ASPECTOS DE LA ADMINISTRACIÓN Y CONTROL .....</b>	<b>22</b>
<b>7.1</b>	<b>Actividades a desarrollar.....</b>	<b>22</b>
<b>7.2</b>	<b>Cronograma de actividades .....</b>	<b>22</b>
<b>7.3</b>	<b>Presupuesto de la investigación .....</b>	<b>23</b>
<b>8</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>24</b>

# **INFLUENCIA DEL TIEMPO DE REVENIDO EN LAS PROPIEDADES DE TENSIÓN Y DUREZA DE UN ACERO 1045 TEMPLADO DESDE TEMPERATURAS INTERCRÍTICAS Y DIFERENTES TIEMPOS DE REVENIDO**

## **1 INTRODUCCIÓN**

Hoy en día, en el mundo tenemos grandes avances en cuestiones de tecnología, uno de los campos de investigación y desarrollo que sean venido trabajando con más frecuencia es el del mejoramiento de las propiedades físicas químicas y sobre todo mecánicas de los diversos tipos de materiales que encontramos en la naturaleza.

Es frecuente encontrar en el mundo actual el uso constante de las distintas variedades de acero que se utilizan a nivel industrial, se ha trabajado en dar mayor capacidad de respuesta ante situaciones críticas de operación y funcionamiento que se presente a diario en las plantas de fabricación de los distintos productos que se comercializan en el mercado, el desarrollo de mejores condiciones de trabajo reducen el costo operativo y aumentan la capacidad de producción. Una manera de lograr esa mejora que se busca en las propiedades mecánicas de los aceros es realizando distintos tipos de tratamientos térmicos que influyen directamente en los materiales a los cuales se les realiza este proceso industrial.

## **2 ASPECTOS CIENTÍFICOS**

### **2.1 Problema y objetivos de la investigación**

En la actualidad existe una gran competencia a nivel mundial por mejorar muchos de los procesos que se desarrollan en los distintos tipos de sectores de la industria; teniendo como objetivo productos con altos estándares de calidad, mayor aprovechamiento de los recursos disponibles y una alta eficiencia en los procesos que intervienen en la elaboración del producto final. Este tipo de lineamientos incentivan a desarrollar nuevos métodos de investigación para lograr establecer los parámetros y las variables que se pueden intervenir para poderlas mejorar y obtener mejores resultados que los que se conocen actualmente.

El objetivo de la investigación para este caso en particular, es analizar la influencia del tiempo de revenido sobre las propiedades de tensión y dureza en el acero SAE 1045 templado a temperaturas intercríticas; estableciendo todo tipo de mejoras que se puedan conseguir comparando los parámetros iniciales con los resultados de las distintas pruebas de laboratorio y demás análisis que se pretenden realizar.

### **2.2 Antecedentes y revisión de conocimientos disponibles**

De fase dual (DP) los aceros con una microestructura que consiste en una matriz de ferrita, en el cual las partículas de martensita se encuentran dispersos, han recibido una gran atención debido a su combinación útil de alta resistencia, alta velocidad de endurecimiento por deformación y ductilidad, todos los cuales son propiedades favorables para los procesos de formación.

Investigación experimental sobre el efecto de la fracción de volumen de la fase más difícil, la morfología y distribución de fases en las propiedades mecánicas de los aceros de fase dual está bien establecida globalmente. Los aceros doble fase que están siendo muy utilizados en la industria del automóvil, son aceros poco aleados que requieren un tratamiento intercrítico en el dominio austenita + ferrita seguido de un tratamiento lo suficientemente rápido como para que esa austenita se transforme en martensita. Estos tratamientos también se ven directamente afectados con respecto al contenido de carbono en su composición química ya que se evidencio con un ensayo miniatura de punzonado que entre más alto sea el contenido de Carbono mayor será su rigidez. (E. Cárdenas, C. Rodríguez, F.J. Belzunce y C. Betegón, 2009)

En el artículo titulado "Comportamiento a la fatiga de las hojas de acero de fase doble al carbono de baja aleación" se hacen una serie de tratamientos térmicos a algunos aceros con bajo contenido de carbono a los cuales se les realiza pruebas de fatiga, tensión y análisis metalográfico, nos muestran como con los aceros tratados a temperaturas intercríticas tenemos la ventaja de obtener una mayor dureza y una mayor resistencia a la tracción debido a la producción de martensita y ferrita, además un dato muy importante para resaltar, y es que entre mayor sea la martensita en el material mayor será su fragilidad. También cabe destacar que la iniciación de fisuras por fatiga se produce en la interface de ferrita-martensita especialmente en la parte de ferrita. (S.K. Akaya, M. Yazici, A. Bayramc, A. Avinca. 2009)

En el trabajo sobre "Comportamiento mecánico y la corrosión de los aceros bajos en carbono normal de doble fase" se destacó, que las propiedades mecánicas de los aceros de fase dual pueden ser alteradas modificando su fracción de volumen de martensita. Esto se evidenció cuando se observó que la resistencia a la tracción, la dureza y la ductilidad disminuyeron con el aumento de la fracción de volumen de martensita, dado sus pruebas correspondientes. También se pudo contemplar la mayor resistencia a la corrosión de los aceros de fase dual se explica en función de las características micro estructurales en el que se vea claramente el volumen en el que se ha producido la martensita. (Lakshmana Rao Bhagavathi, G.P. 2011). El efecto de la temperatura de tratamiento térmico intercrítico en las propiedades de tracción y comportamiento en el trabajo de endurecimiento de la ferrita-martensita hojas de acero de doble fase, fue un trabajo en donde se determinó unos resultados experimentales que mostraron a los aceros de doble fase con la misma cantidad de ferrita y martensita, tienen excelentes propiedades mecánicas en términos de resistencia a la tracción, ductilidad y la energía de fractura. (P. Movaheda, S. Kolahgara. 2009)

Los aceros de doble fase representan una excelente alternativa en la producción de piezas automotrices que combinan alta resistencia mecánica, resistencia al impacto y elongación elevada, que además se fabrican con aceros de baja aleación, lo que representa reducción de costos y estructuras resultantes que combinan martensita y ferrita con granos de tamaño ultra fino. Lo anterior se logra a través de un estricto control de las condiciones de laminación: velocidad de deformación, velocidad de enfriamiento y aplicación de temple directo. El trabajo presenta los resultados al ensayar mecánicamente dos tipos de acero de doble fase y caracterizarlos micro estructuralmente.

### 2.3 Justificación

En la actualidad los materiales empleados en la fabricación de componentes de máquinas y equipos deben soportar más cargas de trabajo por lo que sus propiedades se han ido mejorando, así el esfuerzo de fluencia, el esfuerzo último y la elongación son cada vez mayores, sin que ello haya implicado un aumento de los precios de fabricación. Como ya se mencionó los tratamientos térmicos son una forma fácil y económica de cambiar dichas propiedades con el propósito de satisfacer las solicitudes mecánicas de su aplicación.

Con referencia a lo anterior un producto de estas transformaciones son los DP, Pouranvari (2010) indica que estos aceros (Dual Phase Steel) son una parte importante de los aceros de alta resistencia y baja aleación (High Strength Low Alloy Steels HSLA), estos materiales tienen una buena combinación de propiedades mecánicas como: alto esfuerzo de fluencia, alta velocidad de trabajo en caliente y buena ductilidad. (Movaheda. P, 2009) Sugiere que las propiedades están relacionadas definitivamente con la microestructura formada por el tratamiento térmico, una matriz ferrítica que brinda una buena ductilidad, mientras que las partículas de martensita soportan las cargas a las que se somete durante el servicio. Debido a su excelente resistencia y conformabilidad, los aceros DP ofrecen la posibilidad de mejorar el comportamiento partes de automóviles sin aumento de peso.

En ese mismo sentido la manera de conseguir esta mezcla de propiedades son los tratamientos térmicos intercríticos; llamados así por el rango de temperaturas a los que se efectúan, para aceros de bajo contenido de carbono aleaciones con carbono inferior al 0,2%, se realiza un temple desde el intervalo de temperaturas de  $A_1$  y  $A_3$ , este tratamiento hace que la austenita presente se transforme en martensita, dando lugar a la aparición de una microestructura que reemplaza la convencional de ferrita y perlita, como lo muestra la figura 8. En ella se puede apreciar que al aumentar la temperatura de tratamiento se aumenta la cantidad de martensita que se forma. (Al-Abbasi. F, 2003) Señala que el modelamiento micromecánico de los aceros DP, ha recibido poca atención, a pesar de su atractiva combinación de propiedades. Los interrogantes acerca de las combinaciones óptimas de las fases persisten y precisan de modelos predictivos para minimizar costosos métodos de prueba y error en el desarrollo de productos.

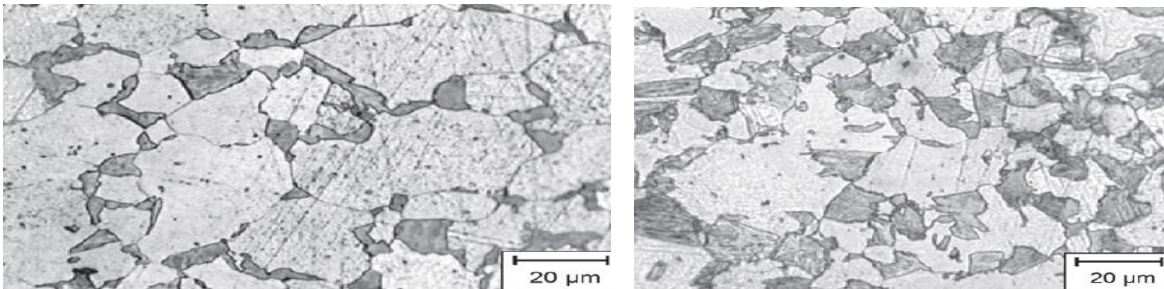


Figura 1 Microestructura de un acero SAE 1010 al que se le realizó un tratamiento térmico desde temperaturas intercríticas de 760°C y 820°C respectivamente (Movaheda. P, 2009)

(Yoshida. K, 2011) Anota que en los aceros DP existen dos mecanismos que pueden explicar el comportamiento ante el endurecimiento causado por la deformación: el primero

es que la martensita se forma trayendo consigo un esfuerzo interno en el material debido a su cambio volumétrico, y el segundo es un contraste entre el comportamiento mecánico de la ferrita y la martensita por su naturaleza heterogénea, uno se forma por un proceso de difusión y el otro sin difusión. En ambos casos el modelo de elementos finitos consiste en una fase dura rodeado de una fase blanda. (Bhagavathi. L, 2011) Muestra los beneficios de trabajar aceros DP, con diferentes contenidos de martensita, lo cual modifica no solo la resistencia a la tensión, sino también la resistencia a la corrosión, estos estudios son realizados de manera experimental.

Según se ha visto los aceros DP son un ejemplo de modificación del material base en el que se mejoran las propiedades mecánicas significativamente, sin embargo encontrar de forma experimental: la composición de la estructura adecuada para cada requerimiento, la temperatura a la cual se debe realizar el tratamiento térmico y el tiempo de permanencia a la temperatura seleccionada, resulta muy dispendioso, costoso y con un alto grado de incertidumbre en los resultados. Ello sugiere la aplicación de un método diferente (Movaheda. P, 2009). Es evidente entonces que el modelamiento matemático y la implementación computacional permiten no solo encontrar la mejor combinación de propiedades en tiempos relativamente cortos, sino que adicionalmente resulta muy favorable desde el punto de vista económico, pues elimina las dudas en el resultado final de las propiedades mecánicas.

En este orden de ideas se puede citar que en el país no hay referencias del modelamiento de este tipo de procesos, las referencias encontradas más cercanas muestran que en Brasil las investigaciones son mucho más recientes y de mayor profundidad (Silva. E, 2004) (Oliveira. W, 2010), algunas referencias halladas en Argentina y Chile (Carlos Camurri, 2004) (Risso. J, 2004) (Anca. A, 2008), muestran trabajos sin relación entre ellos y no tratan los tratamientos térmicos con profundidad. En Europa, Norteamérica y Asia aparecen los citados en este documento, pero como se menciona anteriormente los modelos en algunas ocasiones son simplificados por la complejidad del problema o simplemente buscado estudiar alguna propiedad en particular.

Lo novedoso del modelo planteado se puede mostrar en 4 aspectos importantes:

Se va a tener en cuenta la deformación ocasionada por la difusión de carbono; la temperatura desde la cual se va a realizar el tratamiento de temple no es de austenización total, sino que por el contrario se hace desde temperaturas que involucran la presencia de austenita y ferrita, lo cual puede ocasionar la aparición de varias fases como: ferrita, austenita retenida, martensita, bainita, perlita. Lo que haría mucho más verídico el modelo planteado. La inclusión en el análisis de procesos estocásticos para establecer las fases presentes después del tratamiento y la realización de un modelo multiescala, para analizar el fenómeno a nivel micro y macro. Se hará una implementación computacional que permitirá obtener las propiedades finales de las piezas tratadas, antes de su fabricación, propiedades como: Dureza, esfuerzos internos, microconstituyentes.



## **2.4 Formulación clara y precisa del problema de la investigación**

¿Qué influencia tiene el tiempo de revenido a temperaturas intercríticas en las propiedades mecánicas del acero SAE 1045?

Con la implementación del tiempo de tratamiento térmico de revenido, se desea ampliar y conocer la información sobre el comportamiento de los aceros DUAL PHASE particularmente del SAE 1045 a temperaturas intercríticas, con base en los resultados y conclusiones finales obtenidos después del desarrollo total del proyecto.

## **2.5 Tipo de investigación**

El tipo de investigación que se pretende realizar es de tipo experimental por medio de la recolección de datos y su respectivo análisis después de haber desarrollado las pruebas pertinentes.

## **2.6 Limitaciones**

El análisis que se va a realizar es básicamente enfocado a una parte metalográfica óptica, por lo tanto se va a utilizar el microscopio de los laboratorios que se encuentran en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

En la elaboración y desarrollo de este proyecto en ningún momento se van a tener en cuenta análisis en los comportamientos y cambios químicos que se puedan generar debido a que no afectan circunstancialmente los resultados vistos. Las pruebas de dureza y de tensión se van a realizar en los laboratorios de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, al igual que la utilización del horno para tratamientos térmicos dispuestos allí. En caso que no sea posible contar con ninguno de los laboratorios ya mencionados se contactará a un laboratorio externo para realizar las pruebas.

# **3 OBJETIVOS QUE SE PRETENDEN LOGRAR CON LA INVESTIGACIÓN**

## **3.1 Objetivo general**

Establecer la influencia en las propiedades de tensión y dureza de un acero SAE 1045 templado a temperaturas intercríticas y en tiempos de revenido de 5, 10 y 15 minutos.

## **3.2 Objetivos específicos**

- Determinar las temperaturas a las cuales se va a realizar el temple del material, teniendo como base su composición química en el diagrama Hierro Carbono
- Determinar la secuencia de tratamientos térmicos basados en la composición química del material seleccionado
- Realizar pruebas de tensión, impacto, dureza y metalográficas a los materiales que han sido utilizados en nuestros procesos teniendo en cuenta la norma ASTM E-8 y E-23
- Calcular los coeficientes de endurecimiento K y n de la curva plástica para cada uno de los materiales a los cuales se les realizó las pruebas correspondientes

## **4 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

Al comienzo del proyecto se debe determinar las temperaturas a las cuales se debe realizar el tratamiento térmico que deben estar entre A1 y A3 del diagrama hierro-carbono, posteriormente se realizara el análisis de composición metalográfica, por lo tanto se debe aplicar teóricamente la regla de la palanca.

Para desarrollar este proyecto vamos a tener en cuenta factores importantes ya antes mencionados sobre los aceros doble fase con el fin de obtener experimentalmente resultados que nos permitan identificar los cambios que se presentan después de realizar el revenido como tratamiento térmico sugerido, teniendo en cuenta las transformaciones de fase que pueden ocurrir. Las pruebas de tensión, dureza y metalográficas nos van a servir como soporte para establecer algunas diferencias entre los tratamientos térmicos aplicados a distintas temperaturas. Dado los resultados de las pruebas preestablecidas, se realizarán las comparaciones necesarias entre los datos teóricos y experimentales obtenidos, desarrollando gráficamente y demostrando de una forma clara los cambios existentes entre todos los procedimientos experimentales.

## **5 MARCO TEÓRICO**

### **5.1 Tratamientos térmicos**

Los Tratamientos Térmicos se refieren a una amplia gama de operaciones llevadas a cabo a elevadas temperaturas, con las cuales se transforman las propiedades de los metales y de las aleaciones para poder trabajarlos eficientemente o para conferirles determinadas características mecánicas o tecnológicas.

Desde el momento en el que un material entra en la fabricación de la mayoría de los objetos metálicos sufre por lo menos un tratamiento térmico en alguna fase de su producción, puede considerarse que este tratamiento es parte importante de la moderna tecnología industrial. De lo antes expuesto podemos deducir que los tratamientos térmicos son operaciones de calentamiento y enfriamiento a temperaturas y en condiciones determinadas, a que se someten los aceros (y otros metales y aleaciones), para darles características más adecuadas para su empleo; estos no modifican la composición química pero si otros factores como su constitución, estructura y estado mecánico.

### **5.2 Factores de Importancia en un Tratamiento Térmico.**

La clave de los tratamientos térmicos consiste en las reacciones que se producen en el material, tanto en los aceros como en las aleaciones no férricas, y ocurren durante el proceso de calentamiento y enfriamiento de las piezas, con unas pautas o tiempos establecido.

A través de los tratamientos se modifican la constitución del acero, variando el estado en el que se encuentra el carbono, y el estado alotrópico del hierro, se modifica la estructura, variando el tamaño de grano y el reparto de los constituyentes, el estado mecánico queda afectado por las tensiones a las cuales son sometidos los materiales luego de algunos TT, principalmente después de un temple, el producto sólido se expone parcial o totalmente a

ciclos térmicos según lo amerite la ocasión, deben ser tomadas en cuenta tanto la temperatura de enfriamiento como la de calentamiento y de igual forma los medios en los que se efectúen los tratamientos como tales. Otros factores que deben ser considerados son: la composición del material, la velocidad de calentamiento, duración del tratamiento. Casi todos los tratamientos se llevan a cabo en hornos especiales, que pueden ser de tipo continuo, con zonas a temperaturas diferentes por las que va pasando la pieza, o bien de tipo discontinuo. El enfriamiento puede tener lugar dentro o fuera del horno. Los tratamientos térmicos y termoquímicos son una alternativa para cambiar las propiedades del material base transformado su microestructura. Este cambio se obtiene al modificar el tamaño, distribución, forma, composición y estructura cristalina de las fases, lo que resulta en la variación de propiedades mecánicas como: dureza, resistencia a la fluencia, ductilidad, resistencia al impacto, entre otras [LIU.C, 2002]. El modelamiento de los tratamientos térmicos se puede analizar desde diferentes aspectos que interactúan entre sí como lo muestra la figura 2. Las relaciones existentes entre cada uno de ellos se explican a continuación:

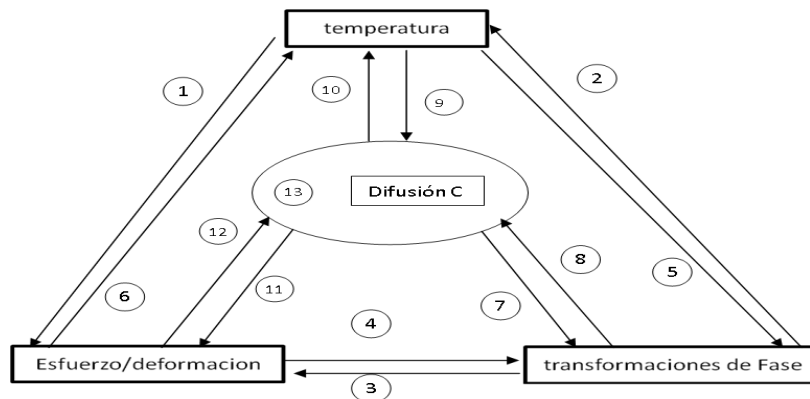


Figura 2 Esquema de la interacción de los procesos en los tratamientos térmicos. (LIU.C, 2002)

El cambio de temperatura durante el enfriamiento induce un esfuerzo causado por el cambio volumétrico de la transformación de fase ①; la influencia de la temperatura en la transformación de fase resulta en el cambio de la microestructura del material ②; la deformación local producto de este cambio está acompañada de un aumento de los esfuerzos internos ③. La existencia de estos esfuerzos y deformaciones tiene una influencia directa en la cinética de la transformación de fases ④. El calor latente generado debido a que la transformación de fase afecta la distribución de temperatura ⑤. Parte del trabajo realizado por la aparición del esfuerzo se convierte en calor que afecta la temperatura ⑥. Los efectos de la difusión de carbono en la transformación de fases ⑦, se reflejan en dos mecanismos: El primero referido al incremento del porcentaje de C permite realizar la transformación en un rango de temperaturas más bajas; y el segundo tiene que ver con los carburos que se han formado en la superficie del material tratado cuando se presentan elementos aleantes en el acero que exceden los límites de saturación de C en la matriz. La cinética de la difusión y la velocidad de la reacción de la superficie del carbono dependen de la morfología de la microestructura ⑧ y de los niveles de temperatura ⑨. Por otra parte el contenido de C afecta la conductividad térmica del

material ⑩. La absorción de átomos de C desde la atmósfera del tratamiento conduce al cambio de parámetros reticulares (lattice), que deben tenerse en cuenta cuando se establecen las ecuaciones constitutivas de las relaciones esfuerzo- deformación ⑪. El efecto que puede tener el estado de esfuerzos en la cinética de la difusión de carbono ⑫. (Liu.C, 2002, Gur. J, 2009, Totten.G 2007)

Existen varios tipos de tratamientos térmicos en los cuales se combinan varias de las interacciones que se mencionaron, en el caso de nuestra investigación vamos a tener en cuenta solamente las transformaciones de fase ② y ⑤ especificadas anteriormente, junto con le realización del siguiente tratamiento térmico. Temple (Quenching) El acero es autenizado y se enfría rápidamente para transformar la austenita en martensita.

### 5.3 Transformaciones de fase

Las transformaciones de fase son cambios en la naturaleza de la fase o en el número de fases, como el resultado de la variación de condiciones de enfriamiento, todas estas modificaciones tienen su origen en la estructura inicial de acero, de su composición y de la temperatura desde la cual se realiza el tratamiento, como se puede observar en el diagrama hierro carbono Fe-C (figura 3). Cada una de estas fases poseen propiedades mecánicas definidas y el resultado final de las mezclas se pueden calcular de acuerdo con

la expresión (ASM, 2003). 
$$X = \sum X_I \xi_I \quad (3)$$

Donde X es la propiedad en particular del material y  $\xi$  es la fracción volumétrica de la fase I (C.C Lui, 2003)

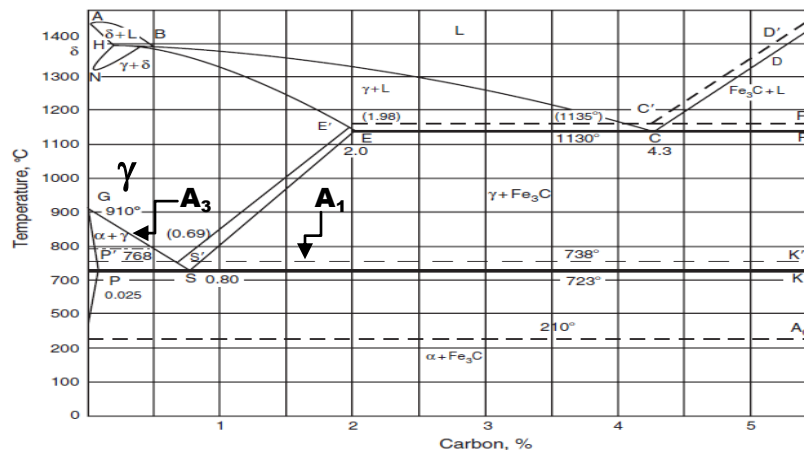


Figura 3. Diagrama hierro carbono donde se observan las fases presentes Hierro delta  $\delta$  , Austenita  $\gamma$ , Cementita  $Fe_3C$ , Perlita P, Ferrita  $\alpha$ . y las temperaturas del eutectoide  $A_1$  720°C y la temperatura de inicio de transformación de la Austenita  $A_3$  (ASM, 2003)

Para las temperaturas comprendidas entre  $A_1$  y  $A_3$  zona conocida como: de austenización parcial, de temperaturas Inter-críticas o de doble fase; derivando su nombre por la presencia de ferrita y austenita (figura 4) (Movaheda. P, 2009). Las temperaturas se pueden calcular con las siguientes expresiones

$$A_1(^{\circ}C) = 727 + 13.4Cr - 1.03C Cr - 16.72Mn + 0.91 C Mn + 6.18 Cr Mn - 0.64Mn^2 + 3.14 Mo + 1.86Cr Mo - 0.73 Mn Mo - 13.66 Ni + 0.53 C Ni + 1.11 Cr Ni - 2.28 Mn Ni - 0.24 Ni^2 - 6.34 Si - 8.88 Cr Si - 2.34 Mn Si + 11.98 Si^2$$

(4)

Cuando se realiza en un estado de austenización total la temperatura debe estar por encima de  $A_3$  que se calcula de acuerdo con (Gur. J, 2009):

$$A_3(^{\circ}C) = 912 - 203\sqrt{C} + 15.2Ni + 44.7Si + 104V + 31.5Mo + 13.1W - 30Mn - 11Cr - 20Cu + 700P + 400Al + 120As + 400Ti$$

(5)

En las anteriores expresiones se puede observar la influencia de los elementos aleantes que disminuyen o aumentan estas temperaturas dependiendo del aumento o disminución del campo de estabilidad de la austenita, por esta razón el signo que los precede (ASM, 2003).

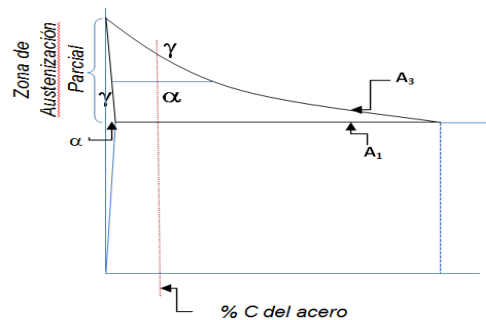


Figura 4. Representación de las zonas y temperaturas de tratamiento, la línea punteada denota el % de carbono del acero. (Liedl. U, 2002) (Movaheda. P, 2009)

Realizando un enfriamiento rápido desde este rango de temperaturas comprendidos entre  $A_1$  y  $A_3$  se obtienen aceros de doble fase DP (dual phase), que brindan una buena combinación de propiedades (Bhagavathi. L, 2011), como consecuencia de la aparición de martensita en una matriz ferrítica. Una variable importante es para consecución de este objetivo es la velocidad de enfriamiento, dependiendo de ella se obtendrán diversas combinaciones de estructuras como lo muestran los diagramas TTT (figura 4). (Kang. S, 2007) (Reti. T, 2001) (Gur. J, 2009)

#### 5.4 Temple

Consiste en un calentamiento del material hasta una temperatura crítica seguido de un enfriamiento muy rápido, para impedir la transformación normal del constituyente obtenido en el calentamiento. El objetivo central del temple es fundamentalmente, aumentar la dureza y resistencia mecánica. El constituyente obtenido es la martensita, la cual representa la sobresaturación distorsionada de los cristales de hierro alfa. El temple utiliza como medios de enfriamiento agua, aceites, baños de plomo, mercurio y sales fundidas. Las temperaturas del temple son algo más elevada que la crítica superior  $A_c$  (entre 900-950°C)

La obtención de la martensita se da con el enfriamiento rápido del acero desde la zona de la fase austenítica la cual se consigue con una consistencia dura y frágil. La profundidad del temple de un componente enfriado con rapidez depende de su templabilidad (capacidad a la penetración del temple), que a su vez depende, fundamentalmente, del diámetro o espesor de la pieza y de la calidad del acero y de la misma forma está en función de la composición del acero y del tamaño de grano. Un acero de determinada templabilidad adquiere un grado de temple tanto mayor cuanto más elevada sea la velocidad de enfriamiento, que, a su vez, depende del medio de enfriamiento, del grado de agitación y del espesor de la pieza. Los aumentos en el contenido de carbono o de los elementos de aleación en el acero (Mn, Cr, Ni, Mo, V, W) proporcionan mayor templabilidad; algunos materiales (por ejemplo algunos aceros para herramientas) son tan latamente aleados que se templean por completo al ser enfriados al aire.

Los artículos de acero endurecidos calentándolos a unos 900 °C y enfriándolos rápidamente en aceite o agua se vuelven duros y quebradizos. Si se vuelven a calentar a una temperatura menor se reduce su dureza pero se mejora su tenacidad. El equilibrio adecuado entre dureza y tenacidad se logra controlando la temperatura a la que se recalienta el acero y la duración del calentamiento. La temperatura se determina con un instrumento conocido como pirómetro. Es importante señalar que debido a que el producto del temple es mayormente frágil, normalmente se le somete a otro proceso térmico (Revenido), el cual será desarrollado posteriormente.

## 5.5 Revenido

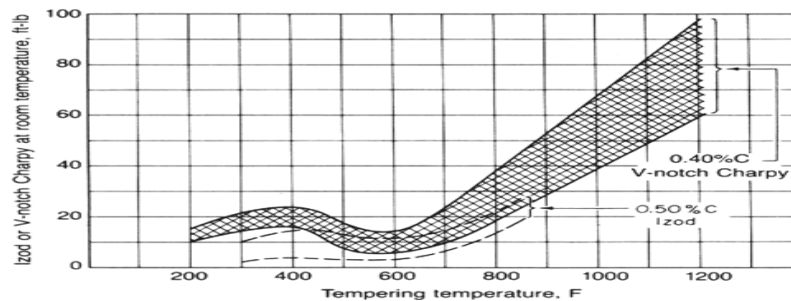


Figura 5. Impacto de la tenacidad como una función de la temperatura de revenido de endurecido, de baja-aleación, aceros al carbono

Es un tratamiento complementario del temple, que generalmente sigue a éste. Al conjunto de los dos tratamientos también se le denomina "bonificado". El tratamiento de revenido consiste en calentar al acero después de normalizado o templado, a una temperatura inferior al punto crítico, seguido de un enfriamiento controlado que puede ser rápido cuando se pretenden resultados altos en tenacidad, o lento, para reducir al máximo las tensiones térmicas que pueden generar deformaciones. El objeto del tratamiento de revenido es aumentar la tenacidad de las piezas, reducir las tensiones resultantes del temple y reducir la dureza. El sistema tradicional de revenido consiste en un calentamiento a temperaturas relativamente bajas (entre 150 y 700 °C) durante un tiempo del orden de más de una hora y dejarlas enfriar lentamente. Modificar las características

mecánicas, en las piezas templadas produciendo los siguientes efectos: 1. Disminuir la resistencia a la rotura por tracción, el límite elástico y la dureza. 2. Aumentar las características de ductilidad; alargamiento estiración y las de tenacidad; resiliencia. Hay que tener mucho cuidado con la temperatura que se selecciona, ya que hay tres zonas bien diferenciadas.

- 150°C – 200°C, ligero aumento de tenacidad
- 260°C – 370°C, disminuye la tenacidad. Fragilización por la martensita revenida
- 450°C – 650°C, gran aumento de tenacidad, disminución de L.E. Y carga de rotura.

### 5.5.1 Revenido rápido

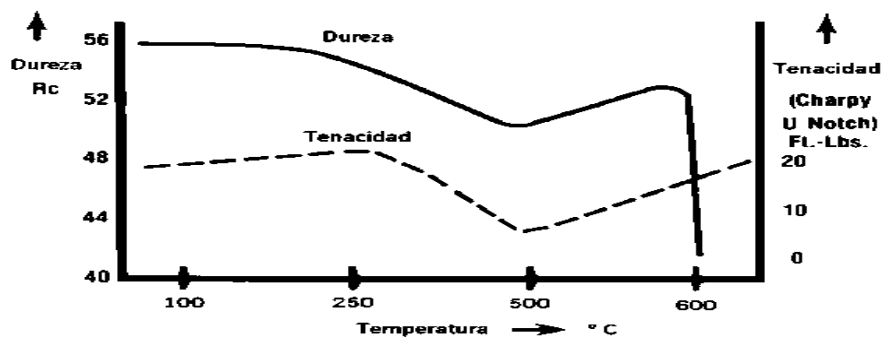


Figura 6. Diagrama revenido rápido curva Dureza – Temperatura - Tenacidad

Un revenido duro a un rango de temperaturas de 500 a 530° C y una resistencia a la tracción promedio de 105 a 110 Kg/mm<sup>2</sup> y una resiliencia de 6 a 8 kg/cm<sup>2</sup>. Es la culminación de todo proceso de templado y el más importante de todos, ya que con él se logran las características adecuadas a cada uno de las condiciones de trabajo. Consiste en poner a temperatura las piezas que han sido previamente templadas. Con esto se logra, además de eliminar las tensiones acumuladas en el proceso del temple, la adecuación de las características mecánicas en función al trabajo que después va a ejecutar la pieza. Los aceros que pueden ser tratados se pueden dividir en dos clases:

- ✓ Aceros al carbono: con tenores de carbono mayor que 0.30% y temple severo.
- ✓ Aceros de baja aleación: También con tenores de carbono superiores a 0.30 % y temple al aceite.
- ✓ Aceros especiales: existen diversos tipos de aceros con aleaciones tales que realzan cada una de las propiedades requeridas.

Mejora sustancialmente las propiedades de las piezas, permitiendo reducir las dimensiones y pesos y por lo tanto los costos. Cuanto mayor sea el tamaño de las piezas mayor debe ser la templabilidad del acero empleado; de lo contrario se obtienen temple imperfectos, dado que la velocidad de enfriamiento es menor en las capas interiores, y por lo tanto las durezas obtenidas son proporcionales a las velocidades.

## 5.6 Curva de la “s”

Las curvas de las “S” conocidas también como diagrama tiempo tiempo temperatura – transformación E IT o simplemente curva C , es un estudio exhaustivo sobre las diferentes reacciones que se presentan en determinado estudio , dicho estudio permite predecir estructura , propiedades mecánicas y así mismo el respectivo tratamiento térmico que requiere el acero analizado.

Una de las reacciones que requiere un análisis completo con respecto a su desarrollo lo representa la reacción eutectoide en estado sólido , debido a la lentitud de la misma , provocando en el acero un enfriamiento por debajo de la temperatura eutectoide de equilibrio antes de que se inicie la transformación , provocando esto importantes consecuencias ya que una temperatura de transformación inferior dará una estructura más fina y resistente (Figura A) , lo cual afectará el tiempo requerido para dicha transformación , y alterará la organización de las dos fases. El diagrama TTT o curva de las “S” de acuerdo a lo observado en el planteamiento anterior es consecuencia de la reacción eutectoide. A cualquier temperatura en particular, una curva sigmoidea representa la velocidad a la cual la austenita se transforma en una mezcla de ferrita y de cementita (figura C). Para la nucleación se requiere un tiempo de incubación. La línea Ps representa el momento en el cual se inicia la transformación. La curva sigmoidea también da el tiempo en el cual se completa la transformación, este momento está dado por línea Pf. Cuando la temperatura disminuye de 727 °C, se incrementa la velocidad de nucleación y al mismo tiempo se reduce la rapidez de crecimiento del eutectoide. En el caso de un acero eutectoide la rapidez máxima de transformación ocurre cerca de 550°C (Figura B)

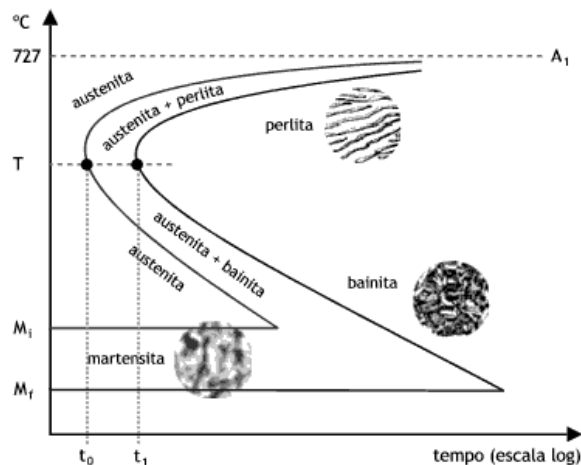


Figura 7. Curva de la “s” temperatura vs tiempo

Los resultados obtenidos en la transformación producen dos tipos de microconstituyentes , siendo los mismos Perlita (P) cuya formación se registra por encima de 550°C, y la Bainita (B) que se forma a temperaturas inferiores respectivamente. Uno de los aspectos de más prestancias en la determinación de las curvas de las “S” lo representa la Nucleación dada en el proceso por lo que a continuación veremos el comportamiento de esta:



Nucleación y Crecimiento de la Perlita: Al realizar el templado por debajo de la temperatura eutectoide, se produce un subenfriado ligero en la austenita, y por otro lado se requieren tiempos prolongados antes de que se produzcan núcleos estables tanto para la ferrita como para la cementita. Al comenzar el crecimiento de la ferrita, los átomos son difundidos con rapidez, produciéndose de esta forma una perlita gruesa; dicha transformación es completada en el tiempo de  $(P_f)$ . En el caso de que la austenita se temple a una temperatura inferior a la estipulada la misma se subenfriará mucho más, provocando la rápida ocurrencia de la enucleación y por lo tanto  $P_s$  sería más corto. Sin embargo, la difusión es considerablemente más lenta, ya que los átomos se difunden sólo a distancias cortas dando como resultado una estructura de perlita fina. Es bueno reconocer que a pesar de que las velocidades de crecimiento son más lentas el tiempo total que se requiere sufre una reducción para el logro de la transformación como tal, todo esto debido a la corta duración del tiempo de incubación. Como observamos la perlita más fina tiene formación en tiempos más cortos conforme se reduce la temperatura de transformación isotérmica hasta aproximadamente  $550^{\circ}\text{C}$ , la cual es la nariz o rodilla de la curva TTT. Nucleación y Crecimiento de la Bainita : Cuando se registra una temperatura justo por debajo de la nariz del diagrama TTT o Curva de las "S", la difusión se produce de manera más lenta, y así mismo los tiempos totales de transformación sufren un incremento general. A parte de esto se observa una estructura distinta. En el caso específico de transformación a bajas temperaturas, las laminillas de Perlita requerirían ser extremadamente delgadas y, en consecuencia, el área entre ferrita y laminillas de  $\text{Fe}_3\text{C}$  sería muy grande.

La cantidad de energía asociada con la interface Ferrita – Cementita incide en el aumento de la energía total del acero ya que esta será muy grande; donde es preciso acotar que la energía interna del acero puede ser reducida a través de la precipitación de la cementita en forma de películas distintas y redondeadas en una matriz de ferrita. El microconstituyente formado en este proceso se le denomina Bainita (Bs), siendo tras la formación de la misma donde empieza la transformación y la misma termina con la finalización de la bainita (Bf)

## **5.7 Acero SAE 1045**

### **5.7.1 Características de empleo**

SAE 1045 es un acero grado ingeniería de aplicación universal que proporciona un nivel medio de resistencia mecánica y tenacidad a bajo costo con respecto a los aceros de baja aleación. Frecuentemente se utiliza para elementos endurecidos a la llama ó por inducción. Este acero puede ser usado en condiciones de suministro: laminado en caliente o con tratamiento térmico (templado en aceite y revenido; o templado en agua y revenido). Se caracteriza por ser un acero de baja templabilidad que puede ser endurecido totalmente en espesores delgados por temple en agua. En secciones más gruesas se puede obtener un endurecimiento parcial de la sección de la pieza y el incremento de la resistencia será proporcional a la capa o espesor endurecido, al ser deformado en frío se presenta un incremento en la dureza y la resistencia mecánica.

COMPOSICION QUIMICA	C %	Mn %	P Max %	S Max %	Si Max %
Análisis típico en %	0,43 0,5	0,6 0,9	0,04	0,05	0,2 0,4

### 5.7.2 Propiedades físicas

Estos valores son obtenidos a partir de probetas bajo condiciones específicas de laboratorio y deben ser usados como referencia.

- Densidad → 7.85 gr/cm<sup>3</sup>.
- Módulo de elasticidad →  $2 \times 10^{11}$  Pa ( $24 \times 10^6$  PSI).
- Conductividad térmica → 52 W/(m·°C).
- Calor específico J/(Kg°K) → 460
- Coeficiente de Poisson → 0,3
- Resistividad eléctrica (microhm-cm):

A 32°F = 16.2

A 212°F = 22.3

- Coeficiente de dilatación térmica / °C

(20 - 100°C)  $12.3 \times 10^{-6}$

(20 - 200°C)  $12.7 \times 10^{-6}$

(20 - 400°C)  $13.7 \times 10^{-6}$

- ❖ Propiedades típicas a temperatura ambiente sin endurecimiento diámetro de la barra: 12 a 38 mm

Propiedad	Laminado en caliente	Normalizado	Recocido
Resistencia a la tracción MPa	655	655	620
Punto de fluencia MPa	413	413	379
% de elongación	23	23	26
% de reducción de área	44	45	53
Dureza brinell (3000 kg.)	190	190	180

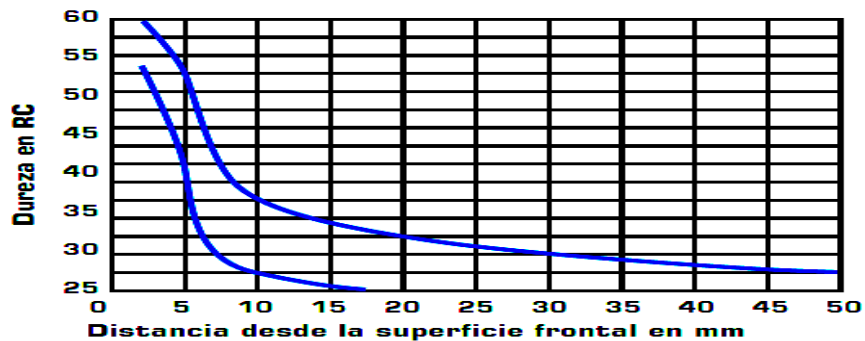
- ❖ Propiedades típicas a temperatura ambiente con temple en aceite redondo de 25 mm

Temperatura de revenido °C	Resistencia a la tracción MPa	Punto de Fluencia Mpa	Elongación (en 50 mm) %	Reducción de área %	Dureza Brinell (3000 Kg.)
320	965	655	11	34	278
430	875	621	15	39	257
540	793	558	18	45	228
650	703	482	23	51	203
705	641	462	25	55	195

- ❖ Propiedades típicas a temperatura ambiente con temple en agua redondo de 25 mm

Temperatura de revenido °C	Resistencia a la tracción N/mm <sup>2</sup>	Punto de Fluencia N/mm <sup>2</sup>	Elongación (en 50 mm) %	Reducción de área %	Dureza Brinell (3000 Kg.)	Impacto Izod ft - lb
320	1034	786	8	33	313	15
430	965	731	13	43	281	24
540	827	621	19	52	242	38
650	717	503	24	60	210	61
705	669	455	27	62	198	70

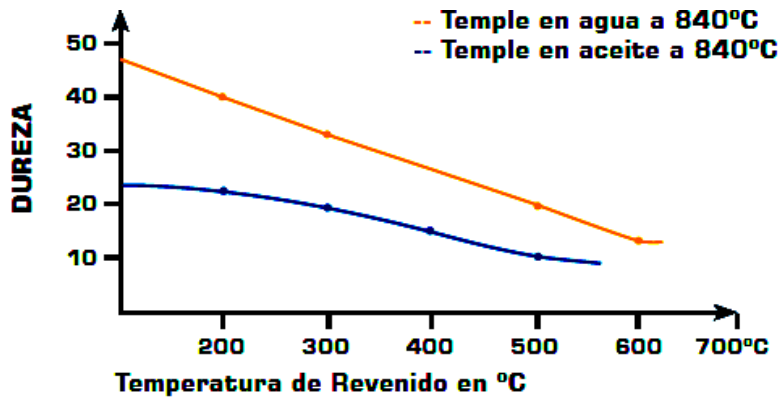
### 5.7.3 Banda de templabilidad



### 5.7.4 Tratamientos térmicos

TRATAMIENTO TÉRMICO	TEMPERATURA °C	MEDIO DE ENFRIAMIENTO
Forja	850 - 1100	Arena seca
Normalizado	856 - 900	Aire
Recocido total	815 - 885	Horno
Recocido posterior al trabajo en frío	595 - 662	Horno luego aire
Temple (*)	815 - 870	Agua - aceite
Revenido	450 - 600	Aire

### 5.7.5 Diagrama de revenido



El tiempo de sostenimiento a esta temperatura es de 1 hora + 1 hora por pulgada de espesor o diámetro de la pieza. Posteriormente se enfría en el horno o al aire

### 5.7.6 Maquinabilidad

Puede ser mecanizado fácilmente en estado recocido, normalizado o templado, tomando como referencia al 12L14 (100% de maquinabilidad). El acero 1045 presenta la siguiente maquinabilidad:

- En estado calibrado = 55%
- En estado recocido = 68 - 70%

Este acero presenta un buen acabado superficial y su mecanizado se caracteriza por presentar una larga vida útil de la herramienta de corte

Torneado:

PROFUNDIDAD DE CORTE mm	ACERO RÁPIDO		HERRAMIENTA DE CARBURO		
	Velocidad m/min	Avance mm/rev	Soldado velocidad m/min	Insertado velocidad m/min	Avance mm/rev
<b>Dureza, 125 a 175 HB</b>					
<b>1</b>	43	0.18	140	180	0.18
<b>4</b>	35	0.40	110	140	0.50
<b>8</b>	27	0.50	85	110	0.75
<b>16</b>	11	0.75	67	85	1.00
<b>Dureza, 175 a 225 HB</b>					
<b>1</b>	40	0.18	130	160	0.18
<b>4</b>	30	0.40	100	125	0.50
<b>8</b>	26	0.50	78	100	0.75
<b>16</b>	20	0.75	60	78	1.00

### 5.7.7 Conformabilidad

SAE 1045 puede ser conformado fácilmente en caliente a temperaturas entre 980 y 1230°C. Este material no debe ser deformado en frío extensivamente sin realizar recocidos intermedios. Un recocido sub-crítico será suficiente excepto cuando un trabajo severo en frío ha de ser seguido por más trabajo en frío en cuyo caso se requiere de un recocido total.

### 5.7.8 Soldabilidad

El acero SAE 1045 está cerca al límite superior de aceros con porcentaje de carbono que pueden ser soldados satisfactoriamente por todos los métodos comunes. Sin embargo, precalentamiento y post-calentamiento pueden ser necesarios en función del espesor. Usualmente hay menos necesidad de precalentamiento y post-calentamiento con procesos de soldadura con gas que con métodos de soldadura por arco debido a que el proceso de soldadura por gas genera una zona afectada por el calor mayor que el proceso de arco eléctrico y por tal razón el enfriamiento es más lento. Se recomienda el uso de electrodos de bajo hidrógeno.

Datos de impacto: templado al agua y revenido a 870°C

Dureza Brinell	Probeta Charpy (entalla en V), Joules, realizado a diferentes temperaturas						
	- 73°C	- 45°C	- 18°C	10°C	40°C	65°C	95°C
225	7 a 15	11 a 20	27 a 40	51 a 65	55 a 70	63 a 74	70 a 81
300	----	8 a 12	10 a 16	13 a 24	19 a 36	27 a 40	36 a 47

### 5.7.9 Aplicaciones

Este acero de medio carbono se usa cuando la resistencia y dureza obtenidas por el tratamiento térmico o por deformación en frío, son suficientes para satisfacer las condiciones de servicio requeridas. Es ampliamente utilizado en la industria automotriz (productos forjados y estampados). Se usa en partes de máquinas que requieran dureza y tenacidad como: manivelas, chavetas, pernos, bulones, engranajes de baja velocidad, acoplamientos, árboles, bielas, cigüeñales, ejes de maquinaria de resistencia media, piezas de armas, cañones de fusiles, espárragos, barras de conexión, tornillería grado 5, pernos de anclaje, fabricación de herramientas agrícolas, mecánicas y de mano forjadas de todo tipo como: hachas, azadones, rastrillos, picas, martillos, palas, barretones, llaves.

## 6 PROCEDIMIENTO Y TÉCNICAS PARA LA RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN

Teniendo en cuenta que para el desarrollo de este proyecto vamos a utilizar múltiples enunciados relacionados con toda la información general acerca de la utilización de los aceros y sus tratamientos térmicos, debemos tener en cuenta que lo primero que se debe hacer es recolectar toda la información proporcionada por libros, artículos y catálogos que nos permitan conocer y establecer cuáles son los parámetros que se van a tener en cuenta para el desarrollo y limitaciones del proyecto.

Se planteara unas inquietudes en un aspecto teórico-técnico que se pretenden solucionar de la misma manera en el transcurso de tiempo que se realice el proyecto, además de esto se pretende realizar pruebas y comparar los resultados obtenidos en ellas con la información y planteamientos inicialmente propuestos.

## 7 ASPECTOS DE LA ADMINISTRACIÓN Y CONTROL

### 7.1 Actividades a desarrollar

- Búsqueda de la información para iniciar el proyecto
- Evaluar la información recolectada y clasificar su utilidad en el proceso de investigación
- Redacción del anteproyecto y correcciones pertinentes al respecto
- Cotización y compra del material correspondiente
- Fabricación de las probetas necesarias para sus respectivas pruebas
- Realizar el tratamiento térmico a las probetas asignadas
- Ejecutar las pruebas metalográficas, de tensión y dureza e impacto a cada conjunto de probetas
- Analizar y verificar los resultados obtenidos de las pruebas
- Documentar y concluir acerca de todo el proceso que se llevó a cabo en la realización del proyecto

### 7.2 Cronograma de actividades

<b>CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES</b>													
	<b>SEMANAS</b>												
<b>ACTIVIDADES</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<b>DOCUMENTACIÓN</b>													
Recolección de la información													
Análisis de la información suministrada													
Desarrollo teórico de los cálculos pertinentes													
Redacción de anteproyecto													
Correcciones de la redacción del anteproyecto													
<b>ESTABLECER LAS TEMPERATURAS A LAS CUALES SE REALIZARÁ EL TRATAMIENTO TÉRMICO</b>													
Recordar conceptos básicos de metalografía													

Determinar la temperatura de los tratamientos térmicos																						
Analizar la composición metalográfica mediante cálculos correspondientes																						
<b>FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS</b>																						
Consecución del material que se va a utilizar																						
Mecanizar el material según las normas establecidas																						
<b>IMPLEMENTACIÓN DEL TRATAMIENTO TÉRMICO</b>																						
Solicitar préstamo de los equipos necesarios																						
Realizar tratamiento térmico																						
<b>REALIZAR PRUEBAS</b>																						
Solicitar préstamo de los equipos necesarios																						
Realizar prueba de tensión																						
Realizar prueba de dureza																						
Realizar prueba de impacto																						
Realizar pruebas metalográficas																						
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>																						
Recolección de toda la información																						
Comparación de los resultados teórico-prácticos																						
Conclusiones y observaciones finales																						
<b>DOCUMENTACIÓN FINAL</b>																						

### 7.3 Presupuesto de la investigación

ACTIVIDADES	COSTOS
TIEMPO DE ASESORIAS	\$ 400.000
TRANSPORTES	\$ 250.000
INTERNET	\$ 50.000
PAPELERIA	\$ 120.000
ALIMENTACION	\$ 150.000
TIEMPO DE DISPONIBILIDAD	\$ 300.000
GASTOS EXTRA	\$ 80.000
TOTAL	\$1'350.000

## 8 BIBLIOGRAFÍA

AKAY, S.K. YAZICI, M. BAYRAMC, A. AVINCA, A. Fatigue life behaviour of the dual phase low carbon steel sheets. *Journal of materials processing technology*. 2009; p. 3358–3365.

AL-ABBASI F.M, NEMES J.A., Micromechanical modeling of dual phase steels. *International Journal of Mechanical Sciences*. vol 45, 2003; p. 1449-1465.

ANCA. A, C. A. Finite element modeling of welded joints. *Mecánica Computacional*. vol 27, 2008; p.1445-1470

ASM. *Methals Handbook 4*. ASM. 2003.

BHAGAVATHI, Lakshmana Rao. Mechanical and corrosion behavior of plain low carbon dual-phase steels. *Materials and Design*. 2011; p. 433–440

CAMURRI, Carlos. Modelo matemático y validación experimental de la transferencia de calor durante las diferentes etapas del tratamiento térmico de bolas para molienda. SAM CONAMET. 2004.

CARDENAS, E. RODRÍGUEZ, C. BELZUNCE, F.J. y BETEGÓN. C. Estudio de las propiedades mecánicas de aceros de doble fase mediante el ensayo miniatura de punzonado. *Anales de Mecánica de la Fractura*, vol. 1, 2009; p.166-171.

C.C, Lui. A FEM modeling of quenching and tempering and its application in industrial engineering. *Finite Elements in Analysis and Desing*. 2003; p.1053-1070

GUR. J, P. J. *Handbook of thermal modeling process*. IFHTSE. 2009.

KANG. S, I. Y. Three-dimensional thermo-elastic–plastic finite element modeling of quenching process of plain-carbon steel in couple with phase transformation. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2003; p.423–439

LIU. C, J. D. A numerical modeling of metallo-thermo-mechanical behavior in both carburized and carbonitrided quenching processes. *ISIJ International*. 2002; p.1125–1134

MOVAHED, P. KOLAHGARA, S. MARASHI, S.P.H. POURANVARI, M. PARVIN, N. The effect of intercritical heat treatment temperature on the tensile properties and work hardening behavior of ferrite–martensite dual phase steel sheets. *Materials Science and Engineering A*. 2009; p.1–6

OLIVEIRA. W, S. M. Thermomechanical analysis of steel cylinders quenching using a constitutive model with diffusional and non-diffusional phase transformations. *Mechanics of Materials*. 2010; p.31-43.

RETI. T, F. Z. Computer simulation of steel quenching process using a multi-phase transformation model. *Computational Materials Science*. 2001; p.261-278.



RISSE, J. C. A. A simplified model for heat treatment simulation. *Mecánica Computacional*. vol. 23, 2004; p.2443-2458

SILVA, E, L. P. On the thermo-mechanical coupling in austenite-martensite phase transformation related to the quenching process. *International Journal of Solids and Structures*. 2004; p.1139-1155

TOTTEN, G. Heat treating in 2020: what are the most critical issues and what will the future look like? *IFHTSE*. 2010; p. 1-5.

YOSHIDA, K, B. R. Micromechanical modeling of the work hardening behavior of single and dual phase steels under two stage loading paths. *Materials Science and Engineering A*. 2011; p.1037–1046