

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DEL SUR DE GUANAJUATO



Tratamientos térmicos y su afectación en la dureza superficial de los aceros comerciales 4140, SISA 01 y SISA D2

Opción 2: Titulación Integral – Tesis Profesional

Elaborada por:

José Alejandro Pito Ruiz

Que presenta para obtener el título de:

INGENIERO EN SISTEMAS AUTOMOTRICES

Asesor:

M.C Mariano Braulio Sánchez

Uriangato, Gto.

Noviembre 2022

“Tratamientos térmicos y su afectación en la dureza superficial de los aceros comerciales 4140, SISA 01 y SISA D2”

Elaborada por:

José Alejandro Pito Ruiz

Aprobado por.

M.C Mariano Braulio Sánchez
Docente de la carrera de Ingeniería en Sistemas Automotrices
Asesor de la Tesis Profesional

Revisado por.

M.C Pedro Durán Reséndiz
Docente de la carrera de Ingeniería en Sistemas Automotrices
Revisor de la Tesis Profesional

Revisado por.

Ing. Rogelio Orozco Martínez
Docente de la carrera de Ingeniería en Sistemas Automotrices
Revisor de la Tesis Profesional



LIBERACIÓN DE PROYECTO PARA LA TITULACIÓN INTEGRAL

Uriangato, Gto., 07/noviembre/2022

Asunto: Liberación de proyecto para la titulación integral

Ing. J. Trinidad Tapia Cruz
Director Académico y de Estudios Profesionales
ITSUR
PRESENTE

Por este medio informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la titulación integral:

Nombre de estudiante y/o egresado(a): José Alejandro Pito Ruiz	
Carrera: Ingeniería en sistemas automotrices	Núm. de control: T16120155
Nombre del proyecto: Tratamientos térmicos y su afectación en la dureza superficial de los aceros 4140, SISA 01 y SISA D2	
Producto: Tesis Profesional	

Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestras y nuestros egresados.

ATENTAMENTE


M.C. Mariano Braulio Sánchez
Coordinador de Ingeniería en Sistemas Automotrices
ITSUR



La comisión revisora ha tenido a bien aprobar la reproducción de este trabajo.

		
M.C. Mariano Braulio Sánchez Asesor de la Tesis Profesional	M.C. Pedro Durán Reséndiz Revisor de la Tesis Profesional	Ing. Rogelio Orozco Martínez Revisor de la Tesis Profesional

Instituto Tecnológico Superior
del Sur de Guanajuato
COORDINACIÓN DE
EN SISTEMAS AUTOMOTRICES

c.c.p.- Expediente

Julio 2017

Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato
División de Ingeniería en Sistemas Automotrices

DEPARTAMENTO ACADEMICO	CLAVE:11EIT0002E ISA-EGR-2022/55
---------------------------	-------------------------------------

Uriangato, Guanajuato, 07/noviembre/2022

Asunto: Aprobación de impresión de trabajo profesional

C. JOSÉ ALEJANDRO PITO RUIZ
PRESENTE:

Por medio de este conducto, le comunico a usted que después de haber sido revisado su trabajo bajo la cual se derivó la Monografía Titulada:

**“Tratamientos térmicos y su afectación en la dureza superficial
de los aceros 4140, SISA 01 y SISA D2”**

La comisión revisora, ha tenido a bien aprobar la impresión de este trabajo.

ATENTAMENTE

*“Excelencia en Educación Tecnológica”
“Tecnología y Calidad para la Vida”*



M.C Mariano Braulio Sánchez

Jefe de División de Ingeniería en Sistemas Automotrices

C.c.p Unidad de Servicios Escolares

C.c.p Coordinación de Ingeniería en Sistemas Automotrices

C.C.p Archivo Consecutivo



Instituto Tecnológico Superior
del Sur de Guanajuato
COORDINACIÓN INGENIERÍA
EN SISTEMAS AUTOMOTRICES

Efecto de los tratamientos térmicos en la dureza de aceros 4041, D2 y 01

Resumen:

La industria metal-mecánica es una de las más exigentes en cuanto a lo laboral se refiere, pues esta requiere que todo se encuentre en tiempo y forma para poder satisfacer las necesidades de diversas empresas que le competen a esta. Sin embargo, esto no es siempre posible debido a diversos factores, por ejemplo: fallas en las maquinas, personal ausente, errores de producción, accidentes e incluso rezagos de trabajo. Una de las más comunes y en la cual nos enfocaremos en esta ocasión es la falta de personal o personal nuevo.

Los tiempos de entrega de algunas piezas las cuales llevan un proceso exclusivo suelen retrasarse debido a la falta de personal, o en ocasiones personal nuevo el cual no tiene el conocimiento necesario de la empresa para seguir con el proceso de las piezas para poder darle seguimiento y el pedido logre estar en tiempo y fecha acordado con el cliente.

Por lo que surge la incógnita ¿cómo agilizo el proceso? ¿Contratar empleados que solo se encargue de ese proceso? ¿Solicitar personal solo cuando requiera ciertas piezas con dicho proceso? La respuesta o solución a esta situación es la posible capacitación de cierto personal pero una mejor manera es la elaboración de un manual para la empresa posiblemente exclusivo para ella con el cual dar la posibilidad de que cualquier operador pueda realizar el proceso de tratamiento térmico con lo que se agilizará el trabajo pedido.

Abstract:

The metal-mechanical industry is one of the most demanding in terms of labor, as it requires that everything be found in a timely manner to be able to satisfy the needs of various companies that are responsible for it. However, this is not always possible due to various factors, for example: machine failures, absent personnel, production errors, accidents and even work delays. One of the most common and on which we will focus on this occasion is the lack of personnel or new personnel.

The delivery times of some parts which have an exclusive process are usually delayed due to the lack of personnel, or sometimes new personnel who do not have the necessary knowledge of the company to continue with the process of the parts to be able to follow up and the order was able to be on time and on the date agreed with the client.

So the question arises, how do I streamline the process? Hire employees who only take care of that process? Request personnel only when you require certain parts with said process? The answer or solution to this situation is the possible training of certain personnel, but a better way is to prepare a manual for the company, possibly exclusively for it, with which to give the possibility that any operator can carry out the heat treatment process with the that the requested work be expedited.

Palabras claves (*keywords*)

- Tratamiento térmico
- Proceso
- Temple
- Acero 4140
- Acero O1
- Acero D2

AGRADECIMIENTOS

Gracias a dios, por haberme acompañado en este camino de esfuerzo, sabiduría y conocimiento para alcanzar mis objetivos.

Agradezco a mis formadores, personas de gran sabiduría que quienes se han esforzado en ayudarme a llegar al punto donde me encuentro, sencillo no ha sido el proceso, pero gracias a las ganas de transmitirme sus conocimientos y dedicación que los ha regido, he logrado importantes objetivos como culminar el desarrollo de mi tesis con éxito y obtener mi titulación profesional.

Agradezco a mi tutor M.C. Mariano Braulio Sánchez. Por sus virtudes, la paciencia y constancia en este trabajo no lo hubiese logrado de tal manera. Sus consejos fueron siempre útiles cuando no salían de mi pensamiento las ideas para escribir lo que hoy se ha logrado, usted formo parte importante de esta historia con sus aportes profesionales que le caracterizan, gracias por sus múltiples palabras de aliento, por las horas de trabajo dedicadas, por sus orientaciones muchas gracias.

Al Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato (ITSUR) por haberme aceptado a ser parte de ellos por brindar la oportunidad de poder estudiar mi carrera de Ing. Sistemas automotrices y brindar a cada uno de los docentes que compartieron cada uno de sus conocimientos y apoyo día a día para seguir adelante. A mis compañeros de universidad y a Renovatec empresa que me brindó su apoyo para realizar mi proyecto en su empresa y cada uno de los compañeros y amigos que forme en mi estancia dentro de esta empresa.

DEDICATORIA

Dedicado con el amor y cariño a mis padres y hermano, ustedes han sido siempre el motor que impulsa mis sueños y esperanzas, quienes estuvieron siempre a mi lado en los días y noches más difíciles durante mis horas de estudio. Siempre han sido mis mejores guías de vida. Hoy cuando concluyo mis estudios, les dedico a ustedes este logro amados padres, como una meta más conquistada. Orgulloso de haberlos elegido como mis padres y que estén a mi lado en este momento tan importante.

Porque tantos años de lenguaje humano no bastan para encontrar las palabras de agradecimiento para ustedes.

En la vida se nos dan pocas oportunidades para salir adelante y contar con seres que nos induzcan que no debemos darnos por vencidos, y la enorme gratitud de los esfuerzos, de cada lucha y sacrificios realizados para que yo lograra terminar mi carrera profesional donde cada esfuerzo, desvelo y tropiezo vale la pena, gracias por apoyarme y guiarme en este camino.

Dios me ha dado la fortuna de tenerlos y la oportunidad de contar con ustedes para compartir mis fracasos, mis tristezas, pero sobre todo mis sueños, triunfos, alegrías y éxitos que también les pertenecen.

Por ello, con amor, admiración y respeto a dios y ustedes. Gracias por ser quienes son y por creer en mí. GRACIAS.

Índice general

.....	1
Índice de Tablas	10
Índice de Figuras.....	11
Capítulo 1	13
Introducción.	13
Capítulo 2.....	15
Marco teórico (Antecedentes).....	15
Capítulo 3.....	40
Planteamiento del problema	40
Capítulo 4.....	41
Objetivos	41
4.1. Objetivo general.....	41
4.2. Objetivos específicos.	41
Capítulo 5.....	42
Metodología	42
Capítulo 6.....	55
Resultados	55
Capítulo 8.....	70
Conclusiones y trabajo a futuro.....	70
Referencias bibliográficas	72
Anexos	74

Índice de Tablas

Tabla 1 Contenido porcentual en aceros y materiales ferrosos. [5].....	16
Tabla 2 Aceros al carbono, contenido en porcentaje de acuerdo a su caracterización. [7]	17
Tabla 3 Composición química del acero 4140.....	32
Tabla 4 Propiedades mecánicas del acero 4140.....	33
Tabla 5 Composición química Acero O1	34
Tabla 6 Propiedades mecánicas	35
Tabla 7 Composición química del acero SISA D2.....	36
Tabla 8 Cambio dimensional durante el tratamiento térmico	36
Tabla 9 Valores de dureza Rockwell C	57
Tabla 10 Valores de dureza Rockwell C. SISA D2.....	58
Tabla 11 Valores de dureza del acero 4140.....	59
Tabla 12 a) Temperatura y tiempo basado en antecedentes y b) tiempo establecido por la empresa Ronovatec.	60
Tabla 13 Temperatura y tiempo para la aplicación de los tratamientos térmicos para el acero SISA D2.....	62
Tabla 14 Temperaturas y tiempos de exposición para el tratamiento térmico aplicado a un acero 4140	63
Tabla 15 Tiempos y temperaturas de tratamiento térmico final aplicado a cada material.....	69

Índice de Figuras

Figura 1 Diagrama hierro carbono [6].....	17
Figura 2 Diagrama Hierro-Carbono (Fe-C), reflejando el punto hiper-eutectoide...	18
Figura 3 Constituyentes más simples del diagrama Fe-C [6].....	19
Figura 4 Arreglo octaédrico cristalino de cuerpo centrado BCC, las esferas blancas son átomos de hierro y las negras de carbono [5].....	20
Figura 5 Micrografía del acero, ferrita (parte blanca) y perlita (zona oscura) [6] .	21
Figura 6 Microestructura del acero.....	22
Figura 7 Estructura cubica centrada en las caras (hierro gama).....	23
Figura 8 Martensita tetragonal centrada en el cuerpo.....	25
Figura 9 Microestructura de la martensita 400X.....	26
Figura 10 Cementita eutectoide, globular o también llamada perlita globular. Se presenta en pequeños glóbulos o granos dispersos en una matriz de ferrita.	27
Figura 11 Perlita acero al carbono 13% granos oscuros de perlita delineados por cementita (líneas gruesas blancas).....	29
Figura 12 Curva de revenido del acero D2.....	37
Figura 13 a) Isométrico de la pieza terminada, b) vista lateral, c) vista superior y d) sección parcial de la parte posterior de la pieza.....	42
Figura 14 a) Encendido de mufla. B) display de temperatura y c) swich de alarma.....	44
Figura 15 a) interior de la mufla, b) temporizador.....	45
Figura 16 Piezas sometidas a enfriamiento en un contenedor con aceite.....	45
Figura 17 Pieza sometida a tratamiento térmico.....	46
Figura 18 a) interior de la mufla, b) pieza sometida a tratamiento térmico.....	47
Figura 19 Durómetro Rockwell.....	48
Figura 20 Careado y pulido de la pieza antes del tratamiento térmico.....	49
Figura 21 a) Acabado superficial después del tratamiento térmico, b) retiro de la capa superficial.....	50
Figura 22 Proceso de ajuste de temperatura con respecto al proceso de revenido.....	50
Figura 23 Probeta después del enfriamiento en aceite y limpia de exceso del mismo.....	51
Figura 24 Proceso de maquinado superficial.....	52
Figura 25 Pieza con un color rojizo, característica del tratamiento aplicado.....	56

Figura 26 Gráfica de dureza para el material SISA D2	57
Figura 27 Gráfica de dureza para el material D2.....	58
Figura 28 Gráfica de los valores de dureza Acero 4140.	59
Figura 29 Ciclos de tratamiento térmico de a) temple y b) revenido acero SISA 01	61
Figura 30 Ciclos de calentamiento y enfriamiento que representa el tratamiento térmico aplicado a un acero SISA D2 basado en la tabla 12.....	63
Figura 31 Gráfica del tratamiento térmico aplicado acero 4140	64
Figura 32 Vista a) frontal, b) lateral y c) isométrico de la pieza sometida a tratamiento térmico Acero 4140	65
Figura 33 a) Distribución de la temperatura sobre la pieza, b) vectores de distribución de la temperatura.	66
Figura 34 Simulación en ANSYS del acero 4140.....	67
Figura 35 Simulación de la transferencia de calor en el acero 4140.....	68

Capítulo 1

Introducción.

La industria metal- mecánica tiene diversidad de materiales utilizados para la producción y están sometidos a diferentes factores que con el paso del tiempo pueden afectar el funcionamiento y acortar la vida útil del metal, uno de estos factores es la corrosión, así como el desgaste o la fatiga del material es por ello que intervenga un tratamiento térmico con el cual se busca obtener mejores resultados para beneficiar la pieza [1].

El tratamiento térmico se describe como una operación o combinación de varias operaciones de una o varias herramientas las cuales son sometidas a un proceso de calentamiento y posterior a esto a uno de enfriamiento en determinado tiempo ambos procesos y en algunos casos son sometidas adicionalmente a otras influencias químicas y/o físicas [2].

Algunos de los efectos que se pretenden alcanzar al realizar un tratamiento térmico pueden ser los siguientes:

1. Aumentar dureza
2. Prevenir deformaciones
3. Ablandar el acero
4. Eliminar tensiones residuales
5. Mejorar el maquinado.

Con el proceso de tratamiento térmico se busca la obtención de un cambio estructural que es lo que nos provoca dicho tratamiento un cambio en la estructura de los materiales sin modificar la composición química en promedio del material.

Este trabajo surge por las necesidades de la industria de manufactura a la cual se debe hacer las entregas a tiempo y con prioridad a importantes clientes internacionales, nacionales y locales con los que cuenta la empresa Renovatec. En esta ocasión el propósito del trabajo es aprovechar de mejor manera la herramienta

con la que cuenta Renovatec y aprovechar los tiempos muertos de cada uno de los operadores, haciéndoles que con el manual cualquiera de las personas pueda realizar el proceso de tratamiento térmico incluso aunque no esté capacitada o tenga conocimiento alguno en dicha tarea y este proyecto les facilite la operación para lograr hacer las entregas más a tiempo.

El trabajo de tesis en su capítulo 2, describe los conceptos básicos considerados con base a los tratamientos térmicos, variables consideradas y la microestructura de los materiales, la revisión incluye el estado del arte de materiales sometidos a diferentes tratamientos y su cambio en las propiedades mecánicas. El planteamiento del problema y motivo de la presente investigación se muestra en el capítulo 3, la metodología experimental se describe con detalles en el capítulo 4. Los resultados de los tratamientos térmicos y el efecto en la dureza de los aceros comerciales se muestran en el capítulo 6 y el análisis de los mismos en el capítulo 7. Finalmente, el capítulo 8 resume las conclusiones del trabajo.

Capítulo 2

Marco teórico (Antecedentes).

Tratamiento térmico

Se conoce como tratamiento térmico cuando las aleaciones de metales son sometidas bajo condiciones bruscas de temperatura alta y enfriamiento repentino, tiempo de permanencia, velocidad, presión, siempre y cuando la alineación de los metales o las aleaciones se encuentre en estado sólido, con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas, especialmente la dureza, la resistencia y la elasticidad. Los materiales a los que se aplica el tratamiento térmico son, básicamente, el acero, el vidrio y la fundición, formados por hierro y carbono [3]. Un proceso de tratamiento térmico puede provocar transformaciones de los constituyentes estructurales sin modificar la composición química promedio del material [4]–[6].

Para conocer a que temperatura debe elevarse el metal para que se reciba un tratamiento térmico es recomendable contar con los diagramas de cambio de fases como el diagrama hierro carbono. En este tipo de diagramas se especifican las temperaturas en las que suceden los cambios de fase. Los tratamientos térmicos han adquirido gran importancia en la industria en general, ya que con las constantes innovaciones se van requiriendo metales con mayores resistencias tanto al desgaste como a la tensión.

Aceros al carbono.

Un acero es una aleación Fe – C, así como porcentajes bajos de otros elementos el carbono, como elemento en un acero, aumenta la templabilidad y la dureza, así como la resistencia al desgaste, aunque puede disminuir la soldabilidad y la ductilidad. La temperatura de fusión está comprendida entre 1400 a 1800 °C en función del contenido de carbono que contenga el acero.

Capítulo 2. Marco teórico (Antecedentes).

El origen de los aceros de bajo carbono se dio en 1870, donde se lo utiliza como elemento estructural en remplazo del hierro forjado, permitiendo reducir la cantidad de vigas requeridas en una construcción.

Para una mejor interpretación los aceros han sido clasificados según la (tabla 1), donde se presentan los porcentajes de elementos para aceros y otros materiales ferrosos [5].

Tabla 1 Contenido porcentual en aceros y materiales ferrosos. [5]

	Carbono C	Aceros Aleados	Inoxidables	Fundiciones
Carbono	<1.67% de C	1 % de C máximo	0.5 % de C máximo	Entre 167 y 6.67 % de C
Otros metales	No supera el 1%	Como máximo 5 %	5% mínimo de compuestos de aleación	Porcentajes mínimos para mejora de propiedades

Los aceros de bajo carbono, también conocidos como aceros dulces, utilizado para la manufactura de pernos, tuercas, placas y tubos, así como elementos de máquina donde no se necesite una elevada resistencia. Según su contenido de este elemento, en la (tabla 2) se incluye los tipos de aceros al carbono [5]

Capítulo 2. Marco teórico (Antecedentes).

Tabla 2 Aceros al carbono, contenido en porcentaje de acuerdo a su caracterización. [7]

Acero	Carbono (%)
Bajo carbono	Entre 0.05 y 0.30
Mediano carbono	Entre 0.030 y 0.45
Alto carbono	Entre 0.45 y 0.90
De herramientas	Entre 0.90 y 1.50

Los aceros son los de más amplia gama entre los metales ferrosos, dependiendo del comportamiento de su elemento principal, el hierro. El diagrama de fase hierro-carbono donde se han señalado distintas fases está en la (figura 1). Al iniciar el proceso de calentamiento, la aleación está en ferrita (α) que al llegar hasta los 900 °C se va a transformar en austenita (γ). En delta (δ) está a 1400 °C hasta que alcanza los 1539 °C, temperatura de fundición.

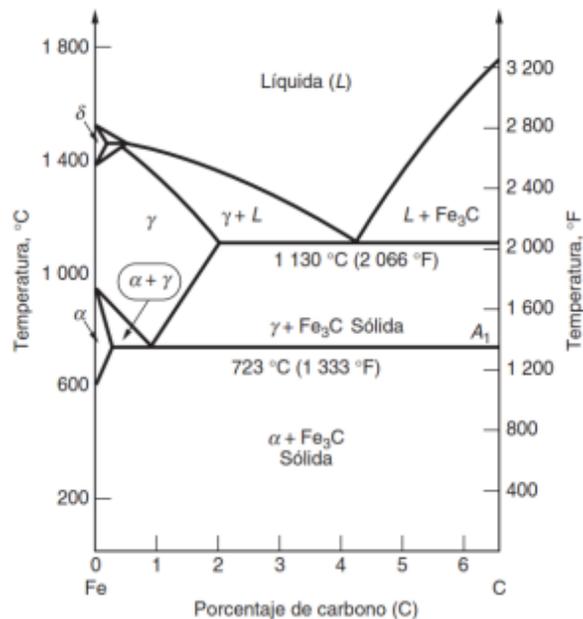


Figura 1 Diagrama hierro carbono [6]

Diagrama hierro-carbono

Origen

El estado actual del diagrama de equilibrio de las aleaciones hierro-carbono fue establecido como resultado de las investigaciones hechas por varios científicos. La elaboración de este diagrama fue empezada por D. Chernov, quien estableció en 1968 los puntos críticos del acero. Más tarde volvió a estudiar reiteradamente este diagrama. N. Gutovski, M. Wittorft, Roberts Austen, Roozeboom hicieron una gran aportación al estudio de este diagrama. Los últimos datos acerca del diagrama están expuestos en las obras de I. Kornilov.

Diagrama hierro(Fe) carbono(C): También llamado de equilibrio o de fases Fe-C se emplea para la representación de las transformaciones que sufren los aceros al carbono con la temperatura, admitiendo que el calentamiento (o enfriamiento) de la mezcla se realiza muy lentamente de modo que los procesos de difusión (homogeneización) tienen tiempo para completarse Figura 2.

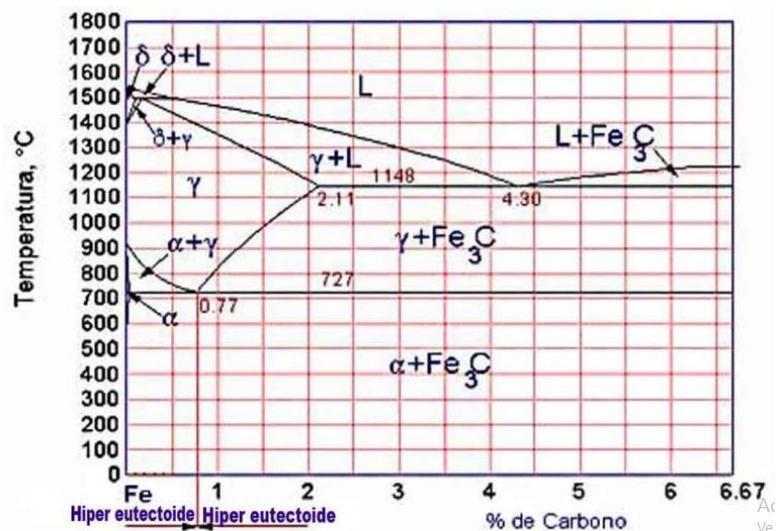


Figura 2 Diagrama Hierro-Carbono (Fe-C), reflejando el punto hiper-eutectoide.

Capítulo 2. Marco teórico (Antecedentes).

El diagrama Fe-C consta de dos ejes las coordenadas que indican temperaturas y las abscisas que indican porcentajes de carbón y en las áreas comprendidas estas dos que son las faces según en la región que se ubique.

El diagrama de equilibrio Fe-C suele dividirse en dos partes

1. La primera comprende aleaciones con menos del 2% de carbono y que se llaman aceros
2. La segunda integrada con las aleaciones con más del 2% de carbono que se les suele llamar fundiciones

Hipoeutectoide: 0.0008 a 0.80 % de carbono

Eutectoide: 0.80% de carbono

Hipereutectoide: 0.80 a 2% de carbono

Microestructuras

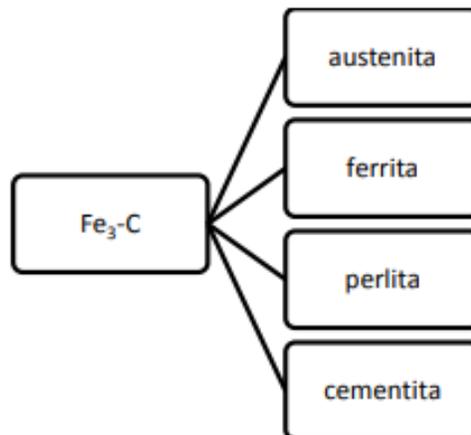


Figura 3 Constituyentes más simples del diagrama Fe-C [6]

Los dos primeros se caracterizan por ser soluciones solididad de inserciones octaédricas de carbono Fe (y), Fe (a) respectivamente la cementita (Fe₃-C) es un compuesto inter mecánico con estructura ortorrómbica [4]

Ferrita

La ferrita es el hierro alfa (α), es decir, hierro casi puro porque puede contener en disolución pequeñas cantidades de carbono- silicio, fosforo y otras impurezas, en los aceros aleados de ferrita se puede encontrar Ni, Mn, Cu, Si, Al, etc. La ferrita es el constituyente más blando del acero, tiene una dureza de 90 HBN es decir una resistencia de 28 kg/mm^2 (2.7 MPa) llegando a un alargamiento de hasta 40%; presenta propiedades magnéticas. La morfología y estructura granular de la ferrita es muy variada. La ferrita, es una solución sólida intersticial de carbono en una red BCC del hierro (Figura 4). La fase ferrita casi no admite ferrita en su interior, a lo mucho acepta un 0.021% de carbono a temperatura ambiente, es por esto que casi se considera la ferrita como hierro alfa puro. Su transformación a hierro gamma comienza cuando la temperatura es alrededor de 700°C a 723°C [5].

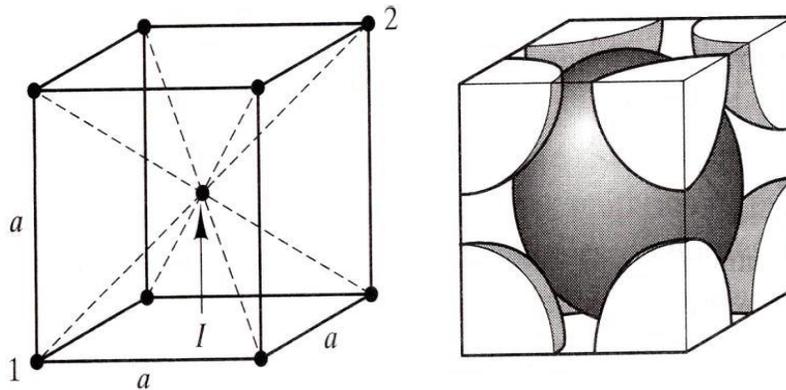


Figura 4 Arreglo octaédrico cristalino de cuerpo centrado BCC, las esferas blancas son átomos de hierro y las negras de carbono [5].

Capítulo 2. Marco teórico (Antecedentes).

A temperaturas inferiores el hierro se vuelve mucho más intolerante al carbono y aumenta su tenacidad a expulsarlo. El carbono que no cabe en la ferrita, forma el compuesto llamado carburo de hierro; $\text{Fe}_3\text{-C}$, que aparece en forma de laminillas blancas en los granos más oscuros, (figura 5), (perlita apreciable a mayores aumentos)[8].

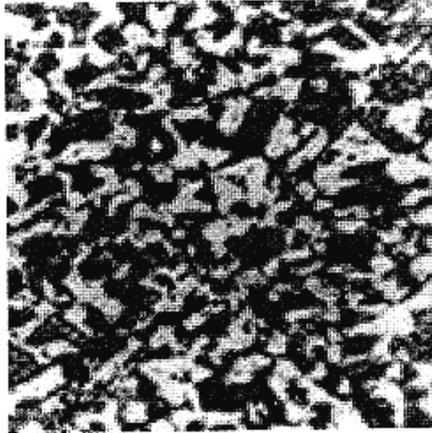


Figura 5 Micrografía del acero, ferrita (parte blanca) y perlita (zona oscura) [6]

En los aceros, la ferrita puede aparecer como cristales mezclados con los de perlita. En los aceros de menos de 0.6% carbono, podemos distinguir, formando una red o malla limitada, los granos de perlita en la figura anterior. En los aceros de 0.6 a 0.85% de carbón en forma de agujas o bandas circulares, orientadas en la dirección de los planos cristalográficos de la austenita, como en los aceros en bruto de coladas o en aceros que han sido sobrecalentados. Este tipo de estructura se denominan Widmanstätten y no es muy deseada por sus bajas propiedades mecánicas [6].

La ferrita en la naturaleza aparece como elemento pre eutectoide que lo acompaña, la perlita, por ejemplo:

- Cristales mezclados con los de perlita (0.5% de carbono).
- Forma una red o malla que limita los granos de perlita (0.55 a 0.85% de

Capítulo 2. Marco teórico (Antecedentes).

Carbono)

- Formando agujas, en dirección de los planos cristalográficos de la austenita [8].

Austenita

El nombre de austenita se debe a la memoria de Robert Austen [9], la austenita es una solución de carbono o carburo de hierro gamma (γ). Puede contener desde 0 hasta 1.7 de carbono y es por lo tanto un constituyente de composición variable. Todos los aceros se encuentran formados por cristales de austenita, cuando se calientan a temperatura de las líneas críticas. Aunque generalmente es un constituyente inestable, se puede obtener esa estructura a la temperatura ambiente por enfriamiento rápido de aceros de alto contenido en carbono o de muy baja aleación (figura 6) [8].

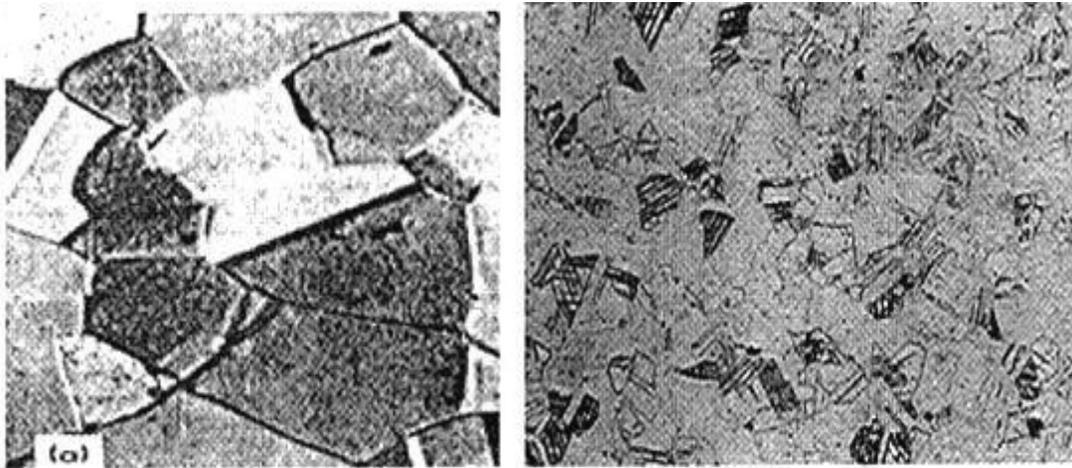


Figura 6 Microestructura del acero.

Los átomos de hierro en la fase austenita asumen las posiciones en una red cristalina FCC. Como se indica en la (figura 7). Los átomos de hierro se acomodan ocupando las esquinas y el centro de cada cara en una estructura cubica. En este caso, los

Capítulo 2. Marco teórico (Antecedentes).

átomos de carbono caben en el centro de cada uno de los vértices de las caras, llenando así las vacancias. [6]

La fase austenita puede admitir dentro de su red cristalina, de un 0.8 hasta un 2% de C, que es la máxima solubilidad a la temperatura de 1130 °C. Nótese que la austenita tiene una capacidad de aceptar carbono, del orden de 40 veces más que la ferrita [8].

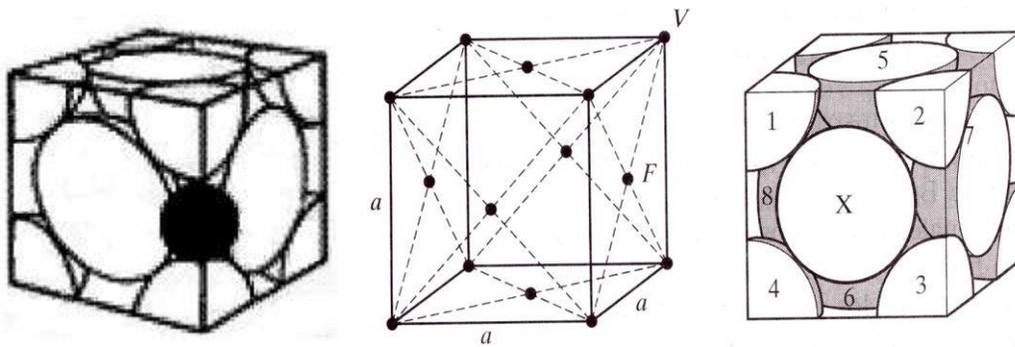


Figura 7 Estructura cubica centrada en las caras (hierro gama)

Cuando al acero se le agregan elementos aleantes estos influyen en el cambio de temperaturas de transformación alotrópica del acero. Se le llama metal alotrópico a aquel que puede transformarse en diversas variedades de estructuras cristalinas, dependiendo, una de otra, de la temperatura a que se encuentre. La austenita en los aceros al carbono, es decir sin ningún otro elemento aleado, empieza a formarse a la temperatura de 723 °C. También puede obtenerse una estructura austenítica en los aceros, a temperatura ambiente, enfriando muy rápidamente una probeta de acero, de alto contenido de carbono, a partir de una temperatura por encima de la crítica. Pero este tipo de austenita no es estable y con el tiempo se transforma en ferrita y perlita o bien cementita y perlita [10].

Capítulo 2. Marco teórico (Antecedentes).

Posee una dureza de 90 HB, una resistencia a la tracción de 28 Kg/mm² (980 KPa) y un alargamiento del 35%, la fase más blanda del acero, muy dúctil y maleable, etc.

Martensita.

La martensita es una solución sólida sobresaturada de carbono en hierro alfa. Se obtiene por enfriamiento muy rápido de los aceros, una vez elevada su temperatura lo suficiente para conseguir su constitución austenítica. La martensita se presenta en forma de agujas y cristaliza en la red tetragonal, en lugar de cristalizar en la red cúbica centrada, que es la del hierro alfa, debido a la deformación que produce, en su red cristalina, la inserción de los átomos de carbono. La dureza de la martensita puede atribuirse precisamente a la tensión que produce en sus cristales esta deformación, de la misma manera que los metales deformados en frío deben a los granos deformados y en tensión, al aumento de dureza que experimentan. Después de la cementita, es el constituyente más duro de los aceros. La proporción de carbono de la martensita no es constante, sino que varía hasta un máximo de 0,89%, aumentando su dureza, resistencia mecánica y fragilidad con el contenido de carbono. Su dureza varía de 50 a 68 Rockwell-C; su resistencia mecánica, de 175 a 250 kg/mm² y su alargamiento de 2,5 a 0,5%. Además es magnética, la transformación de la austenita, producida por nucleación y crecimiento (con difusión) origina la formación de estructuras tipo perlítico, o de tipo bainítico, según sea el orden de temperaturas en la que la transformación tiene lugar, cuando por un brusco enfriamiento que evite la formación de perlita o de bainita, la austenita es llevada a temperaturas más bajas que la de transformación bainítica se produce una transformación sin difusión a una velocidad en que la austenita, recibe el nombre de martensita.

Cristalográficamente la martensita es una estructura tetragonal (figura 8), con átomos de Carbono en posición intersticial deformada. Los parámetros

Capítulo 2. Marco teórico (Antecedentes).

crystallográficos c y a de la martensita, están caracterizados en función del porcentaje en Carbono. De tal forma:

- La variación del parámetro c de la martensita–función del porcentaje de carbono–presenta una pendiente tres veces superior a la variación del parámetro a de la austenita, en función del porcentaje en carbono.
- Si bien c aumenta con el porcentaje de carbono, a en cambio disminuye constantemente de manera lineal.

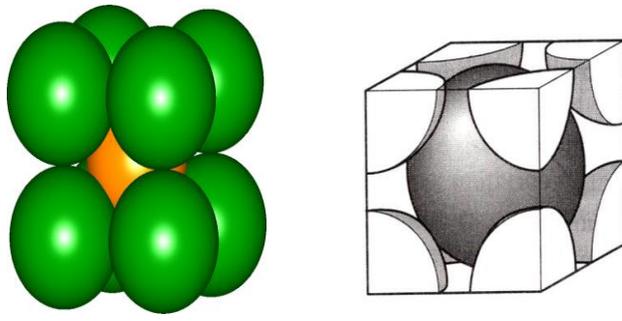


Figura 8 Martensita tetragonal centrada en el cuerpo

La transformación de austenita en martensita va siempre acompañada de aumento de volumen. La austenita tiene 4 átomos de Fe por celda elemental, y la martensita dos átomos de Fe por celda elemental, figura 8 [5]



Figura 9 Microestructura de la martensita 400X

- La velocidad de transformación de la austenita en martensita es prácticamente instantánea.
- La martensita observada al microscopio, presenta un aspecto acicular con efectos de relieve producidos por mecanismos de cizallamiento, prueba de que su formación resulta de transformaciones casi instantáneas (sin difusión) en ciertos planos cristalográficos de la malla de austenita.
- La martensita tiene el mismo contenido en carbono que la austenita.

Cementita

Es un carburo de hierro Fe_3C con un contenido en carbono del 6.67% y 93.33% de hierro. Cristalográficamente se presenta en celdas ortorrómbicas con 12 átomos de hierro y 4 átomos de carbono por celda, donde los átomos de Fe pueden, a veces, ser sustituidos por otros átomos de Cr, Mo, Mn, etc.

Puesto que la cementita es un compuesto inter metálico, cuyo enlace predominante es no metálico, parece lógico que sea frágil y, además, el constituyente más duro de los aceros (68 HRC), por lo que, no es posible utilizarla para operaciones de laminado o forja, debido a su dificultad para ajustarse a las concentraciones de esfuerzos. Es ferro magnético por debajo de los $210^{\circ} C$, y pierde esta propiedad a los $212^{\circ}C$, probablemente funde y se descompone a temperaturas inferiores a los

Capítulo 2. Marco teórico (Antecedentes).

1950°C, es termodinámicamente inestable a temperaturas inferiores a 1200° C. Su densidad es 7.649 g/cm³.

La morfología de la cementita es muy variada, siendo destacables algunas estructuras típicas. Se consideran las siguientes en los aceros:

- Cementita secundaria.
- Cementita eutectoide.
- Cementita terciaria.

En los aceros la cementita libre no es asociada con otras fases, suele aparecer en los aceros Hipereutectoide (más de 0.8%C) y como cementita secundaria formando una red continúa enmarcando una estructura granular formada por colonias de perlita (figura 10). En esta cementita secundaria, que se precipita en los límites de granos austeníticos, se separa el exceso de carbono de la austenita, ya que la solubilidad del carbono, en la fase gamma, disminuye con la temperatura para concentraciones superiores a 0.8% de Carbono.

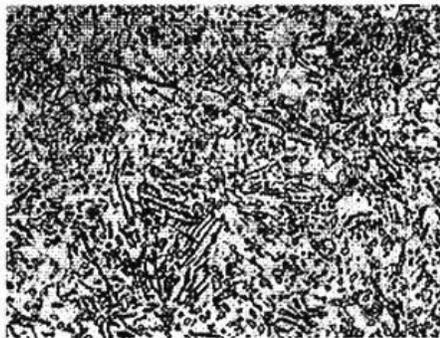


Figura 10 Cementita eutectoide, globular o también llamada perlita globular. Se presenta en pequeños glóbulos o granos dispersos en una matriz de ferrita.

La cementita eutectoide, globular o también llamada perlita globular. Se presenta en pequeños glóbulos o granos dispersos en una matriz de ferrita. Cuando la cementita forma parte de la perlita, se llama cementita eutectoide, tomando forma de láminas

Capítulo 2. Marco teórico (Antecedentes).

paralelas separadas. Como cementita globular se presenta en forma de pequeños glóbulos o granos dispersos en una matriz de ferrita.

La cementita terciaria, aparece como consecuencia de una precipitación en estado sólido en aceros con muy poco carbono. Como consecuencia de la disminución de la solubilidad del mismo, por debajo de la temperatura de transformación eutectoide, la solubilidad del carbono en ferrita sigue disminuyendo hasta el 0.008% de C. lo que da lugar a una precipitación, en estado sólido, del carbono no soluble en forma de cementita [6].

Perlita

Es el constituyente eutectoide de cementita y hierro, está formado por capas alteradas de ferrita y cementita, la temperatura de transformación y composición de los 650°C a los 725°C la ferrita y la cementita, que componen la perlita, aparecen formando laminas paralelas alternadas que tienen reflejos nacarados, (figura 11) y depende de los elementos agregados al sistema hierro-Carbono[8]. Esta trama de cementita, que dibuja los contornos de los granos de la austenita originaria, se puede apreciar a relativamente pocos aumentos y aparece muy clara a mayores aumentos, rodeando las colonias perlíticas cuya estructura está perfectamente resuelta.



Figura 11 Perlita acero al carbono 13% granos oscuros de perlita delineados por cementita (líneas gruesas blancas)

TRATAMIENTO TÉRMICO DEL ACERO

El cambio o modificación de las propiedades de un material con calentamiento y enfriamiento controlados se denomina tratamiento térmico y es un término genérico que incluye los procesos de reblandecimiento, endurecimiento y tratamiento de superficies. El reblandecimiento incluye, por ejemplo, liberar esfuerzos, recocido, normalización y esferoidización. El endurecimiento abarca procesos como templado en martensita, templado en austenita y endurecimiento entre sí. Entre los procesos para tratamiento de superficie se encuentra nitruración, cianuración, carburación y endurecimiento por inducción y a la flama. Estos procesos se efectúan para aumentar la resistencia y dureza, mejorar la ductilidad, mejorar la facilidad de trabajo, liberar esfuerzos, desesforzar, endurecer herramientas y modificar las propiedades eléctricas y magnéticas de los materiales.

Como todos estos procesos implican cambios o modificaciones en la estructura del material, se necesitan conocimientos de metalurgia o de físico - químico para conocerlos a fondo. Por tanto, sólo se describirán los aspectos sencillos de estos procesos. El tratamiento térmico, incluye calentar y enfriar la pieza de trabajo para alterar su estructura. Para evitar o minimizar los efectos indeseables de la configuración de la pieza de trabajo, en el acabado de la superficie y en las

Capítulo 2. Marco teórico (Antecedentes).

tolerancias dimensionales, la preparación del trabajo y el tipo de pieza de trabajo antes del tratamiento, son factores que deben considerarse. Se ha encontrado que la forma física o el diseño de una pieza se refleja en el tratamiento térmico. Por tanto, se deben tener en cuenta factores básicos a considerar, como el equilibrio de las áreas de masa, evitar esquinas agudas y cortes internos como cuñeros y mantener el mismo espesor de los cubos de engranes, poleas y herramientas de corte, así mismo se debe tener en cuenta que se requiere un conocimiento básico de los efectos de algunos procesos de tratamiento térmico sobre el acabado de superficies y tolerancias dimensionales. También se debe determinar si el material puede someterse al tratamiento térmico. Se tratan térmicamente no sólo las piezas semiacabadas (bloques, lingotes, planchas, etc.), con objeto de disminuir su dureza, mejorar la maquinabilidad y preparar su estructura para el tratamiento térmico definitivo posterior, sino también las piezas terminadas y las herramientas, con el fin de proporcionarles las propiedades definitivas y exigidas

Los procesos normales en los tratamientos térmicos son:

RECOCIDO

Los aceros se someten a un tratamiento térmico de recocido para reducir la dureza, mejorar la maquinabilidad, facilitar el trabajo en frío, producir una microestructura particular o para obtener propiedades mecánicas, físicas o químicas determinadas. Se define como recocido completo en aleaciones ferrosas, aquella austenitización seguida de un enfriamiento lento a través del rango de transformación. Cuando se quiere indicar otra cosa que un recocido completo es necesario agregar términos específicos a la palabra recocido para indicar el método de recocido o la condición del material luego del tratamiento. Los recocidos dependen casi totalmente de dos factores: 1. La formación de la austenita 2. La subsecuente transformación de la austenita a temperaturas subcríticas elevadas. Cuanto más se controlen estos factores, mejores resultados se obtendrán en el recocido.

REVENIDO

Debido a su contenido de carbono, o de aleación, algunos aceros presentan una tendencia a fisurarse si se les deja enfriar hasta la temperatura ambiente luego o durante una operación de temple. Esta tendencia puede aumentar por cambios bruscos de la sección de las piezas. Por esta razón estos aceros se retiran del medio del temple y se llevan al medio de revenido mientras están a temperaturas entre 100 y 150 °C. Los aceros al carbono y muchos aceros de baja aleación revenidos a temperaturas relativamente bajas muestran un aumento de la elongación a medida que la temperatura de revenido se aumenta hasta alrededor de 205 °C. Sin embargo, el revenido en el rango comprendido entre 260 y 315 °C produce menor resistencia al impacto que al obtenido por un revenido a 190 °C. Temperaturas más altas aumentan la resistencia al impacto a valores mucho mayores.

TEMPLE

El temple de un acero es el enfriamiento rápido a partir de la temperatura de austenización. Usualmente esto se realiza por inmersión de la pieza en agua o aceite y, a veces, se usa aire forzado. Como resultado del temple se desarrollan estructuras martensíticas aceptables y propiedades mecánicas que deben cumplir especificaciones mínimas luego del revenido. La del temple depende de las características de enfriamiento del medio del temple, así como de la posibilidad del acero de ser endurecido. Los resultados se pueden cambiar variando la composición del acero, el tipo de medio de temple, la agitación o la temperatura del medio templante. Algunos factores que intervienen en el mecanismo del temple son: 1. Composición química del acero. 2. Condiciones internas de la pieza que afectan la transmisión del calor hacia la superficie. 3. La superficie y otras condiciones externas que afectan la remoción de calor. 4. El potencial de remoción de calor del fluido de temple a temperaturas y presiones normales (condiciones estándar). 5. Cambios en

Capítulo 2. Marco teórico (Antecedentes).

el potencial de extracción de calor del fluido debido a condiciones no estándar como agitación, temperatura o presión. Propiedades de los materiales seleccionados [11].

Los aceros pueden ser clasificados como aceros al carbono, aceros baja aleación, aceros aleados grado maquinaria, aceros para herramientas, aceros inoxidables y aceros para aplicaciones especiales. En cuanto a su contenido de carbono, los aceros pueden ser clasificados como bajo carbono ($\%C < 0.20$), medio carbono ($0.20 < \%C < 0.60$) y alto carbono ($\%C > 0.60$).[12]

Acero 4140

El acero 4140 es un acero aleado grado maquinaria. El contenido de cromo y molibdeno incrementa la resistencia a la tensión, templabilidad, tenacidad y resistencia al desgaste. El 4140 es uno de los aceros aleados de medio carbono más usados, siendo relativamente de bajo costo, considerando la alta templabilidad que ofrece. El 4140 totalmente endurecido posee rangos de 543-634 HBN, dependiendo de la cantidad precisa de carbono.[12]. Sus principales aplicaciones son para la fabricación de ejes, engranajes, cigüeñales, cilindros de motores, bielas, rotores, árboles de turbinas a vapor, ejes traseros, tuercas y pernos sometidos a exigencias de torsión e impacto. En el caso de aplicaciones para ejes superiores a 3" de diámetro sugerimos emplear acero AISI 4340 o 34CrNiMo6 [13].

Tabla 3 Composición química del acero 4140

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0,38 - 0,43	≤ 0,4	0,75 – 1	≤ 0,035	≤ 0,04	0,8 - 1,1	0,15 - 0,25

Propiedades del acero

Acero aleado al cromo molibdeno, de buena penetración al temple, con buenas características de estabilidad dimensional hasta 2 ½" aprox., muy versátil y apto

Capítulo 2. Marco teórico (Antecedentes).

para esfuerzos de fatiga y torsión. Puede ser endurecido superficialmente por temple directo o por inducción obteniendo durezas sobre los 54 HRC no más allá de los 120 mm. Condición normal de entrega, bonificado, con una dureza nominal de 260 a 300 HB [13].

Tabla 4 Propiedades mecánicas del acero 4140

Diámetro en mm \varnothing	Límite elástico min. N/mm ²	Resistencia a la tracción N/mm ² Rm, min	Elongación % A min.	Tenacidad (ISO-V) J min.
≤ 16	900	1000 - 1300	10	30
$> 16 \leq 40$	750	1000 - 1200	11	35
$> 40 \leq 100$	650	900 - 1100	12	35
$> 100 \leq 160$	550	800 - 950	13	35
$> 160 \leq 250$	500	750 - 900	14	35
$> 250 \leq 500$	460	690 - 840	15	38
$> 500 \leq 750$	390	590 - 740	16	38

CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES A TRATAR TÉRMICAMENTE

Acero SISA O1

El acero O1 es un acero grado herramienta para temple al aceite, el cual puede ser templado a temperaturas bajas exhibiendo poca distorsión. Combina cualidades de penetración al temple con una estructura de grano fino. Tiene una buena combinación de alta dureza superficial y tenacidad después del temple y revenido. Ofrece buenas corridas iniciales de producción y buena continuidad de producción entre rectificadores, el cual es un material apto para gran variedad de aplicaciones de trabajo en frío. Buena estabilidad dimensional en el temple (poco deformable) y

Capítulo 2. Marco teórico (Antecedentes).

buena combinación de dureza y tenacidad tras el temple y revenido) algunas de las aplicaciones más comunes son:

- Estampado y Formado
- Troquelado y Perforado
- Dados para Rebabar
- Calibres Matrices y Punzones
- Cuchillas para Corte de Papel
- Herramientas para Roscar (a mano)
- Clavos de Joyero

Tabla 5 Composición química Acero O1

MATERIAL	C	Mn	Si	Cr	W
%	0.95	1.25	0.30	0.50	0.50

Capítulo 2. Marco teórico (Antecedentes).

Tabla 6 Propiedades mecánicas

	Temperatura ⁽¹⁾ de Temple		Dureza HRC	Resistencia ⁽²⁾ al Impacto		Resistencia ⁽³⁾ al Desgaste Adhesivo
	°C	°F		ft.-lb.	(J)	
O1	800	1475	60	30	(41)	1.5
H13	1010	1850	45	175*	(237*)	---
S7	955	1750	57	125	(169)	1
A2	955	1750	60	40	(53)	2-3
D2	1010	1850	60	21	(28)	3-4
SISA MET3	1065	1950	60	70	(95)	7

Acero SISA D2

Acero al alto carbón y alto cromo. Dimensionalmente estable de excelente rendimiento al corte y resistencia al desgaste. Especialmente apto para temple al aire. [14]

Aplicaciones:

- Estampado y Formado
- Matrices y Punzones
- Troquelado y Perforado
- Rodillos Troquelado Fino
- Dados para Acuñaado Herramientas de Roscado
- Trituradoras de Llantas
- Herramientas para Rebabeear Partes de Desgaste
- Dados de Laminación
- Insertos para Moldes
- Cuchillas Slitters y Cizallas

Capítulo 2. Marco teórico (Antecedentes).

- Husillos y Puntas para Inyección de Plástico
- Cuchillas para molino de plástico

Tabla 7 Composición química del acero SISA D2

MATERIAL	C	Mn	Si	Cr	Mo	V
%	1.55	0.35	0.35	11.80	0.85	0.85

Tabla 8 Cambio dimensional durante el tratamiento térmico

Temperatura de Temple		Temperatura de Revenido		Dureza	Cambio Longitudinal en Medida %
°C	°F	°C	°F	HRC	
1010	1850	205	400	61	+0.025
1010	1850	315	600	59	-0.010
1010	1850	425	800	58	-0.017
1010	1850	540	1000	55	-0.006

El Acero SISA D2 puede ser nitrurado, recubierto con TiN (nitruro de titanio) o cromo duro. Cuando se utilizan recubrimientos superficiales, temprar a rango de temperaturas altas de austenización (1070°C) y revenir de acuerdo a la gráfica de revenido (>510°C).[14]

Revenir

El revenido se realiza a 205-540°C (400-1000°F) - Doble revenido es necesario. Revenir por un mínimo de 2 horas por cada revenido o por lo menos 1 hora por cada pulgada (25 mm) de espesor para secciones arriba de 2" (50 mm) de espesor. Enfriar a temperatura ambiente entre revenidos. Curva de dureza de revenido figura 13 [14].

Diagrama de revenido

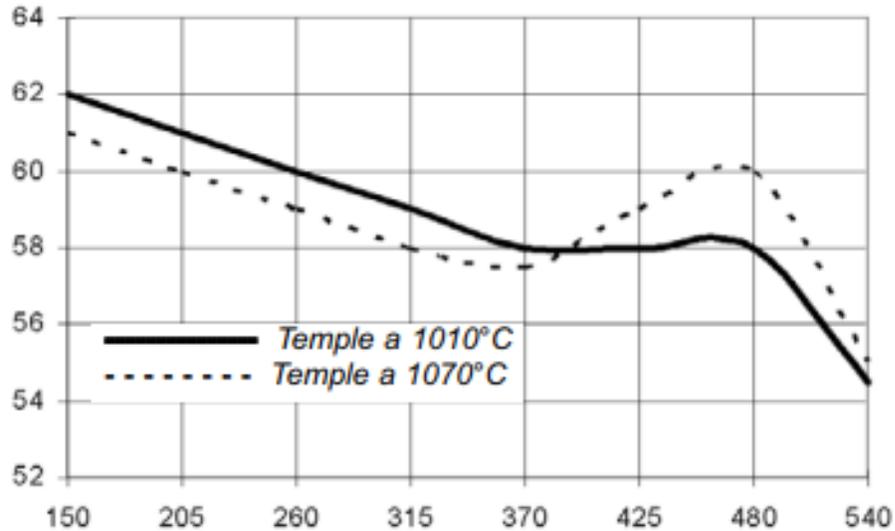


Figura 12 Curva de revenido del acero D2

INFLUENCIA DEL MEDIO DE ENFRIAMIENTO.

El incremento en la rapidez de enfriamiento por aire cuando se compara con el enfriamiento por horno afecta en varias formas la transformación de la austenita y de la micro estructura resultante. Como ya no se enfría en condiciones de equilibrio, el diagrama hierro-carburo de hierro no puede utilizarse para predecir las proporciones de ferrita y perlita proeutectoide o cementita y perlita proeutectoide que existirán a temperatura ambiente. Hay menos tiempo para la formación de la constituyente proeutectoide; en consecuencia, habrá menos ferrita proeutectoide en los aceros normalizados hipoeutectoides y menos cementita proeutectoide en los aceros hipereutectoides en comparación con los aceros recocidos.

Otro factor importante en el temple o en cualquier tratamiento térmico es la velocidad de calentamiento. En cualquier operación de tratamiento térmico, es importante la velocidad de calentamiento. El calor fluye del exterior hacia el interior

Capítulo 2. Marco teórico (Antecedentes).

del acero a una velocidad determinada. Si el acero se calienta demasiado rápido, el exterior se vuelve tan caliente como el interior y no se puede obtener una estructura uniforme. Si una pieza es irregular en su forma, lo más esencial es una velocidad lenta para eliminar alabeo o agrietamiento. Mientras mayor es la sección, mayor deberá ser el tiempo de calentamiento para lograr resultados uniformes. Aún después que se ha alcanzado la temperatura correcta, la pieza deberá mantenerse a esa temperatura por un periodo de tiempo suficientemente para permitir que su sección más gruesa obtenga una temperatura uniforme.

La dureza obtenida de un tratamiento dado depende de la velocidad del temple, del contenido de carbono y del tamaño de la pieza. En los aceros aleados, la clase y cantidad del elemento de aleación influye sólo en la templabilidad del acero y no afecta la dureza excepto en aceros sin temprar o parcialmente templados. Para aceros de bajo y medio carbono, el temple en un baño de agua es un método de enfriamiento rápido que comúnmente se usa. Para aceros de alto carbono y aleados se usa generalmente aceite como medio para el temple, debido a que su acción no es tan severa como la del agua. Algunos aceites comerciales, tales como el aceite mineral, tienen diferentes velocidades de enfriamiento y consecuentemente, imparten diferente dureza al acero al templarse. Para enfriamiento extremo, lo más efectivo es usar salmuera o rocío de agua. Ciertas aleaciones pueden endurecerse por enfriamiento al aire, pero, para aceros ordinarios, la velocidad de enfriamiento que se obtiene es demasiado lenta para dar un efecto de endurecimiento apreciable. Las piezas grandes por lo común se templan en un baño de aceite, lo que tiene como ventaja el enfriarlas rápidamente abajo de la temperatura ambiente, siendo así no demasiado severo. Para lograr resultados semejantes, la temperatura del medio para temple debe mantenerse uniforme. Cualquier baño para temple utilizado en trabajos de producción deberá tener medios para el enfriamiento. El acero con bajo contenido de carbono no reacciona apreciablemente a los tratamientos térmicos de endurecimiento. Según el contenido de carbono en el acero aumenta

Capítulo 2. Marco teórico (Antecedentes).

hasta alrededor de 0.6%, la dureza que es posible alcanzar también aumenta. Arriba de este punto, la dureza puede incrementarse sólo ligeramente, debido a que los aceros arriba del punto eutectoide están compuestos enteramente de perlita y cementita en la condición de recocido. La perlita reacciona mejor a las operaciones de tratamiento térmico; cualquier acero compuesto por perlita principalmente puede transformarse en un acero duro.

Según se incrementa el tamaño de las partes por endurecer la dureza superficial se reduce un poco, aun cuando todas las demás condiciones se mantienen iguales. Hay un límite para la velocidad de flujo del calor a través del acero. No importa que tan frío esté el medio para temple, si el calor en el interior de una pieza grande no puede escapar más rápido que a una cierta velocidad crítica, hay un límite definido para la dureza interior. Sin embargo, en temple con salmuera o agua, es capaz de llevar rápidamente la superficie de la pieza templada a su propia temperatura y mantenerla a esa o a una temperatura muy cercana. Bajo esas circunstancias habría siempre una profundidad finita de la superficie endurecida independientemente del tamaño. Esto no pasa con el temple al aceite, cuando la temperatura superficial puede ser alta durante los estados críticos del enfriamiento [10].

Capítulo 3

Planteamiento del problema

Identificación. En la empresa Renovatec la precisión y calidad son puntos clave que colocan a la empresa hasta el día de hoy como una de las 3 mejores de América para importantes clientes internacionales, sin embargo para que se siga desempeñando de la mejor manera y mantener el prestigio se debe de establecer planes efectivos, gants, entre otras cosas, debido a esto, a la falta de personal, al personal no capacitado para realizar un tratamiento térmico genera un retraso en la entrega de piezas y esto ocasiona que la empresa tenga una baja entrada de ingresos y un alto margen de gastos debido a que se envían a realizar el tratamiento térmico a otro lugar fuera de la empresas y otros problemas que suelen presentarse desaprovechando con lo que cuenta la empresa y esta valla decayendo.

Justificación. Es por ello que el presente estudio forma parte de un proyecto general el cual junto con la empresa Renovatec, busca la innovación para lograr dar solución a los tiempos largos que es uno de los factores importantes a resolver, para esto es necesario una persona le dé el seguimiento que requiere el proyecto ya que debe de identificar las piezas que bajo ciertos criterios las pide el cliente y que están presentes en los planos de diseño, lo cual es indispensable para la serie de pruebas a realizar para recabar la información necesaria que es el punto clave del proyecto para poder beneficiar tanto a la empresa como al operador o ingeniero.

Alcance. Con este proyecto se pretende alcanzar una limitación ya que el tema de tratamiento térmico de temple en metales y aleaciones es muy amplio y más en cuanto a los aceros se refiere por lo que a través de este estudio establecer la condición necesaria que requiere la empresa para dicho proceso.

Capítulo 4

Objetivos

4.1. Objetivo general.

Determinar las condiciones óptimas de los tratamientos térmicos velocidad de calentamiento, enfriamiento y su influencia microestructura y propiedades mecánicas de los aceros AISI D2, O1 y 4041.

4.2. Objetivos específicos.

- Diseñar un procedimiento específico del tratamiento térmico a aplicar.
- Evaluar la dureza superficial de los diferentes aceros empleados.
- Establecer la influencia del tiempo, contemplando el tiempo de diseño, maquinado, de tratamiento y el rectificado de la pieza.
- Simular el efecto de la temperatura en la deformación de los materiales mediante el uso de SolidWorks® y ANSYS®.

Capítulo 5

Metodología

En el presente capítulo se dará a conocer el desarrollo experimental de tratamiento térmico del temple y revenido que se realizó a 3 diferentes tipos de materiales, describiendo cada uno de los parámetros utilizados y la acción aplicada a cada uno de ellos.

Con la finalidad de disminuir el impacto térmico en las probetas tratadas térmicamente y que esto ocasione deformación plástica en dichas probetas, para ello es muy importante realizar una preparación de la probeta, en este caso la empresa Renovatec primeramente recibe la orden del cliente con las especificaciones de la probeta descritas en un plano CAD (figura 13).

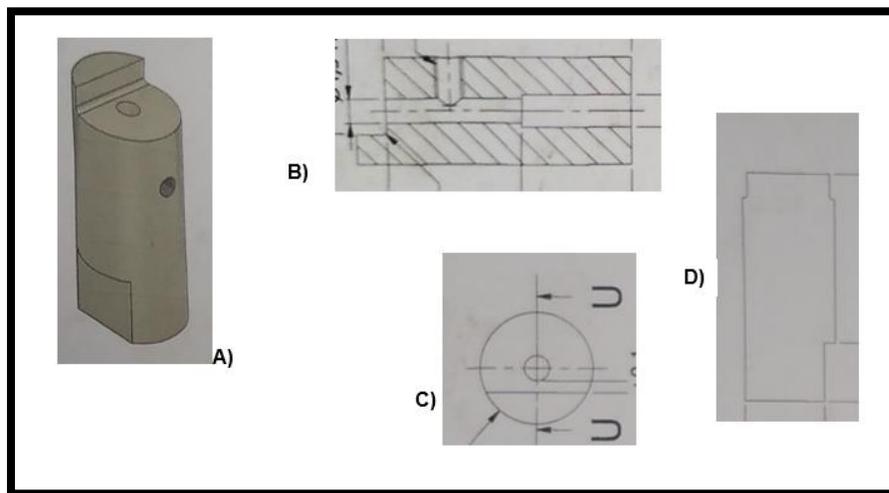


Figura 13 a) Isométrico de la pieza terminada, b) vista lateral, c) vista superior y d) sección parcial de la parte posterior de la pieza.

Una vez se hayan observado y analizado cada una de las vistas isométricas se procede a observar las peticiones por parte del cliente, en las cuales se identifica el tipo de tratamiento térmico sugerido y la dureza requerida. En primer lugar, se procede a seccionar el material con las dimensiones especificadas para ello se empleó una sierra cinta, posteriormente a cada muestra seccionada se maquina en

un torno de control numérico dejando la pieza semiterminada, después se procedió a pulir mecánicamente cada pieza, para ello se emplearon lijas de carburo de silicio grado 300, 420, 500, 600 y 800. Para asegurar de que la pieza estuviera libre de impurezas se sometió a un proceso de limpieza ultrasónica durante 2 minutos en acetona.

El tratamiento de templado consiste en calentar 30°C (50°F) por debajo de la temperatura de revenido, mantener 2 horas después de calentamiento al núcleo, enfriamiento lento en horno o al aire quieto. Recomendable para reducir las tensiones causadas por un extenso maquinado en caso de herramientas de configuración complicada y para reducir las tensiones después de un proceso de electroerosión, para ello la se empleó una mufla lingberg blue M, siguiendo el siguiente procedimiento.

1. Encendido de la mufla desde su respectivo switch. (A).
2. Para el precalentamiento de la mufla debemos revisar la temperatura de temple del material O1 que se encuentra en la tabla 10 entonces colocamos la temperatura en el display (B).
3. Una vez establecida la temperatura indicada se procede a activar la alarma con la que cuenta el horno (C). Véase la figura 14.



Figura 14 a) Encendido de mufla. B) display de temperatura y c) swich de alarma

Una vez alcanzada la temperatura de tratamiento térmico 810°C, se coloca la pieza en el soporte y se introduce a la mufla para ser calentada, el tiempo recomendado por cada pulgada cuadrada es de 30 minutos.

Como siguiente paso lo que tenemos es el tiempo de espera y que la mufla nos de la indicación de que se encuentra en el punto de tempera deseada, seguido de esto procedemos a establecer la pieza en un soporte donde entrara para ser calentada e ingresamos al interior de la mufla, el temple se realiza a 810 grados Celsius con un tiempo de 30 minutos por pulgada cuadrada, las condiciones establecidas nos permitirá propiciar el cambio en la estructura del acero y con ello obtener las propiedades mecánicas deseadas.

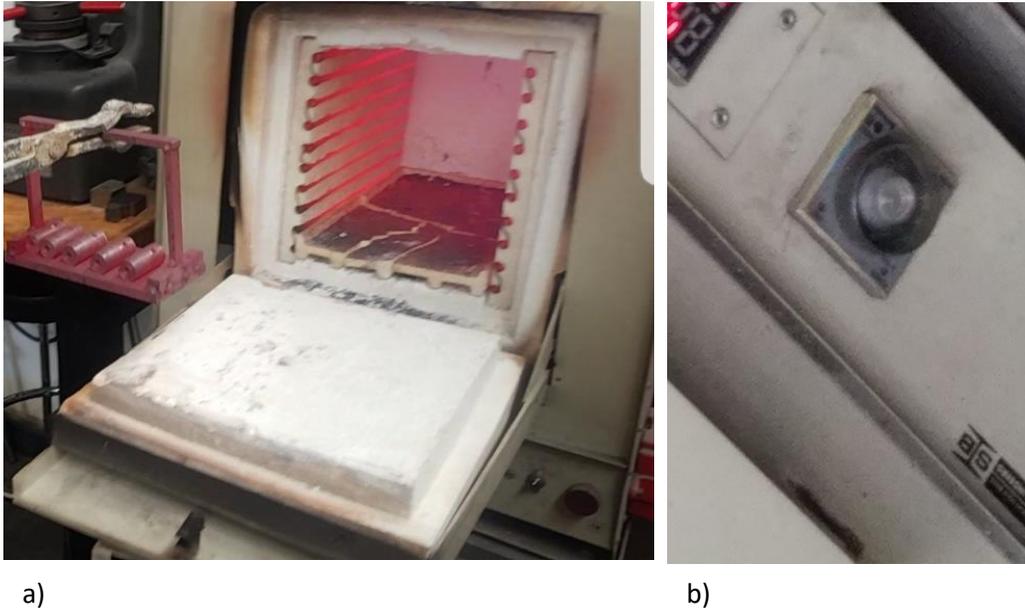


Figura 15 a) interior de la mufla, b) temporizador

La mufla cuenta con un reloj que permite la programación del ciclo de calentamiento y la determinación de la alarma, la cual se establece un tiempo aproximado de 12 minutos lo que es equivalente a 2.5 líneas, significando un tiempo de 30 minutos aproximadamente, una vez transcurrido el tiempo se activa la alarma indicando que es momento de retirar la pieza del horno, inmediatamente la pieza es sumergida en aceite por un tiempo aproximado de 1 hora.



Figura 16 Piezas sometidas a enfriamiento en un contenedor con aceite

Debido a la diferencia de temperaturas entre la pieza (810°C) y el medio de enfriamiento (25°C), se produce una reacción exotérmica como se puede apreciar en la figura 18. La reacción ocasiona productos de oxidación en la superficie del material, por lo tanto, es necesario limpiar estos productos, para tal efecto se emplea un torno para rectificar la pieza dejando un terminado semiespejo (figura 17), con la finalidad de disminuir la fricción el proceso de rectificación se realiza a bajas revoluciones, controlando con ello la temperatura y no afectando la microestructura y las propiedades mecánicas obtenidas previamente.



Figura 17 Pieza sometida a tratamiento térmico

Revenido

Una vez concluido el rectificado, dejamos reposar la pieza (enfriar) mientras dejamos que la fragua (horno) baje su temperatura a 300 grados Celsius para realizar el revenido de la pieza la cual le daremos un tiempo de 6 minutos, para lograr esto regresamos a la primera parte donde deberemos modificar el display de la fragua. Una vez establecida la temperatura, entra de nuevo la pieza a la mufla, después corregimos el reloj análogo al cual en esta ocasión solo daremos la mitad de la primera línea que se marca en el reloj, como antes ya se mencionó cada marca tiene un aproximado de 12 minutos y es por ello que en esta ocasión solo será la mitad de la marca, hecho esto solo queda activar la alarma y observar el tiempo personalmente por si la alarma llegase a fallar.

Una vez concluido el tiempo del revenido se realiza la misma operación de enfriar en el aceite, en este punto al sacar la pieza de la fragua debe de verse de un color paja eso es un buen punto de apoyo que nos dará un aproximado lo más posible a nuestro objetivo se deja por un tiempo aproximado de 30 minutos a que se pueda manipular que ya no este caliente se limpian los accesos o sobrantes de aceite.

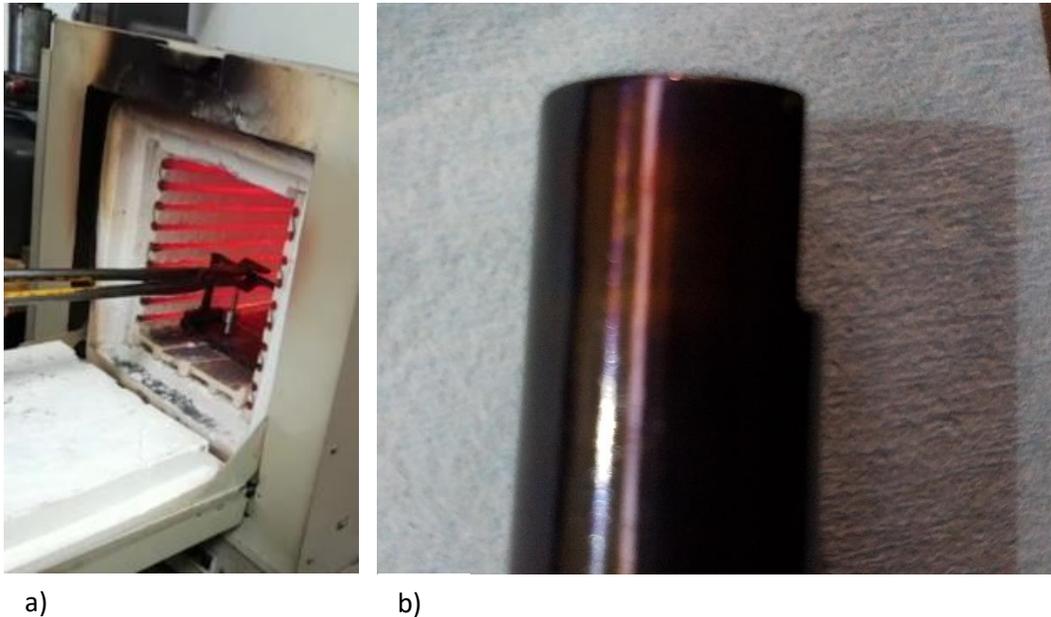


Figura 18 a) interior de la mufla, b) pieza sometida a tratamiento térmico

Dureza

Para aplicar la prueba de dureza la pieza debe ser limpiada y tener un proceso de pulido completamente liso para retirar cualquier impureza que se encuentre en ella y de esta manera realizar la prueba de dureza con cargas puntuales superficiales en un durómetro Rockwell C, se tomó la dureza de cada muestra utilizando una carga de 150 lbf con un tiempo de 15 segundos en todos los casos y para todas las muestras. El procedimiento aplicado fue de acuerdo a la norma ASTM E18-11, por lo tanto se realizaron 5 mediciones en la superficie, dejando un espacio de 150 micras con la finalidad de obtener una medición real del material [15].



Figura 19 Durómetro Rockwell

SISA D2

Como ya se hecho mención anteriormente de tres materiales a realizar una prueba de temple y revenido este es el segundo tipo de material, un material D2, en este caso solo usaremos una barra $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro por 6 pulgadas de longitud esto con el fin de poder realizar una prueba de esfuerzo tención en un futuro desarrollo de proyecto, sin embargo se debe de hacer hincapié en que la probeta a pesar de no ser una pieza a terminar debe de pasar por cada uno de los procesos de torno ya que tiene que llevar el proceso de careado, rectificado con sus respectivas medida y un pulido como se ve en la (figura 20).



Figura 20 Careado y pulido de la pieza antes del tratamiento térmico.

Una vez concluido el proceso de tornos se procede a tener lista la mufla, para esto utilizamos el mismo principio de funcionamiento del encendido de la mufla (horno) previamente definido en el proceso anterior. Como siguiente paso lo que tenemos el tiempo de espera y que la mufla nos de la indicación de que se encuentra en el punto de tempera deseada, seguido de esto procedemos a establecer la pieza en un soporte donde entrara para ser calentada e ingresamos al interior de la mufla el temple se realiza a 1100 grados Celsius con un tiempo de 30 minutos por pulgada cuadrada, a la mufla damos el tiempo por medio de un temporizador.

El reloj con el que cuenta la mufla para que realice la activación de la alarma esta graduada, análogamente este en cada marca que tiene, tenemos un tiempo aproximado de 12 minutos por lo que le damos 2.5 rayitas lo cual nos hace una aproximación a 30 min y una vez transcurrido este tiempo la alarma se activa y es momento de retirar la pieza del horno para seguir a sumergirla en aceite por aproximado de 2 horas.

Anteriormente se explicaba lo de la martensita una capa de material que debe de ser removida para que entre al proceso de revenido. Una vez limpia de aceite se procede a realizar un maquinado donde se pulirá para retirar la capa de la martensita y llevar de nuevo a la mufla para realizar el proceso de revenido.

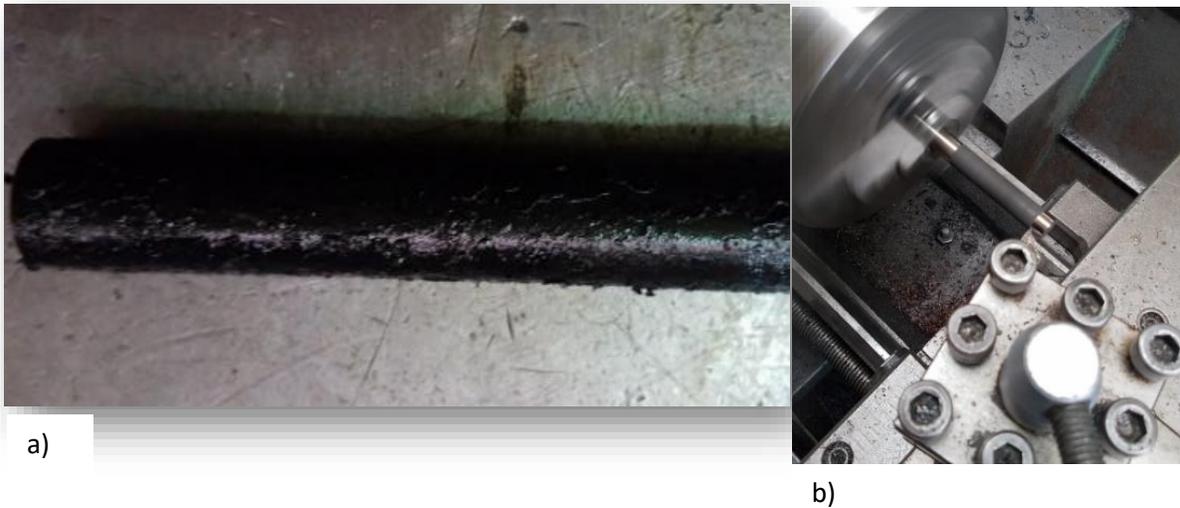


Figura 21 a) Acabado superficial después del tratamiento térmico, b) retiro de la capa superficial

Revenido

Una vez concluido el rectificado, dejamos reposar la pieza (enfriar) mientras dejamos que la fragua (horno) baje su temperatura a 400 grados Celsius para realizar el revenido de la pieza la cual le daremos un tiempo de 5 minutos, para lograr esto regresamos a la primera parte donde deberemos modificar el display de la fragua y poner la temperatura indicada de los 400°C y activar la alarma.



Figura 22 Proceso de ajuste de temperatura con respecto al proceso de revenido

Una vez establecida la temperatura, entra de nuevo la pieza a la mufla, después corregimos el reloj análogo al cual en esta ocasión solo daremos la mitad de la primera línea que se marca en el reloj, como antes ya se mencionó cada marca tiene un aproximado de 12 minutos y es por ello que en esta ocasión solo será la mitad de la marca, hecho esto solo queda activar la alarma y observar el tiempo personalmente por si la alarma llegase a fallar.

Una vez concluido el tiempo del revenido se realiza la misma operación de enfriar en el aceite, en este punto al sacar la pieza de la fragua debe de verse de un color paja eso es un buen punto de apoyo que nos dará un aproximado lo más posible a nuestro objetivo se deja por un tiempo aproximado de 30 minutos a que se pueda manipular que ya no este caliente se limpian los accesos o sobrantes de aceite.



Figura 23 Probeta después del enfriamiento en aceite y limpia de exceso del mismo

Al realizar la prueba de dureza y al aplicarle carga a la probeta el durómetro nos arrojó una dureza de 60 Rockwell lo cual es muy bueno puesto que se disminuyó el tiempo en que se realiza el tratamiento dándonos como resultado el mismo que se ha venido manejando desde tiempos remotos y en cuanto al uso que se le puede dar ya sea como una probeta esfuerzo deformación o un simple perno debido a la forma que se le dio, por tanto nos deja saber que se aplicó bien cada uno de los pasos en cuanto al tiempo que debe de ser.

Acero 4140

Por último, pero no menos importante, uno de los aceros más comerciales, más conocidos, pero sobre todo más usado en la industria refaccionaria metal-mecánica se tomó una muestra en especial de 1 in. La cual se le aplicaría una carga puntual vertical a diferencia de los otras dos que se les fue aplicada la carga en forma horizontal, llevando el mismo proceso se explicara a detalle los pasos realizados para la prueba del material 4140 comenzando por el pulido de la pieza véase la (figura 24).



Figura 24 Proceso de maquinado superficial

Ya terminado el proceso de tornos se procede a precalentar la mufla, para esto utilizamos el mismo principio de funcionamiento del encendido de la mufla (horno) que se ha aplicado a cada una de las pruebas y ya antes mencionado.

Como siguiente paso lo que tenemos es el tiempo de espera y que la mufla nos de la indicación de que se encuentra en el punto de tempera deseada, seguido de esto procedemos a establecer la pieza en un soporte donde entrara para ser calentada e ingresamos al interior de la empresa de Renovatec el temple se realiza a 850°C

con un tiempo de 30 minutos por pulgada cuadrada, a la mufla damos el tiempo por medio de un temporizador.

El reloj con el que cuenta la mufla para que realice la activación de la alarma esta graduada análogamente este en cada marca que tiene, tenemos un tiempo aproximado de 12 minutos por lo que le damos 2.5 rayitas lo cual nos hace una aproximación a 30min y una vez transcurrido este tiempo la alarma se activa y es momento de retirar la pieza del horno para seguir a sumergirla en aceite por aproximado de 1.30 horas.

Anteriormente se explicaba lo de la martensita una capa de material que debe de ser removida para que entre al proceso de revenido. Una vez limpia de aceite se procede a realizar un maquinado donde se rectificará para retirar la capa de la martensita y llevar de nuevo a la mufla para realizar el proceso de revenido.

Revenido

Una vez concluido el rectificado, dejamos reposar la pieza (enfriar) mientras dejamos que la fragua (horno) baje su temperatura a 400 grados Celsius para realizar el revenido de la pieza la cual le daremos un tiempo de 7 minutos, para lograr esto regresamos a la primera parte donde deberemos modificar el display de la fragua y poner la temperatura indicada de los 400 grados Celsius y activar la alarma como se realizó el proceso anterior.

Una vez establecida la temperatura, entra de nuevo la pieza a la mufla, después corregimos el reloj análogo al cual en esta ocasión solo daremos la mitad de la primera línea que se marca en el reloj, como antes ya se mencionó cada marca tiene un aproximado de 12 minutos y es por ello que en esta ocasión solo será la mitad de la marca, hecho esto solo queda activar la alarma y observar el tiempo personalmente por si la alarma llegase a fallar.

Ya realizado el proceso y haya terminado el tiempo del revenido se realiza la misma operación de enfriar en el aceite, en este punto al sacar la pieza de la fragua debe

de verse de un color paja eso nos es un buen indicador de que nos dará un aproximado lo más posible a nuestro objetivo se deja por un tiempo aproximado de 30 minutos a que se pueda manipular que ya no este caliente se limpian los accesos o sobrantes de aceite. Para aplicar la prueba de dureza la pieza debe ser limpiada y tener un proceso de pulido mínimo para retirar cualquier impureza que se encuentre en ella y de esta manera realizar la prueba de dureza con cargas puntuales superficiales en dos posiciones horizontal y vertical con un durómetro Rockwell.

Al realizar la prueba de dureza y al aplicarle carga a la probeta el durómetro nos arrojó una dureza de 56 Rockwell en ambas posiciones tanto la horizontal como la vertical característica primordial que indica que el tratamiento aplicado fue de forma homogénea y eficiente, lo cual proporciona un material con propiedades isotrópicas.

Capítulo 6

Resultados

La figura 25 se observa que la pieza no cuenta con un color paja, en esta ocasión se presenta un color poco azul, paja debido a que se retrasó la salida de la pieza por un par de minutos, al realizar las mediciones de dureza se pudo determinar que los valores obtenidos no fueron los esperados, esto debido a que un mayor tiempo de exposición provocó un aumento en el tamaño de grano del material, por lo tanto, la dureza del material disminuyó considerablemente obteniendo un promedio de 55.6 en la escala Rockwell, disco valor está a solo tres unidades por debajo de lo esperado, sin embargo considerando la aplicación de dicho material, es de suma importancia obtener el valor determinado por el cliente. (59 Rockwell) para asegurarnos de cumplir con lo especificado se realizaron algunos ajustes en los parámetros de calentamiento y tiempo de permanencia a la máxima temperatura, así como la velocidad de enfriamiento (70 °C min), la velocidad de enfriamiento en la transformación martensítica, que es función de la temperatura. En efecto, la velocidad de enfriamiento consigue la metaestabilidad de la austenita, sin transformaciones isotérmicas a perlita, hasta alcanzar las temperaturas de transformación martensítica [16].

Cualquier velocidad de enfriamiento puede ser válida para el temple si en su camino q-t no corta las curvas de transformación isotérmica. Es la condición necesaria para alcanzar la transformación martensítica. retomó el proceso nuevamente y se obtuvo lo establecido, aplicando de nuevo el ensayo de dureza obteniendo los valores

deseados, esta se logró con los mismos pasos a seguir únicamente revisando en cada segundo el tiempo de tratamiento térmico.



Figura 25 Pieza con un color rojizo, característica del tratamiento aplicado

La tabla 5 muestra los resultados obtenidos del tratamiento térmico aplicado, se puede observar que el promedio fue de 55.6 Rockwell con una desviación estándar de 1.02 indicando que los valores obtenidos fueron muy similares, lo cual representa las propiedades de un material isotrópico. Los valores de dureza obtenidos nos permiten conocer los cambios generados en el material con el tratamiento de temple-revenido. En un inicio y debido a que no se había alcanzado la dureza solicitada por el cliente, fue necesario repetir el tratamiento y en la tabla 6 se muestra los resultados de dureza obtenidos. La hipótesis con respecto a la diferencia de la dureza en el material es debido a que existen pérdidas de calor por los mecanismos de transferencia (conducción, convección y radiación).

Tabla 9 Valores de dureza Rockwell C

SISA O1		
No	Valor	Unidad
1	56	Rockwell
2	55	
3	57	
4	54	
5	56	
Prom:	55.6	
STD	1.02	

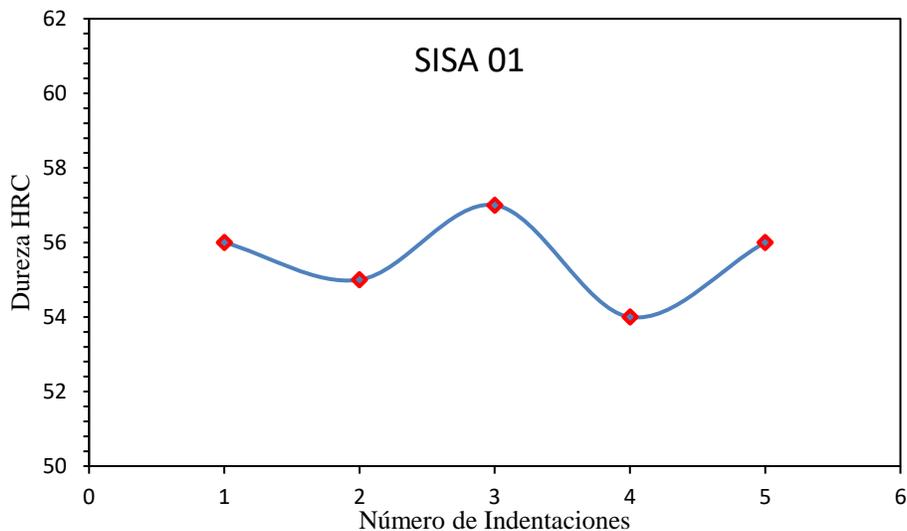


Figura 26 Gráfica de dureza para el material SISA D2

Continuando con un material más al que se le aplicó el mismo tratamiento es el material SISA D2 para el cual obtuvimos los siguientes resultados representados en la gráfica de la figura 26 donde este tipo de material debe estar dentro de un parámetro de 60 HRC, de acuerdo a los valores mostrados en la tabla 10, podemos observar que la variación es mínima y entre cada valor obtenido lo cual da como resultado una desviación estándar de 1.14 y un promedio de 59.6 HRC.

Tabla 10 Valores de dureza Rockwell C. SISA D2

SISA D2		
No	Valor	Unidad
1	60	Rockwell
2	61	
3	59	
4	58	
5	60	
Prom:	59.6	
STD	1.14	

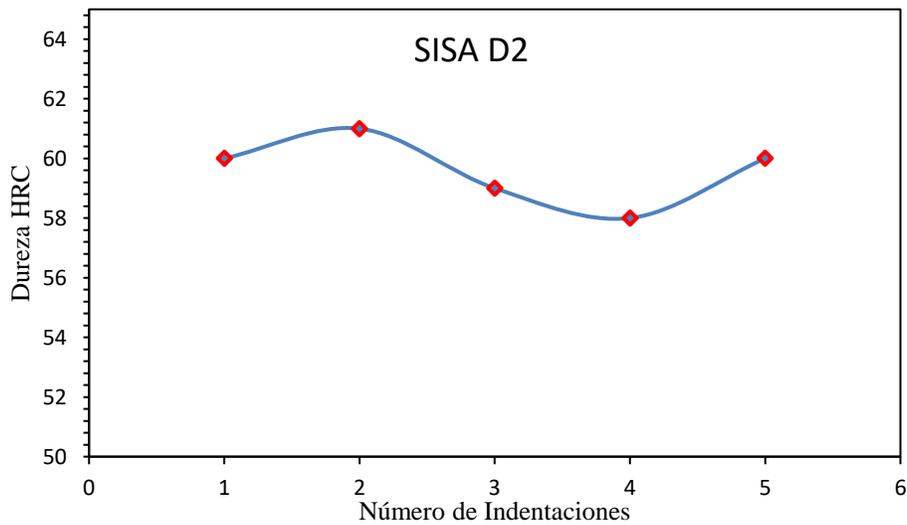


Figura 27 Gráfica de dureza para el material D2

Uno más de los ensayos realizados fue empleado a los materiales 4140 uno de los materiales más comerciales y tratados en la industria metal-mecánica en este caso el material 4140 su dureza oscila dentro de los 57 y 59 HRC obsérvese la gráfica de la figura 27.

Tabla 11 Valores de dureza del acero 4140

ACERO 4140		
No	Valor	Unidad
1	58	Rockwell
2	56	
3	55	
4	57	
5	59	
Prom:	57	
STD	1.58	

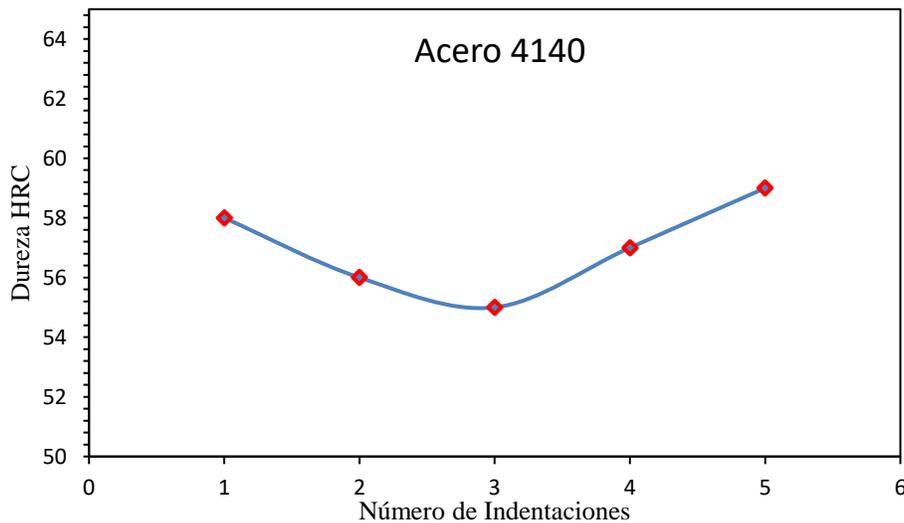


Figura 28 Gráfica de los valores de dureza Acero 4140.

Uno de los resultados importantes en este estudio fue el observar el ciclo de tratamiento térmico basados en el ciclo de tratamiento general figura 28, el cual consiste es tres etapas un calentamiento desde la temperatura ambiente hasta la temperatura 800°C, con una velocidad de calentamiento de 75°C/min, posteriormente se deja un tiempo de 30 minutos lo que asegura la transformación de la fase deseada, siendo esta la temperatura de tratamiento (Tt), una temperatura de permanecía (Tp) en la cual el calor está un poco más estable durante un lapso

de tiempo donde está penetrando en la pieza y finalmente viene una temperatura de enfriamiento (T_e).

Este ciclo se genera por lo siguiente, es necesario calentar la pieza y al calentar la pieza de acero, la parte externa se calienta más rápidamente que la interna por lo que se produce un gradiente de temperaturas, esto es una diferencia de temperaturas y al ocurrir dicho suceso da lugar a diferentes dilataciones desde el núcleo. Veamos el rango de temperatura de dos variables de cada uno de los procesos aplicados en cada ensayo.

SISA 01

Tabla 12 a) Temperatura y tiempo basado en antecedentes y b) tiempo establecido por la empresa Ronovatec.

Tratamiento térmico SISA 01	Temperatura °C	Tiempo
Temple	350-400	1h*in ²
Revenido	205-220	1h* in ²

a)

Tratamiento térmico SISA 01	Temperatura °C	Tiempo
Temple	750-800	30 min*in ²
Revenido	205-230	10 min* in ²

b)



Figura 29 Ciclos de tratamiento térmico de a) temple y b) revenido acero SISA 01

SISA D2

Tabla 13 Temperatura y tiempo para la aplicación de los tratamientos térmicos para el acero SISA D2

Tratamiento térmico SISA D2	Temperatura C	Tiempo
Temple	1010-1040	1h*in ²
Revenido	200-540	1h* in ²

a)

Tratamiento térmico SISA D2	Temperatura C	Tiempo
Temple	1070- 1100	30 min*in ²
Revenido	205-260	5 min* in ²

b)

En seguida se presentan de manera gráfica el ciclo TT del acero SISA D2. Véase en las figuras 49 y 50.

GRAFICA TIEMPO DE TRATAMIENTO T.

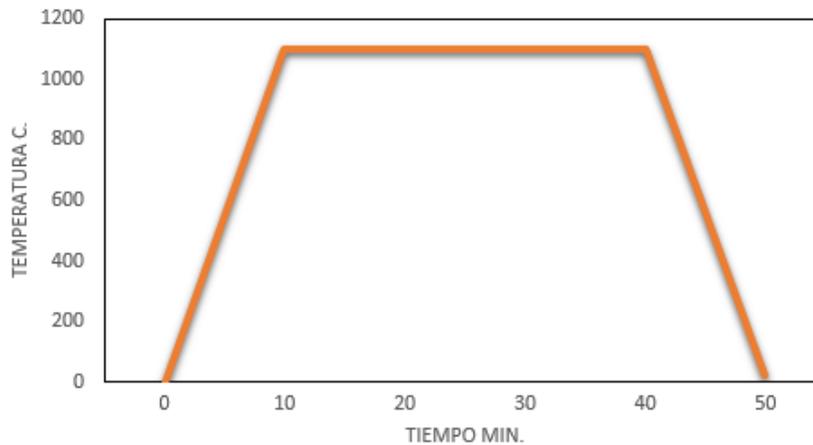




Figura 30 Ciclos de calentamiento y enfriamiento que representa el tratamiento térmico aplicado a un acero SISA D2 basado en la tabla 12.

ACERO 4140

Tabla 14 Temperaturas y tiempos de exposición para el tratamiento térmico aplicado a un acero 4140

Tratamiento térmico ACERO 4140	Temperatura °C	Tiempo
Temple	820-840	1h*in ²
Revenido	230-240	1h* in ²

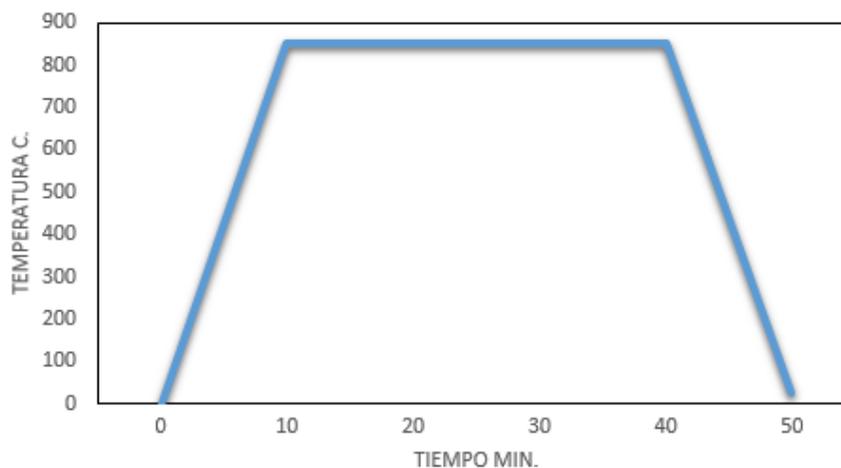
a)

Tratamiento térmico ACERO 4140	Temperatura °C	Tiempo
Temple	820-850	30 min*in ²
Revenido	200-220	15 min* in ²

b)

Cabe resaltar que cada uno de los rangos de temperatura fueron asignados para la pieza con las características y propiedades que el cliente solicitó, la cual solicitaba un valor de dureza preestablecida sin embargo, al obtener los resultados y compararlos con los antecesores podemos observar que no obtuvimos gran diferencia en cuanto a dureza esto nos indica que podemos reducir tiempos de tratamiento.

GRAFICA TIEMPO DE TRATAMIENTO T.



GRAFICA DE CICLO TT DE REVENIDO.

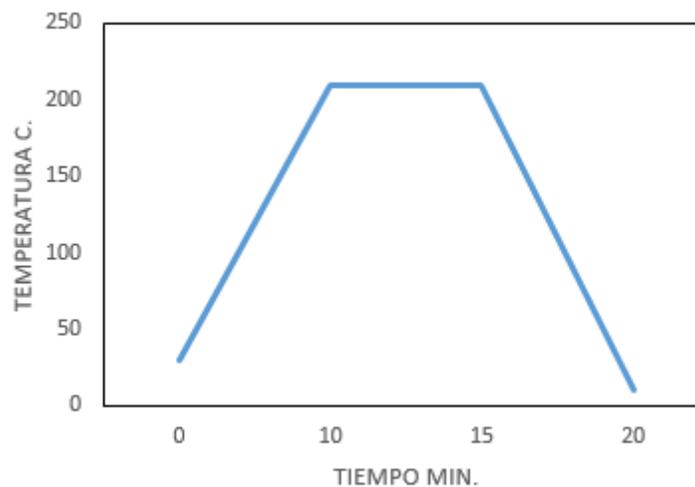


Figura 31 Gráfica del tratamiento térmico aplicado acero 4140

Análisis de distribución de temperatura

De manera complementaria y con la finalidad de conocer el grado de deformación térmica, así como conocer y observar la distribución de la temperatura y hasta qué punto logra penetrar el calor con el cual se templan y así puedan alcanzar su dureza indicada, se llevó a cabo el diseño de la forma de las probetas en SolidWorks® [17] (figura 32), posteriormente se seleccionó el módulo de Simulation, análisis térmico, condiciones frontera (temperaturas de trabajo de acuerdo al tratamiento térmico) dado que se tiene una temperatura inicial y tendrá una carga de temperatura mayor, seguido de esto podemos crear la malla y ejecutar el proceso .

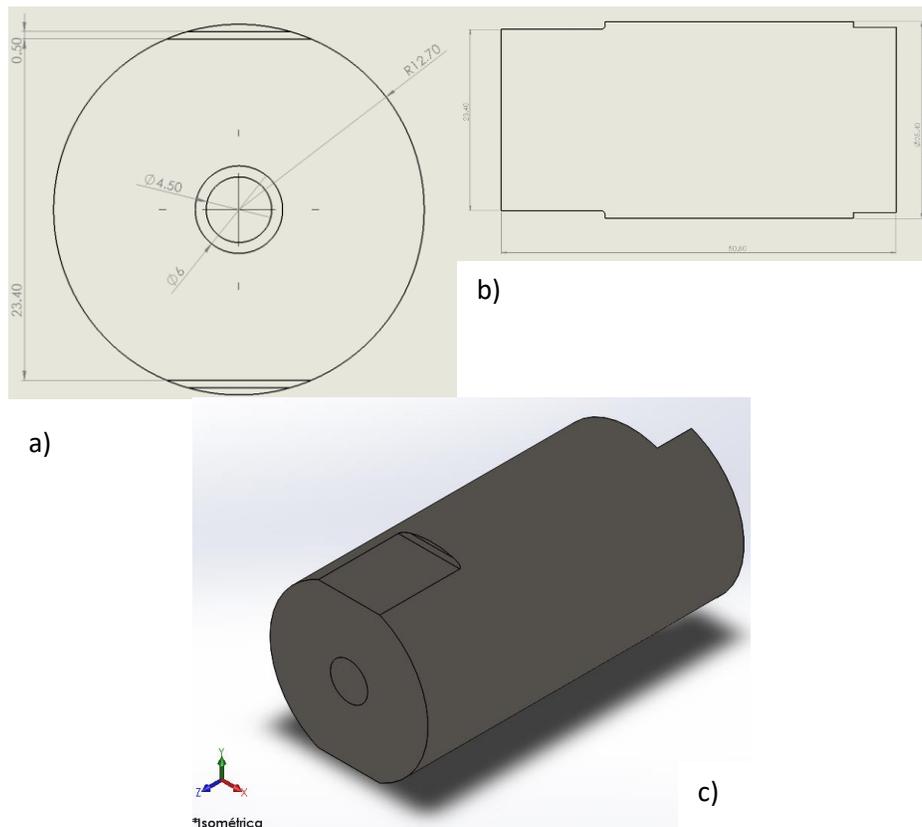


Figura 32 Vista a) frontal, b) lateral y c) isométrico de la pieza sometida a tratamiento térmico Acero 4140

De los planos realizados en el software SolidWorks tomamos una de la muestra para someterla a la simulación de un análisis térmico en el mismo software esto con Para esto realizamos un estudio de simulación térmica, para ejecutar dicho estudio donde el calor impacta directamente en la pieza se procedió a realizar un nuevo estudio térmico donde colocamos la pieza que analizaríamos, la cual anteriormente ya había sido elaborada y a esta le daríamos el material del cual está elaborada en este caso acero 4140. Una vez colocada la pieza se le aplica la temperatura a la cual llegara para poder ser sometida al aceite refrigerante para el temple y en la simulación estos fueron los resultados que nos arrojó el software.

En la figura 33a se puede observar cómo fue la distribución de la temperatura aplicada, debido a la información parcial de condiciones de tratamiento, se hicieron suposiciones con base en referencias disponibles de trabajos similares [18], permitiendo identificar algunas de las principales razones por la cual en un inicio no se habían logrado obtener los valores de dureza solicitados por la empresa. En lo que respecta a las propiedades térmicas del material, estas fueron consideradas como constantes y también como variables, con base en información disponible en la literatura para algún material similar al de este estudio.

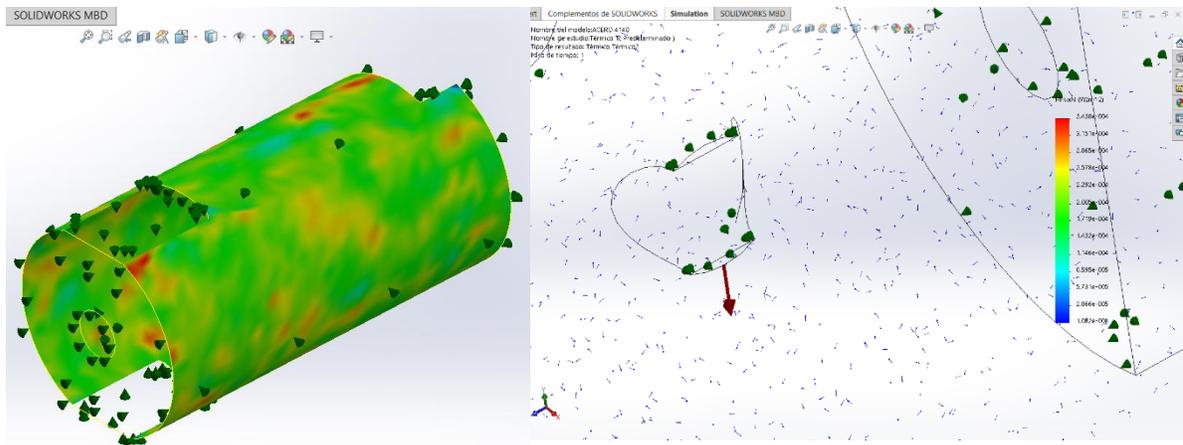


Figura 33 a) Distribución de la temperatura sobre la pieza, b) vectores de distribución de la temperatura.

Para el análisis en ANSYS®, se consideró que inicialmente las piezas estaban sometidas inicialmente a una temperatura ambiente uniforme, posteriormente se somete aun calentamiento hasta la temperatura de tratamiento térmico, para ello se considera un coeficiente de transferencia de calor por convección $h=20 \text{ W/m}^2\text{K}$, el tiempo considerado para la transferencia de calor fue de 30 min (1800seg), de acuerdo a la figura 34 se puede observar que la perdida de calor hacia el medio es por convección lo cual da como resultado una diferencia de 32°C , esta diferencia es muy significativa debido a que este factor no se considero al momento de realizar el tratamiento térmico y por lo tanto no se obtuvieron los cambios microestructurales en la pieza de trabajo, lo que origino una afectación en los valores de dureza obtenidos.

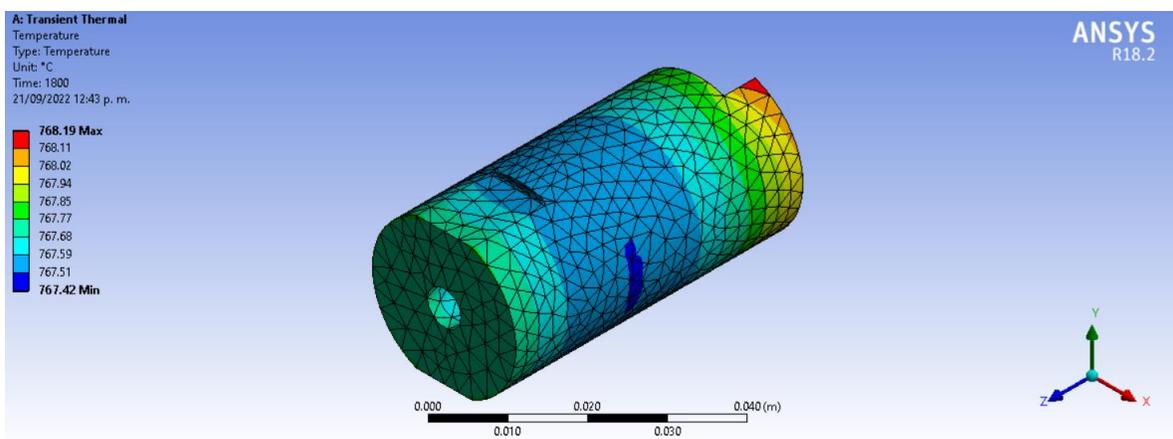
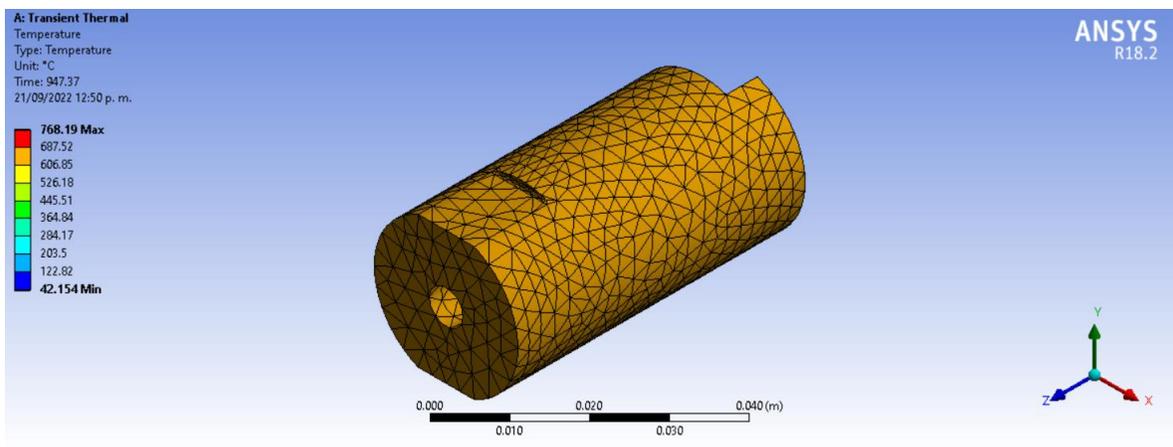


Figura 34 Simulación en ANSYS del acero 4140.

Como se ilustra en la figura 35 la distribución de calor total aplicado en la superficie de la pieza es de 19084 W/m^2 , la distribución de calor no es aplicado uniformemente debido a los mecanismos de transferencia de calor conocidos [19], si el flujo de calor cambia, esto origina un cambio en la temperatura y por lo tanto una afectación en las propiedades mecánicas [20]. Es importante considerar que el color azul representa el área más fría, mientras que el color rojo el área más caliente, en esta primera etapa no fue posible determinar las distorsiones térmicas de la simulación llevada a cabo, sin embargo, de forma experimental se observó que la afectación fue mínima, resultado de un material térmicamente estable.

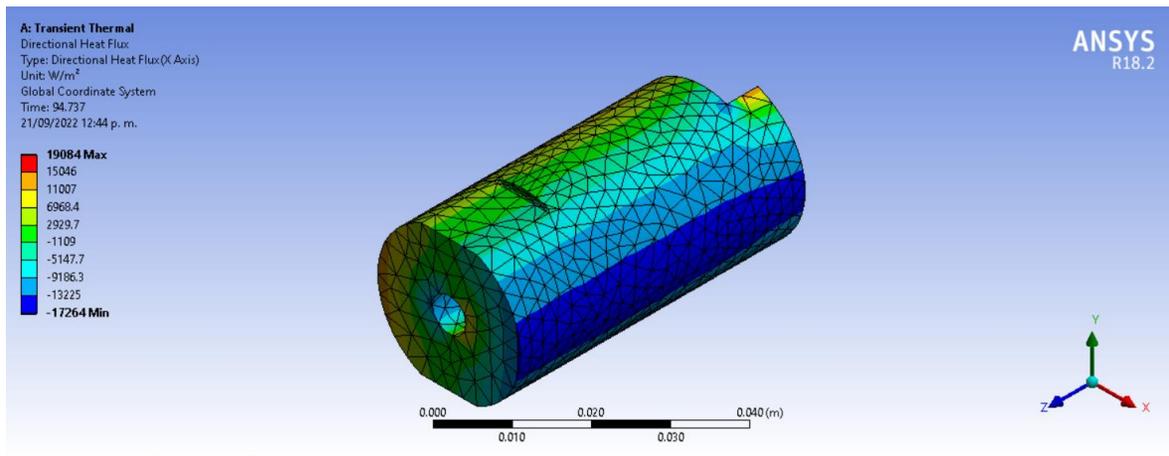


Figura 35 Simulación de la transferencia de calor en el acero 4140.

Haciendo el análisis de los resultados obtenidos desarrollaremos una tabla de comparación donde estableceremos, las temperaturas que se manejan tiempo atrás y las temperaturas que se manejan en la empresa de Renovatec donde se indica cada una de las pruebas que se realizaron y los datos obtenidos.

Tabla 15 Tiempos y temperaturas de tratamiento térmico final aplicado a cada material.

TEMPERATURA DE TEMPLE				
Material	Temperatura en grados °C Antecesora	Tiempo estimando por in²	Temperatura, en grados °C Empresa Renovatec.	Tiempo estimando por in²
SISA O1	400	1 hora	800	30 minutos.
SISA D2	1010	1 hora	1100	30 minutos
ACERO 4140	840	1 hora	850	30 minutos
TEMPERATURA DE REVENIDO				
SISA O1	230	1 hora	230	10 minutos
SISA D2	200	1 hora	260	5-7 minutos
ACERO 4140	230	1 hora	220	15 minutos

En la tabla presentada anteriormente (tabla 17) se observa que la mayor parte de variaciones de temperatura se centra más en el proceso de temple y en el cual logramos reducir bastante el tiempo, tiempo que favorece a la empresa en cuestión de un manejo de procesos de serie, en el proceso de revenido podemos observar que no varea mucho la temperatura pero logramos que con la poca varianza alcanzar las durezas HRC que requiere cada material y las que se impusieron por el cliente y analizando el tiempo es totalmente muy bajo en comparación con el antecesor pero se alcanzó el objetivo en cuanto a dureza establecida, aclarando uno de los puntos importantes es que los ensayos fueron realizados en probetas de (1in²).

Capítulo 8

Conclusiones y trabajo a futuro

- Se logró identificar la problemática asociada a la aplicación correcta de los tratamientos térmicos, así como la importancia en el mejoramiento de las propiedades mecánicas.
- Se logró hacer más eficiente el proceso y con ello la disminución de los tiempos muertos por parte de los trabajadores, lo cual se traduce en mejores tiempos de entrega con los clientes, así como el ahorro significativo de recursos económicos.
- El templado y el revenido son dos tratamientos de un mismo proceso y no dos tratamientos por separado como se pudiera pensar ya que no existe un revenido sin temple y no se puede dar un acero que contenga solamente el proceso de temple.
- Los resultados obtenidos muestran que la modificación, mejora y aplicación de los tratamientos térmicos permitió obtener valores de dureza muy similares con una desviación estándar promedio de 1.5, lo cual nos garantiza una transformación homogénea en la estructura de los materiales a estudio, así como también condiciones isotrópicas.
- Las altas temperaturas, así como la presencia de aire dio como resultado la formación de productos de oxidación, mismos que fueron removidos de la superficie de cada una de las piezas para la determinación de la dureza.
- La simulación térmica preliminar nos permitió identificar algunos valores de deformación en los materiales los cuales fueron mínimos, parámetro muy importante ya que nos permite obtener un buen control de las dimensiones de la pieza para su uso/aplicación final.

Trabajo a futuro

- Realizar un análisis metalográfico y las pruebas de dureza que puedan ser desempeñadas en el instituto superior sur de Guanajuato (ITSUR) con la finalidad de identificar la naturaleza de las fases formadas y su rol en los valores de dureza obtenido.
- Realizar un estudio de desgaste por deslizamiento para caracterizar el comportamiento mecánico bajo condiciones de tiempo, carga y distancias similares a la aplicación final de la pieza.
- Ejecutar un análisis termodinámico para predecir los diferentes productos que se pueden formar durante la aplicación del tratamiento térmico y el rol de esos productos en las propiedades mecánicas finales.

Referencias bibliográficas

- [1] R. G. Kelly, J. R. Scully, D. W. Shoesmith, and R. G. Buchheit, *Electrochemical Techniques in Corrosion Science and Engineering*, vol. 18. 2003. doi: 10.1201/9780203909133.
- [2] G. José R, *CORROSION.pdf*. Buenos Aires, Argentina, 1979.
- [3] F. Diaz del Castillo Rodríguez, *Materiales y sus propiedades*. México: UNAM, 2008. [Online]. Available: http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m1/materiales_1.pdf
- [4] J. Newell, *Ciencia de Materiales Aplicaciones en Ingeniería*, Primera Ed. México: Alfaomega, 2010.
- [5] D. R. Askeland and W. J. Wright, *Ciencia e ingeniería de materiales*, Séptima Ed., vol. 12, no. 1. México, D.F: Cengage Learning, 2010. [Online]. Available: <http://latinoamerica.cengage.com>
- [6] A. Güemes Gordo and N. Martín Piris, *Ciencia de materiales para ingenieros*, Primera Ed. Madrid: Pearson Educación, S.A, 2012. [Online]. Available: <http://www.casadellibro.com/ebook-ciencia-de-materiales-ebook/9788470634741/2026088>
- [7] J. William D. Callister and D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering an Introduction*, Eighth Edi. Wiley, 2010.
- [8] T. Interrumpido, E. N. Un, and G. H. Enta, "Instituto Politécnico Nacional," 2012.
- [9] D. De, "£E\$Es F•," p. 19.
- [10] A. Donald R, *The Science and Engineering of Materials*, Sixth Edit. Stamford, 2011.
- [11] A. Ramirez-Arteaga, "EFECTO DE LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO Y DE RECOCIDOS INTERCRITICOS EN LA CORROSIÓN POR H2SO4, NaCl y NaOH DE UN ACERO DE DOBLE FASE," 2010.
- [12] C. E. Márquez de la Torre, "Tratamiento Térmico de Anillos de Acero AISI 4140," p. 127, 2012.
- [13] ThyssenKrupp, "Aceros y Servicios," pp. 1–5, 2010.
- [14] Aceros SISA, "Acero AISI D2," p. 2, 2012.
- [15] ASTM, "Astm: E18-11," *ASTM Int.*, 2021, doi: 10.1520/E0018-15.2.

- [16] A. Pastor-Muro, “ESTUDIO DE LA TRANSFORMACIÓN MARTENSÍTICA, OPTIMIZACIÓN DE LA MICROESTRUCTURA Y PREVENCIÓN DE LA ROTURA FRÁGIL EN PIEZAS COLADAS DE ACERO X38CrMoV5-1 DE ALTA RESISTENCIA,” Universidad Complutense de Madrid, 2015.
- [17] S. C. Dassault Systèmes, “SolidWorks.” Alemania, 2020. [Online]. Available: <https://www.solidworks.com/>
- [18] F. Martínez-Olvera, “Simulación numérica del tratamiento térmico de carburizado y temple de aceros de baja aleación,” Posgrado Interinstitucional de Ciencia y Tecnología, 2019.
- [19] Y. A. Cengel, *Transferencia de calor y masa*, Tercera Ed. México, D.F.: Mc Graw Hill Interamericana, 2007. doi: 10.1007/BF00129346.
- [20] M. Neri Flores, H. Castillo Espinosa, and A. Perez Hernández, “Simulación de la distorsión durante el tratamiento térmico de temple en piezas de acero utilizadas en la industria automotriz.,” *Sci. Tech.*, vol. 14, no. 39, pp. 176–181, 2008.

Anexos

Simulaciones térmicas SolidWorks® y ANSYS®

