



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE PUEBLA

---

FACULTAD DE INGENIERÍA  
COLEGIO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y  
ELÉCTRICA

“DESARROLLO DE PRÁCTICA DE  
LABORATORIO DE UN TRATAMIENTO  
TÉRMICO ISOTÉRMICO A UN ACERO  
4140 RECOCIDO”

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
LICENCIADO EN INGENIERÍA MECÁNICA  
Y ELÉCTRICA

PRESENTA: CÉSAR AUGUSTO FLORES ZAMBRANO

DIRECTOR:

JOSUÉ ALBERTO TAMAYO ISLAS

ASESORES

CARLOS ROBERTO IBÁÑEZ JUÁREZ

NUBIA SAAVEDRA CRUZ

PUEBLA, PUEBLA A 03 DE SEPTIEMBRE DE  
2024



**BUAP**

Oficio No. SAC/1466/2024

**C. César Augusto Flores Zambrano -201743573-  
Pasante de la Licenciatura en Ingeniería  
Mecánica y Eléctrica  
Presente.**

En atención al Tema de Tesis que puso Usted a consideración de la Coordinación de Área y de esta Secretaría Académica en coordinación con la Dirección de ésta Facultad de Ingeniería, dentro del marco de Titulación por Examen Profesional, como medio de Titulación se dio revisión y se ha autorizado el tema denominado:

**“DESARROLLO DE PRÁCTICA DE LABORATORIO DE UN TRATAMIENTO TÉRMICO ISOTÉRMICO A UN ACERO 4140 RECOCIDO”**

Por lo anterior hago de su conocimiento que se asigna como Director de tema al Mtro. Josué Alberto Tamayo Islas.

Sin más por el momento, le envío la seguridad de mi consideración más distinguida.

**Atentamente**  
**“Pensar bien para vivir mejor”**  
H. Puebla de Z. a 06 de septiembre de 2024

M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora  
Director



M'ACGZ/M'VGL/barv  
C.c.p. Archivo

M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora  
Director de la Facultad de Ingeniería  
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
P r e s e n t e.

El que suscribe: Mtro. Josué Alberto Tamayo Islas, director del tema de tesis:

“DESARROLLO DE PRÁCTICA DE LABORATORIO DE UN TRATAMIENTO TÉRMICO ISOTÉRMICO A UN ACERO 4140 RECOCIDO”

Presentada por el C. César Augusto Flores Zambrano -201743573-, pasante del Colegio de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, y en atención al oficio No. SAC/1466/2024 con fecha de emisión 03 de septiembre de 2024, me permito informar a Usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, metodología, redacción y ortografía de la tesis correspondiente, no tengo inconveniente en autorizar la impresión del mismo.

Sin otro particular, le reitero la seguridad de mi más atenta y distinguida consideración.

A t e n t a m e n t e  
“Pensar bien, para vivir mejor”  
H. Puebla de Z. a de 12 de septiembre de 2024



Mtro. Josué Alberto Tamayo Islas  
Director de Tema

M'JATI/BARV  
C.c.p. Archivo

## **Dedicatoria.**

A mis padres, por su apoyo incondicional y por ser una inspiración para mí.

**Agradecimientos.**

A mis hermanos, por siempre confiar en mí.

A mis amigos, por haberme ofrecido su amistad incondicional.

A mis maestros, por siempre apoyarme en todo cuanto ellos pudieron.

A quien me dijo la verdad cuando necesitaba oírlo.

## Índice.

<b>Capítulo 1.- introducción</b> .....	<b>12</b>
Antecedentes.....	12
Planteamiento del problema.....	13
Justificación.....	14
Objetivo general: .....	15
Objetivos particulares:.....	15
Hipótesis.....	16
<b>Capítulo 2.- Marco teórico</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1. Aceros al Carbono</b> .....	<b>17</b>
2.1.1 Aleaciones Hierro Carbono.....	17
2.1.2 Estructuras cristalinas y redes de Bravais.....	18
<b>2.2 Fases del hierro carbono</b> .....	<b>19</b>
2.2.1 Cementita: .....	19
2.2.2 Perlita:.....	19
2.2.3 Austenita:.....	19
2.2.4 Ferrita:.....	19
2.2.5 Ledeburita:.....	19
<b>2.3 Diagrama hierro-carbono</b> .....	<b>20</b>
2.3.1 Reacciones invariantes en el diagrama de fases hierro-carbono.....	21
<b>2.4. Normas SAE y AISI</b> .....	<b>23</b>
2.4.1. SAE.....	23
2.4.2. Importancia de la clasificación SAE.....	23
2.4.3. Interpretación de las normas SAE de los aceros.....	23
2.4.4. AISI.....	24
2.4.5. Importancia de la clasificación AISI.....	24
2.4.6. Interpretación de las normas AISI de los aceros.....	24
2.4.7. Clasificación de los aceros por su contenido de carbono.....	24
2.4.8. Aceros de bajo carbono.....	25
2.4.9. Aceros de medio carbono.....	25
2.4.10. Aceros de alto carbono.....	25
<b>2.5. Dispersión</b> .....	<b>26</b>
2.5.1. Diagramas TTT (Tiempo, Temperatura, Transformación).....	26
2.5.2. Temperatura de Transformación.....	27
<b>2.6. Dureza</b> .....	<b>28</b>

2.6.1. Durómetros.....	28
2.6.2. Partes del durómetro: .....	29
2.6.3. Ensayos de Dureza.....	30
2.6.4. Ensayo Brinell.....	30
2.6.5. Ensayo Vickers. ....	30
2.6.6. Ensayo Rockwell.....	31
<b>2.7. Acero AISI/SAE 4140.....</b>	<b>33</b>
2.7.1. Propiedades físicas. ....	33
2.7.2. Propiedades químicas.....	33
2.7.3. Propiedades Mecánicas.....	33
2.7.4. Aplicaciones. ....	33
2.7.5. Diagrama TTT Acero 4140. ....	34
<b>2.8. Tratamientos térmicos de los aceros.....</b>	<b>35</b>
2.8.1. ¿Qué son los tratamientos térmicos? .....	35
2.8.2. Tipos de tratamientos térmicos. ....	35
2.8.2.1. Recocido Total. ....	35
2.8.2.2. Esferoidización.....	35
2.8.2.3. Recocido por eliminación de esfuerzos.....	35
2.8.2.4. Recocido de procesos.....	36
2.8.2.5. Normalizado.....	36
2.8.2.6. Propósito del normalizado. ....	36
2.8.2.7. Templado del acero.....	37
2.8.2.8. Factores que influyen en el proceso de templado.....	37
2.8.2.9. Dureza límite del acero.....	38
2.8.2.10. Revenido. ....	38
2.8.2.11. Baja temperatura.....	38
2.8.2.12. Revenido Intermedio.....	39
2.8.2.13. Revenido a alta temperatura.....	39
2.8.2.14. Ventajas de los tratamientos térmicos .....	39
<b>2.9 Tratamientos térmicos isotérmicos.....</b>	<b>40</b>
2.9.1 Revenido en la Fase Austenítica y Recocido Isotérmico. ....	41
2.9.2 Recocido isotérmico .....	41
<b>2.10 Diagrama esfuerzo deformación.....</b>	<b>42</b>
2.10.1 Límite de proporcionalidad. ....	42
2.10.2 Límites de elasticidad. ....	43

2.10.3 Punto de fluencia.....	43
2.10.4 Esfuerzo máximo o Esfuerzo Último. ....	43
2.10.5 Esfuerzo de Rotura. ....	43
2.10.6 Regiones del diagrama Esfuerzo Deformación. ....	43
2.10.6.1 Región Elástica.....	43
2.10.6.2 Región Plástica.....	43
2.10.7 Zonas del diagrama esfuerzo deformación.....	44
2.10.7.1 Zona Elástica.....	44
2.10.7.2 Zona de Cedencia. ....	44
2.10.7.3 Zona de Endurecimiento.....	44
2.10.7.4 Zona de Estricción. ....	44
2.10.8 Ensayo de Tensión. ....	45
<b>2.11 El Torno.....</b>	<b>46</b>
2.11.1 Partes del Torno.....	46
<b>2.12. Calibrador Vernier.....</b>	<b>47</b>
2.12.1. Partes del Vernier. ....	47
<b>Capítulo 3.-Metodología .....</b>	<b>48</b>
<b>3.1. Introducción al experimento. ....</b>	<b>48</b>
<b>3.2. Probetas.....</b>	<b>49</b>
3.2.1. Diseño de las probetas. ....	49
3.2.2. Uso de CATIA para el dibujo de las probetas. ....	50
<b>3.3 Maquinado de las probetas para ensayo de tensión y dureza.....</b>	<b>57</b>
<b>3.4 Tratamiento térmico isotérmico de las probetas. ....</b>	<b>67</b>
3.4.1 Procedimiento de temple y consideraciones a seguir. ....	68
3.4.2 Diagrama de apoyo tratamiento térmico isotérmico. ....	69
3.4.3 Equipo de seguridad para altas temperaturas.....	71
3.4.4 Equipo de tratamiento térmico.....	72
<b>3.5 Proceso de templado y recocido de las probetas.....</b>	<b>74</b>
3.5.1 Templado de probeta caso 1.....	74
3.5.2 Templado de probeta caso 2.....	76
3.5.3 Recocido de probeta caso 3. ....	78
3.5.4 Temple de probeta caso 4.....	80
3.5.5 Probeta caso 5. ....	82
3.5.6 Temple de probeta caso 6.....	83

<b>Capítulo 4. Resultados.</b> .....	<b>85</b>
<b>4.1 Introducción resultados.</b> .....	<b>85</b>
<b>4.2 Ensayos de dureza</b> .....	<b>86</b>
<b>4.3 Ensayo de dureza a las probetas</b> .....	<b>87</b>
<b>4.4 Ensayo de tensión a las probetas.</b> .....	<b>91</b>
4.4.1 Probeta 1 Templada en Aceite. ....	93
4.4.2 Probeta 2 enfriada a 350°C templada en aceite. ....	95
4.4.3 Probeta 3 Recocida. ....	97
4.4.4 Probeta 4 enfriado a 350°C y horno abierto. ....	100
4.4.5 Probeta 5 Original sin tratamiento. ....	102
4.4.6 Probeta 6 Templado en Agua. ....	104
<b>Conclusiones</b> .....	<b>107</b>
<b>Bibliografía de citas</b> .....	<b>108</b>
<b>Bibliografía.</b> .....	<b>109</b>

## Índice de figuras.

Figura 1 Redes de Bravais .....	18
Figura 2 Diagrama hierro – carbono, obtenida de la página de internet “área académica de metalurgia” .....	20
Figura 3 Diagrama TTT tomado del libro introducción a la Ciencia de Materiales para Ingenieros - James F. Shackelford; pagina 350. 6ta. Edición.....	26
Figura 4 Imagen de durómetro obtenida de la página Ingeniería Mecafenix. ....	29
Figura 5 ensayo de dureza Rockwell tomada del libro Ciencia de materiales para ingenieros, Alfredo Güemes Gordo, Nuria Martin Piris; pagina 27 6ta. Edición. ....	31
Figura 6 Diagrama TTT Acero 4140 tomada del documento “PRINCIPIOS GENERALES DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS ACEROS” .....	34
Figura 7 tomada de la tesis “Tratamientos Térmicos de los Aceros” del ing. Juan Antonio Pérez Patiño. ....	38
Figura 8 Diagrama esfuerzo deformación obtenido de Internet. ....	42
Figura 9 diagrama esfuerzo deformación para saber si un material es dúctil o frágil.....	45
Figura 10 Partes Principales del Torno. ....	46
Figura 11 Calibrador Vernier análogo.....	47
Figura 12 Primer diseño de la probeta .....	49
Figura 13 Segundo diseño de la probeta.....	50
Figura 14 Sketch de la primera probeta. ....	51
Figura 15 Superficie de la primera probeta.....	51
Figura 16 Superficie central (offset) .....	52
Figura 17 interior cerrado para posteriormente convertirlo en sólido. ....	52
Figura 18 superficie extrapolada con interior cerrado. ....	53
Figura 19 Superficie interior cerrada lograda para crear un sólido y añadirla al cuerpo principal (superficie 1) .....	53
Figura 20 probeta diseñada.....	54
Figura 21 Sketch de la segunda probeta. ....	54
Figura 23 Conicidades.....	55
Figura 22 cuerpo solido de la probeta obtenido del anterior Sketch. ....	55
Figura 24 Segunda probeta terminada en diseño.....	56
Figura 25 Herramientas utilizadas en el proceso de torneado.....	57
Figura 26 careado de las piezas de metal.....	58
Figura 27 maquinado del centro de la pieza. ....	59
Figura 28 Desbaste de las piezas para el diámetro de 30 mm.....	60
Figura 29 piezas desbastadas a 30 mm. ....	61

Figura 30 Desbaste Interior de la pieza .....	62
Figura 31 Desbaste interior de la pieza. ....	62
Figura 32 piezas torneadas junto a calibrador Vernier Digital. ....	63
Figura 33 probetas finalizadas junto a otros brutos de acero 4140. ....	64
Figura 34 Probetas finalizadas en comparación con el diseño uno y un bruto de acero. ....	64
Figura 35 maquinado de 5ta probeta. ....	65
Figura 36 maquinado de la 6ta probeta. ....	65
Figura 38 Torno usado en el maquinado, marca Cornmetal. ....	66
Figura 37 probeta número 6 finalizada y torno limpio .....	66
Figura 39 Diagrama de Apoyo. ....	69
Figura 40 Diagrama de apoyo 2. ....	70
Figura 41 Equipo de seguridad para altas temperaturas. ....	71
Figura 43 Horno de uso industrial marca thermolyne color gris. ....	73
Figura 42 Horno de uso industrial marca thermolyne color blanco. ....	73
Figura 45 Horno a 819°C programado a 830°C. ....	74
Figura 44 Colocación de la probeta dentro del horno. ....	74
Figura 46 probeta 1 justo antes de ser templada. ....	75
Figura 47 Probeta 1 siendo templada en aceite. ....	75
Figura 48 Horno número 2 a 350°C para el enfriamiento. ....	76
Figura 49 colocación de probeta número 2 al primer horno. ....	76
Figura 50 manipulación de probeta 2 para el cambio de horno. ....	77
Figura 51 templado de probeta número 2 en aceite. ....	77
Figura 52 Horno 1 a 761°C. ....	78
Figura 53 Colocación de probeta número 3 en horno 1. ....	79
Figura 55 modificación del control de temperatura .....	80
Figura 54 Colocación de la probeta número 4 en horno 1. ....	80
Figura 56 probeta numero 4 siendo transportada al segundo horno. ....	81
Figura 57 Colocación de la probeta dentro del horno 2 .....	81
Figura 58 horno abierto para el enfriamiento de la probeta. ....	81
Figura 59 Probeta numero 5 siendo maquinada a 6 milímetros de diámetro. ....	82
Figura 61 Horno 1 a 790 °C antes de alcanzar los 820°C. ....	83
Figura 60 introducción de la probeta número 6 a horno 1. ....	83
Figura 62 Manipulacion de la probeta 6. ....	84
Figura 63 temple en agua de la probeta 6. ....	84
Figura 64 Grafica de cajas y bigotes de la Dureza de las probetas por cantidad de pruebas. ....	87

Figura 65 bloque en V y probeta colocados de manera centrada sobre la plataforma. ....	88
Figura 66 carga siendo aplicada a la probeta número 1 .....	88
Figura 67 Maquina universal de ensayo. ....	91
Figura 68 Indicador digital de carga. ....	92
Figura 69 Indicador de caratula graduado en pulgadas. ....	92
.....	94
Figura 70 Grafico esfuerzo deformación de la probeta número 1. ....	94
Figura 71 probeta 1 después del ensayo de tensión.....	94
Figura 72 grafico esfuerzo deformación de la probeta número 2. ....	95
Figura 73 probeta número 2 después del ensayo de tensión.....	96
Figura 74 Diagrama esfuerzo deformacion de la probeta numero 3. ....	98
Figura 75 Probeta número 3 después del ensayo de tensión.....	99
Figura 76 diagrama esfuerzo deformación de la probeta número 4. ....	101
Figura 77 Probeta número 4 después del ensayo de tensión.....	101
Figura 78 Diagrama esfuerzo deformación de la probeta número 5. ....	103
Figura 79 Probeta numero 5 despues del ensayo de tensión.....	103
Figura 80 Diagrama esfuerzo deformacion de la probeta numero 6. ....	104
Figura 81 Probeta numero 6 después del ensayo de tensión.....	105
Figura 82 Probetas despues del ensayo de tension. ....	105
Figura 83 Diagrama de Esfuerzo Deformación comparativo. ....	106

## Índice de Tablas.

Tabla 1: Expresión para la obtención del valor de dureza de Rockwell en función de la escala empleada. ....	32
Tabla 2 Plan de Tratamiento Térmico Isotérmico. ....	67
Tabla 3. Equipo de seguridad para altas temperaturas. ....	72
Tabla 4 Durezas obtenidas en el ensayo de dureza .....	86
Tabla 5 fotografías de los resultados de ensayos de dureza. ....	90
Tabla 6 Valores obtenidos del ensayo de tensión probeta 1. ....	93
Tabla 7 Valores obtenidos del ensayo de tensión probeta 2 .....	95
Tabla 8 Valores obtenidos del ensayo de tensión probeta 3 .....	98
Tabla 9 valores obtenidos del ensayo de tensión probeta 4. ....	100
Tabla 10 Valores obtenidos del ensayo de tensión probeta 5. ....	102
Tabla 11 Valores obtenidos del ensayo de tensión probeta 6 .....	104

## Capítulo 1.- introducción

### Antecedentes.

Un tratamiento térmico nos ayuda a darle mayor dureza y resistencia al material que nosotros deseemos, para este caso será el acero 4140 recocido, este tipo de aceros son conocidos como aceros de medio carbono y “muy versátil y apto para esfuerzos de fatiga y torsión en secciones pequeñas y medianas” (Cía. General de Aceros, 2024)

Durante el proceso de calentar y enfriar un acero suelen suceder nuevas transformaciones y apariciones de estos, como es el caso de la formación de la austenita, en gran parte de los casos al calentar el acero, cuando hacemos el tratamiento térmico aparecerán otras fases de acero, como puede ser la perlita, ferrita, austenita de grano fino y cementita.

La velocidad de enfriamiento, así como el tiempo de enfriado cambiarán las propiedades mecánicas del material, aquí es donde podremos variar los tiempos y de esta manera experimentar, utilizando varias probetas de un mismo material, así variar el tiempo y velocidad de enfriado modificando a las propiedades del material. Dependiendo del tiempo de enfriado las propiedades cambiarán, tanto debido a la estructura como debido a la fase del material que se forme, como se planteó anteriormente la temperatura y el enfriado no son solo un proceso técnico, entendiéndolo de esta forma serán la razón de que las propiedades del acero cambien.

Claro que durante este proceso se explicarán de la misma manera varios otros factores como por qué se elige la temperatura a la cual el horno se calentará, a qué temperatura será que realicemos el proceso de enfriado, así como el que solución usaremos para enfriar, ya que de variar este proceso así como el material y temperaturas, tendremos más variables a considerar para este proceso.

## **Planteamiento del problema.**

En la actualidad el área de la metal mecánica es demasiado extensa, en la facultad de ingeniería las materias relacionadas con el área de los materiales son de las materias más interesantes, no tenemos un manual de práctica bien establecido que nos ayude a entender acerca de los tratamientos sobre los aceros, es importante la práctica en esta área, puesto que en la mayoría de los casos, los empleos relacionados con el área son en un alto porcentaje el estar dentro del taller, ya sea en maquinados o en áreas para tratamientos directos con el acero, entre otros tipos de procesos relacionados al tema.

El acero es necesario desde los procesos de construcción o el correcto uso de los procesos de maquinado de unas cuantas piezas automotrices, hasta el desarrollo de piezas de mueblería para interiores, claro que no todo el acero es el mismo, y usamos diferentes tipos de aceros para diferentes procesos, así como algunos que tienen diferentes utilidades, para el caso de estudio de este trabajo se usará el acero AISI/SAE 4140 que tiene en su mayoría un gran uso en el área de maquinados como la producción de engranajes, ejes, cigüeñales, cilindros de motores, bielas, rotores, taladros, brocas, entre otros más artículos.

El AISI/SAE 4140 al ser un acero de medio carbono, su nombre se deriva de su contenido de carbono que suele estar entre 0.38 a 0.43%, “Es reconocido por su capacidad para endurecerse a través de tratamientos térmicos, lo que lo hace ideal para fabricar piezas que deben soportar grandes esfuerzos y resistir la abrasión” (Redacción Aceromafe, 2021). En cuanto a sus propiedades tienden a tener una mejor capacidad de endurecimiento.

## **Justificación.**

La razón de este proceso experimental es para comprobar que un correcto tratamiento térmico a un acero puede cambiar las propiedades mecánicas del mismo acero, o modificarlas de una manera en la que aumenten o mejoren, una vez modificando las probetas tendremos un punto de partida, las propiedades del acero AISI/SAE 4140 en su forma comercial, de esta manera podremos comparar la propiedad mecánica de la dureza para observar en que forma cambio con el tratamiento térmico.

Este experimento servirá como un manual de cómo hacer una correcta práctica de un tratamiento térmico, para así lograr el objetivo de crear un referente de los pasos a seguir para lograr que este tratamiento se realice de manera correcta, de la misma manera contemplaremos las normas de seguridad necesarias para que esta prueba se realice limpiamente.

Se buscará lograr hacer una comparación de dureza que nos indique el cómo el material cambiara después del tratamiento térmico, también queremos resaltar que los ensayos de tensión y tracción son importantes, puesto que compararemos estas propiedades mecánicas para lograr que nuestros datos comparativos estén también respaldados por otras pruebas.

Los datos recopilados en estos ensayos y pruebas, así como el proceso que seguiremos para la realización del tratamiento térmico de manera correcta, nos creará un proceso capaz de ser representado en un laboratorio con conocimientos adquiridos dentro del aula, para que de esta manera aquellos interesados en el tema logren adquirir el conocimiento y comprobarlo.

**Objetivo general:**

Diseñar una guía para que aquellos interesados en los tratamientos térmicos de los aceros puedan realizar uno de una manera que les permita complementar el conocimiento adquirido de forma teórica.

**Objetivos particulares:**

Los objetivos particulares que se esperan al realizar el tratamiento térmico son los siguientes.

- 1.- Demostrar que, con un tratamiento térmico correcto, podemos modificar las propiedades mecánicas de un acero.
  
- 2.- Utilizar los conocimientos teóricos aprendidos para lograr que un tratamiento térmico cumpla con su función de modificar las propiedades del acero.
  
- 3.- Presentar los resultados obtenidos de las pruebas que ayuden a más personas interesadas en este tipo de procesos.
  
- 4.- Obtener de este proceso y experimento un manual de cómo se realiza de forma correcta un tratamiento térmico.
  
- 5.- Complementar los conocimientos adquiridos que las materias nos aportan de forma teórica.

**Hipótesis.**

Las propiedades del acero AISI/SAE 4140 se modificarán a un valor superior deseado al variar el tiempo y la temperatura de un tratamiento térmico, diferente al ya obtenido en su forma base, este valor será diferente para cada una de las probetas del acero ya mencionado, el procedimiento completo busca crear una práctica de laboratorio complementaria.

## **Capítulo 2.- Marco teórico.**

### **2.1. Aceros al Carbono.**

Las aleaciones hierro carbono son las más importantes aleaciones de la actualidad, encontramos que “él hierro de fundición es el material más barato para la construcción de maquinaria” (Kucher, Tecnología de metales., 1987, pág. 39).

#### **2.1.1 Aleaciones Hierro Carbono.**

Los aceros que tienen un contenido de carbono medio (para nuestro caso que es el acero AISI/SAE 4140 recocido) son necesarios cuando se requieren las propiedades mecánicas más altas por ejemplo más resistencia y más dureza, este resultado de un tratamiento térmico o trabajo en frío cuando son requeridos.

Estos aceros tienen una alta variedad de aplicaciones para la industria automotriz, estos aceros únicamente llevan al carbono como aleante (referente a la aleación) para obtener las propiedades requeridas, son de los aceros más utilizados a nivel global.

Tiene una templabilidad media, bajo “condiciones de recocido puede ser expuesto a un endurecimiento por temple y revenido” (Serviacero especiales, 2024, pág. 1), tiene una combinación de tenacidad y resistencia, tiene también la capacidad de ser soldado (referente a soldadura).

Es adaptable para la creación de piezas de alta resistencia, y cargas de fuerte impacto.

Como hemos visto este tipo de acero tiene una gran variedad de usos y múltiples aplicaciones, es debido a esta razón que se decidió trabajar en este acero para esta práctica.

Las aleaciones hierro carbón son importantes, puesto que tiene como objetivo el de fabricar piezas para diferentes aplicaciones y son bastante utilizados en la vida diaria para las empresas, aunque estas tengan un diferente giro de aplicación.

## 2.1.2 Estructuras cristalinas y redes de Bravais.

“La principal característica de la estructura cristalina es que es regular y repetitiva” (Shackelford, 2005, pág. 62), la estructura cristalina es la manera agrupada de cómo se organizan y empaquetan los átomos, cualquier estructura cristalina puede ser descrita como un modelo formado con base de repetir varias unidades estructurales.

Se puede describir a la celda unitaria como la forma mas simple de representar una unidad estructural.

La longitud de las aristas y los ángulos entre los ejes cristalográficos son conocidos como parámetros de red. Algo representativo de la celda unitaria es que tiene la capacidad de describir una estructura como un todo, esto debido a que la estructura total se puede generar mediante el agrupamiento ordenado y repetido de celdas unitarias apoyadas cara a cara a lo largo del espacio tridimensional.

Existen 14 tipos de celdas unitarias agrupadas en 7 sistemas cristalinos.

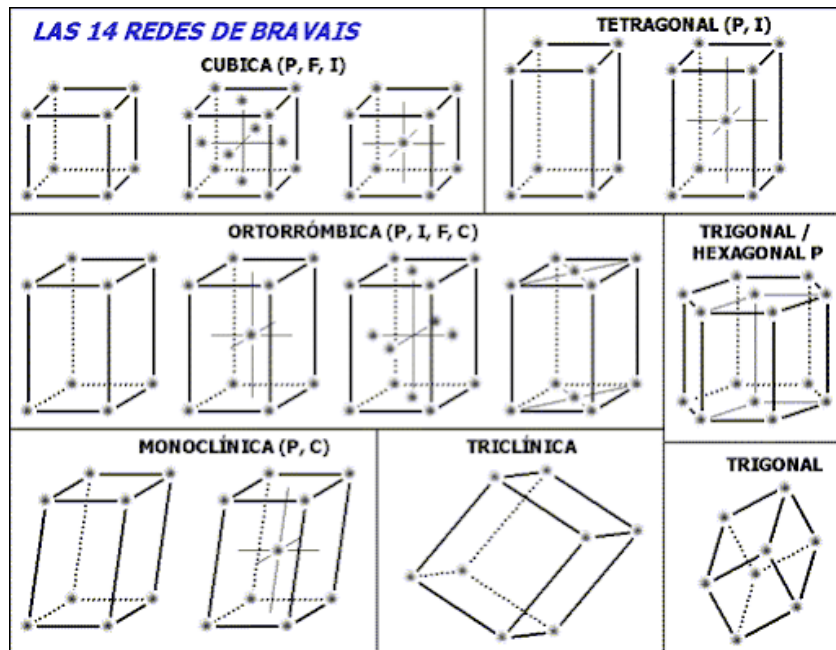


Figura 1 Redes de Bravais.

## **2.2 Fases del hierro carbono.**

**2.2.1 Cementita:** También es conocida como carburo de hierro es un compuesto químico en el cual el 25 por ciento de sus átomos son de carbono, es ferromagnética hasta los 218 °C, muy dura y frágil, es importante en diferentes tipos de acero y hierro fundido, su estructura cristalina es ortorrómbica, se forma durante el enfriamiento y solidificación de los materiales, es más común en aquellos con alto contenido de carbono. La extrema dureza que posee la cementita la hace valiosa en aplicaciones donde la resistencia al desgaste y la dureza son críticas, como en herramientas de corte, rodamientos y algunos tipos de aceros de alta resistencia. Sin embargo, al ser quebradiza puede ser una limitación en algunas aplicaciones.

**2.2.2 Perlita:** Es una estructura laminar que se forma cuando en un proceso el acero se enfría lentamente en la región de la austenita en el diagrama hierro-carbono, está hecha de capas alternas de ferrita y cementita, es una estructura suave y tenaz, es común mayormente en aceros estructurales y de baja aleación.

**2.2.3 Austenita:** Una de las fases cristalinas del acero que es más fuerte y más densa que la ferrita, crece en temperaturas más altas y en aceros con un alto contenido de carbono, no posee propiedades magnéticas y puede ser endurecida mediante un tratamiento térmico.

**2.2.4 Ferrita:** También llamada fase alfa del hierro puro, es la fase más estable a temperatura ambiente, es suave y relativamente débil esto la hace no tener muchas aplicaciones, puede estar presente en cantidades pequeñas y mejora la resistencia a la corrosión en aceros con un bajo contenido de carbono o aceros inoxidables austeníticos (aceros inoxidables no magnéticos con bajos niveles de carbón y altos niveles de cromo y níquel).

**2.2.5 Ledeburita:** Mezcla de fases entre la austenita y cementita.

### 2.3 Diagrama hierro-carbono.

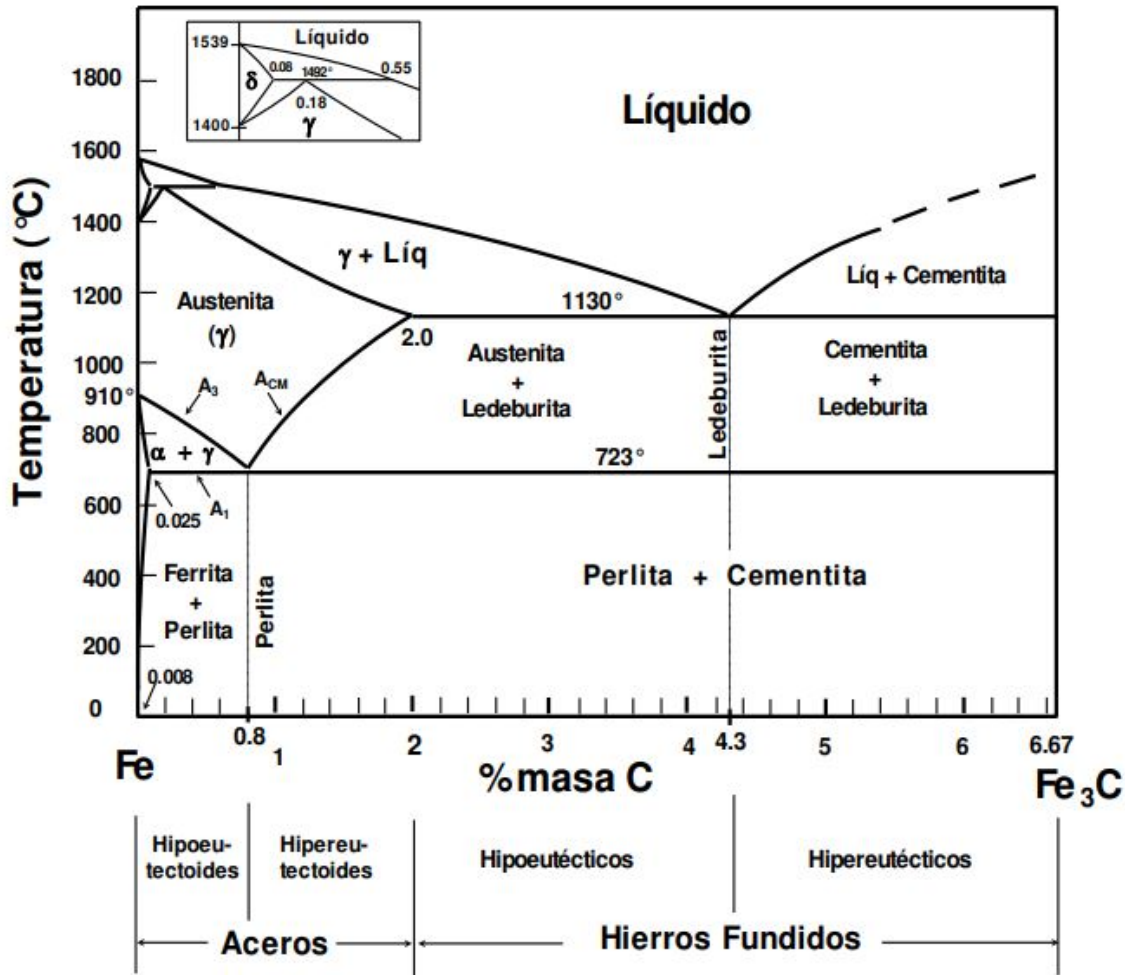


Figura 2 Diagrama hierro – carbono, obtenida de la página de internet “área académica de metalurgia”.

En el extremo inferior izquierdo tenemos el 100% de hierro, en el extremo inferior derecho tenemos el 6.7% de carbono esto es representado en la línea de las abscisas, por otro lado, en el lado de las ordenadas tenemos a la temperatura que va desde los 0 °C hasta los 1800 °C.

Si el porcentaje de carbono es menor al 2% tendremos aceros, si el porcentaje de carbono es mayor a 2% y menor a 6.7% tendremos hierros fundidos, dentro de los aceros si tenemos hasta 0.77% de carbono entonces tendremos aceros Hipoeutectoides, mientras que si tenemos una composición de entre 0.77% a 2.0% tendremos aceros Hipereutectoides.

Las fases que se encuentran presentes son las siguientes:

- La fase gamma o austenita ( $\gamma$ ), es la fase que comprende hasta un valor de 2.11% de contenido de carbono y existe en un rango de temperatura desde 727 °C hasta los 1495 °C “la austenita suele usarse en procesos de deformación plástica porque es un material suave” (Centeno, Youtube, 2020).
- La Ferrita o fase alfa ( $\alpha$ ), se encuentra en una pequeña porción del diagrama de fases hasta una composición máxima de 0.022% de carbono, “es una fase blanda a temperatura ambiente” (Centeno, Youtube, 2020), pero es más dura que la austenita.
- La cementita ( $Fe_3C$ ) o carburo de hierro, es un material muy duro y frágil, por su alto contenido de carbono, entre más cantidad de carbono tenga una aleación se volverá más dura, esta se encuentra en 6.7% de carbono.
- La perlita está formada por ferrita y cementita, aunque no se considera una fase porque está compuesta por las fases antes mencionadas, se encuentra la parte de abajo el diagrama hierro carbono, está formado por láminas de ferrita y cementita.

### **2.3.1 Reacciones invariantes en el diagrama de fases hierro-carbono.**

Las reacciones invariantes se ubican por la cantidad de líneas horizontales que se ven en el diagrama cada una de estas líneas representan una reacción invariante, en el diagrama hierro-carbono encontramos tres líneas horizontales.

La primera se encuentra en el intervalo de temperaturas de 1400°C a 1539°C, en el lado izquierdo de la línea encontramos la fase hierro-delta, que aparece de los 1394°C con una composición de carbono del 0.08% de carbono, en la parte superior encontramos la fase líquida y la región comprendida entre la fase delta y líquida estará formada por líquido más delta ( $L + \delta$ ), por debajo de la línea horizontal encontraremos la fase austenita (gamma) con una composición de carbono de 0.17% la reacción invariante presente es donde se tiene la unión de todas las líneas, esto quiere decir que podremos pasar de dos fases a una región de una fase y esto es una reacción de tipo peritético ( $L + \delta = \gamma$ ).

La siguiente reacción invariante es la que comprende de 727°C debajo de la fase de austenita, con una composición de 0.77% de Carbono, por encima tenemos a la austenita, por debajo de la línea tenemos perlita (ferrita + cementita), y al pasar de una región de fase sólida a una donde tenemos dos fases sólidas tendremos una reacción invariante de tipo eutectoide ( $\gamma = \alpha + Fe_3C$ ).

La última reacción invariante tiene la composición de carbono de 2.0 % a 4.3% de Carbono a una temperatura de 1130°C, en la parte superior tendremos una fase líquida y por debajo tenemos una región con dos fases ( $\gamma + Fe_3C$ ), y bien pasando de una región líquida a una de dos fases sólidas tendremos una reacción invariante de tipo eutéctico.

## **2.4. Normas SAE y AISI**

### **2.4.1. SAE**

SAE clasifica los aceros en: al carbono, de media aleación, aleados, inoxidable, de alta resistencia, de herramientas, etc.

Es un sistema de identificación de 4 o 5 dígitos, como ya dijimos anteriormente se basa en la composición química del acero en cuestión, así podemos identificar a todos los elementos presentes en la aleación, “ayuda a optimizar la creación que se necesita en las industrias para aleaciones específicas” (Rodríguez , 2022).

### **2.4.2. Importancia de la clasificación SAE**

Existen distintos tipos de normas SAE que se utilizan en la industria, entre ellas las normas para autos, para medidas y calibración, o procesos de fabricación, entre otras, la que nos interesa a nosotros son las normas SAE para materiales y la importancia que tienen estas, establecen especificaciones y requisitos que deben tener los materiales con los cuales se fabrican piezas y componentes para diversos equipos o autos.

### **2.4.3. Interpretación de las normas SAE de los aceros.**

Las normas SAE para los aceros tienen muchas combinaciones sobre las aleaciones del acero, de esta forma la clasificación por números se torna más fácil. Para lograr interpretar las normas SAE podemos identificar formatos parecidos a este ABXXX o solo números.

Los dos primeros lugares identifican las aleaciones principales y contenidos, los tres o dos últimos dígitos indican los centésimos de porcentaje de carbono en el metal. Como números podemos identificar lo siguiente AB=10 – Acero al carbono simple; identificarlos solo como número nos resulta así XXXX,

- ❖ Primer número, este número indica la aleación con mayor predominancia en la aleación, 1=Carbón, 2=Níquel, 3=níquel-cromo, 4=molibdeno, 5=cromo, 6=cromo-vanadio, 8=triple-aleación, 9=Silicio Magnesio.
- ❖ Segundo número nos indica que existen otros elementos aleantes.

- ❖ Los últimos dos dígitos nos indican la cantidad promedio del carbono en centésimas.

#### **2.4.4. AISI**

Las siglas AISI hacen referencia al instituto americano del hierro y acero, con sus siglas en inglés "*american iron and Steel institute*" esta institución es la encargada de la clasificación y la designación de los aceros inoxidable, fue fundada en el año 1855 para fomentar la comercialización del acero en todos sus campos, toma el control de la calidad de la producción del acero y les asigna valores para identificar a los aceros, su objetivo es que la producción sea segura y amable con el medio ambiente.

#### **2.4.5. Importancia de la clasificación AISI.**

La utilización de esta norma es dentro de la industria la clasificación de los aceros que dependerá de las aleaciones y materiales, se distinguirán por un código de tres dígitos, también tendrán letras en algunos casos.

#### **2.4.6. Interpretación de las normas AISI de los aceros.**

Normalmente la clasificación AISI se puede interpretar de la misma manera que las normas SAE, los dos primeros dígitos nos indican los elementos principales de la aleación y sus rangos, los otros dos dígitos nos indican la cantidad de carbono que el acero posee por ejemplo un acero 4140 nos indica un acero al carbono con molibdeno número 4, 1 referente a otro material aleante en este caso carbono y los últimos dos dígitos nos indican el promedio del carbono en centésimas.

#### **2.4.7. Clasificación de los aceros por su contenido de carbono.**

Como ya se hizo mención anteriormente los aceros se pueden clasificar de diferentes maneras, incluyendo números y letras para denotar su aleación con otro material o cuál de estos predomina en la pieza, estos dígitos nos guiarán para saber la composición del material.

Para nuestro estudio e investigación tomaremos como referencia la cantidad de

carbono contenido en el material y nos quedara de la siguiente manera:

#### **2.4.8. Aceros de bajo carbono.**

Tienen entre 0.08% y 0.25% porcentaje de carbono, son mecánicamente hablando suaves y a la vez dúctiles, también son fácilmente deformables, cortables, maquinables, soldables. Solo se pueden endurecer por carburización, algunos aceros comunes de bajo carbono son los AISI 1018 o AISI 1020, son comúnmente utilizados en la industria automotriz, como aceros estructurales, varillas de refuerzo o corazas de barcos.

#### **2.4.9. Aceros de medio carbono.**

Tienen entre un 0.25% y 0.60% porcentaje de carbono, los tratamientos térmicos mejoran sus propiedades, son más resistentes, pero menos dúctiles, son empleados para la fabricación de piezas de manufactura que necesitan de una alta resistencia mecánica y resistencia al desgaste como pueden ser los engranes, ejes etc. Necesitan cuidados especiales para la soldadura.

#### **2.4.10. Aceros de alto carbono.**

Tienen entre un 0.60% y 1.40% en peso de carbono, poseen una resistencia mayor que los aceros de medio carbono, menos dúctiles, “su capacidad de ser moldeados es inferior, así como su soldabilidad” (Grupo Torices, 2022), en estos materiales se añaden otros elementos formando carburos que incrementan la dureza, son empleados mayormente en la fabricación de herramientas.

## 2.5. Dispersión.

En estas aleaciones endurecidas mediante la dispersión, se introducen pequeñas partículas de una fase, casi siempre muy resistentes y duras que están en una segunda fase más débil pero a su vez más dúctil, existe una fase blanda que es continua y está presente en mayor cantidad, a esta fase la llamamos matriz, a la fase de endurecimiento duro se le llama fase dispersa o precipitado su nombre dependerá de cómo se forma la aleación, no es muy común que a esta fase o mezcla de fases se le llama microconstituyente.

“Para que ocurra el endurecimiento por dispersión la fase dispersa debe ser lo suficientemente pequeña para proveer obstáculos efectivos al movimiento de las dislocaciones, por tanto proveyendo el mecanismo de endurecimiento” (Askeland, Fulay, & Wright, Ciencia e ingeniería de materiales, 2011, pág. 414).

En gran parte de las aleaciones el endurecimiento de los metales por dispersión se produce por medio de las transformaciones de fases.

### 2.5.1. Diagramas TTT (Tiempo, Temperatura, Transformación)

Los diagramas TTT nos indican la transformación que tendrá un material al ser expuesto a una temperatura, con la temperatura en la vertical, el tiempo en la horizontal y la transformación en el lado opuesto de la temperatura, estos diagramas crean a las curvas parecidas a la letra “S” también llamadas curvas TTT.

Para determinar donde comienza, y termina esta transformación y a qué temperatura, es para lo que nos sirven estos diagramas, la transformación se da en porcentaje, el tiempo en escala logarítmica y la temperatura en grados normales.

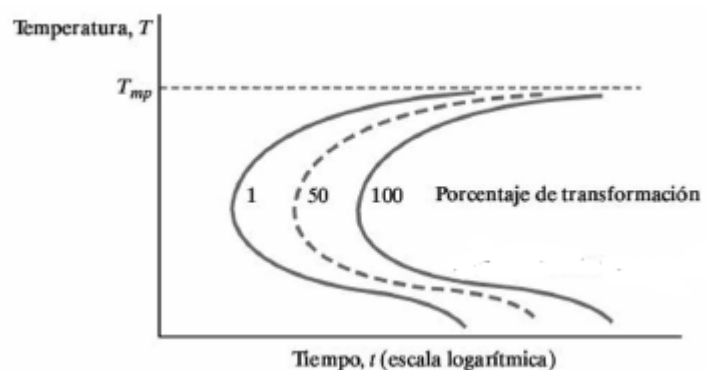


Figura 3 Diagrama TTT tomado del libro introducción a la Ciencia de Materiales para Ingenieros - James F. Shackelford; pagina 350. 6ta. Edición.

### **2.5.2. Temperatura de Transformación**

La temperatura de transformación se refiere a la temperatura en la que un sólido o material debe calentarse para que en la microestructura y propiedades de este mismo cambien, así podemos visualizar el cambio de fases de este sólido o material, por ejemplo, el acero, al calentarlo a cierta temperatura tendrá otra composición, pero a temperaturas altas puede producirse en su estructura la cementita. Esta temperatura a la cual fue calentado el material sería en efecto la temperatura de transformación.

La temperatura de transformación es importante, es nuestro punto de partida para lograr modificar las propiedades o la estructura del material, esta temperatura no solo es una, de hecho, dependiendo de lo que nosotros queramos modificar en la estructura del material en cuestión, dependerá de la cantidad de temperatura a la cual se caliente el acero.

Estas temperaturas que nos ayudan a modificar la estructura de los materiales serán diferentes para cada tipo de material, un buen ejemplo es si comparamos al aluminio con el acero 4140 que usaremos, el aluminio tiene una temperatura de fusión de 660°C dando alúmina y nitruro de aluminio, mientras que el acero 4140 la temperatura para el acero AISI-SAE 4140 es 815°C y 870°C.

## **2.6. Dureza**

Propiedad del material que se relaciona con la resistencia que opone un material a ser deformado plásticamente, “la dureza está directamente relacionada con el límite elástico” (Güemes Gordo & Martín Piris, Ciencia de materiales para ingenieros, 2012, pág. 24), por ejemplo el ensayo de Mohs, que se efectúa en la resistencia que un material opone al ser rayado por otro material, la escala de Mohs se trata de 10 materiales que son ordenados de menor a mayor dureza, este ensayo tiene poca validez ya que existen otros materiales con diferentes propiedades que bien podrían ocupar un mismo nivel de dureza y esto no permite diferenciarlos.

Otro tipo de ensayo en la industria son los ensayos de penetración y “el valor de dureza que se obtiene puede interpretarse como la resistencia que opone un material al ser penetrado por otro” (Güemes Gordo & Martín Piris, Ciencia de materiales para ingenieros, 2012, pág. 24), en estos ensayos se coloca un penetrador sobre la superficie del material, se le aplica una fuerza determinada lo cual ocasiona una deformación plástica, a esto se le conoce como huella, la dureza se determina entre una relación matemática entre la fuerza aplicada y la o las dimensiones de la huella, a los equipos que realizan este tipo de ensayos se les conoce como durómetros.

### **2.6.1. Durómetros.**

El durómetro es un dispositivo diseñado para medir la propiedad de dureza de distintos materiales como: metales, cauchos, plásticos, elastómetros, etc.

### 2.6.2. Partes del durómetro:



Figura 4 Imagen de durómetro obtenida de la página Ingeniería Mecafenix.

### 2.6.3. Ensayos de Dureza.

Existen diferentes escalas, así como diferentes tipos de ensayos relacionados a la carga aplicada, el penetrador y de la forma de calcular la dureza.

Los ensayos más comunes son el Brinell, Vickers y Rockwell:

### 2.6.4. Ensayo Brinell.

Usando un penetrador de forma esférica de un metal duro (principalmente wolframio) con un diámetro  $D$ , se mide el diámetro de la huella  $d$  que se queda en la superficie del material al retirar la carga  $F$ , la dureza Brinell (HBW) se obtiene de dividir la carga que se aplicó sobre el área de la superficie curva que dejó la huella, el número de dureza Brinell se obtiene a partir de la siguiente fórmula:

$$HBW = 0.102 \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Ecuación 1: Ecuación de dureza Brinell tomada del libro Ciencia de materiales para ingenieros- Alfredo Güemes Gordo, Nuria Martín Piris. Fuerza expresada en Newtons y diámetros en milímetros.

Este ensayo es muy útil debido a que su escala cubre una gran extensión de dureza de materiales, en algunos casos se obtiene una relación prácticamente lineal entre la dureza del material y su resistencia, aunque el ensayo tiene sus limitaciones, el ensayo es permitido siempre y cuando la relación entre los diámetros ( $d/D$ ) se encuentre en 0.24 y 0.6 por esto debe elegirse la relación carga diámetro  $0.102 F/D^2$  (factor de carga) según la dureza del material, para cumplir con la condición de los diámetros.

### 2.6.5. Ensayo Vickers.

Para este ensayo la fuerza aplicada sobre la superficie del material será con un “penetrador de diamante en forma de pirámide recta y de base cuadrada, con un ángulo prefijado entre las caras opuestas” (Güemes Gordo & Martín Piris, Ciencia de materiales para Ingenieros , 2012, pág. 26), después se retirará la carga y se miden las longitudes de las diagonales de la huella que se formó, la dureza vickers (HV) es parecido al cociente obtenido al dividir la carga aplicada entre el área de

las caras inclinadas de la huella, esta es una pirámide de base cuadrada con el mismo ángulo en el vértice del penetrador, el ángulo  $\alpha$  en el vértice de la pirámide del penetrador será de  $136^\circ$  debido a que de esta manera se obtiene un valor numérico de dureza parecido al que sale en el ensayo Brinell, la fórmula de este ensayo es:

$$HV = 0.102 \frac{2F \operatorname{sen} \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 0.1891 \frac{F}{d^2}$$

Ecuación 2: Ecuación de dureza Vickers tomada del libro Ciencia de materiales para ingenieros- Alfredo Güemes Gordo, Nuria Martín Piris. Fuerza expresada en Newtons y d la media aritmética de las diagonales en mm de la huella.

La dureza Vickers se expresa como HV seguido del valor numérico de la dureza, a continuación, por un número representativo de la carga del ensayo dada en kilogramos fuerza (ejemplo 58HV45),

### 2.6.6. Ensayo Rockwell.

En el ensayo Rockwell se oprime con un penetrador puede ser de diamante, bola de acero o de un metal duro, contra la superficie de la pieza de ensayo con dos cargas sucesivas, una carga preliminar  $F_0$  y una carga adicional  $F_1$ , que se retiran después, se mide el incremento de profundidad de la huella,  $h$ , debido a la aplicación de la segunda carga una vez retirada esta y mantenida la primera. Con el valor de  $H$  y dos constantes  $N$  y  $S$  calculamos la dureza con la siguiente expresión.

$$HR = N - \frac{h}{S}$$

La norma europea reconoce hasta 24 escalas diferentes, debido a que el intervalo

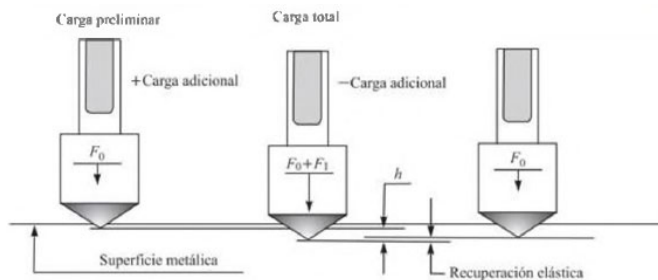


Figura 5 ensayo de dureza Rockwell tomada del libro Ciencia de materiales para ingenieros, Alfredo Güemes Gordo, Nuria Martín Piris; pagina 27 6ta. Edición.

de medida tiene una buena respuesta y es cercano a cada una de las escalas, se distinguen por el penetrador usado, la carga total aplicada, el intervalo permitido de medida y la fórmula para calcular el

valor de la dureza en función del valor de  $h$ .

En la tabla siguiente se muestra la fórmula concreta empleada según norma, en función de la escala.

Escala	HR
<b>HRA, HRC, HRD</b>	$HR = 100 - \frac{h}{0.002}$
<b>HRB, HRE, HRF, HRG, HRH, HRK</b>	$HR = 130 - \frac{h}{0.002}$
<b>HRN, HRT</b>	$HR = 100 - \frac{h}{0.001}$

Tabla 1: Expresión para la obtención del valor de dureza de Rockwell en función de la escala empleada.

La medida de  $h$  la obtendremos con un reloj comparador, recargado sobre el soporte del penetrador y la obtención de la dureza se hace con una escala graduada, el ensayo se realiza en pocos segundos es por esto que tiene un gran éxito.

La escala Rockwell C es la más utilizada, se aplica una carga preliminar de 10 kgf y una carga adicional de 140 kgf el resultado se expresa por ejemplo 42HRC indica una dureza Rockwell de 42 medida en la escala C.

## **2.7. Acero AISI/SAE 4140.**

Este es un acero con una capacidad de endurecimiento medio, está asociada al cromo y molibdeno, es utilizado en la fabricación de diversos componentes mecánicos en los que se necesitan una fuerza media y resistencia a la fractura, poseen también una alta resistencia a la fatiga.

### **2.7.1. Propiedades físicas.**

En las propiedades se encuentran las siguientes, su densidad es aproximadamente de  $7.87 \text{ g/cm}^3$ , su módulo de elasticidad es de 190 GPa su coeficiente de poisson es de 0.29.

### **2.7.2. Propiedades químicas.**

Dentro de sus propiedades químicas este carbón está formado por un total de:

- 0.38%-0.43% de carbono.
- 0.75%-1.0% de manganeso
- 0.040% fósforo máximo
- 0.15%-0.035% azufre máximo
- 0.80%-1.10% Cromo
- 0.15%-0.25% Molibdeno

### **2.7.3. Propiedades Mecánicas.**

El acero AISI/SAE 4140 tiene una resistencia a la tensión de 850 Mpa, el límite elástico de este material es de 680 Mpa, su módulo de elasticidad a 20°C es de 190 Gpa.

### **2.7.4. Aplicaciones.**

Las principales aplicaciones de este acero son en la industria automotriz para fabricar partes mecánicas de maquinaria en general como ejes, flechas, engranes de baja velocidad etc. también empleado en la industria de la construcción<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> La información contenida en esta página fue obtenida de diferentes catálogos citados al final.

### 2.7.5. Diagrama TTT Acero 4140.

Como ya vimos los diagramas tiempo, temperatura y transformación nos indican a que temperatura y en qué tiempo ocurrirá la transformación del acero, un ejemplo usando el diagrama que se muestra a continuación, es que podemos obtener martensita si, por ejemplo, calentamos el acero a 204°C y enfriamos en el intervalo de 1 a 15 segundos.

Una vez dado este ejemplo podemos apreciar las curvas de transformación del acero 4140, como también se nos indican las durezas que este acero puede alcanzar dependiendo de la temperatura y el tiempo que pase o logre en enfriarse, estas curvas nos pueden ayudar a predecir que obtendremos al realizar algún temple o tratamiento térmico.

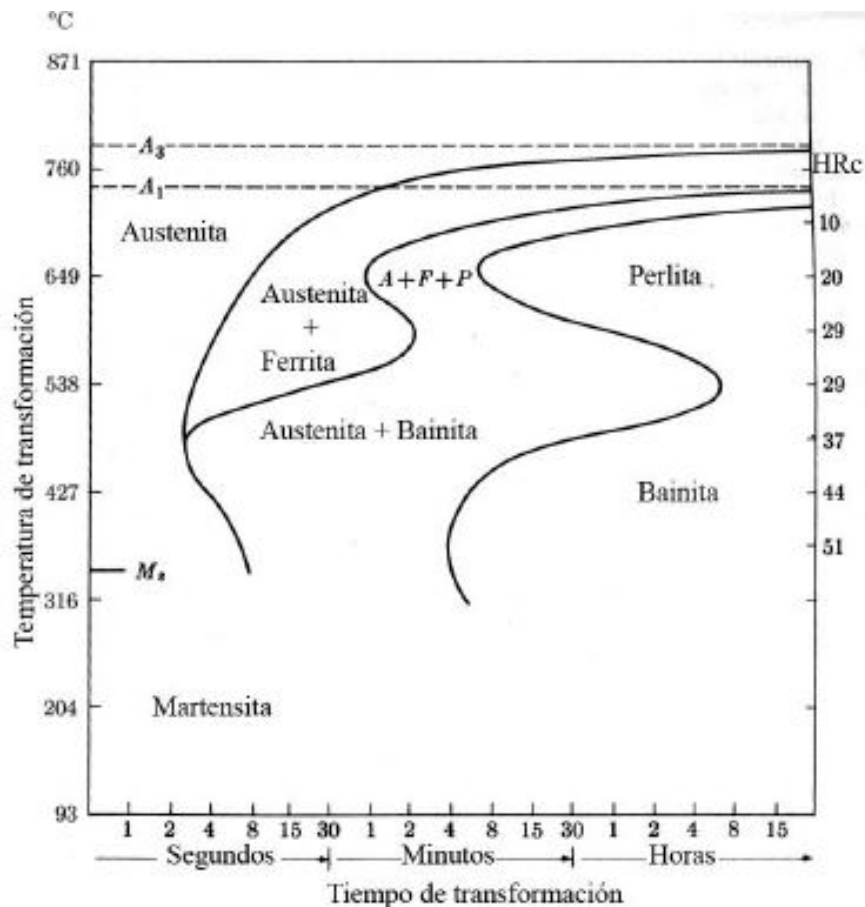


Figura 6 Diagrama TTT Acero 4140 tomada del documento "PRINCIPIOS GENERALES DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS ACEROS".

## **2.8. Tratamientos térmicos de los aceros.**

### **2.8.1. ¿Qué son los tratamientos térmicos?**

El modificar o cambiar a las propiedades de un material mediante el calentamiento o enfriamiento controlado es conocido como un tratamiento térmico, término genérico que abarca los procesos de reblandecimiento, endurecimiento y tratamiento de superficies, del autor Juan Antonio Pérez Patiño conocemos que:

- ❖ Reblandecimiento: liberar esfuerzos, recocido, normalización y esferoidización
- ❖ Endurecimiento: templado en martensita, templado en austenita y endurecimiento entre los mismos.
- ❖ Tratamiento de superficie: nitruración, cianuración, carburación y endurecimiento por inducción y a la flama.

### **2.8.2. Tipos de tratamientos térmicos.**

#### **2.8.2.1. Recocido Total.**

“El proceso se basa en calentar el acero a una temperatura adecuada y después enfriar lentamente a través del intervalo de transformación” (Pérez Patiño J. , 1996, pág. 34), adecuadamente dentro del horno o en cualquier material que sea buen aislante al calor.

El propósito de este proceso es el de refinar el grano, proporcionar suavidad y mejorar las propiedades eléctricas y magnéticas, también algunas como la mejora del maquinado, este proceso es muy lento y por lo mismo llega a estar muy cerca del diagrama de equilibrio hierro-carburo de hierro.

#### **2.8.2.2. Esferoidización.**

Un tratamiento térmico que mejorará la maquinabilidad de las piezas es conocido como recocido de esferoidización, este proceso requiere varias horas, cambia la morfología de la fase, producirá una forma de carburo esferoidal o globular.

#### **2.8.2.3. Recocido por eliminación de esfuerzos**

Del autor Donal R. Askeland sabemos que es una etapa de recuperación en la que se liberan esfuerzos residuales sin modificar la resistencia o ductilidad del material,

es a baja temperatura, normalmente es usado porque el material tuvo un fuerte maquinado, o por su trabajo en frío.

#### **2.8.2.4. Recocido de procesos**

“Este tratamiento térmico es utilizado en las industrias de lámina y alambre, se realiza al calentar el acero a temperaturas debajo de la línea crítica inferior” (Pérez Patiño J. , 1996, pág. 41), (573.33 a 712.22°C), aplicado después del trabajo en frío y suaviza el acero.

#### **2.8.2.5. Normalizado.**

Es un tratamiento fácil de realizar se requiere lo mismo para piezas fundidas, forjadas o mecanizadas, ayuda para afinar la estructura y quitar las tensiones que suelen aparecer en la solidificación, forja o en otras operaciones siguientes, el nombre de este proceso hace referencia a que se realiza para dejar con las características que puedan considerarse normales de su composición, el proceso se lleva a cabo después de sobrecalentamientos o enfriamientos erróneos, o siempre que se quieran eliminar efectos de procesos anteriores.

De autores como Güemes Gordo y Nuria Martín, podemos entender que este proceso es diferente al recocido.

“La normalización del acero se realiza al calentar aproximadamente 37.77°C por encima de la línea de temperatura crítica superior seguida por un enfriamiento en aire quieto hasta la temperatura ambiente” (Perez Patiño J. , 1996, pág. 43).

#### **2.8.2.6. Propósito del normalizado.**

El propósito de este proceso es el de hacer un acero con mayor dureza y más fuerte que el que se obtiene mediante el *recocido total* por esto en algunas de las aplicaciones este puede ser un tratamiento térmico final, también mejora la maquinabilidad, modificar y refinar las estructuras de piezas de fundición, refinar el grano y homogeneizar la microestructura para optimizar la respuesta de los tratamientos de endurecimiento, “no se recomienda recocer los aceros pobres en carbono, sino normalizarlos, puesto que para ellos prácticamente no hay diferencia entre las propiedades mecánicas después del recocido o normalizado”. (Kucher, Tecnología de metales, 1987, pág. 71)

### **2.8.2.7. Templado del acero.**

Para el acero con excepción de algunos tipos especiales podemos endurecerlo mediante el calentamiento a temperatura elevada y un enfriamiento rápido seguido, este es el proceso que conocemos como temple o templado.

“Cada acero requiere su temperatura particular de calentamiento para temple” (Pérez Patiño J. , 1996, pág. 49), de diferentes autores como Kucher o Askeland comprendemos que para conseguir la dureza máxima en el temple, la temperatura a la cual el acero será calentado se verá afectada por el contenido de carbono del mismo, también la velocidad a la que es enfriado o calentado es un factor importante.

### **2.8.2.8. Factores que influyen en el proceso de templado.**

La velocidad de calentamiento es importante en los procesos de tratamiento térmicos, “el calor fluye desde el exterior hacia el interior del acero a una velocidad determinada” (Perez Patiño J. A., 1996, pág. 51), el calentar de manera rápida ocasiona que el exterior se vuelva igual de caliente que el interior entonces no se logra obtener una estructura uniforme, para piezas uniformes una velocidad lenta es lo adecuado para evitar agrietamientos (alabeo), entre más grande sea la sección a calentar también lo será el tiempo de calentamiento requerido para obtener resultado uniforme, incluso con la temperatura adecuada debemos permitirle al acero reposar para obtener un calentamiento uniforme en toda la pieza, otros factores que afectan en el proceso son, la velocidad del temple, el contenido de carbono y el tamaño de la pieza, para los aceros de medio y bajo carbono, el temple en agua es un método rápido de enfriamiento comúnmente usado, para los aceros de alto carbono y aleados se usa generalmente aceite como medio de temple, esto debido a que su acción no es tan severa como la del agua, algunos aceites como el mineral cuentan con diferentes velocidades de enfriamiento, por esto imparten diferente dureza al templarse el acero, para enfriamientos extremos podemos utilizar salmuera o rocío de agua.”La templabilidad no se refiere a la dureza del acero” (Askeland, Fulay, & Wright, Ciencia e ingeniería de los materiales, 2011, pág. 509).

### 2.8.2.9. Dureza límite del acero.

La dureza máxima que podemos obtener de un acero depende del contenido de carbono que tenga la pieza, "su máxima dureza no excederá la de un acero al carbono que tenga el mismo contenido de carbono" (Perez Patiño J. A., 1996, pág. 56).

En una curva nos muestra que la dureza máxima que se encontrará en un acero depende directamente del porcentaje de carbono que este tenga.

Para lograr la dureza máxima de un acero el carbono tiene que estar en solución completa con la austenita en el temple, deberá usarse la mínima velocidad de enfriamiento que nos arrojará un 100% de martensita, así mismo la austenita no deberá estar presente porque suavizará la estructura.

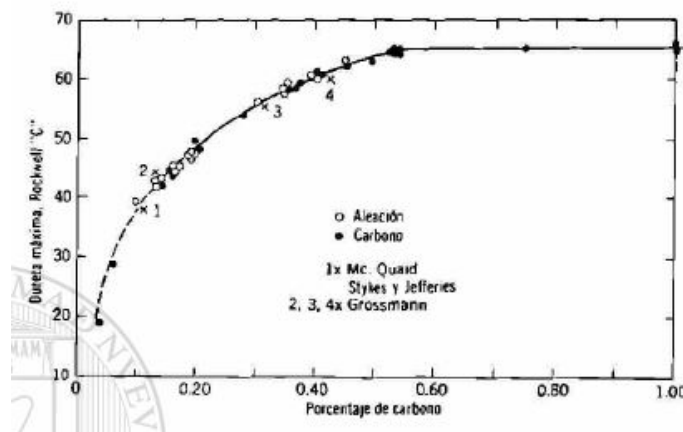


Figura 7 tomada de la tesis "Tratamientos Térmicos de los Aceros" del ing. Juan Antonio Pérez Patiño.

### 2.8.2.10. Revenido.

El autor A. Kucher nos dice lo siguiente del revenido, consiste en el calentamiento del acero templado hasta una temperatura más baja, manteniéndolo a esta temperatura y el siguiente enfriamiento puede ser rápido o lento, el fin es eliminar o reducir las tensiones en el acero, aumenta la viscosidad y disminuye la dureza, para realizar el revenido se debe calentar el acero hasta los 150-600°C, con respecto a la temperatura hay tres tipos de revenido:

### 2.8.2.11. Baja temperatura.

El acero se calienta hasta los 150-250°C después de una exposición a esta temperatura se obtiene la estructura de martensita revenida, se eliminan

parcialmente las tensiones del temple, de existir en el acero una cantidad de austenita residual la dureza después del revenido a baja temperatura puede aumentar en 2-3 unidades, este proceso se emplea para los aceros de herramientas después de la cementación.

#### **2.8.2.12. Revenido Intermedio.**

Para ese proceso se calienta el acero hasta, una temperatura de 350-400°C, después de este revenido encontraremos “una combinación de durezas (41-46HRCe) y resistencia relativamente alta, con buena elasticidad y suficiente viscosidad, por eso al revenido intermedio se someten principalmente los muelles y resortes” (Kucher, Tecnología de metales., 1987, pág. 75).

#### **2.8.2.13. Revenido a alta temperatura.**

Durante el revenido a alta temperatura las piezas se calientan hasta las 450-650°C después del revenido en alta temperatura la cementita obtiene una estructura granular, esto hace que aumente la resiliencia, debido a esto el revenido a alta temperatura se utiliza en las piezas de máquina que durante la explotación sufren cargas de impacto.

#### **2.8.2.14. Ventajas de los tratamientos térmicos**

“Estos procesos se efectúan para aumentar la resistencia y dureza, mejorar la ductilidad, mejoran la facilidad de trabajo, liberar esfuerzos, desesforzar, endurecer herramientas y modificar las propiedades eléctricas y magnéticas de los materiales” (Perez Patiño J. A., 1996, pág. 33).

Todos estos procesos suponen cambios o modificaciones en la estructura del material. Estos procesos incluyen calentar y enfriar la pieza para alterar su estructura.

## **2.9 Tratamientos térmicos isotérmicos.**

En los tratamientos térmicos isotérmicos se calientan los materiales a una cierta temperatura y se mantiene a esta temperatura durante algún tiempo determinado, estos tratamientos están limitados y sus limitantes son los equipos para realizar estos procesos, se necesitan hornos capaces de controlar de forma automática la temperatura, baños de sales y plomo, además de que la temperatura debe ser mayor a la de fusión.

Los diagramas TTT como ya los habíamos visto, son aplicables en este tipo de tratamientos, son resultado de la velocidad de transformación eutectoide, nos permite predecir la estructura, propiedades mecánicas y el tratamiento térmico requerido para los aceros.

Para continuar con la explicación daremos algunos conceptos que nos servirán para entender mejor el proceso de un tratamiento térmico isotérmico.

Existen varios motivos por los cuales se ha incrementado el uso de los baños calientes para el tratamiento de piezas y herramientas.

Por ejemplo, las propiedades de un nuevo constituyente llamado bainita que explicaremos más adelante.

“La gran reducción de grietas y deformaciones que se consigue, al emplear baños de sales para el enfriamiento del acero desde la temperatura del temple” (Perez Patiño J. A., 1996, pág. 81), en lugar de enfriar en agua o en aceite, al enfriar en agua y aceite ocasiona que el exterior se enfría cuando el centro aún está caliente y al observarse las transformaciones estructurales antes de la parte externa del centro se crean grandes tensiones en estas zonas, así se originan las deformaciones, grietas y roturas, al enfriar en baño caliente estos errores son evitados debido a que se logra que antes de iniciarse la transformación de la austenita se equilibren las temperaturas del centro y las externas.

Estos también debido a que se logra ablandar otros aceros en menor tiempo que el que se necesita por ejemplo en los recocidos de regeneración.

### **2.9.1 Revenido en la Fase Austenítica y Recocido Isotérmico.**

El revenido en la fase austenítica es un tratamiento térmico de transformación isotérmica que se emplea para producir bainita, “simplemente involucra austenítizar el acero, templando a alguna temperatura por debajo de la nariz de la curva TTT, y manteniendo a esa temperatura hasta que toda la austenita se transforme en bainita” (Askeland, Fulay, & Wright, Ciencia e ingeniería de materiales, 2011, pág. 500).

### **2.9.2 Recocido isotérmico**

“El recocido y la normalización por lo general se usan para controlar la finura de la perlita” (Askeland, Fulay, & Wright, Ciencia e ingeniería de materiales, 2011, pág. 501), pero la perlita que se forma por un recocido isotérmico puede dar propiedades más equilibradas, esto debido a que las magnitudes de rapidez de enfriamiento y microestructura conseguidas mediante el recocido y la normalización se transforman en toda la sección transversal del acero.

Esto consiste en calentar el acero a una temperatura por encima de la temperatura crítica y enfriar lo más rápido posible hasta una temperatura ligeramente inferior a la de la línea de enfriamiento.

### **2.9.3 Transformación eutectoide.**

Es la transformación en la cual una solución sólida genera al mismo tiempo dos fases de composiciones distintas en el caso del acero, “reacción invariante de tres fases en la que una fase sólida se transforma en dos fases sólidas distintas” (Askeland, Fulay, & Wright, Ciencia e ingeniería de los materiales, 2011, pág. 442), la reacción es la siguiente:

Disolución sólida=Disolución sólida+ F3C.

## 2.10 Diagrama esfuerzo deformación.

Representación gráfica que se obtiene al representar los esfuerzos que sufre un material a medida de la deformación que experimenta en el tiempo.

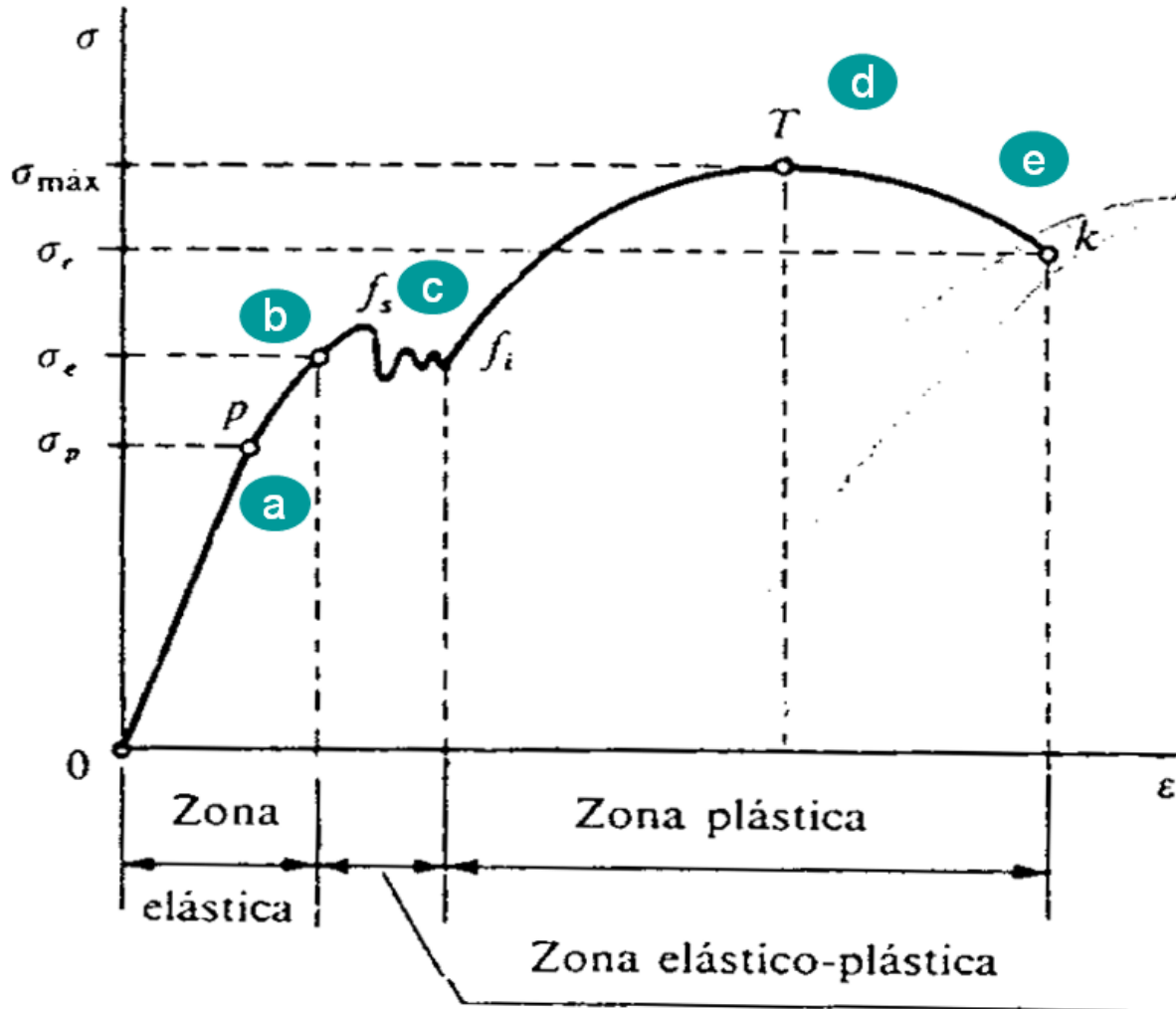


Figura 8 Diagrama esfuerzo deformación obtenido de Internet.

- ❖ A) límite de proporcionalidad.
- ❖ B) límite elástico.
- ❖ C) esfuerzo de fluencia.
- ❖ D) esfuerzo último
- ❖ E) esfuerzo de fractura

### 2.10.1 Límite de proporcionalidad.

Punto donde el material trata de oponerse a la deformación y recuperar su forma

original mientras la fuerza a la que fue sometido no supere su límite de proporcionalidad, “es el punto en el que el material está al límite de ser elástico” (Deingenierias.com, 2019), si el esfuerzo al que es sometido sobrepasa el límite, el material se podrá comportar elásticamente pero ya no recobrará su forma original.

### **2.10.2 Límite de elasticidad.**

Punto donde el material experimenta una deformación aun elástica, aún intenta resistir el esfuerzo y recobrar su forma original, este punto es muy cercano al punto de fluencia.

### **2.10.3 Punto de fluencia.**

En este punto el material abandona su propiedad elástica, el esfuerzo al cual fue sometido supera su resistencia, desde aquí en adelante el material se comportará como un material plástico, ya no intentará recobrar su forma original.

### **2.10.4 Esfuerzo máximo o Esfuerzo Último.**

Aquí el material ha alcanzado su máxima capacidad de soportar al esfuerzo que le afecta, si el esfuerzo incrementa entonces el material colapsará hasta el esfuerzo de rotura.

### **2.10.5 Esfuerzo de Rotura.**

Este punto es aquel donde el material que está siendo sometido a un esfuerzo se fractura de forma permanente.

### **2.10.6 Regiones del diagrama Esfuerzo Deformación.**

#### **2.10.6.1 Región Elástica**

Región comprendida desde el principio hasta el límite de elasticidad, en esta región el material se comporta de forma elástica, con mayor intensidad desde el punto inicial y el punto del límite de proporcionalidad.

#### **2.10.6.2 Región Plástica**

Comienza desde que el material llega al punto de fluencia, atravesando el punto de

esfuerzo máximo hasta el punto de fractura del material, esta región es donde el material presenta una deformación permanente.

## **2.10.7 Zonas del diagrama esfuerzo deformación**

### **2.10.7.1 Zona Elástica**

En esta zona el material se comporta de forma elástica.

### **2.10.7.2 Zona de Cedencia.**

Aparece justo después del punto de fluencia, “en esta zona el material experimenta una deformación permanente plástica con un esfuerzo constante” (Deingenierias.com, 2019), hasta llegar al punto en el cual para seguir deformando al material se necesitará un aumento en la intensidad del esfuerzo que lo deforma.

### **2.10.7.3 Zona de Endurecimiento**

Esta zona aparece después de que el material haya sido sometido a una deformación por un esfuerzo constante, es necesario aumentar el esfuerzo para sacarla de la zona de cedencia a medida que aumenta el esfuerzo, el material experimenta una deformación y a la par experimenta un endurecimiento, aumenta su grado de dureza hasta llegar al punto de esfuerzo máximo.

### **2.10.7.4 Zona de Estricción.**

Esta zona está determinada desde el punto de esfuerzo máximo hasta el punto de esfuerzo de rotura, el material no soporta esfuerzo constante alguno, solo decreciente, se forma el cuello de botella en alguna región para después fracturarse mientras el esfuerzo continúa actuando sobre ella.

### 2.10.8 Ensayo de Tensión.

Este ensayo nos da información sobre la resistencia y ductilidad de los materiales a partir de tensiones de tracción uniaxiales, esta información será útil para “comparar materiales entre sí, desarrollar nuevos materiales, mantener un control de calidad y para diseñar bajo ciertas circunstancias” (García Méndez, 2022, pág. 4).

De este ensayo obtendremos 4 datos mecánicos.

- **Cedencia (Límite Elástico,  $\sigma_{YS}$ ):** es el nivel más alto de esfuerzo que permite el material antes de sufrir deformaciones perpetuas.
- **Fuerza de Tensión (UTS):** es el nivel más alto de esfuerzo que permite un material antes de comenzar con la rotura.
- **\*Elongación:** es el porcentaje de alargamiento total que presenta la probeta despues del ensayo.
- **\*Reducción de área:** es el porcentaje de reducción transversal del área original en comparación con el área final.

Estos resultados nos ayudarán para saber qué tan dúctil es el material que se está analizando, al graficar cada cierto tiempo el esfuerzo aplicado contra la deformación unitaria de la muestra obtendremos la curva esfuerzo deformación, un material puede ser clasificado como dúctil o frágil si conocemos su capacidad de ser o no deformado plásticamente.

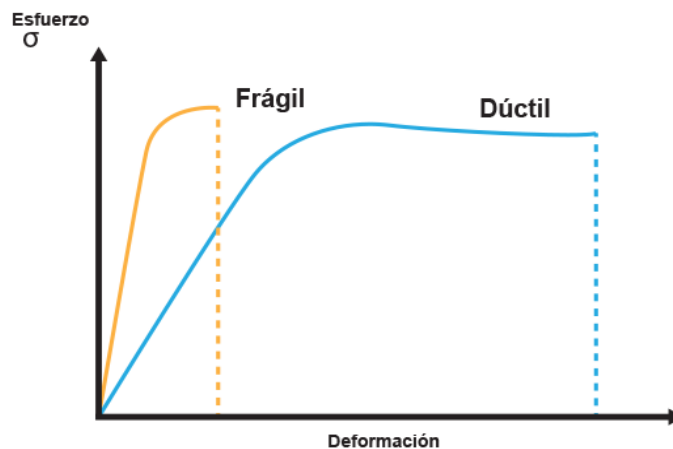


Figura 9 diagrama esfuerzo deformación para saber si un material es dúctil o frágil.

## 2.11 El Torno.

“Es una herramienta mecánica muy utilizada en la industria pesada” (eonsi INDUSTRIAL DEVELOPMENT, 2022), con su proceso de arranque de viruta corta, da forma o pule piezas de distintos materiales, para realizar el trabajo de torneado. Existen diferentes tipos de tornos según su función pueden ser, fresador, copiador, de revolver y automático, se pueden clasificar según su manera de trabajar verticales, horizontales y CNC, también se pueden clasificar según su base, existen los de sobremesa y bancada.

### 2.11.1 Partes del Torno.

Esta herramienta está compuesta principalmente por:

Bancada, eje principal, cabezales, caja Norton y carros portaherramientas.

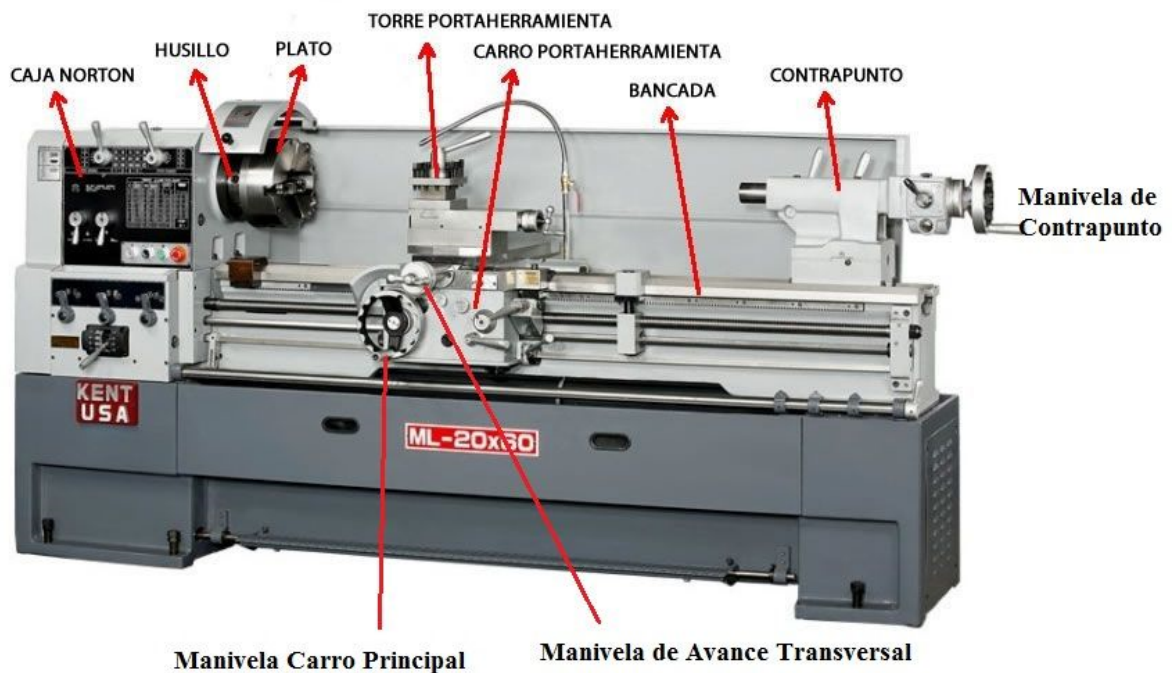


Figura 10 Partes Principales del Torno.

## 2.12. Calibrador Vernier.

Es un instrumento de medición que se usa con la finalidad de medir dimensiones externas, internas, y profundidades de objetos pequeños con alta precisión.

### 2.12.1. Partes del Vernier.

Consiste en una regla graduada, con una escala principal y una escala vernier móvil, esto permite realizar medidas más precisas que las obtenidas de una regla común.

- Barra principal: Es la parte central del calibrador, y también es donde se coloca el objeto a medir.
- Puntas inteligentes de medición: Son las puntas que se deslizan a lo largo de la barra principal.
- Tornillo de fijación: Es un tornillo que se encuentra en la parte superior del calibrador. Ajusta la distancia entre la escala interna y externa, permitiendo el bloqueo de las puntas de medición.
- Vernier: Es una escala auxiliar que se encuentra en el calibrador y se extiende a lo largo de la barra principal.
- Escala principal: Es la escala que se encuentra en el calibrador.
- Trinquete de bloqueo: Es un dispositivo de bloqueo que se encuentra en el extremo opuesto del tornillo de fijación. Se utiliza para fijar las puntas de medición en su lugar.
- Nonio: Es una pequeña regla graduada que se encuentra también en el calibrador, está fijada a la barra principal.

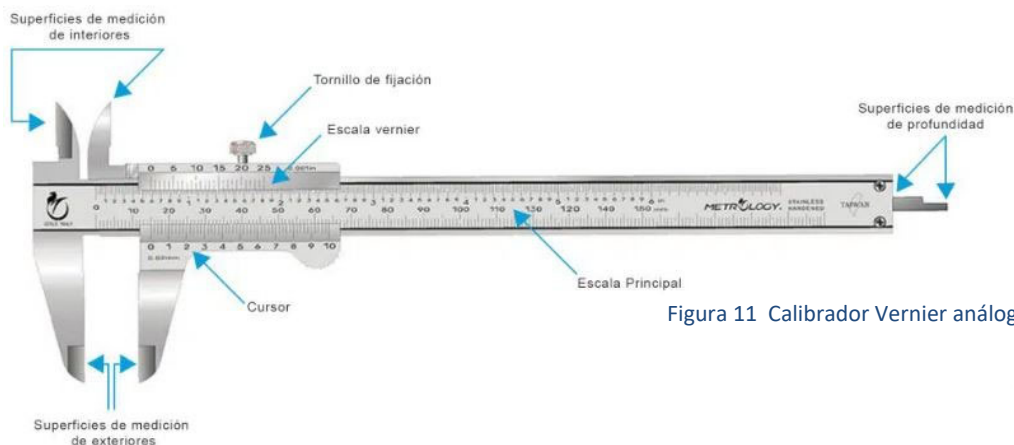


Figura 11 Calibrador Vernier análogo.

## **Capítulo 3.-Metodología**

### **3.1. Introducción al experimento.**

El primer proceso que se realizó para la parte de metodología de esta tesis fue el adquirir los materiales necesarios, el acero 4140 recocido es un acero comercial, y es fácil de conseguir si podemos decirlo así, no tuvo que ser sobre pedido ni mucho menos importado, dicho esto podemos decir que el conseguir el acero 4140 no represento un inconveniente para la tesis.

Los materiales recocidos son aquellos que pasan por un proceso térmico antes de ser comercializados, en este caso el proceso térmico se utilizó para reducir la dureza y aumentar la ductilidad, como antes vimos en páginas anteriores el recocido cumple esa función para modificar las propiedades de los materiales.

Como segundo paso fue el maquinado de las probetas que más adelante se explicara con mayor énfasis en el proceso que se llevó a cabo para lograr que estos materiales tomarán la forma que resultado del proceso.

Después de seleccionar el material nos dimos cuenta que las dimensiones que tenía el bruto eran demasiado grandes por lo que se comenzó con un proceso de desbaste de la pieza para lograr hacer que tuviera las medidas adecuadas, conforme se iba analizando el proceso de maquinado de las probetas surgieron nuevos inconvenientes, por lo que se decidió darle otro tipo de acabado.

Más que eso la realización de estos procesos se definió como el punto de partida de este proyecto en el cual se debieron obtener nuevas habilidades y otros conocimientos de distintas fuentes para lograr el cometido del maquinado de las probetas.

No solo eso, también se obtuvo muchísima ayuda por parte de algunos catedráticos de otras instituciones, así como compañeros que están dentro del laboratorio y se logró que el proyecto saliera adelante.

Como en todo, este proyecto represento un reto en el cual se invirtió tiempo y esfuerzo, pero al final se ha logrado que este siguiera su curso, esta tesis nos ha hecho adquirir nuevas formas de aprendizaje y nos ha hecho adquirir nuevas habilidades por lo que nos mantiene disfrutando del proceso.

### 3.2. Probetas.

El acero 4140 recocido es un acero de buena maquinabilidad y que posee buenas propiedades para obtener un buen temple, con esto se quiere decir que no será difícil trabajar sobre él, y sus propiedades mejorarán con el temple.

#### 3.2.1. Diseño de las probetas.

Las probetas de tensión normalmente están diseñadas bajo alguna norma establecida, para nuestro caso queríamos hacer algo diferente con las probetas, así que se diseñó una probeta propia al principio, que es la siguiente.

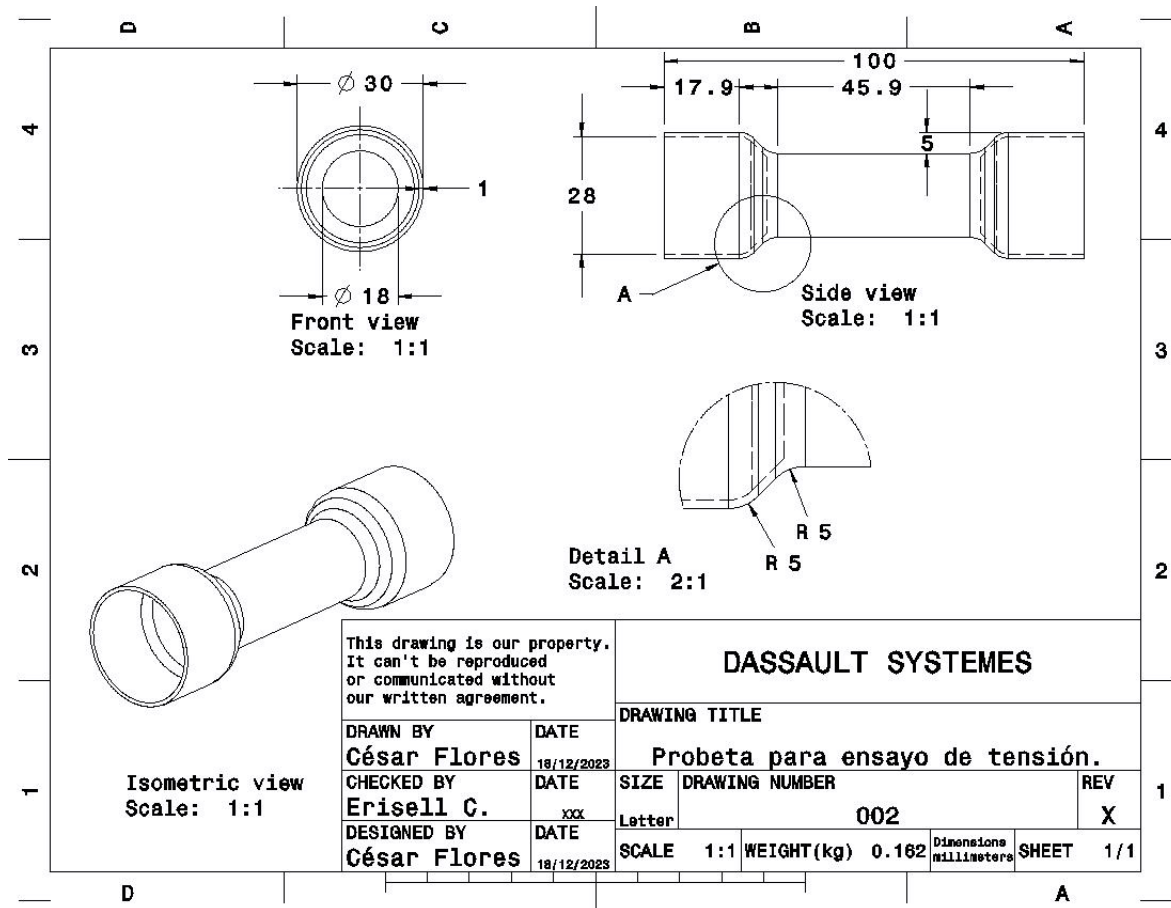


Figura 12 Primer diseño de la probeta.

Este fue el primer diseño que se realizó para las probetas, al paso de los días mientras se maquinaban y bajo la opinión de quienes ya habían realizado estas pruebas con anterioridad se llegó a la conclusión de que el diámetro era demasiado

grande, no para sujetarlo, sino para fracturarla por lo que se optó bajar el diámetro de 18mm a 15mm, aun con este proceso realizado nos dimos cuenta de que el diámetro seguía siendo muy grande para la capacidad de las máquinas que podíamos disponer para las pruebas, el diseño, aunque con tolerancias resulto ser el siguiente.

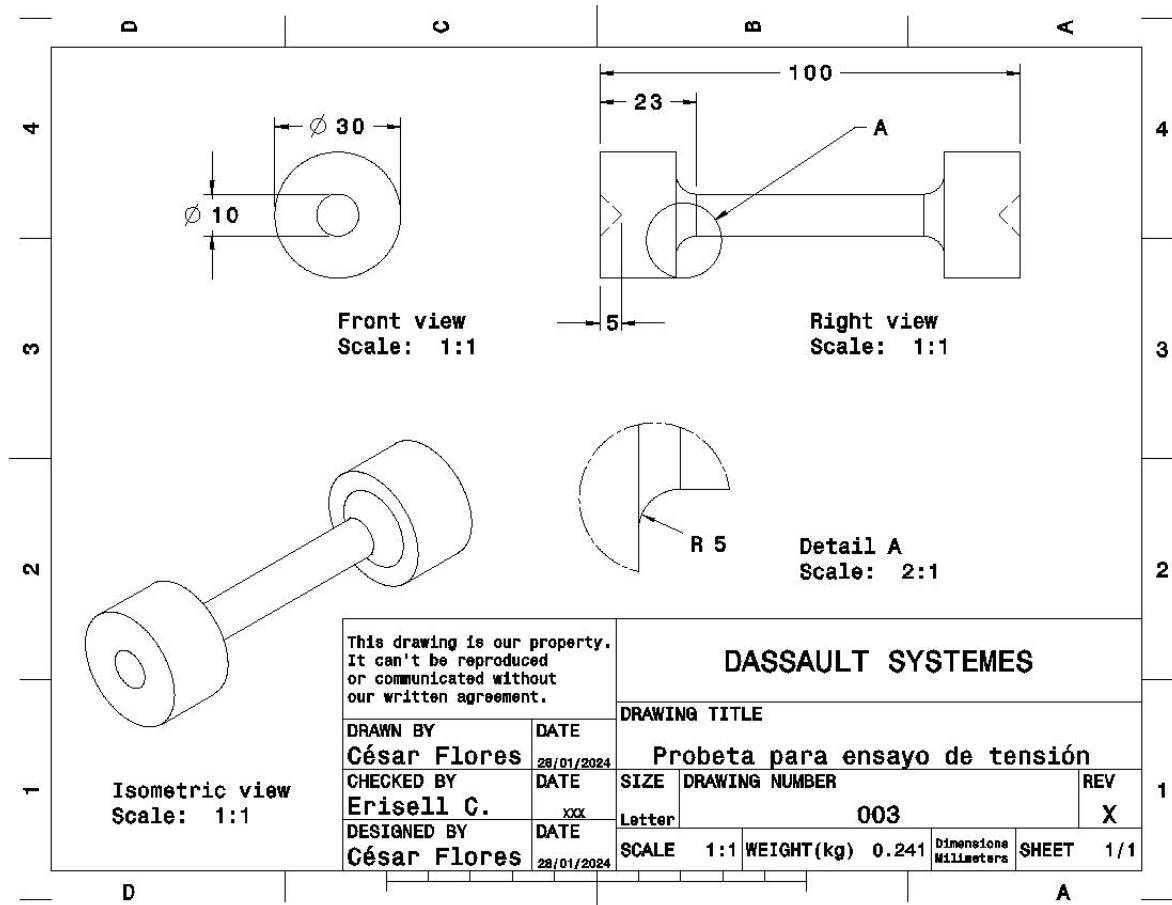
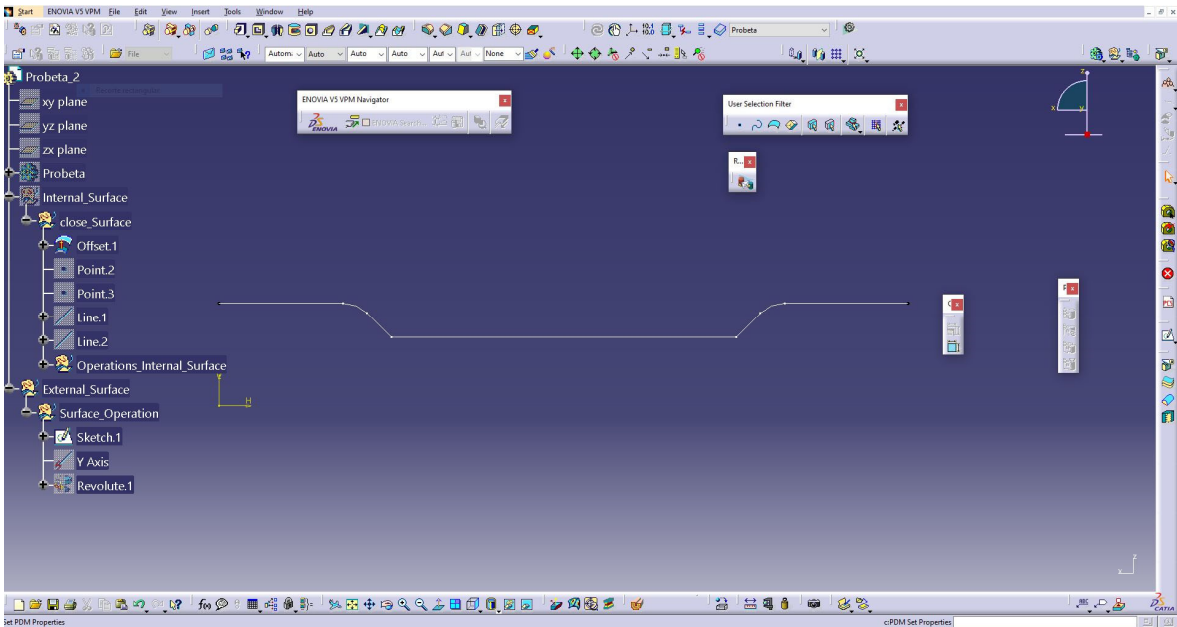


Figura 13 Segundo diseño de la probeta.

El ultimo diseño de las probetas refiere a que tiene menos material en la zona de elongación y más material en las zonas exteriores de donde será sujeta, aunque el proceso no fue complicado tal vez convendría explicar el diseño de la probeta para así mostrar cómo se realizó en el software CATIA.

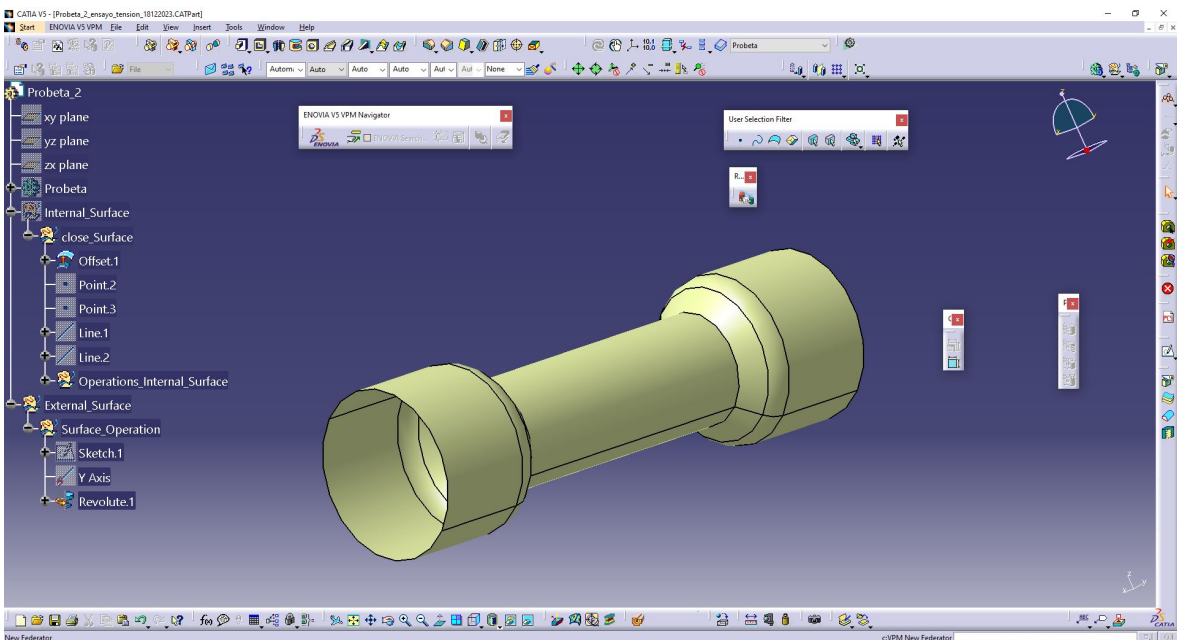
### 3.2.2. Uso de CATIA para el dibujo de las probetas.

La primera probeta se realizó con el uso de superficies creando primeramente la zona exterior de la probeta y después la zona interior de la siguiente manera.



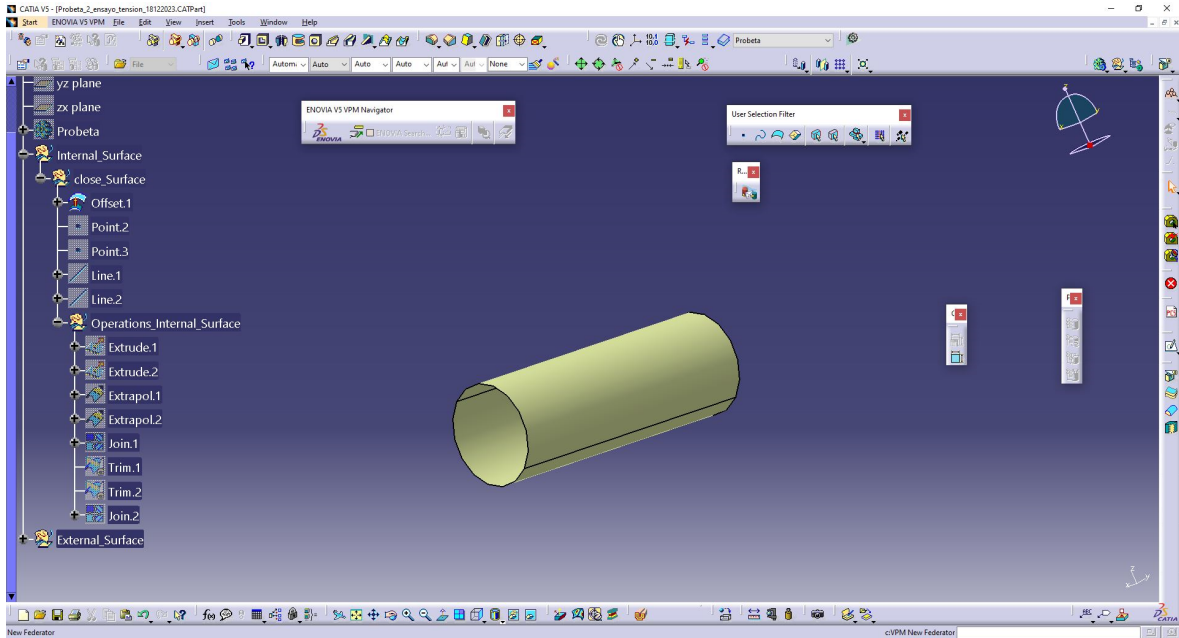
*Figura 14 Sketch de la primera probeta.*

Esta es nuestra primera probeta, Después de dibujar la siguiente línea con las dimensiones de la figura 6, la seleccionamos y usamos el comando Revolute para así girar sobre el eje X y crear toda la parte exterior de la probeta.



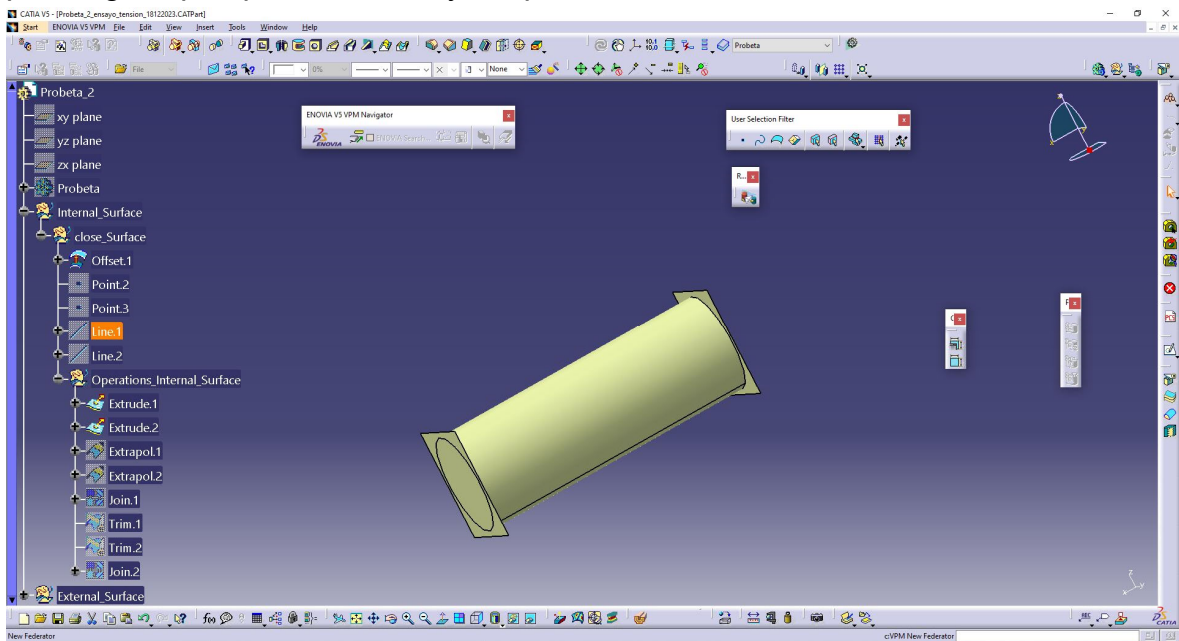
*Figura 15 Superficie de la primera probeta.*

Esta es la superficie mostrada de la primera probeta, por su interior es hueca para eso creamos un offset de la cara del cuerpo central.



*Figura 16 Superficie central (offset)*

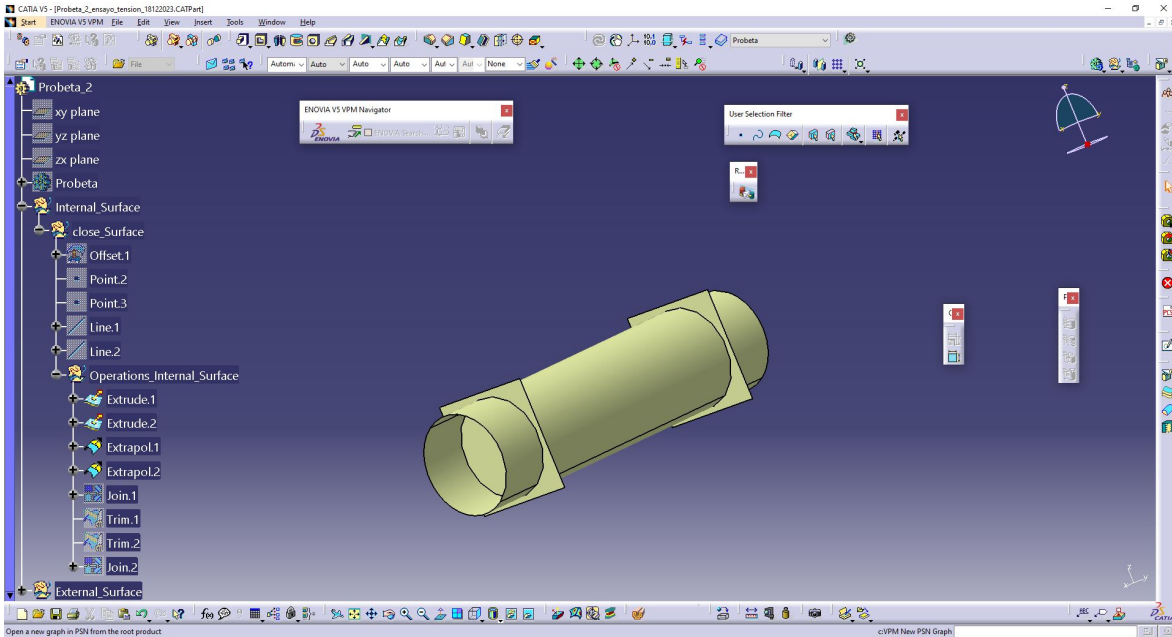
Después de crear este offset procedemos a cerrarlo con diversas operaciones para lograr que quede cerrado y así poder convertirlo en sólido.



*Figura 17 interior cerrado para posteriormente convertirlo en sólido.*

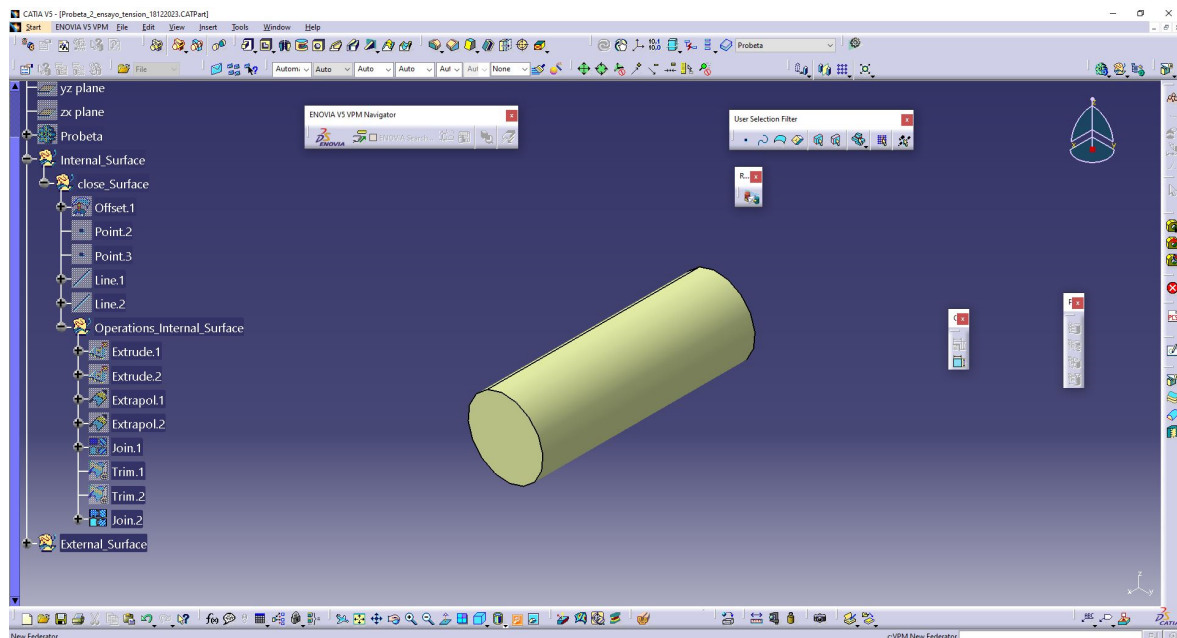
Una vez cerrado procedemos a unir las partes para crear el cilindro, en el árbol de operaciones se logra apreciar todas las operaciones que se han realizado sobre

las superficies para lograr unir las.



*Figura 18 superficie extrapolada con interior cerrado.*

Aquí hacemos una pausa para notar como extrapolamos el cilindro para cortar con los planos delimitantes para cerrar el cilindro.



*Figura 19 Superficie interior cerrada lograda para crear un sólido y añadirla al cuerpo principal (superficie 1)*

Una vez obtenida la pieza cerrada y sólida, procedemos a añadírsela a nuestro

cuerpo principal que es el creado con la herramienta thickness de la superficie número 1.

Este es el resultado de nuestra pieza.

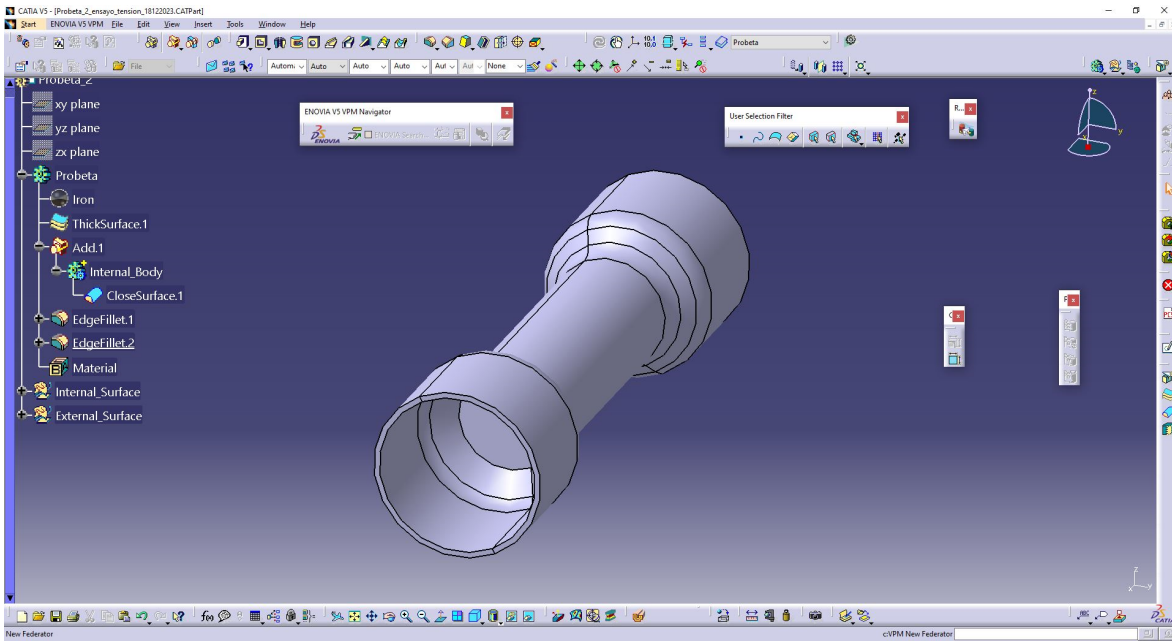


Figura 20 probeta diseñada.

Para la segunda probeta que es con la que se terminó o mejor dicho es aquella con la cual tendimos el acabado final es el procedimiento siguiente.

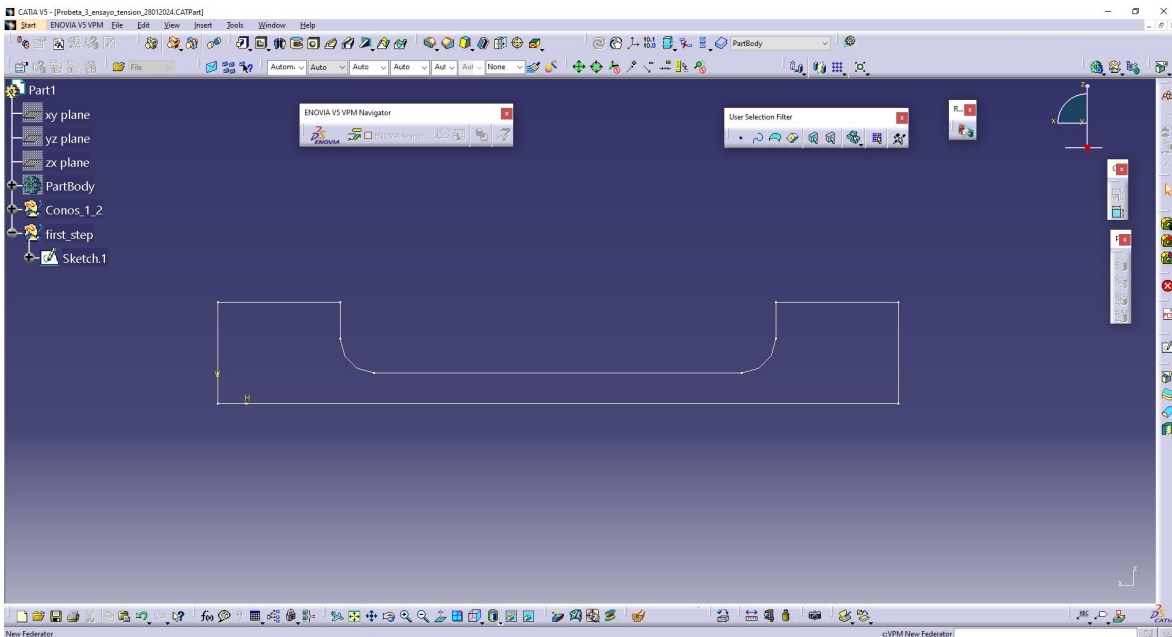


Figura 21 Sketch de la segunda probeta.

Este es el dibujo de la segunda probeta, para la cual se decidió utilizar un sketch y utilizar la operación shaft y crear el sólido.

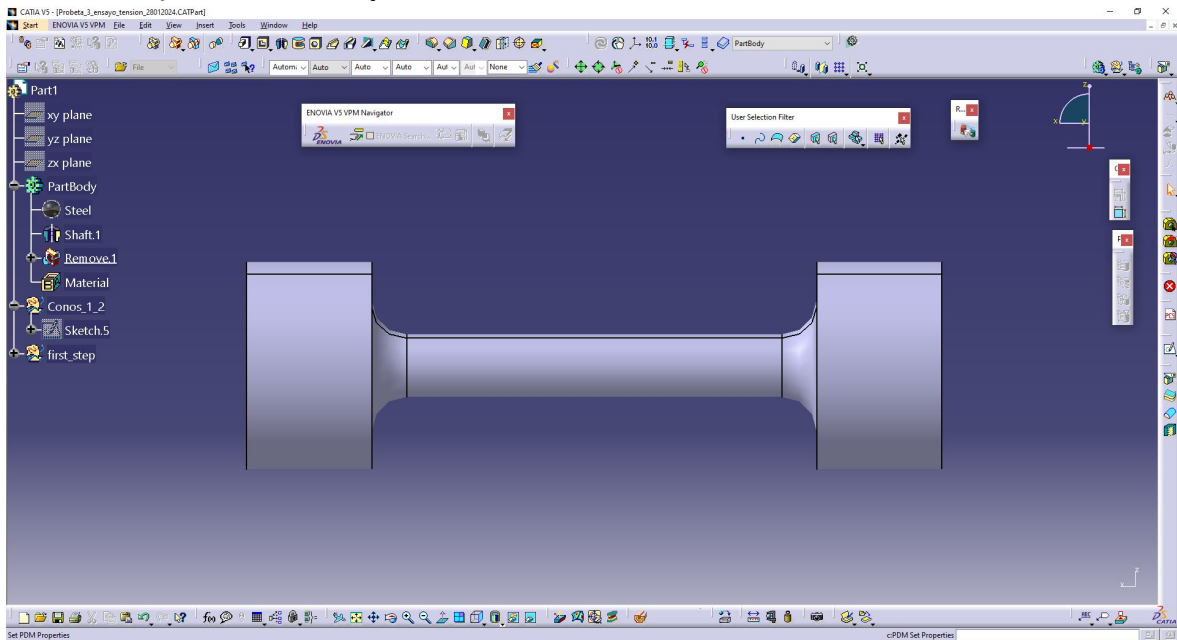


Figura 22 cuerpo solido de la probeta obtenido del anterior Sketch.

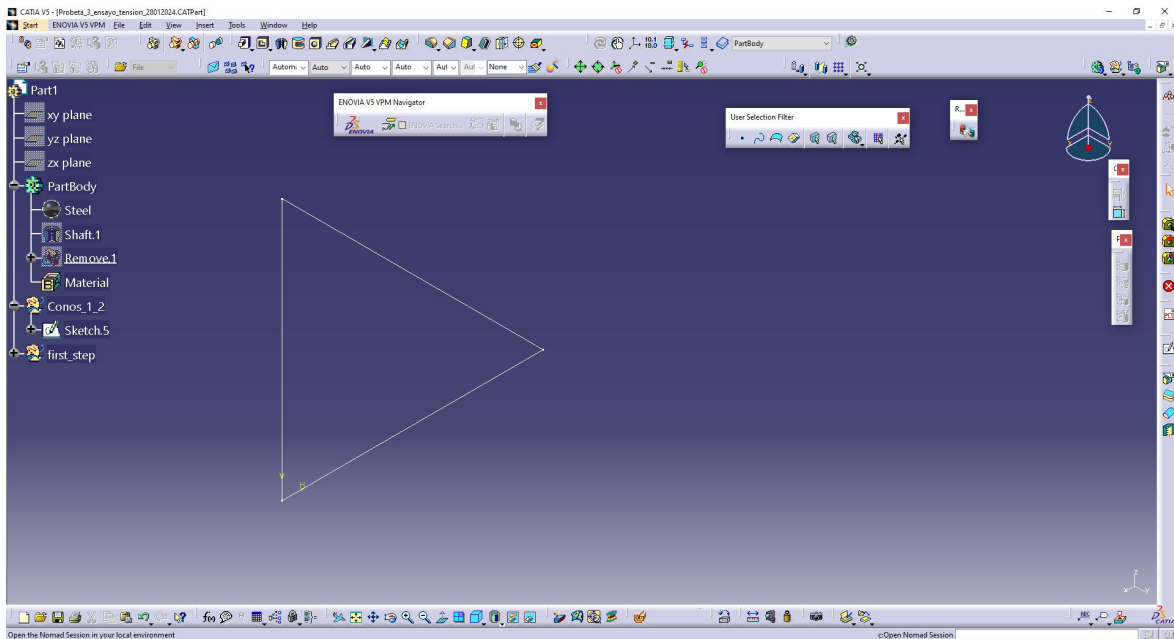
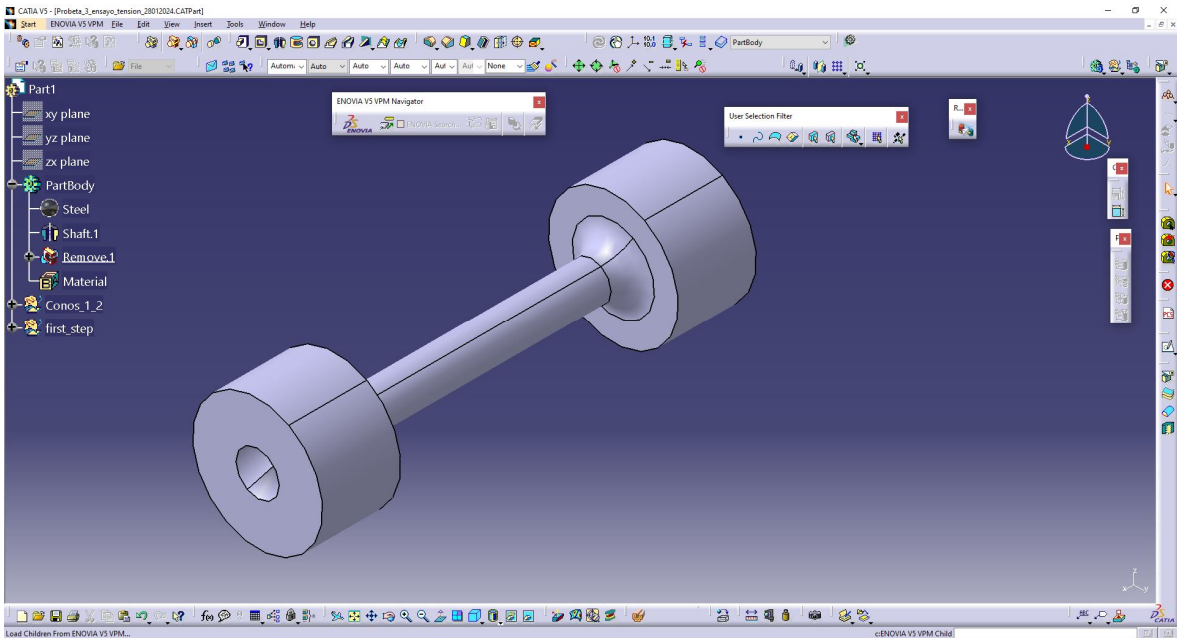


Figura 23 Conicidades.

Con esto definimos las conicidades que se obtienen al taladrar la base para que pueda detenerse dentro del torno.



*Figura 24 Segunda probeta terminada en diseño.*

Esta es la segunda probeta que se terminó en cuanto a diseño, es esta la probeta que nosotros templaremos y después probaremos para lograr los resultados esperados.

### 3.3 Maquinado de las probetas para ensayo de tensión y dureza.



*Figura 25 Herramientas utilizadas en el proceso de torneado.*

En las imágenes podemos apreciar algunas de las herramientas que utilizamos en el proceso de maquinado de las probetas, junto al plano primero que se realizó, un candado y una botella de Coca-cola con soluble.

Algunas de las herramientas que se pueden apreciar son:

- Una lima plana con punta.
- Un buril de carburo de tungsteno.
- Un buril de afilado universal de cobalto.
- La llave del chuck.
- Llave allen para el porta herramientas.

El maquinado de las probetas fue uno de los pasos más interesantes, esto debido a que se tuvieron que adquirir nuevos conocimientos y habilidades para lograr el correcto maquinado de las probetas.

El primer paso que se realizó fue el de carear el pedazo bruto de acero 4140 porque este no estaba del todo derecho, fue lo primero que hicimos antes de comenzar el maquinado.



*Figura 26 careado de las piezas de metal.*

Este paso consistió en carear los cinco brutos de metal en el torno, todos por ambos lados uno a la vez, para así lograr que estos tuvieran una base plana y pudiera ser más fácil tiempo después el maquinado de las mismas, en la figura anterior podemos ver como careamos uno de los pedazos de metal para que este logre tener la base plana.

Como el careo resulto en quitar las imperfecciones de las bases de los pedazos de metal podemos apreciar el Scrap o escoria que resulto de cortar el pedazo de metal.

El segundo paso una vez realizados todos los careos es el de realizar los centros de la pieza, estos centros nos ayudarán a que el contra-punto rotatorio lo detenga mientras se maquina el centro de la pieza, es un paso importante pues de esto depende la sujeción de la pieza entre el chuck y el contrapunto.



*Figura 27 maquinado del centro de la pieza.*

Para obtener el centro de la pieza se utilizó en el contrapunto una broca de centro que se utiliza para obtener los puntos de centrado de un eje.

En este paso el buril no se utilizó, debido a eso el porta herramientas se ve de lado.

El centro de la pieza se realiza utilizando la manivela del contrapunto, una vez detenido el contrapunto a una distancia considerablemente cerca de la pieza se rota la manivela para acercar la broca y de esta manera a un paso lento se realiza el centro.

Continuamos con el desbaste de todos los pedazos de acero para lograr que tuvieran la dimensión más grande, refiriéndonos a la dimensión de 30mm, claro que dentro de nuestras medidas existen tolerancias a las diferentes medidas que estas puedan tener.



*Figura 28 Desbaste de las piezas para el diámetro de 30 mm.*

Este fue uno de los procesos más largos que se realizaron, como mencionamos anteriormente el proceso consistía en tener una medida exterior de 30 mm y nosotros teníamos un diámetro de una pulgada y media (38.1 mm) por lo que tuvimos que desbastar 8.1 mm de material para obtener la medida y la forma que requeríamos, este proceso nos tomó casi medio día, por la cantidad de material que debíamos desbastar, así como por la cantidad de piezas que teníamos en aquel momento, lo hicimos con todas las piezas que teníamos para en próximos días realizar el proceso de darle forma a todas las probetas.

En el camino se nos cruzaron algunos contratiempos como la ruptura de un buril de corte de carburo de tungsteno y también se nos des-sujeto una pieza que tuvimos que volver a carear que se ve más pequeñas que las otras probetas en el final.

Para evitar que la pieza y la herramienta se sobrecalentara, utilizamos soluble (botella de coca-cola con líquido blanco) como refrigerante.

Aquí se pueden apreciar mejor los desbastes que se hicieron de las piezas, para lograr el radio de 30 mm se tuvieron que pasar aproximadamente 4-5 veces para quitar a la cantidad de material, en este punto la primera probeta está casi completa, pero resultaría en la probeta que está en el diseño 1 por lo cual no la utilizaremos en estas pruebas.



*Figura 29 piezas desbastadas a 30 mm.*

El desbaste de las piezas consistió en cortar todo el exceso de material exterior de todas las piezas, una vez que estas quedaron por un lado a 30 mm, se les dio la vuelta y se realizó el mismo procedimiento, pero por el otro lado para que estas quedaran uniformemente.

En estas piezas se puede apreciar como ya tienen marcados los centros y desbaste de gran parte de las piezas, a este punto aún faltaba quitarle más de la parte del centro para que tuvieran las mismas dimensiones del diseño de probeta 1.



Figura 30 Desbaste Interior de la pieza.

En estas imágenes podemos ver el desbaste interior que hace que tengan la misma forma que la probeta 1, en este punto fue donde nos percatamos que el diámetro era demasiado grande para fracturarlo en la máquina universal con la que disponíamos.



Figura 31 Desbaste interior de la pieza.



*Figura 32 piezas torneadas junto a calibrador Vernier Digital.*

Aquí podemos apreciar el primer acabado que se les dio a las probetas, los diámetros oscilaban entre los 15 y 15.5 mm, por lo que ahora la misión era reducirlos hasta un diámetro de 9mm aproximadamente, claro que existen tolerancias y pueden tener décimas de milímetros más o menos

En este punto me gustaría mencionar a quienes me ayudaron en el proceso de maquinado de las probetas, el profesor Bonifacio Estévez del CECATI 8 fue uno de los que me ayudo y explico cómo manejar el torno, bajo su asesoría realizamos el primer diseño y los primeros desbastes que se realizaron para lograr obtener las formas que se muestran en la imagen.

Para terminar de darle forma el profesor del laboratorio Arturo Mendoza me proporciono los materiales y asesoría necesaria para lograr terminarlas de acuerdo al segundo diseño, que es el mostrado en las siguientes figuras.



*Figura 33 probetas finalizadas junto a otros brutos de acero 4140.*



*Figura 34 Probetas finalizadas en comparación con el diseño uno y un bruto de acero.*

En este punto se maquinaron dos probetas más, para así tener un total de seis probetas a temprar, el proceso de las siguientes dos probetas fueron los siguientes:



*Figura 35 maquinado de 5ta probeta.*

El desbaste completo de las piezas se completó en un día, al ser solo dos piezas se decidió dejarlas a un acabado fino y con las dimensiones que antes se describieron en los planos y los anteriores pasos del procedimiento de maquinado de las probetas.



*Figura 36 maquinado de la 6ta probeta.*

Como una última parte del apartado de el maquinado de las probetas hemos de decir que el proceso no fue fácil al maquinar, se quemaron varios buriles y el exceso de material que se género provoco que en algunas partes fuera difícil llegar a las dimensiones esperadas, pero al finalizar el maquinado los resultados nos ayudaron a comprender aún más al torno y el trabajo que conlleva este tipo de procesos.



Figura 37 probeta número 6 finalizada y torno limpio.



Figura 38 Torno usado en el maquinado, marca Cornmetal.

### 3.4 Tratamiento térmico isotérmico de las probetas.

El tratamiento térmico isotérmico de las probetas consistió en templados y recocidos, aquí es donde empezamos a definir el paso a paso de los tratamientos térmicos isotérmicos a las diferentes seis probetas.

Para este proceso se realizaron preparativos previos al templado, por ejemplo: se buscó el apoyo por parte del laboratorio de mecánica de la facultad de ingeniería para realizar la experimentación con las probetas, después se realizó un plan de templado para todas las probetas, este plan consistió en lo siguiente:

Plan de templado para probetas de acero 4140 recocido.					
Número de probeta	Tratamiento Térmico	Temperatura de calentamiento	Tiempo de calentamiento	Medio de Enfriamiento	Dureza esperada
1	Templado	820°C	15 minutos	Aceite	62 HRC
2	Templado	820°C	15 minutos	Enfriar a 350°C mantener 8 minutos y enfriar a temperatura ambiente en aceite	50 HRC
3	Recocido	780°C	15 minutos	Dejar enfriar en el horno	20 HRC
4	Templado	820°C	15 minutos	Dejar enfriar a 350°C durante 8 minutos, después dejar enfriar en horno abierto	37 HRC
5	Sin tratamiento				33 HRC
6	Templado	820°C	15 minutos	Agua	51 HRC

Nota	No se debe usar ningún método o equipo adicional al tratamiento.
	El equipo de seguridad debe portarse en todo momento.

*Tabla 2 Plan de Tratamiento Térmico Isotérmico.*

El plan consistía en un temple para cuatro probetas, una con un tratamiento de recocido y una que mantendríamos de manera original o mejor dicho sin tratamiento térmico, para obtener durezas esperadas (teóricas) y compararlas.

Este plan tiene una base en la cual nos apoyamos para así lograr generar el plan, este plan lo cuadramos mi asesor y yo.

Ahora que ya conocemos el plan, es importante mencionar que dentro de todo lo que se conoce como teórico es posible, pero también existen otros conocimientos que van más allá de los libros, estos se aprenden en el campo y son de mucha ayuda cuando se trata de hacer algo nuevo en proyectos como este, donde no solo el conocimiento teórico importa.

#### **3.4.1 Procedimiento de temple y consideraciones a seguir.**

El procedimiento que se seguirá con el temple lo podremos describir en unas cuantas líneas que a continuación se presentaran.

- ❖ Escoger la temperatura del horno.
- ❖ Preparar y vestir el equipo de protección.
- ❖ Despejar el área para el temple.
- ❖ Ubicar el medio de enfriamiento.
- ❖ Introducir en el horno la pieza a calentar (en caso de cambiar de horno se despeja el área recorrida entre hornos).
- ❖ Sacar la pieza e introducirla en el medio de temple lo más rápido posible (sujetar de marea adecuada para evitar que se caiga).
- ❖ Limpiar con estopa la pieza templada.

### 3.4.2 Diagrama de apoyo tratamiento térmico isotérmico.

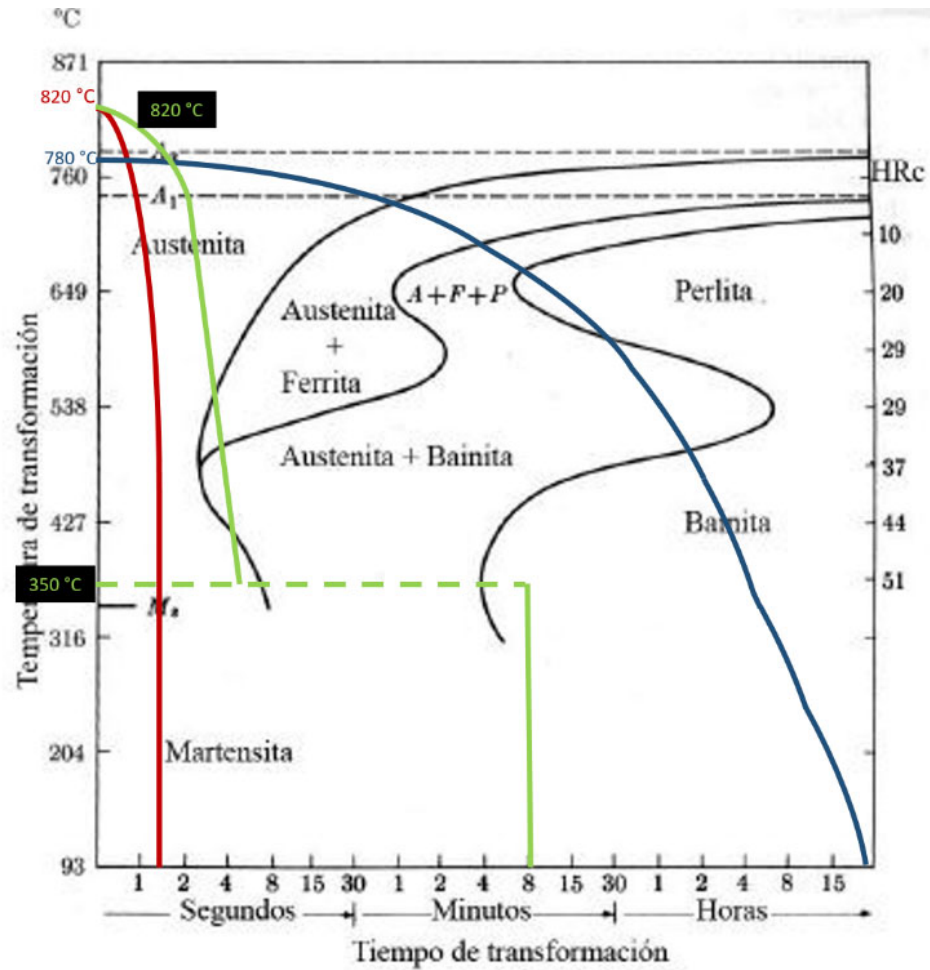


Figura 39 Diagrama de Apoyo.

- ❖ Color rojo: Calentado a 820°C y templado en aceite.
- ❖ Color azul fuerte: Calentado a 780°C y recocido en horno cerrado.
- ❖ Color verde: Templado, calentamiento 820°C y enfriado a 350°C durante 8 minutos después enfriado en aceite a temperatura ambiente.

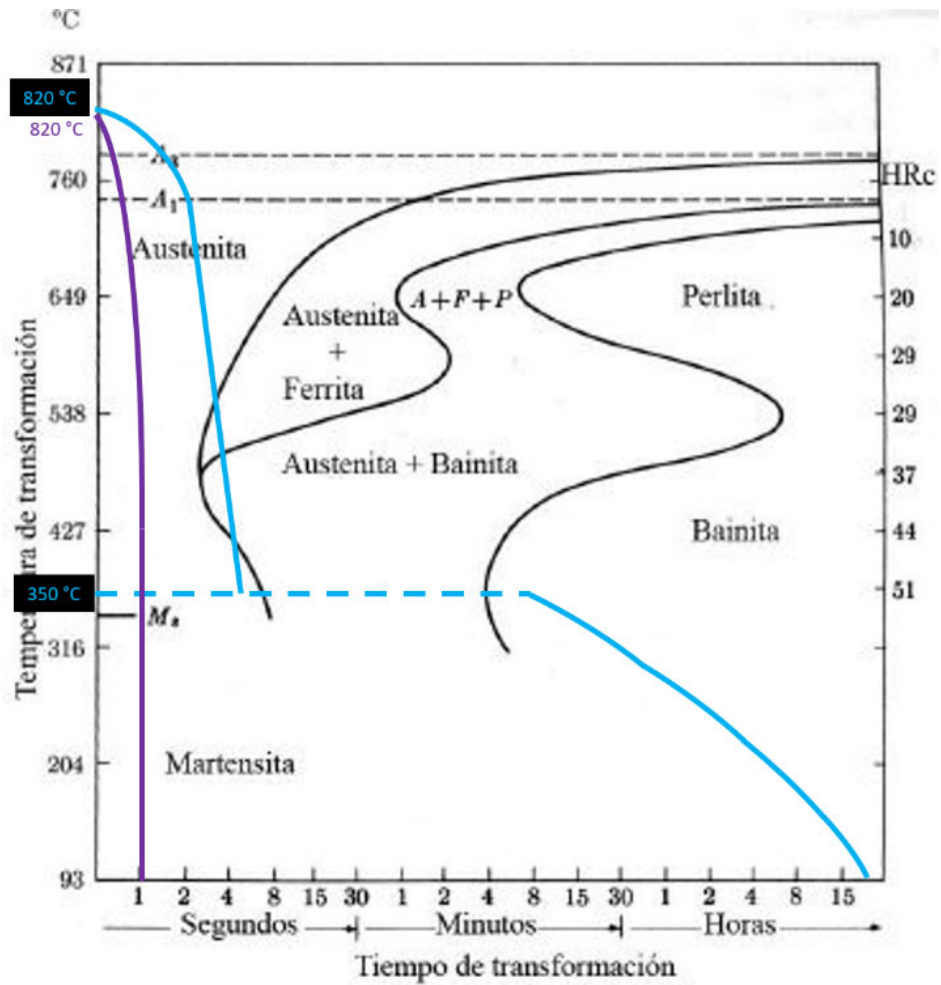


Figura 40 Diagrama de apoyo 2.

- ❖ Color azul claro: calentado a 820°C y enfriado a 350°C durante 8 minutos, después enfriado en horno abierto en temperatura ambiente.
- ❖ Color morado: Calentado a 820°C y templado con agua.

Como se mencionó al principio, las normas de seguridad debían ser respetadas, por lo tanto, el procedimiento no podía continuar si no se tenían el equipo y espacios correspondientes, en cuanto al espacio lo que se hizo fue solamente despejar el área en donde se encontrarían las probetas y el espacio que se utilizaría para tomarlas, en cuanto al equipo lo que se obtuvo fue el siguiente equipo.

### **3.4.3 Equipo de seguridad para altas temperaturas.**

El equipo de seguridad que utilizamos fue proporcionado por el laboratorio de mecánica de la facultad de ingeniería, es representado y descrito en la siguiente tabla e imagen.



*Figura 41 Equipo de seguridad para altas temperaturas.*

<b>Numero</b>	<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>	<b>Uso</b>
<b>1</b>	Careta transparente.	Es una careta transparente que se amolda a la cabeza.	Protege contra escoria que podría saltar a la cara.
<b>2</b>	Guantes de carnaza.	Guantes gruesos y largos.	Protege las manos y parte del antebrazo.
<b>3</b>	Babero de cuero.	Babero que se amolda al tren superior.	Protege el tren superior y parte del tren inferior.
<b>4</b>	Pinzas de herrero.	Pinzas para manipular piezas a altas temperaturas.	Se usa para sostener objetos que estén a altas temperaturas.

*Tabla 3. Equipo de seguridad para altas temperaturas.*

El equipo de seguridad fue muy útil, aunque no se ocasionó ningún inconveniente claro que proporcionaba un sentir de seguridad y confianza mayor que al no tenerlo, claro que las probetas no hubieran podido ser manipuladas sin las pinzas y las pinzas sin los guantes, esto es muy necesario para evitar y prevenir accidentes, además de ser lo indicado en este tipo de procesos.

#### **3.4.4 Equipo de tratamiento térmico.**

El equipo para la prueba de tratamiento térmico que también encontramos dentro de la facultad de ingeniería se puso a nuestra disposición, se nos enseñó a cómo controlarlo y manipularlo para lograr las temperaturas deseadas y que el plan de tratamiento térmico fuera el correcto para los propósitos de esta tesis, a continuación, describiremos brevemente los dos equipos que se utilizaron para el calentamiento de las probetas.

##### **Horno 1.**

Este es un horno pequeño de color blanco que encontramos apenas entrar en el laboratorio, se encuentra sobre la mesa principal donde se imparten las prácticas, es un horno de la marca Thermolyne.



Figura 42 Horno de uso industrial marca thermolyne color blanco.



Figura 43 Horno de uso industrial marca thermolyne color gris.

## Horno 2.

El segundo horno lo encontramos en un rincón del laboratorio (están alejados uno del otro), cerca de los esmeriles para la práctica de afilado, también es de la marca thermolyne es más grande en cuanto tamaño y es de color gris.

Ambos hornos fueron usados para propósitos diferentes el primero alcanzó las temperaturas más altas mientras que el segundo se dejó para el enfriamiento o las temperaturas bajas.

### 3.5 Proceso de templado y recocido de las probetas.

#### 3.5.1 Templado de probeta caso 1.

Para nuestro primer caso con la probeta, esta será expuesta a 820°C y después enfriada en aceite, después de leer a varios fabricantes de este acero, las recomendaciones para el temple de piezas de este acero es que el temple sea en aceite, entonces una vez calentado el horno a 820°C dejamos nuestra probeta dentro del horno para después sumergirla dentro del aceite.



Figura 44 Colocación de la probeta dentro del horno.

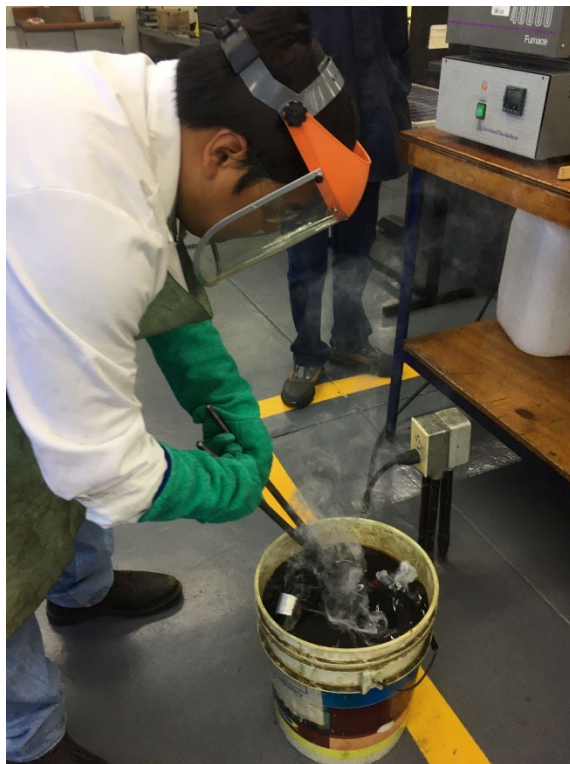


Figura 45 Horno a 819°C programado a 830°C.

Aunque la temperatura que necesitamos es de 820°C el horno fue programado a 830°C, esto es porque al abrir el horno se pierde calor dentro del horno y la temperatura baja, por eso se deja el rango de 10°C para compensar esta pérdida con el tiempo que llevara dentro la pieza.



*Figura 46 probeta 1 justo antes de ser templada.*



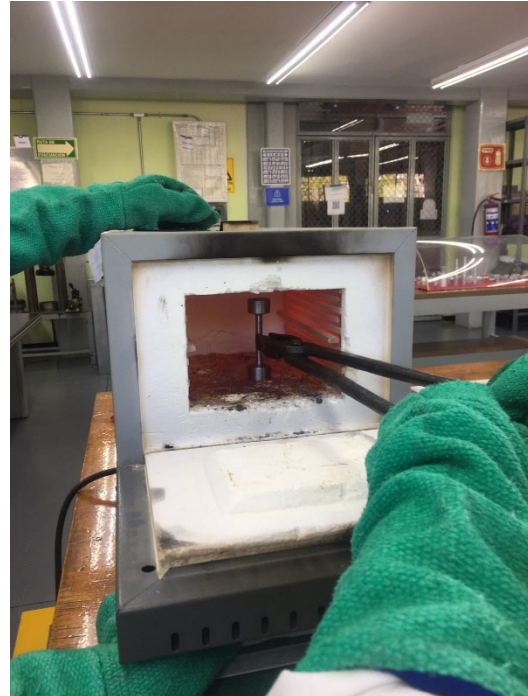
*Figura 47 Probeta 1 siendo templada en aceite.*

### 3.5.2 Templado de probeta caso 2.

Para el caso de nuestra probeta número 2 lo que se necesitó fue calentar el horno a 820°C y mantener ahí la probeta durante 15 minutos, después de eso cambiamos la probeta de horno, donde se enfrió durante 8 minutos a 350°C para después ser templada en aceite.



*Figura 48 Horno número 2 a 350°C para el enfriamiento.*



*Figura 49 colocación de probeta número 2 al primer horno.*

Para mover la probeta de lugar, fue necesario despejar el área que teníamos alrededor, fue apartar unas cuantas sillas y objetos para lograr el paso libre, el cambio de lugar debía ser a prisa pero seguro, por lo lejano entre un horno y otro se tuvo precaución al hacer este cambio.



Figura 50 manipulación de probeta 2 para el cambio de horno.



Figura 51 templado de probeta número 2 en aceite.

### 3.5.3 Recocido de probeta caso 3.

Para el recocido de la probeta número 3 fue necesario calentar el horno a 780°C para posteriormente dejar enfriar dentro del horno durante todo lo que restaba del día, la encontraríamos lista al día siguiente.



*Figura 52 Horno 1 a 761°C.*

Como podemos apreciar en la figura, el horno de nuevo se programó con diez grados más, el desfase es para evitar las pérdidas de calor al abrirlo, en ese momento el contador va en 761°C.



*Figura 53 Colocación de probeta número 3 en horno 1.*

### 3.5.4 Temple de probeta caso 4.

Para el caso número 4 se realizó una especie de recocido o temple con aire a temperatura ambiente, puesto que en ese caso no lo dejamos en el horno para su enfriamiento, lo dejamos reposar durante 15 minutos en el horno a 820°C, después lo cambiamos de horno a 350°C durante 8 minutos.

Posterior a eso, abrimos el horno y este quedo abierto durante todo el tiempo, paso todo el fin de semana enfriándose con el horno abierto.

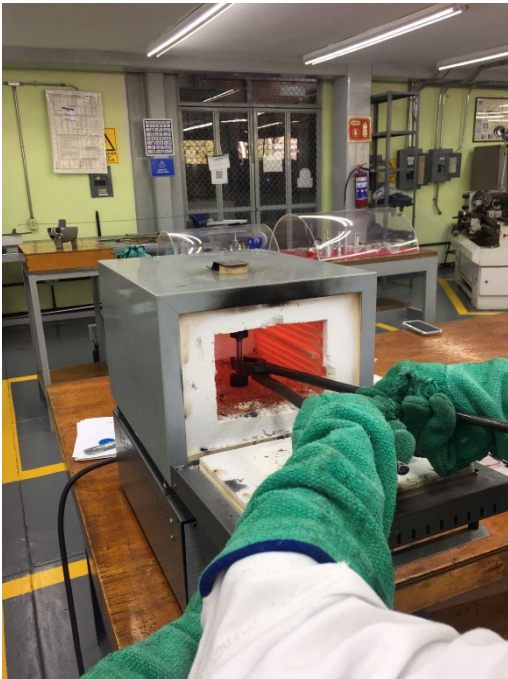


Figura 54 Colocación de la probeta número 4 en horno 1.



Figura 55 modificación del control de temperatura.

En este caso al cambiar rápidamente de horno se buscó que pasara el menor tiempo posible fuera de los hornos, por lo que el cambio de horno 1 a horno 2, se realizó caminando la distancia entre estos rápidamente, así se realizó esta etapa. Se puede notar en la figura 47 que el control de la temperatura dice 470°C, esto fue porque por alguna razón el horno perdía calor, entonces subimos la temperatura para después bajarla y que quedara en 350 °C para tener un mejor control de ella.



*Figura 56 probeta numero 4 siendo transportada al segundo horno.*



*Figura 57 Colocación de la probeta dentro del horno 2.*



*Figura 58 horno abierto para el enfriamiento de la probeta.*

### 3.5.5 Probeta caso 5.

Para el caso número 5 fue que dejamos la probeta en su estado original, esta probeta se propuso así desde el principio para tener un punto de partida donde comparar, esta probeta tuvo un diámetro diferente a las demás, debido a que en el torno existió una irregularidad y tuvimos que reducir el diámetro más de 9 milímetros, quedando así de 6 milímetros.



*Figura 59 Probeta numero 5 siendo maquinada a 6 milímetros de diámetro.*

### 3.5.6 Temple de probeta caso 6.

Para este último caso el temple fue hecho en agua, las recomendaciones del fabricante decían que este acero solo se debía temprar en aceite, pero a nosotros nos pareció interesante el experimentar que pasaría si se templaba en agua, como el enfriamiento sería mucho más rápido que por otros métodos este acero obtendría una dureza mucho mayor que la que obtuvimos con el aceite, así que esa fue la razón por la que decidimos temprar en agua.



Figura 60 introducción de la probeta número 6 a horno 1.



Figura 61 Horno 1 a 790 °C antes de alcanzar los 820°C.

Aquí se finalizan los tratamientos térmicos para las seis probetas, estos tratamientos involucran muchas cosas, no simplemente calentarlas, puesto que el medio, la velocidad, la temperatura son solo algunos de los factores que influyen en los resultados que obtendremos después de temprar, o realizar cualquier otro tratamiento.



*Figura 62 Manipulacion de la probeta 6.*



*Figura 63 temple en agua de la probeta 6.*

## **Capítulo 4. Resultados.**

### **4.1 Introducción resultados.**

La experimentación anteriormente mencionada nos dio una muestra amplia de respuestas que organizamos de manera estructurada en las siguientes líneas, al realizar pruebas a los experimentos antes mencionados nos percatamos de diferentes variables que también influyeron en la parte de la experimentación, variables que estuvieron tanto dentro como fuera de nuestro control, esto no quiere decir que el experimento sea fallido o que se estén justificando los resultados, esto refiere a que hay cosas que propiamente no son posibles de modificar a nuestro favor.

Claro que los tratamientos térmicos son indispensables cuando de cambiar las propiedades de un material se habla, el correcto uso de los tratamientos térmicos nos demuestra que es posible cambiar las propiedades de un material para que este pueda sernos útil a nuestros propósitos, por lo tanto el resultado que obtendremos de un tratamiento térmico será aquel que nosotros nos disponemos a obtener, existe una gran variedad de cosas que se pueden generar al usar los tratamientos térmicos que podría decirse que para cada caso existe una solución.

Para nosotros, los tratamientos térmicos realizados representaron una nueva forma de aprendizaje, una forma en la que se lograron unir tanto la teoría como la práctica, para dar como resultado una mejor forma de aprender y al mismo tiempo indagar más en el tema de los tratamientos térmicos, esto es un reflejo de lo que se puede lograr al generar interés en un tema, especialmente algo bien estructurado y que con una buena base que logre captar la atención de aquellos que gusten aprender más en este tema.

Por otro lado, nos hizo adquirir diferentes habilidades, como lo fue el uso del torno, el control de los hornos, el afilado de herramientas, podríamos decir que el adquirir nuevas formas de conocimiento nos hizo mejorar, como último punto de esta introducción puedo decir con certeza que el proceso que se siguió para completar esta tesis fue una de las mejores experiencias de las que más satisfacción he obtenido.

## 4.2 Ensayos de dureza.

El primer paso para los resultados fueron nuestros ensayos de dureza, los ensayos de dureza como ya se explicaron con anterioridad nos sirven para evaluar la dureza de un material, existen los tres métodos más comunes de los ensayos de dureza, nosotros evaluamos con un durómetro, este durómetro nos daría la dureza en la escala HRC.

El ensayo fue simple, colocamos la pieza sobre el bloque en “V” al escuchar el sensor aplicamos la carga por lo que el indentador aplicaba una marca sobre la pieza en cuestión, después de eso quitamos la carga y esperamos a que el cuadro digital de la máquina nos diera el resultado.

La carga estaba dentro de los rangos de 9.5kg y 10.5kg, se debía tener cuidado porque el cabestrante (la manivela con la que se mueve la plataforma de arriba hacia abajo) era demasiado sensible por lo que con facilidad podría pasarse o no llegar al rango de la carga.

Dureza obtenida.							
	Templado en aceite	Templado 350°C; aceite	Recocido	Templado 350°C; horno abierto	Sin tratamiento	Templado en Agua	
Numero de prueba	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Probeta 6	Unidades
Prueba 1	48.5	25.2	Error	Error	Error	46.7	HRC
Prueba 2	13.5	20	Error	Error	Error	51.7	HRC
Prueba 3	50.6	22.5	Error	16	Error	53.4	HRC
Prueba 4	49.2	Error	Error	13.5	Error	19.2	HRC
Prueba 5	47.7	Error	Error	Error	Error	43.5	HRC

Tabla 4 Durezas obtenidas en el ensayo de dureza.

En la tabla número cuatro podemos observar los valores que obtuvimos del ensayo de dureza, estos valores variaron por los siguientes motivos.

El lugar de donde se manipuló la pieza, esto parece algo increíble pero claro que tiene que ver, el lugar de donde lo sujetaron las pinzas influye en como llego el enfriamiento a esa zona, por eso dependiendo de la zona donde se sujetó es que la dureza varia.

La zona donde se realizó la prueba, la zona de la probeta también influye en la escala de dureza que obtendremos pues, de esto dependen muchos factores, como el que tan rápido se metió al medio de enfriamiento, como se metió, si fueron lentos o pausados los movimientos, entre otros.

Las probetas que nos dieron error son debido a que no tenían dureza, o mejor dicho las zonas no tenían dureza, esto dependió de factores antes mencionados, también es posible que la dureza fuera tan baja que la máquina no podía percibirla, a continuación, se mostrará una gráfica de la tabla anterior para tener una visión más amplia de los resultados de las pruebas de dureza.

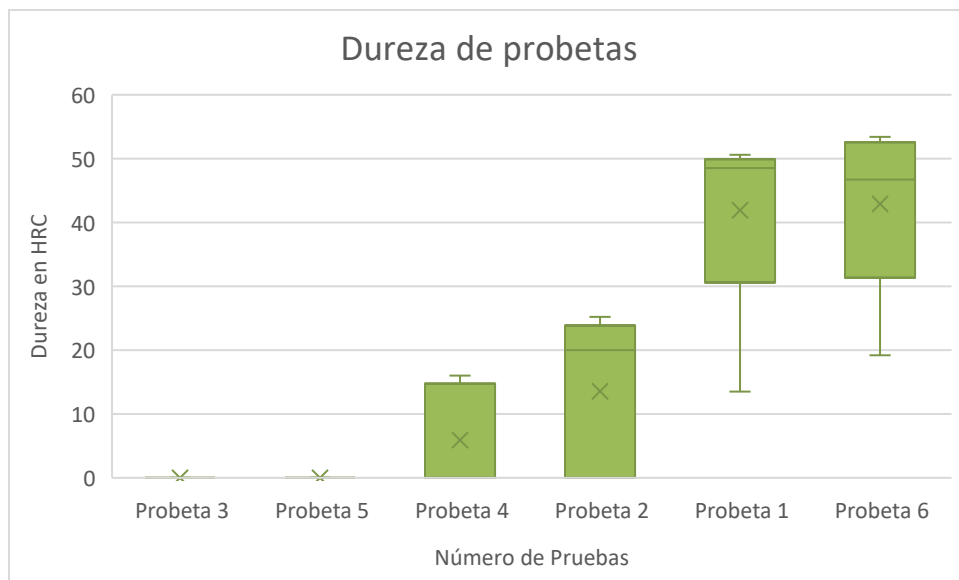


Figura 64 Grafica de cajas y bigotes de la Dureza de las probetas por cantidad de pruebas.

### 4.3 Ensayo de dureza a las probetas.

En la prueba de dureza se coloca de manera centrada el bloque en V sobre la plataforma, después con el cabestrante se sube la plataforma hasta que la pieza haga contacto con el indentador y ahí se mueve ligeramente hasta llegar a la carga de manera que esté entre el rango de 9.5kg y 10.5kg, una vez realizados estos pasos se aplica la carga, y después regresarla para así obtener la dureza de alguna pieza.


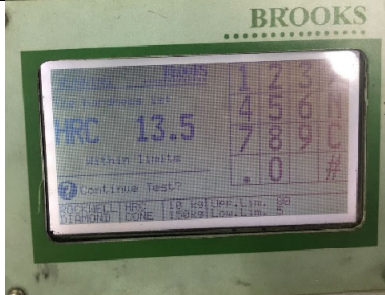
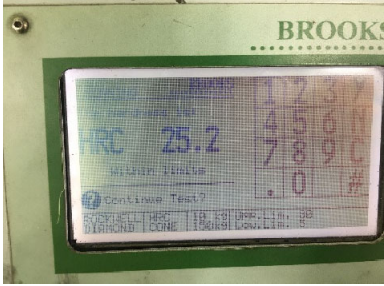
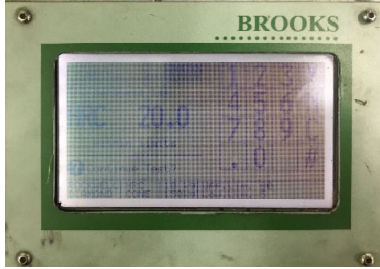
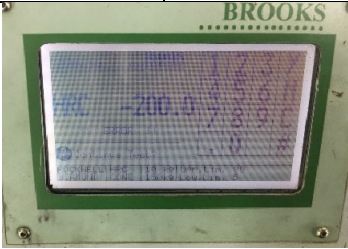


Figura 65 bloque en V y probeta colocados de manera centrada sobre la plataforma.



Figura 66 carga siendo aplicada a la probeta número 1.

A continuación, se mostrará una tabla para identificar los valores de las pruebas obtenidas en el durómetro, estos serán los valores máximos y mínimos que obtuvimos al realizar las pruebas.

	Valor máximo en número .	Foto valor máximo.	Foto Valor mínimo.
Probeta 1.	50.6 HRC		
Probeta 2.	25.5 HRC		
Probeta 3.	Error		
Probeta 4.	16 HRC	Sin Datos.	Sin Datos.

Probet a 5.	Error.	
Probet a 6.	53.4 HRC	

Tabla 5 fotografías de los resultados de ensayos de dureza.

Los resultados de los ensayos de tensión aquí mostrados son una forma más de comprobar que los resultados del experimento son reales, lo siguiente a visualizar son las pruebas de tensión.

#### 4.4 Ensayo de tensión a las probetas.

Para el ensayo de tensión utilizamos una máquina universal, un indicador digital, y un indicador de carátula, estos tres objetos nos ayudarán a generar los diagramas de esfuerzo deformación, este proceso fue grabado mediante celulares.



Figura 67 Máquina universal de ensayo.

A la derecha de la foto podemos ver el mecanismo hidráulico que hace accionar a la máquina universal.

Las piezas se sujetan con unos sujetadores que son atravesados por pernos que van en la base y en la parte superior de la máquina, también se pueden observar las tapaderas de protección.

Los ensayos de tensión que se llevaron a cabo tenían como propósito el ver como se comportaban las probetas y qué respuestas podríamos sacar de ellas.



Figura 68 Indicador digital de carga.



Figura 69 Indicador de caratula graduado en pulgadas.

El indicador de carátula está graduado en pulgadas, por lo que para mayor comodidad al momento de realizar los diagramas, las unidades se pasaron a milímetros, se utilizó Excel para mayor facilidad al momento de realizar las gráficas el resultado de cada probeta es el siguiente.

#### 4.4.1 Probeta 1 Templada en Aceite.

Longitud Inicial (mm)	62.8	Longitud Final (mm)	63.6
Diámetro Inicial (mm)	9	Diámetro Final (mm)	8.94
Área Inicial (mm <sup>2</sup> )	63.6172512	Área Final (mm <sup>2</sup> )	62.7718487

Alargamiento (mm)	Carga (N)	Deformación	Resistencia (Mpa)
0	0	0	0
0.254	2100	0.00404459	33.00991412
0.508	4900	0.00808917	77.02313295
0.762	8800	0.01213376	138.3272592
1.016	12000	0.01617834	188.6280807
1.27	15400	0.02022293	242.0727036
1.524	19000	0.02426752	298.6611278
1.778	22700	0.0283121	356.8214527
2.032	27400	0.03235669	430.7007843
2.286	31700	0.03640127	498.2925132
2.54	35600	0.04044586	559.5966394
2.794	39000	0.04449045	613.0412623
3.048	42700	0.04853503	671.2015872
3.302	45600	0.05257962	716.7867067
3.556	48600	0.0566242	763.9437268
3.81	50400	0.06066879	792.2379389
4.064	51800	0.06471338	814.2445484
4.318	51700	0.06875796	812.6726477

Tabla 6 Valores obtenidos del ensayo de tensión probeta 1.

Los valores de deformación y resistencia son aquellos con los que graficaremos la curva esfuerzo deformación.

La deformación la obtenemos de dividir el alargamiento entre la longitud inicial, la resistencia la obtenemos de dividir la carga entre el área inicial.

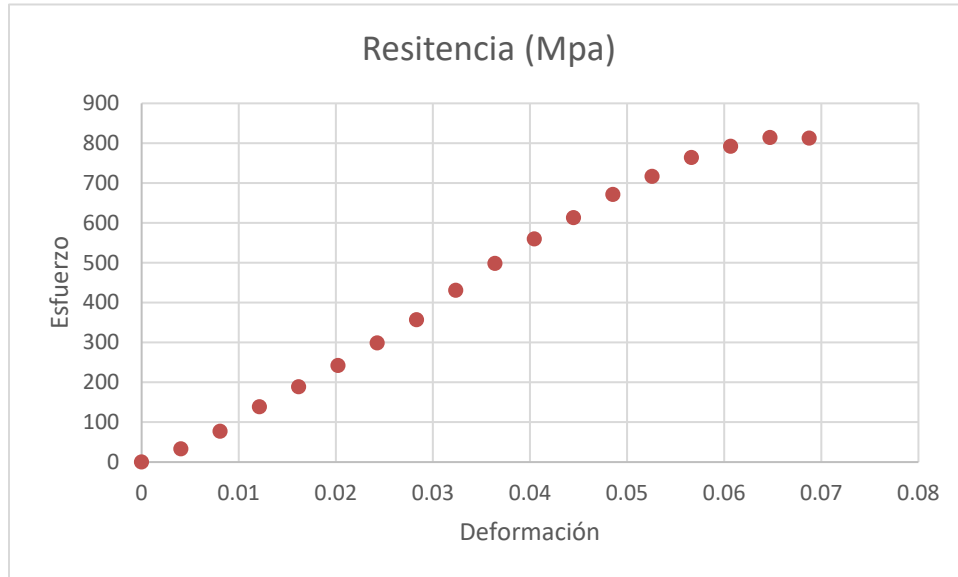


Figura 70 Grafico esfuerzo deformación de la probeta número 1.

Aquí podemos notar el comportamiento de la probeta número 1, como es que esta se fracturó en un punto específico sin hacer “cuello”, que es como se le dice coloquialmente a la elongación que hace un material en algún punto, también en su gráfica es difícil diferenciar a los diferentes puntos importantes del diagrama, al no hacer cuello el material se cortó de los puntos más frágiles que este tenía, como se puede ver en la siguiente imagen son los extremos, y el centro quedo casi sin ninguna deformación.



Resistencia a la fluencia: 390 Mpa  
 Resistencia a la tensión: 810 Mpa  
 Ductilidad: Alargamiento 1%  
 Red de área 1%

Figura 71 probeta 1 después del ensayo de tensión.

#### 4.4.2 Probeta 2 enfriada a 350°C templada en aceite.

Longitud Inicial (mm)	53.53	Longitud Final (mm)	54.7
Diámetro Inicial (mm)	8.87	Diámetro Final (mm)	8.72
Área Inicial (mm <sup>2</sup> )	61.7926928	Área Final (mm <sup>2</sup> )	59.7204197

Alargamiento (mm)	Carga (N)
0	0
0.254	2300
0.508	5500
0.762	9400
1.016	13000
1.27	17500
1.524	20600
1.778	23300
2.032	26200
2.286	28600
2.54	30300
2.794	32000
3.048	33500
3.302	34700
3.556	35700
3.81	36600

Deformación	Resistencia (Mpa)
0	0
0.004745	37.22122952
0.00949001	89.00728798
0.01423501	152.1215467
0.01898001	210.3808625
0.02372501	283.2050072
0.02847002	333.3727514
0.03321502	377.0672382
0.03796002	423.9983537
0.04270503	462.8378975
0.04745003	490.3492411
0.05219503	517.8605846
0.05694003	542.1352995
0.06168504	561.5550715
0.06643004	577.7382147
0.07117504	592.3030437

Tabla 7 Valores obtenidos del ensayo de tensión probeta 2.

Aquí podemos apreciar que el indicador de carátula tuvo una menor cantidad de puntos de movimiento o que no recorrió tanto como en el anterior, también se puede notar que el diámetro y la longitud final no tuvieron cambios significativos, y que la carga fue menor que la de la anterior probeta.

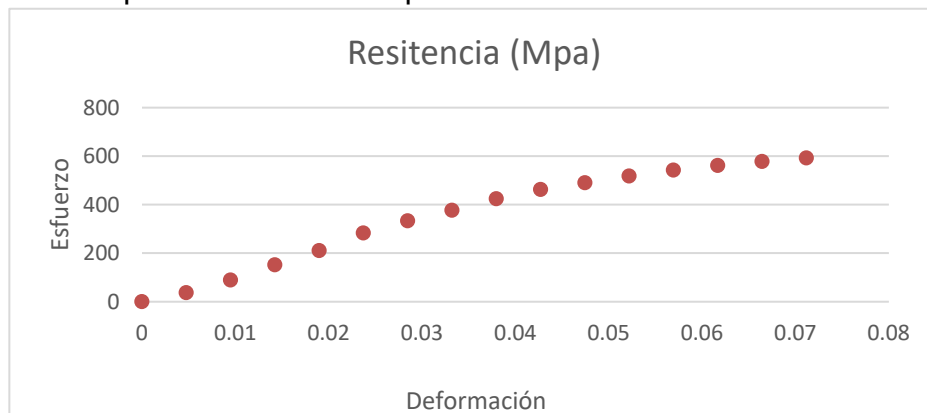


Figura 72 grafico esfuerzo deformación de la probeta número 2.

En la gráfica podemos apreciar una curva más continua y más parecida a una de esfuerzo-deformación, el material se comportó de una manera un poco más dúctil que la primera probeta aunque soporto menos y no desarrollo un cuello como lo podemos ver en la siguiente imagen.



*Figura 73 probeta número 2 después del ensayo de tensión.*

En la figura 65 podemos observar como en la parte superior se ve la grieta que se formó al romperse la probeta, esto nos dice que no alcanzo a deformarse, simplemente se rompió al ser sometida a una carga.

Resistencia a la fluencia: 390 Mpa

Resistencia a la tensión: 600 Mpa

Ductilidad: Alargamiento: 2%

Red de área: 3%

#### 4.4.3 Probeta 3 Recocida.

Longitud Inicial (mm)	53.3	Longitud Final	68.24
Diámetro Inicial	8.83	Diámetro Final	6.28
Área Inicial	61.2366309	Área Final	30.97484693

Alargamiento (mm)	Carga (N)
0	0
0.254	1300
0.508	4600
0.762	8500
1.016	11300
1.27	12500
1.524	12600
1.778	13700
2.032	14900
2.286	15700
2.54	16400
2.794	17300
3.048	18000
3.302	18800
3.556	19200
3.81	19700
4.064	19900
4.318	20400
4.572	20900
4.826	21400
5.08	21700
5.334	21800
5.588	22000
5.842	22200
6.096	22300
6.35	22400
6.604	22400
6.858	22500
7.112	22700
7.366	22600
7.62	22700
7.874	22600
8.128	22700
8.382	22700

Deformación	Resistencia (Mpa)
0.0000000	0.0000000
0.0047655	21.2291235
0.0095310	75.1184370
0.0142964	138.8058076
0.0190619	184.5300736
0.0238274	204.1261876
0.0285929	205.7591971
0.0333583	223.7223016
0.0381238	243.3184156
0.0428893	256.3824916
0.0476548	267.8135581
0.0524203	282.5106437
0.0571857	293.9417102
0.0619512	307.0057862
0.0667167	313.5378242
0.0714822	321.7028717
0.0762477	324.9688907
0.0810131	333.1339382
0.0857786	341.2989857
0.0905441	349.4640332
0.0953096	354.3630617
0.1000750	355.9960712
0.1048405	359.2620902
0.1096060	362.5281092
0.1143715	364.1611187
0.1191370	365.7941282
0.1239024	365.7941282
0.1286679	367.4271377
0.1334334	370.6931567
0.1381989	369.0601472
0.1429644	370.6931567
0.1477298	369.0601472
0.1524953	370.6931567
0.1572608	370.6931567

8.636	22600	0.1620263	369.0601472
8.89	22600	0.1667917	369.0601472
9.144	22100	0.1715572	360.8950997
9.398	22300	0.1763227	364.1611187
9.652	22200	0.1810882	362.5281092
9.906	21900	0.1858537	357.6290807
10.16	21800	0.1906191	355.9960712
10.414	21400	0.1953846	349.4640332
10.668	20800	0.2001501	339.6659762
10.922	21200	0.2049156	346.1980142
11.176	20700	0.2096811	338.0329667
11.43	20000	0.2144465	326.6019002
11.684	19600	0.2192120	320.0698622
11.938	19100	0.2239775	311.9048147
12.192	18400	0.2287430	300.4737482
12.446	17900	0.2335084	292.3087007
12.7	17000	0.2382739	277.6116152

Tabla 8 Valores obtenidos del ensayo de tensión probeta 3.

En este caso podemos observar que hay más datos dentro, esto es debido a que el material se volvió más dúctil, a diferencia de las anteriores esta probeta si desarrollo un cuello, en la lista de alargamiento y carga, al final se puede observar cómo los números fueron bajando esto se debe a que una vez alcanzado el cuello el material no se opone a la resistencia por lo tanto cede para después fracturarse.

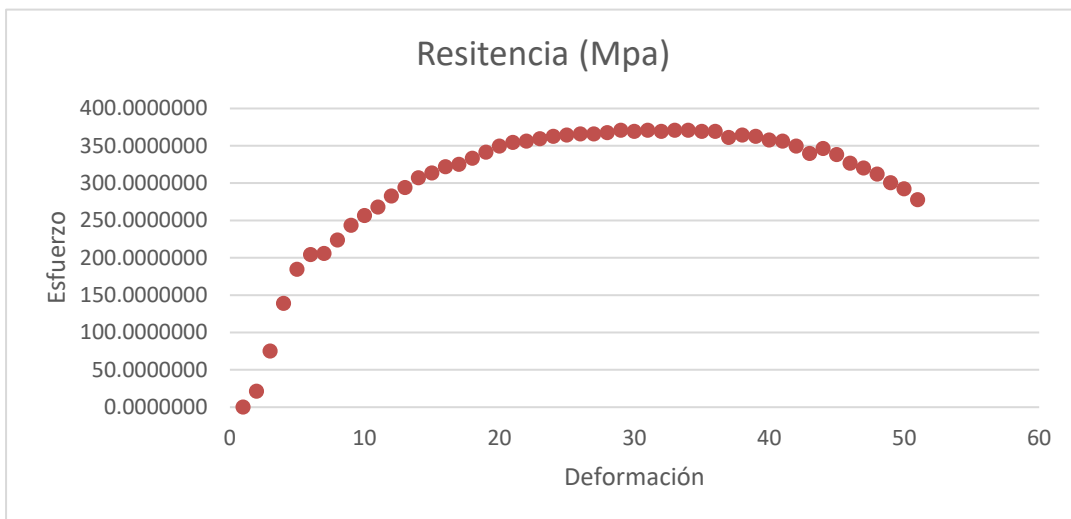


Figura 74 Diagrama esfuerzo deformacion de la probeta numero 3.



Figura 75 Probeta número 3 después del ensayo de tensión.

En la figura 67 se puede apreciar el cuello que se generó de estirar la probeta número 3, esto se debe a que es más dúctil, pero no tanto como para general un cuello mucho más alargado.

En la figura 66 se puede observar el comportamiento de la probeta, en el diagrama esfuerzo-deformación, este se parece más a un diagrama esfuerzo deformación común a diferencia de los anteriores dos.

Resistencia a la fluencia: 200 Mpa

Resistencia a la tensión: 370 Mpa

Ductilidad: Alargamiento: 28%

Reducción de área: 49%

#### 4.4.4 Probeta 4 enfriado a 350°C y horno abierto.

Longitud Inicial (mm)	62.44	Longitud Final (mm)	65.72
Diámetro Inicial (mm)	8.78	Diámetro Final (mm)	7.35
Área Inicial (mm <sup>2</sup> )	60.5450878	Área Final (mm <sup>2</sup> )	42.42917228

Alargamiento (mm)	Carga (N)
0	0
0.254	2200
0.508	5700
0.762	9100
1.016	13100
1.27	17000
1.524	20000
1.778	22700
2.032	24700
2.286	26200
2.54	27600
2.794	28500
3.048	29600
3.302	30100
3.556	30800
3.81	31400
4.064	31600
4.318	32300
4.572	32400
4.826	32500
5.08	32500
5.334	32800
5.588	32900
5.842	32600
6.096	33000
6.35	32900
6.604	32700
6.858	32100
7.112	32200
7.366	31300
7.62	31000
7.874	30800

Deformación	Resistencia (Mpa)
0	0
0.004067905	36.33655645
0.00813581	94.14471444
0.012203716	150.3012108
0.016271621	216.3676771
0.020339526	280.7824817
0.024407431	330.3323314
0.028475336	374.9271961
0.032543242	407.9604293
0.036611147	432.7353541
0.040679052	455.8586173
0.044746957	470.7235722
0.048814862	488.8918504
0.052882767	497.1501587
0.056950673	508.7117903
0.061018578	518.6217603
0.065086483	521.9250836
0.069154388	533.4867152
0.073222293	535.1383768
0.077290199	536.7900385
0.081358104	536.7900385
0.085426009	541.7450235
0.089493914	543.3966851
0.093561819	538.4417002
0.097629725	545.0483468
0.10169763	543.3966851
0.105765535	540.0933618
0.10983344	530.1833919
0.113901345	531.8350535
0.11796925	516.9700986
0.122037156	512.0151136
0.126105061	508.7117903

Tabla 9 valores obtenidos del ensayo de tensión probeta 4.

La probeta cuatro que fue enfriada a horno abierto demostró un gran desempeño en cuanto al ensayo de tensión se refiere, esta probeta soportó una buena cantidad de carga pero se deformó muy poco, aunque el cuello que hizo se nota poco quiere decir que su ductilidad si aumento en un buen porcentaje por lo que esta probeta bajo otros tratamientos podría adquirir otras propiedades que la puedan hacer ligeramente más elástica.

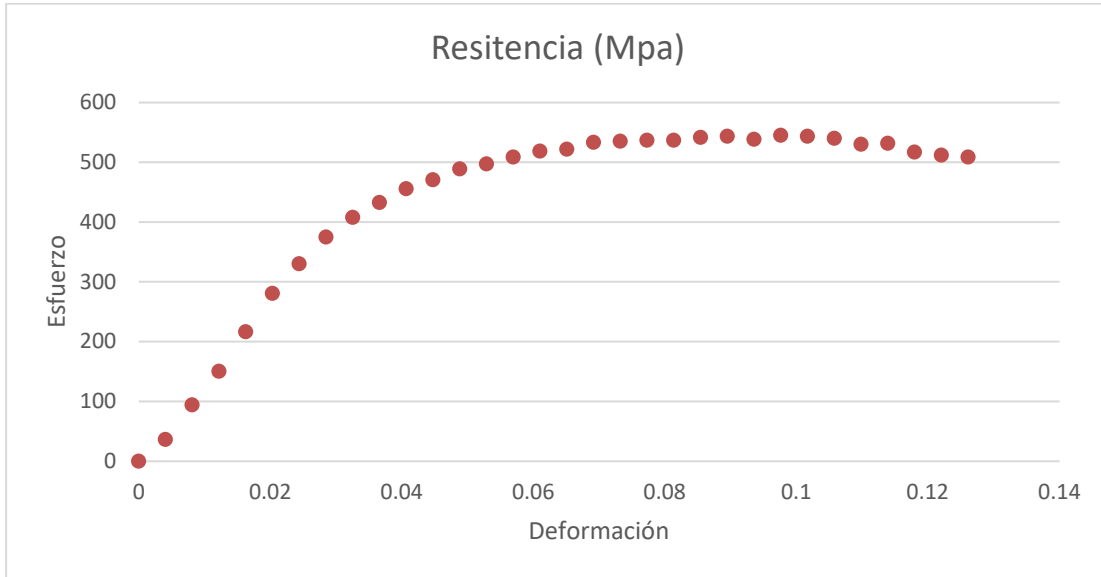


Figura 76 diagrama esfuerzo deformación de la probeta número 4.

En esta curva se puede observar como el material se deforma un poco de forma gradual al aumentar la carga, para posteriormente fracturarse una vez alcanzado su último esfuerzo.



Figura 77 Probeta número 4 después del ensayo de tensión.

Se puede ver en la figura 69 como se formó un pequeño cuello en la parte superior de la probeta, así como se aprecia la fractura en medio de este cuello.

Resistencia a la fluencia: 290 Mpa

Resistencia a la tensión: 550 Mpa

Ductilidad: Alargamiento: 5%

Red de área: 30%

#### 4.4.5 Probeta 5 Original sin tratamiento.

Longitud inicial:	51.4	Longitud final:	58.84
Diámetro inicial:	6.33	Diámetro final:	4.54
Área inicial:	31.4700405	Área final:	16.18831278

Alargamiento (mm)	Carga (N)
0	0
0.254	1900
0.508	5800
0.762	8300
1.016	10800
1.27	12400
1.524	13300
1.778	13900
2.032	14300
2.286	14600
2.54	14900
2.794	15100
3.048	15100
3.302	15300
3.556	15400
3.81	15300
4.064	15300
4.318	15200
4.572	15000
4.826	14800
5.08	14500
5.334	14200
5.588	13800
5.842	13200
6.096	12600
6.35	11900
6.604	11700

Deformación	Resistencia (Mpa)
0	0
0.004941634	60.37488264
0.009883268	184.3022733
0.014824903	263.7429084
0.019766537	343.1835434
0.024708171	394.0255499
0.029649805	422.6241785
0.03459144	441.6899309
0.039533074	454.4004325
0.044474708	463.9333087
0.049416342	473.4661849
0.054357977	479.8214357
0.059299611	479.8214357
0.064241245	486.1766865
0.069182879	489.3543119
0.074124514	486.1766865
0.079066148	486.1766865
0.084007782	482.9990611
0.088949416	476.6438103
0.093891051	470.2885595
0.098832685	460.7556833
0.103774319	451.2228071
0.108715953	438.5123055
0.113657588	419.4465531
0.118599222	400.3808007
0.123540856	378.1374228
0.12848249	371.782172

Tabla 10 Valores obtenidos del ensayo de tensión probeta 5.

Esta probeta se mantuvo intacta en cuanto a tratamiento térmico se refiere, existe la posibilidad de que la carga que soporto fuera más baja, esto debido al diámetro que tiene, en comparación con las demás probetas, también su ductilidad es buena propia del material sin tratar es apropiado decir que es un material con buenas propiedades y capaz de adquirir mejores valores de estas propiedades.

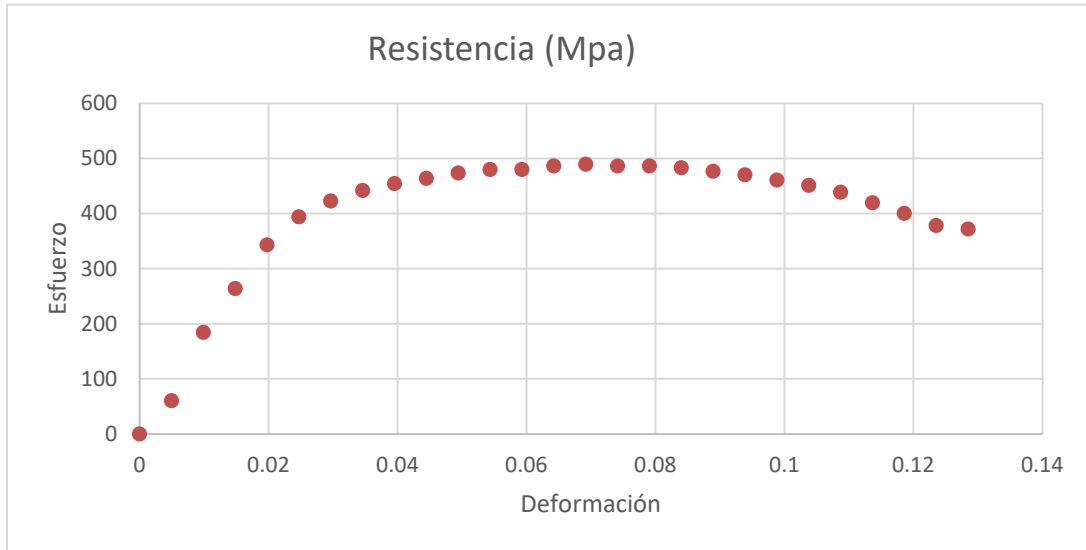


Figura 78 Diagrama esfuerzo deformación de la probeta número 5.

El diagrama nos explica que esta probeta tiene una buena resistencia a la tensión, que posee una buena elasticidad, podemos observar cómo al final de la gráfica los números del esfuerzo van disminuyendo de manera gradual en cantidades pequeñas, esto es lo que nos permite reconocer que hace cuello.



Figura 79 Probeta numero 5 despues del ensayo de tensión.

En la figura 71 se puede observar cómo se formó el cuello de la probeta, la reducción de la sección es notable.

Resistencia a la fluencia: 290 Mpa

Resistencia a la tensión: 550 Mpa

Ductilidad: Alargamiento: 5%

Red de área: 30%

#### 4.4.6 Probeta 6 Templado en Agua.

Longitud Inicial (mm)	50	Longitud Final (mm)	51.09
Diámetro Inicial (mm)	9.3	Diámetro Final (mm)	9.37
Área Inicial (mm <sup>2</sup> )	67.92909	Área Final (mm <sup>2</sup> )	68.955524

Alargamiento (mm)	Carga (N)
0	0
0.254	2300
0.508	5700
0.762	9800
1.016	13700
1.27	18700
1.524	23200
1.778	27700
2.032	32100
2.286	37000
2.54	36300

Deformación	Resistencia (Mpa)
0	0
0.00508	33.85883863
0.01016	83.91103486
0.01524	144.268095
0.02032	201.6809083
0.0254	275.2870793
0.03048	341.5326331
0.03556	407.7781869
0.04064	472.5516174
0.04572	544.6856649
0.0508	534.3808009

Tabla 11 Valores obtenidos del ensayo de tensión probeta 6.

Esta tabla es la más pequeña de todas, contiene menos valores que todas las anteriormente mostradas, es porque la probeta se fracturó con menor esfuerzo, esta probeta fue enfriada de la manera más rápida, es debido a eso que su ductilidad bajo pero su resistencia aumento, aunque no como la primera probeta, que, si comparamos ambas, tuvieron enfriamientos rápidos pero el comportamiento de cada una fue diferente ante el ensayo de tensión.

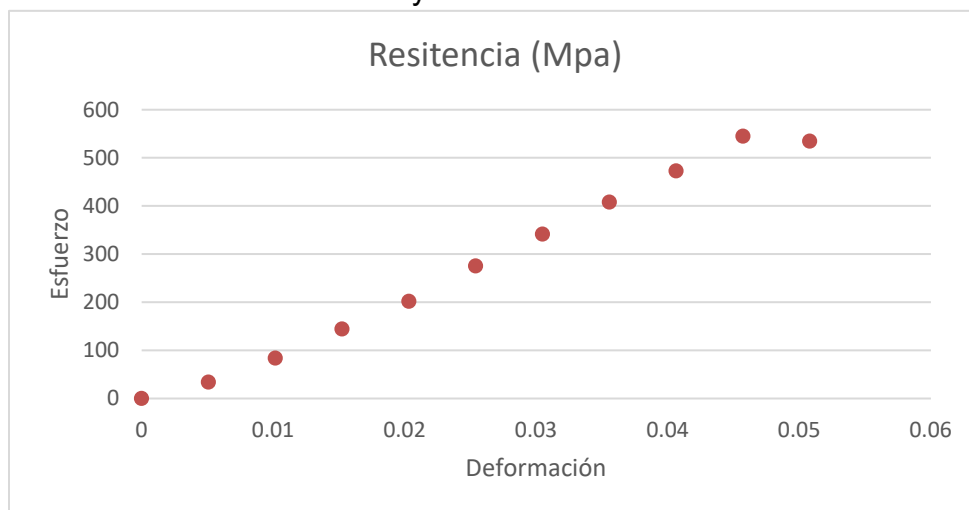


Figura 80 Diagrama esfuerzo deformación de la probeta numero 6.

Podemos observar en la gráfica el crecimiento y de una manera repentina sucede la fractura, al igual que nuestra probeta número 1 esto sucedió debido a que aumento su dureza y disminuyo su ductilidad, pero en este caso soporto menor cantidad de esfuerzo que la primera probeta, es posible que el temple en agua no sea el correcto para este acero, por eso los proveedores hacían énfasis en que el temple debía ser en aceite.



Se puede observar la fractura en la parte superior de la probeta, como se dijo anteriormente, no hizo cuello, no se deformato, solo exploto en su punto debido al esfuerzo.

Resistencia a la fluencia: 370 Mpa

Resistencia a la tensión: 530 Mpa

Ductilidad: Alargamiento: 2%

Red de área: 2%.

*Figura 81 Probeta numero 6 después del ensayo de tensión.*



*Figura 82 Probetas despues del ensayo de tension.*

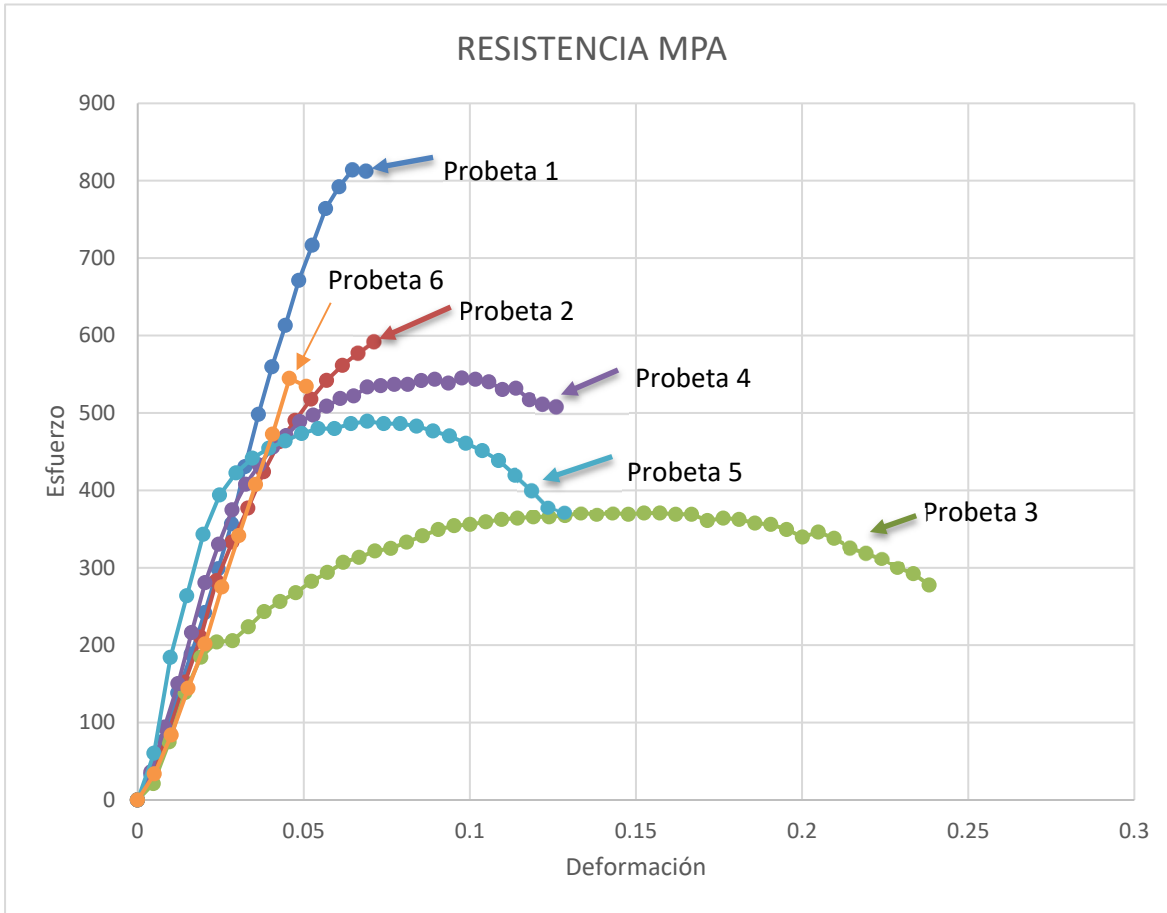


Figura 83 Diagrama de Esfuerzo Deformación comparativo.

En el diagrama comparativo podemos observar como todas las probetas comienzan siguiendo la misma inclinación, esto es porque todas tienen las propiedades base del material 4140, se puede observar también que dependiendo del tratamiento térmico, como podría ser comparando el recocido de la probeta 3 con el templado de la probeta 1 al aumentar la resistencia, disminuye la ductilidad, si nos fijamos en la probeta 6 es la que menos ductilidad tiene pero es una de que las que tienen mayor resistencia esto nos dice que el tratamiento térmico si modifico sus propiedades aunque no de una forma muy adecuada, con respecto a la probeta original podemos observar que soporto una buena cantidad de esfuerzo a pesar de tener la sección más pequeña, hablando de las probetas 2 y 4, podemos observar que en efecto puede existir un tratamiento térmico que logre balancear las propiedades del material dependiendo de cuál sea la función para la que estas piezas sean hechas.

## **Conclusiones.**

Los tratamientos térmicos isotérmicos nos ayudan a cambiar las propiedades de los materiales, estos deben planearse y trazarse para cada tipo de material.

Los planes que tengamos de un tratamiento térmico isotérmico deben trazarse en función de qué propiedades queremos destacar del material.

Al aumentar la dureza de un material, su ductilidad baja y viceversa.

La velocidad del enfriamiento de una pieza influye en las propiedades que esta adquiere, por lo mismo es de vital importancia adecuar un enfriamiento correcto dependiendo de que queremos modificar en el material.

La temperatura a la cual se debe calentar un material para que logremos cambiar las propiedades de este siempre debe ser mayor a la temperatura de transformación del material.

La facilidad con la que se maquinará un material dependerá directamente de la dureza de este material.

La temperatura de templado es la que da la dureza final.

El diagrama TTT nos ayuda a enfriar y escoger la dureza además del tiempo que tardara en obtener dicha transformación.

Es vital tener el diagrama TTT del material que utilicemos, para así obtener teóricamente las durezas.

## Bibliografía de citas.

- Askeland, D. R., Fulay, P. P., & Wright, W. J. (2011). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. Boston: Cengage Learning.
- Centeno, S. (11 de marzo de 2020). *Youtube*. Obtenido de Salvador FI facultad de ingeniería : <https://bit.ly/2xuvkOM>
- Cía. General de Aceros. (Enero de 2024). *Cía. General de Aceros*. Obtenido de Cía. General de Aceros.: <https://www.cga.com.co/producto/acero-aisi-sae-4140/>
- Deingenierias.com. (24 de Julio de 2019). *Deingenierias*. Obtenido de Deingenierias: <https://deingenierias.com/el-acero/diagrama-esfuerzo-deformacion/>
- eonsi INDUSTRIAL DEVELOPMENT. (05 de 09 de 2022). *eonsi INDUSTRIAL DEVELOPMENT*. Obtenido de eonsi INDUSTRIAL DEVELOPMENT: <https://eonsi.eu/torno/#:~:text=Un%20torno%20est%C3%A1%20compuesto%20principalmente,por%20hierro%20fundido%20o%20cola>
- García Méndez, R. E. (22 de Febrero de 2022). Tension de materiales dúctiles y frágiles. *Tension de materiales dúctiles y frágiles*. Guatemala, Guatemala, Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Güemes Gordo, A., & Martín Piris, N. (2012). *Ciencia de materiales para ingenieros*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN .
- Kucher, A. (1987). *Tecnología de metales*. Moscú: Mir.
- Pérez Patiño, J. A. (29 de Marzo de 1996). Tratamientos termicos de los aceros. *Tratamientos termicos de los aceros*. San Nicolas de los Garza, Nuevo León , México : Universidad Autónoma de Nuevo León .
- Rodríguez , A. (31 de Agosto de 2022). *¿Qué es la clasificación SAE y cómo interpretarla?* Obtenido de Ulbrinox: <https://www.ulbrinox.com.mx/blog/que-es-la-clasificacion-sae-y-como-interpretarla>
- Serviacero especiales. (2024). Hoja Técnica acero AISI-4140. *Hoja Técnica*. Puebla de Zaragoza, Puebla, México.
- Shackelford, J. F. (2005). *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*. Madrid: Pearson Education.

## **Bibliografía.**

Villa Escudero, H. (2017). Aceros para Piezas y Herramientas de Corte [Revisión de Aceros para Piezas y Herramientas de Corte].

Güemes Gordo, A., & Martín Piris, N. (2012). Ciencia de Materiales para Ingenieros (Pearson Educación, Ed.; 1st ed.) [Revisión de Ciencia de Materiales para Ingenieros].

Askeland, D. R., Fulay, P. P., & Wright, W. J. (n.d.). Ciencia e ingeniería de Materiales (CENGAGE Learning, Ed.; J. Hernández Lanto & J. H. Romo Muñoz, Trans.; Sexta Edición) [Revision de Ciencia e ingeniería de Materiales]. (Original work published 2012).

Smith, F, Structure and Properties of Engineering Alloys, Mc Graw Hill.

Alcántara Alza, V. (2022). Fundiciones de Hierro y Sus Tratamientos Térmicos [Online Fundiciones de Hierro y Sus Tratamientos Térmicos].

Isunza Bustos, A. (2016). Reciclaje de Desperdicio de Aluminio Para la Fundición de Probetas de Tensión [Tesis Profesional Reciclaje de Desperdicio de Aluminio Para la Fundición de Probetas de Tensión].

Shackelford, J. F. (n.d.). Introducción a la Ciencia de Materiales para Ingenieros (Pearson Prentice Hall, Ed.; A. Güemes & N. Martín, Trans.; Sexta Edición) [Review of Introducción a la Ciencia de Materiales para Ingenieros]. (Original work published 2005).

Hernández Brito, M. (2008). Simulación del proceso de soldadura SMAW en piezas de acero al carbono media aleación (AISI 4140) [Review of Simulación del proceso de soldadura SMAW en piezas de acero al carbono media aleación (AISI 4140)]. Corporación Mexicana de Investigación en Materiales.

Mott, R. L. (n.d.). Resistencia de Materiales (Pearson Educación, Ed.; R. Navarro Salas, Trans.; Quinta Edición) [Review of Resistencia de Materiales]. University of Dayton. (Original work published 2009).

Kucher, A. (n.d.). Tecnología de Metales (MIR MOSCÚ, Ed.; B. A. Mirchevski, Trans.) [Review of Tecnología de Metales]. (Original work published 1987).

Pérez Patiño, J. A. (1996). Tratamientos Térmicos de los Aceros (Universidad Autónoma de Nuevo León, Ed.) [Tesis Profesional Tratamientos Térmicos de los Aceros].

Acero AISI / SAE 4140. (n.d.). Cia. General de Aceros S.A. Retrieved March 25, 2024, from <https://www.cga.com.co/producto/acero-aisi-sae-4140/#:~:text=SAE%204140%20es%20un%20acero>

SAE 4140. (n.d.). GGD Metals. <https://www.ggdmetals.com.br/es/produto/sae-4140/>

Mundial, M. (n.d.). SAE AISI Acero 4140 Ficha Técnica, Propiedades, Dureza, Características, Tratamiento Térmico. Material Mundial Grades. Retrieved March 25, 2024, from <https://www.materialmundial.com/sae-aisi-acero-4140-ficha-tecnica-propiedades/>

Aceromafe, R. (2022, January 20). Acero 4140: características y usos. Aceromafe. <https://www.aceromafe.com/acero-4140-caracteristicas/>

ferrocortes. (n.d.). Acero 4140 - Ferrocortes. <https://www.ferrocortes.com.co/acero-4140/>

Estructuras Cristalinas. (n.d.). Estructuras Cristalinas. <https://estructurascristalinas.weebly.com/>