

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA MECÁNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:  
INGENIEROS MECÁNICOS**

**TEMA:  
VALIDACIÓN DE LA VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES  
MECÁNICAS A LA TORSIÓN DEL ACERO AISI/SAE 4140 TRATADO  
TERMICAMENTE POR TEMPLE A 830°C - 860°C Y REVENIDO A 500°C.**

**AUTORES:  
JORGE WILLY NUÑEZ SARAVIA  
ALEX DARIO YANGUISELA LOACHAMIN**

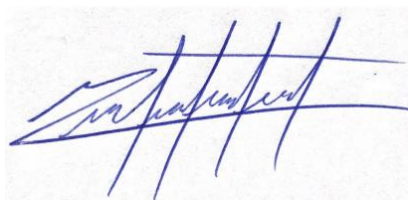
**TUTORA:  
NANCY VERÓNICA MORENO DIAGO**

**Quito, septiembre del 2020**

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Jorge Willy Nuñez Saravia y Alex Dario Yanguisela Loachamin con documentos de identificación N° 1723678510 y N° 1721491445, respectivamente, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: “VALIDACIÓN DE LA VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS A LA TORSIÓN DEL ACERO AISI/SAE 4140 TRATADO TERMICAMENTE POR TEMPLE A 830 °C - 860 °C Y REVENIDO A 500 °C.”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingenieros Mecánicos, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores, nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



---

Jorge Willy Nuñez Saravia  
C.I. 1723678510



---

Alex Dario Yanguisela Loachamin  
C.I. 1721491445

Quito, septiembre del 2020.

## **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR**

Yo, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Proyecto Técnico: “VALIDACIÓN DE LA VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS A LA TORSIÓN DEL ACERO AISI/SAE 4140 TRATADO TERMICAMENTE POR TEMPLE A 830 °C - 860 °C Y REVENIDO A 500 °C.”, realizado por Jorge Willy Nuñez Saravia y Alex Dario Yanguisela Loachamin, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, septiembre del 2020.



---

Nancy Verónica Moreno Diago  
C.I. 1758355307

## **DEDICATORIAS**

A mis padres, Jorge y Mery, con mucho cariño les dedico todo el esfuerzo, entrega y consagración a la realización del presente trabajo... Gracias por todo el apoyo brindado, sus consejos y enseñanzas para poder ser cada día un mejor ser humano, lleno de valores y virtudes... Gracias por toda la motivación y fuerzas transmitidas, no solo a lo largo de mi carrera, sino también durante toda mi vida. A mis hermanos, Martín y Gissela, quienes siempre estuvieron presentes durante los buenos y malos momentos, brindándome su apoyo. A mis familiares, amigos cercanos y demás personas por aportar de una u otra manera a mi formación profesional.

*Jorge Nuñez*

Primeramente, a Dios por fortalecerme día a día para no claudicar ante todas las adversidades que se presentaron en el camino que me llevaba a cumplir las metas y sueños que me planteé para mi vida. A mi padre Patricio quien, con su ejemplo de superación, lucha incansable supo encaminar mi vida hacia la superación; a mi madre Liliana quien ha sido siempre el pilar fundamental de mi vida porque con su amor incondicional nunca me dejó derrumbar; a mis hermanos Valeria y David quienes son mi fortaleza porque con su apoyo y cariño siempre fortalecieron mis deseos de progreso. A mi tío Patricio quien aun estando lejos, con sus palabras de aliento, nunca me dejó solo en los momentos difíciles.

A toda mi familia que estuvo presente en todas las etapas de mi desarrollo personal, con un consejo, con una palabra de aliento para seguir adelante con la meta de formarme como un buen profesional y una buena persona.

*Alex Yanguisela*

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, a Dios por darnos la oportunidad de culminar nuestros estudios con salud y vida. Un agradecimiento muy especial a las autoridades y docentes de la Universidad Politécnica Salesiana, quienes con sus enseñanzas y consejos han sabido formarnos como buenos profesionales para contribuir positivamente a nuestra sociedad. A nuestra directora de proyecto técnico, MsC. Nancy Veronica Moreno Diago, quien con su incondicional apoyo nos ayudó a llevar a cabo el presente trabajo de la mejor manera.

*Jorge y Alex*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR .....	i
DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR .....	ii
DEDICATORIAS.....	iii
AGRADECIMIENTOS .....	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	v
RESUMEN .....	xiii
ABSTRACT .....	xiv
INTRODUCCIÓN.....	xv
CAPÍTULO I.....	1
MARCO TEÓRICO .....	1
1.1    El acero.....	1
1.2    Estructura que posee el acero .....	1
1.3    Acero AISI/SAE 4140.....	2
1.3.1    Características del acero AISI/SAE 4140.....	2
1.3.2    Composición química del acero ASI/SAE 4140.....	3
1.3.3    Elementos aleantes en el acero AISI/SAE 4140.....	3
1.3.4    Aplicación de acero AISI/SAE 4140 .....	4
1.4    Diagrama Hierro - Carbono .....	5
1.5    Tratamientos Térmicos.....	7
1.5.1    Temple .....	8
1.5.2    Revenido .....	11
1.6    Torsión .....	13
1.6.1    Ángulo de Torsión .....	14
1.6.2    Esfuerzo cortante .....	14
1.6.3    Concentración de esfuerzos .....	15
1.6.4    Deformación unitaria por cortante .....	15

1.6.5	Diagrama esfuerzo – deformación.....	16
1.6.6	Ley de Hooke.....	17
1.6.7	Módulo de rigidez.....	17
1.6.8	Módulo tangente .....	17
1.6.9	Relación de Poisson .....	17
1.6.10	Módulo de Compresibilidad o Módulo de Bulk.....	18
1.7	Descripción del desarrollo experimental.....	18
1.8	Método de prueba experimental.....	18
1.9	Equipos e instrumentos .....	19
1.9.1	Especímenes para ensayos de torsión .....	19
1.9.2	Máquina de prueba de ensayos de torsión experimentales.....	19
1.10	Ensayo de torsión en estado de suministro .....	20
1.11	Ensayo de torsión con TT de temple a 830 °C - 860 °C y revenido a 500 °C .....	20
CAPÍTULO II.....		21
MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS .....		21
1.12	Tipos de análisis.....	22
1.12.1	<i>Análisis dinámico o estático</i> .....	22
1.12.2	<i>Análisis lineal o no lineal</i> .....	22
1.12.3	<i>Tipo de estructura</i> .....	22
1.13	Nociones básicas de MEF .....	23
1.14	Análisis por elementos finitos del comportamiento a torsión de las probetas de estudio.....	23
1.15	Mallado .....	23
1.16	Parámetros de mallado .....	24
1.17	Calidad de malla.....	25
1.18	Calidad geométrica de los elementos de una malla .....	25
CAPÍTULO III .....		27

DESARROLLO DE ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITOS .....	27
1.19    Análisis por elementos finitos de la probeta de suministro AISI4140. 27	
1.19.1    Generación del material para el estado de suministro .....	27
1.19.2    Configuración de la geometría.....	28
1.19.3    Sistemas de coordenadas .....	29
1.19.4    Condiciones de frontera.....	30
1.19.5    Parámetros del mallado.....	31
1.19.6    Calidad del mallado .....	32
1.19.7    Resultados de la simulación de la probeta en estado de suministro AISI 4140	33
1.19.8    Parametrización Esfuerzo cortante Vs. Desplazamiento Angular	34
1.20    Análisis por elementos finitos de probetas con TT de temple a 830°C y revenido a 500 °C .....	36
1.20.1    Generación del material .....	36
1.20.2    Condiciones de frontera.....	37
1.20.3    Generación del mallado .....	39
1.20.4    Resultados de la simulación de probeta con TT de temple a 830 °C, revenido a 500 °C, en el acero AISI/SAE 4140 .....	41
1.21    Análisis por elementos finitos de probeta con temple 860°C y revenido 500 °C	43
1.21.1    Implementación del material .....	43
1.21.2    Generación del mallado .....	44
1.21.3    Condiciones de frontera.....	44
1.21.4    Resultados de la simulación de la probeta AISI/SAE 4140 con tratamiento térmico a 860 °C y un revenido 500 °C.....	45
1.21.5    Parametrización Esfuerzo cortante Vs. Desplazamiento Angular	46
CAPÍTULO IV .....	48
ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS .....	48



1.22	Comparación de fracturas experimentales vs simulación, de probetas en estado de suministro.....	49
1.23	Resultados de probetas con TT templadas a 830 °C y con revenido de 500 °C	50
1.24	Comparación de fracturas experimentales vs simulación, de probetas con temple a 830 °C y revenido a 500°C .....	51
1.25	Resultados de especímenes con temple 860°C - revenido 500°C .....	52
1.26	Comparación de fracturas experimentales vs simulación, temple 860 °C , revenido 500 °C.....	53
1.27	Comparación simplificada de resultados .....	55
1.28	Análisis de Error Porcentual .....	56
	CONCLUSIONES.....	57
	RECOMENDACIONES .....	59
	BIBLIOGRAFÍA .....	60
	ANEXOS.....	

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Fotomicrografía de hierro puro [3]. .....	1
<b>Figura 2.</b> Correspondencia de los aceros de segunda generación. [10].....	4
<b>Figura 3.</b> Diagrama Hierro – Carbono [12]. .....	5
<b>Figura 4.</b> Diagrama de fase Hierro – Carbono [15].....	6
<b>Figura 5.</b> Diagrama Hierro – Carbono[18].....	7
<b>Figura 6.</b> Ciclo térmico en un T.T de Temple [13]. .....	9
<b>Figura 7.</b> Gráfico Típico de Templabilidad [16]. .....	10
<b>Figura 8.</b> Curvas de templabilidad para cinco aceros aleados con contenido de carbono al 0,4% [16]. .....	10
<b>Figura 9.</b> Ciclo Térmico utilizado en un T.T de Temple y Revenido [17].....	11
<b>Figura 10.</b> Etapas del revenido [2]. .....	12
<b>Figura 11.</b> Influencia del tiempo de revenido en la dureza [19].....	13
<b>Figura 12.</b> Representación de un Par de torsión [20]. .....	14
<b>Figura 13</b> Diagramas de esfuerzo-deformación de dos materiales dúctiles típicos [24]. .....	16
<b>Figura 14.</b> Medidas del espécimen para ensayos de torsión.....	19
<b>Figura 15.</b> Máquina para ensayo de torsión [25]. .....	19
<b>Figura 16.</b> Ensayo de torsión a probetas con tratamiento térmico [1].....	20
<b>Figura 17.</b> Estructura típica Formada por elementos Interconectados [26].....	21
<b>Figura 18.</b> Propiedades del material en estado de suministro. ....	27
<b>Figura 19.</b> Geometría de la probeta modelado en ANSYS SpaceClaim. ....	29
<b>Figura 20.</b> Sistemas de coordenadas referenciales de la geometría de la probeta. ....	29
<b>Figura 21.</b> Condiciones de frontera en la geometría. ....	30
<b>Figura 22.</b> Condiciones para la configuración del análisis. ....	30
<b>Figura 23.</b> Parámetros de la generación del mallado.....	31
<b>Figura 24.</b> Mallado aplicado a la geometría. ....	31
<b>Figura 25.</b> Valores de calidad del mallado. ....	32
<b>Figura 26.</b> Convergencia del mallado.....	32
<b>Figura 27.</b> Valor del esfuerzo cortante máximo en probeta de suministro.....	33
<b>Figura 28.</b> Gráfica Esfuerzo cortante vs Tiempo, en probeta de suministro. ....	33
<b>Figura 29.</b> Probetas fracturadas en ensayo de torsión experimentalmente [1]...	34

<b>Figura 30.</b> Resultados simulaciones de material en estado de suministro.....	35
<b>Figura 31.</b> Propiedades del material con temple a 830° C y revenido 500° C....	37
<b>Figura 32.</b> Condiciones de frontera de la geometría con temple a 830° C, revenido 500° C. ....	38
<b>Figura 33.</b> Condiciones para el análisis del material con temple a 830° C, revenido 500° C. ....	38
<b>Figura 34.</b> Parámetros de generación del mallado, material con temple a 830° C y revenido 500° C. ....	39
<b>Figura 35.</b> Mallado aplicado a la geometría del material con temple a 830° C y revenido 500° C. ....	40
<b>Figura 36.</b> Convergencia del mallado de la geometría con temple a 830° C, revenido 500° C. ....	40
<b>Figura 37.</b> Valor del esfuerzo cortante promedio en probeta con temple a 830° C, revenido 500° C. ....	41
<b>Figura 38.</b> Gráfica Esfuerzo cortante vs Tiempo en probeta con temple a 830° C, revenido 500° C. ....	41
<b>Figura 39.</b> Propiedades del material con temple a 860° C y revenido 500° C....	43
<b>Figura 40.</b> Condiciones para el análisis del material con temple a 860° C, revenido 500° C. ....	45
<b>Figura 41.</b> Valor del esfuerzo cortante máximo en probeta con temple a 860° C, revenido 500° C. ....	45
<b>Figura 42.</b> Gráfica Esfuerzo cortante vs Tiempo en probeta con temple a 860° C, revenido 500° C. ....	46
<b>Figura 43.</b> Probetas en estado de suministro fracturadas, ensayo de torsión experimentalmente [1].....	49
<b>Figura 44.</b> Fractura y Valor del esfuerzo cortante máximo (876,09 MPa) en probeta de suministro. ....	49
<b>Figura 45.</b> Probetas con temple a 830 °C y revenido a 500 °C, fracturadas en ensayo de torsión experimentalmente [1].....	51
<b>Figura 46.</b> Fractura y Valor del esfuerzo cortante máximo (1288,2 MPa) en probeta con temple a 830 °C y revenido a 500 °C. ....	52
<b>Figura 47.</b> Probetas con temple a 860 °C y revenido a 500 °C, fracturadas en ensayo de torsión experimentalmente [1].....	54

**Figura 48.** Fractura y Valor del esfuerzo cortante máximo (1277,9 MPa), en probeta con temple a 860° C, revenido 500° C..... 54

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Propiedades mecánicas del acero AISI/SAE 4140 [8] .....	2
<b>Tabla 2</b> Valores promedio en % de composición química[8] .....	3
<b>Tabla 3</b> Resultados de simulaciones de probetas en estado de suministro .....	36
<b>Tabla 4</b> Resultados de simulación con temple a 830 °C y revenido a 500 °C ....	42
<b>Tabla 5</b> Resultados de simulación con temple a 860 °C y revenido a 500 °C ....	47
<b>Tabla 6</b> Resultados experimentales estado de suministro .....	48
<b>Tabla 7</b> Resultados de simulación en estado de suministro.....	48
<b>Tabla 8</b> Resultados experimentales con temple a 830 °C y revenido a 500 °C ..	50
<b>Tabla 9</b> Resultados de simulación con temple a 830 °C y revenido a 500 °C ....	50
<b>Tabla 10</b> Resultados experimentales con temple a 860 °C y revenido a 500 °C	53
<b>Tabla 11</b> Resultados de simulación, con temple a 860 °C y revenido a 500 °C .	53
<b>Tabla 12</b> Recopilación de resultados experimentales.....	55
<b>Tabla 13</b> Recopilación de resultados obtenidos en simulación .....	55
<b>Tabla 14</b> Análisis del error porcentual de resultados generales .....	56

## RESUMEN

En el presente documento se lleva a efecto la comprobación de los resultados logrados en el laboratorio de Ciencia y Resistencia de los materiales, de ensayos de torsión realizados a probetas (ejes), del material acero AISI/SAE 4140, previamente templados a 830°C – 860°C y revenidos a 500°C, mediante simulaciones realizadas en el software Ansys. Para esto primero se define el ensayo de torsión en el software utilizado para ejes de material AISI/SAE 4140 según la normativa aplicada. Una vez definidos los parámetros necesarios para ingresar al software, se recopila los datos característicos del acero en estado de suministro para realizar la creación del material. Antes de iniciar un análisis por elementos finitos, es necesario configurar el material correspondiente al estudio designado. Las propiedades del material de mayor relevancia que intervienen dentro del ensayo son: módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson, densidad, coeficiente de expansión y conductividad térmica. También es necesario realizar la configuración de la geometría, para lo cual el programa cuenta con dos modeladores de diseño vinculados a la opción “Geometry”. La geometría fue generada a partir del modelador ANSYS SpaceClaim y presentada todas las dimensiones respectivas de una probeta para ensayos de torsión. Luego de realizada la geometría se procede a generar un mallado acorde a las características de la probeta. Una vez haya sido definido todos estos parámetros se procede a Simular el ensayo de torsión en el material acero 4140 en estado de suministro. Posteriormente se realiza las siguientes simulaciones de torsión teniendo en cuenta los parámetros que varían en el material debido a los tratamientos térmicos de temple a 830°C – 860°C y revenido a 500°C. Ya con los resultados de las simulaciones se puede constatar que se acercan considerablemente a los realizados experimentalmente tanto en el esfuerzo como en la deformación unitaria.

**Palabras claves:** Torsión, elementos finitos, simulación, análisis

## **ABSTRACT**

This document carries out the verification of the results achieved in the Laboratory of Science and Strength of materials, of torsion tests carried out on specimens (shafts), of the AISI / SAE 4140 steel material, previously tempered at 830°C - 860°C and tempered at 500°C, by means of simulations carried out in the Ansys software. For this, the torsion test is first defined in the software used for AISI / SAE 4140 material shafts according to the applied regulations. Once the necessary parameters have been defined to enter the software, the characteristic data of the steel in the state of supply is collected to create the material. Before starting a finite element analysis, you need to set up the material for the designated study. The most relevant material properties involved in the test are: modulus of elasticity, Poisson's ratio, density, coefficient of expansion and thermal conductivity. It is also necessary to configure the geometry, for which the program has two design modelers linked to the "Geometry" option. The geometry was generated from the ANSYS SpaceClaim modeler and presented all the respective dimensions of a specimen for torsional testing. After the geometry is made, a mesh is generated according to the characteristics of the specimen. Once all these parameters have been defined, we proceed to simulate the torsion test on the 4140 steel material in the delivery state. Subsequently, the following torsion simulations are carried out, taking into account the parameters that vary in the material due to the heat treatments of quenching at 830°C - 860°C and tempering at 500°C. With the results of the simulations, it can be seen that they are considerably close to those carried out experimentally both in stress and in unit strain.

**Keywords:** torsion, finite elements, simulation, analysis

## INTRODUCCIÓN

Dentro los materiales con mayor utilidad en el diseño y fabricación de maquinaria es el acero AISI/SAE 4140 que por sus características es de los que mayor demanda tienen dentro de la industria del país, a pesar de que existen una variedad de materiales con características similares que pueden satisfacer las diferentes necesidades, al no poseer una información adecuada ni completa del acero o de la explotación de sus propiedades en cuanto a calidad hace que su selección sea muy limitada [1].

En la industria es un acero muy útil en empresas en las cuales se emplean elementos mecánicos que se encuentran sometidos a esfuerzos combinados y cargas no muy altas, por lo que su utilización se ha visto diversificada y ampliada, para satisfacer las distintas demandas generadas por la empresa automotriz, en la extracción de crudo y la generación de energía. Claramente en la industria automovilística la selección del material es de una importancia relevante por lo que varios elementos requieren especificaciones y exigencias como mayor resistencia a la tensión y a la torsión, durabilidad y absorción de fuerzas de cohesión [1].

Dicho material ofrece propiedades muy utilizadas, pero es necesario aplicar un TT (tratamiento térmico), para que sus características sean más óptimas y obtener un mayor beneficio dependiendo de la aplicación a la cual será destinado.

El presente trabajo investigativo tomará a consideración la utilización del acero AISI/SAE 4140 del cual es necesario conocer sus propiedades, composición química y como variarán estas al aplicar un TT, validando datos de ensayos de torsión que fueron obtenidos experimentalmente citando el trabajo investigativo realizado en el laboratorio [2].

Para la validación de resultados se realizarán simulaciones con la ayuda del Método de los Elementos Finitos aplicado en el software ANSYS WorkBench, obteniendo resultados como el Esfuerzo cortante debido a la torsión y la deformación unitaria por cortante, los cuales serán analizados comparativamente con los resultados experimentales del trabajo investigativo anteriormente citado.



En el sector industrial existen compañías que utilizan el acero 4140 el cual pertenece al grupo de aceros de baja aleación, es un acero de medio carbono, fusionado con cromo y molibdeno, con una resistencia elevada a la torsión, al impacto y al desgaste, responde de manera excelente a todos los tratamientos térmicos, tiene un grado alto de templabilidad, ya que el Cromo proporciona gran penetración de dureza y Molibdeno le ayuda a dar uniformidad de dureza en toda pieza, muy ocupado para la fabricación de piezas medianas y grandes en donde se requiere de una alta dureza, buena resistencia a la tensión y torsión, como por ejemplo: ruedas dentadas, ejes, barras, pernos y tuercas que se encuentran soportando esfuerzos elevados requiriendo mayor resistencia a la torsión y a la vez podrían presentarse fallas al momento de ser utilizadas en su estado de suministro para sus diferentes aplicaciones.

Se ha visto adecuado realizar el análisis comparativo sobre las propiedades mecánicas a la torsión del material AISI/SAE 4140 de los datos experimentales vs los datos obtenidos con la ayuda del software ANSYS, debido a la falta de información detallada del mismo, para así disponer de información validada dentro de la industria local para la obtención de datos reales que ayuden a la correcta selección del material dependiendo de la aplicación, ya que el campo de acción del acero AISI/SAE 4140 es sumamente amplio en relación a piezas sometidas a torsión.

El objetivo general consiste en Validar la variación de las propiedades mecánicas a la torsión del acero AISI/SAE 4140 tratado térmicamente por temple a 830 °C - 860 °C y revenido a 500 °C.

Los objetivos específicos son:

- Definir el ensayo de torsión en el software de simulación utilizado para probetas de material AISI/SAE 4140 según normativa aplicada.
- Simular el ensayo de torsión para el acero AISI/SAE 4140 en estado de suministro.
- Simular el ensayo de torsión para el acero AISI/SAE 4140 después de aplicar un tratamiento térmico de temple y revenido.

- Analizar comparativamente mediante un método estadístico los datos obtenidos experimentalmente y los recabados en la simulación del ensayo de torsión para el acero AISI/SAE 4140.

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO

### 1.1 El acero

Se puede definir al acero como una aleación. Mientras el contenido de carbono en el material sea mayor la dureza se incrementará, en el estado endurecido; el porcentaje de C esta alrededor del 2.10%. [3]

El acero es un material que relativamente puede ser blando, dúctil que puede ser utilizado para diferentes campos de aplicación como partes de los automóviles, herramientas, entre otros, por lo que es necesario conocer sus propiedades, características y composición de esta manera se tendrá una selección del material adecuado.

Los aceros tienen como principal componente el carbono, la presencia de carbono en los aceros tiene un marcado efecto dentro de la selección de un tratamiento térmico aplicable en las distintas propiedades deseadas, así como en sus propiedades, el contenido de carbono es el método para clasificar los aceros de acuerdo a su composición en porcentaje. [4].

### 1.2 Estructura que posee el acero

Una fotomicrografía nos mostrará una imagen tomada con asistencia del microscopio, este es un microscopio metalúrgico conocido como metalográfico, en la figura 1 se puede apreciar una imagen de micrografía del hierro puro [4].



**Figura 1.** Fotomicrografía de hierro puro [4]

Un acero al medio carbono como es el caso del acero AISI/ SAE 4140 dentro de su composición tiene entre 0.30 – 0.60 % de C son ampliamente utilizados cuando las aplicaciones requieren una resistencia mayor a la disponible que no se encuentra en los aceros dulces, su dureza no desarrolla un nivel muy elevado pero al ser muy resistentes y tenaces su aplicación es variada dentro de la fabricación de chumaceras, engranajes, equipo ferroviario y partes de maquinaria para el trabajo de los metales [3],[5].

Las propiedades físicas que incluye el comportamiento eléctrico, magnético, óptico, elástico y químico depende de manera correlacionada tanto de la estructura como del procesamiento del material, aún la más mínima modificación dentro de la estructura podría producir un cambio profundo en el material [6].

### 1.3 Acero AISI/SAE 4140

#### 1.3.1 Características del acero AISI/SAE 4140

Es un acero al medio carbono, fusionado con molibdeno y cromo, posee una buena templabilidad y con una resistencia a la fatiga considerable, abrasión lo cual lo convierte en un material muy utilizado en la industria metalmecánica. Puede ser nitrurado para que logre mejor resistencia a la abrasión. Es apto al endurecimiento por TT [7].

El acero AISI/SAE 4140 es ampliamente aplicado para producción de elementos de maquinaria, de pequeña y mediana sección que son sometidas a esfuerzos normales lo que lo hace muy resistente.

En la Tabla 1 que a continuación se muestra se encontrará las propiedades del material en estado de suministro.

**Tabla 1.** Propiedades mecánicas que posee el acero AISI/SAE 4140 [8]

<b>Diámetro</b> <b>mm</b>	<b>Límite de fluencia</b> <b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>Resistencia a la tracción</b> <b>N/mm<sup>2</sup></b>	<b>Enlongación</b> <b>%</b>	<b>Resistencia al impacto</b> <b>J</b>	<b>Dureza</b> <b>HRC</b>
16 - 40	750.0	1100 - 1200	11.0	35.0	54-56

Fuente: Bohler S.A, “Aceros Especiales”

### 1.3.2 Composición química del acero ASI/SAE 4140

En los materiales su composición química se la realiza con la finalidad de obtener un porcentaje de elementos aleantes de los que está constituido [9].

En la Tabla 2 se presentan los datos de composición química de acuerdo a lo establecido dentro del catálogo de aceros Bohler-Ecuador, todos los valores se encuentran expresados en %.

**Tabla 2** Valores promedio en % de composición química[8]

AISI/SAE	%Cromo	%Mn	%Si	%Ni	%Cr	Mo
4140	0.380-0.450	0.6-0.9	0.4	--	0.9-1.2	0.150-0.3

Fuente: Bohler S.A, "Aceros Especiales"

### 1.3.3 Elementos aleantes en el acero AISI/SAE 4140

En el acero AISI/SAE 4140 existen en su estructura elementos aleantes los cuales por su contenido en porcentaje del cromo, silicio, molibdeno y magnesio aumentan la resistencia a la torsión, así como sus propiedades mecánicas, físicas y químicas se ven afectadas por la presencia de estos elementos aleantes, de la misma manera el azufre y el fosforo se encuentran en una concentración de 0.040% lo que se muestra en todo el acero por lo que es calificado como impurezas.

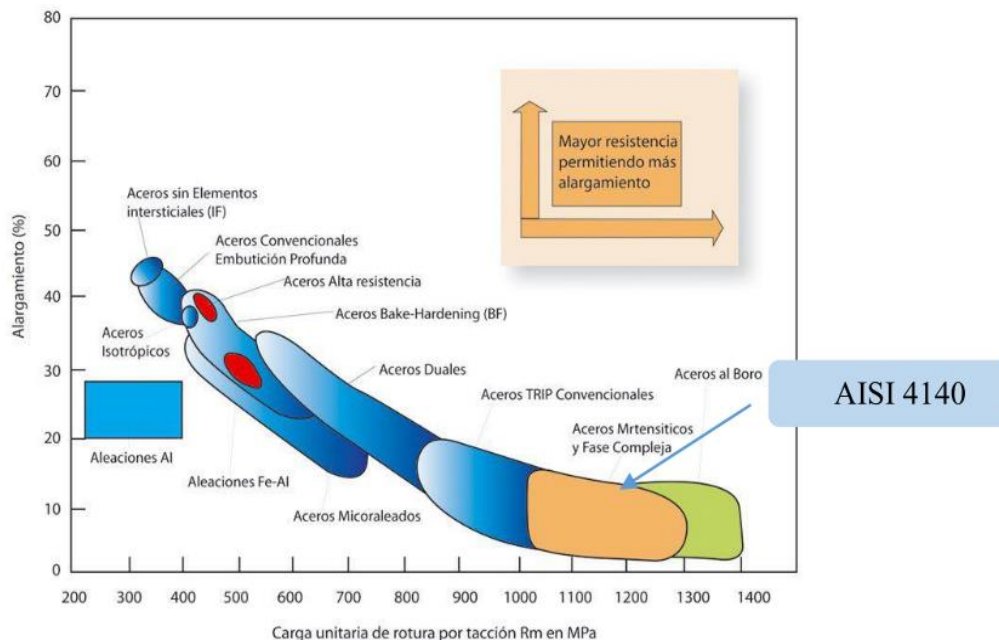
- a. **Cromo.** - Como resultado origina un pequeño endurecimiento del acero y el acrecentamiento de la resistencia a la corrosión, resistencia al desgaste y la solubilidad del Cr en fase austenítica depende del contenido en peso de C en el acero [10].
- b. **Molibdeno.** - El resultado por tener un componente aleante como el molibdeno es el incremento de la templabilidad de una manera más eficiente que el cromo, por la presencia de este elemento aleante la resistencia a la fluencia es mejorada, aumentando la dureza y elimina la fragilidad del proceso de revenido [10].

- c. **Manganeso.**- En todos los aceros la presencia de manganeso se ve necesario por su característica de neutraliza al azufre y el oxígeno además de sus diferentes acciones negativas que ellos ocasionan, de la misma manera su presencia influye en la templabilidad y la resistencia que se ven incrementadas [10].

### 1.3.4 Aplicación de acero AISI/SAE 4140

Dentro de la industria automotriz diferentes tipos de aceros han sido implementados con los cuales se quiere satisfacer las necesidades que se presentan entre los cuales se puede mencionar con gran importancia los de primera generación, segunda generación (mayormente utilizados en la industria automotriz), tercera generación (se encuentran en investigación pero su disponibilidad es limitada en la actualidad) [10].

La Figura 2 muestra la correspondencia de los aceros de segunda generación dentro de los cuales se encuentra el acero AISI/SAE 4140 que es caracterizado por su transformación de austenita a martensita que aun al no poseer cantidades de fases de ferrita o bainita elevadas son ampliamente utilizados en el campo automotriz en la producción de ejes, árboles de transmisión, cigüeñales señalando los más conocidos, debido a que el acero AISI/SAE4140 posee una alta resistencia para el trabajo que se requiere [10].



**Figura 2.** Correspondencia de los aceros de segunda generación [10].

## 1.4 Diagrama Hierro - Carbono

Se conoce que las propiedades de los aceros vienen derivadas del diagrama de equilibrio Hierro – Carbono de forma particular se lo atribuye al carbono que forma en la parte intersticial una disolución sólida con el hierro  $\gamma$  o también llamada austenita relativamente extensa, pero muy restringida de la ferrita o hierro  $\alpha$ , es por ello que a pesar que los aceros en su interior tienen otros elementos de aleación su estudio se lo debe realizar como una aleación de hierro – carbono esto se lo hace teniendo en cuenta las concentraciones de uno o de los diferentes elementos aleantes dentro del acero [11].

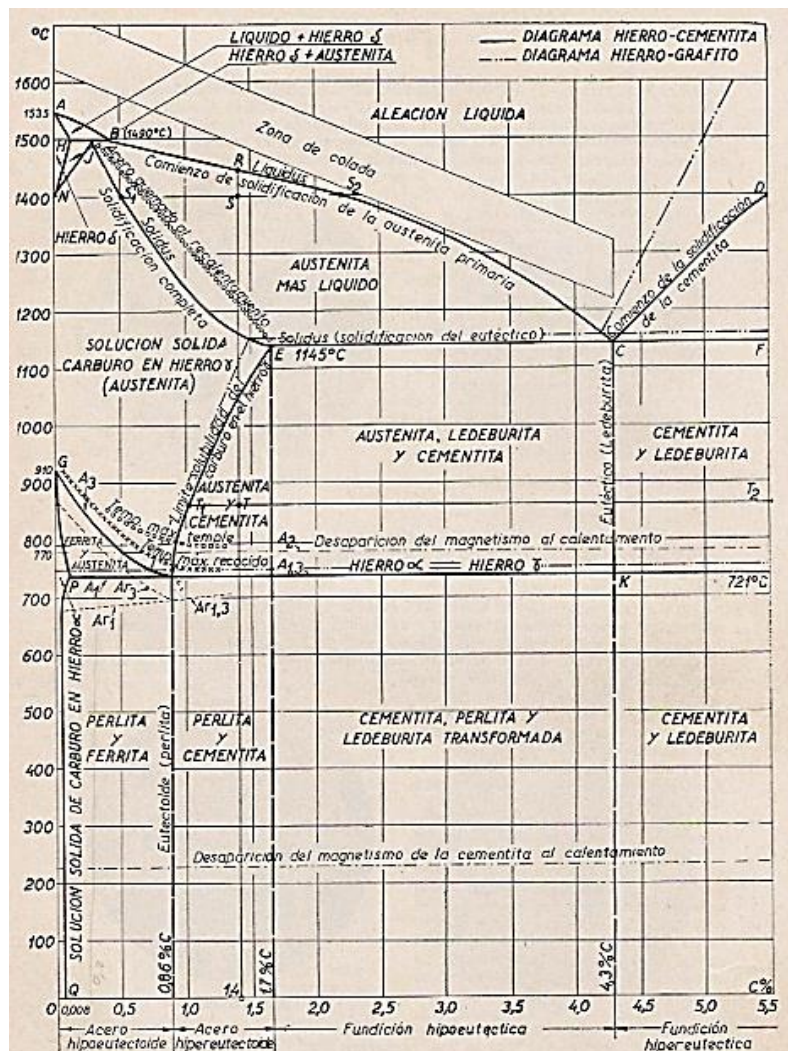


Figura 3. Diagrama Hierro - Carbono [11].

Como se señala en el trabajo realizado por Kalpakjian y Schmid [5], tanto los aceros como los hierros fundidos se encuentran simbolizados por un sistema de hierro/carbono, se conoce que el hierro comercial posee hasta un 0.0079 % de C, sin embargo los aceros

comprende 2.110% de C, y los hierro fundido hasta un 6.667 % de C, pese a que la mayoría de los nombrados solo contienen un porcentaje menor al 4.5 % de C.

El hierro al ser un elemento químico blando y maleable que se puede cristalizar según el sistema cubito centrado siempre a temperatura ambiente como señala en su trabajo Ricardo Rissi [12] puede combinarse con el carbono para de esto obtener compuestos químicos de características específicas. La Figura 4 muestra el Diagrama Hierro – Carbono, seccionando cada fase del acero.

El diagrama simboliza en contexto dos diagramas, el primero el diagrama de hierro y carbono y el segundo el diagrama estable grafito-hierro, del cual se puede observar de una manera más clara el comportamiento fuertemente gammágeno del carbono [13]. Donde cualquier punto en la gráfica representa un tipo de acero con su contenido específico de carbono y este a una temperatura concreta definida para las condiciones de trabajo requeridas.

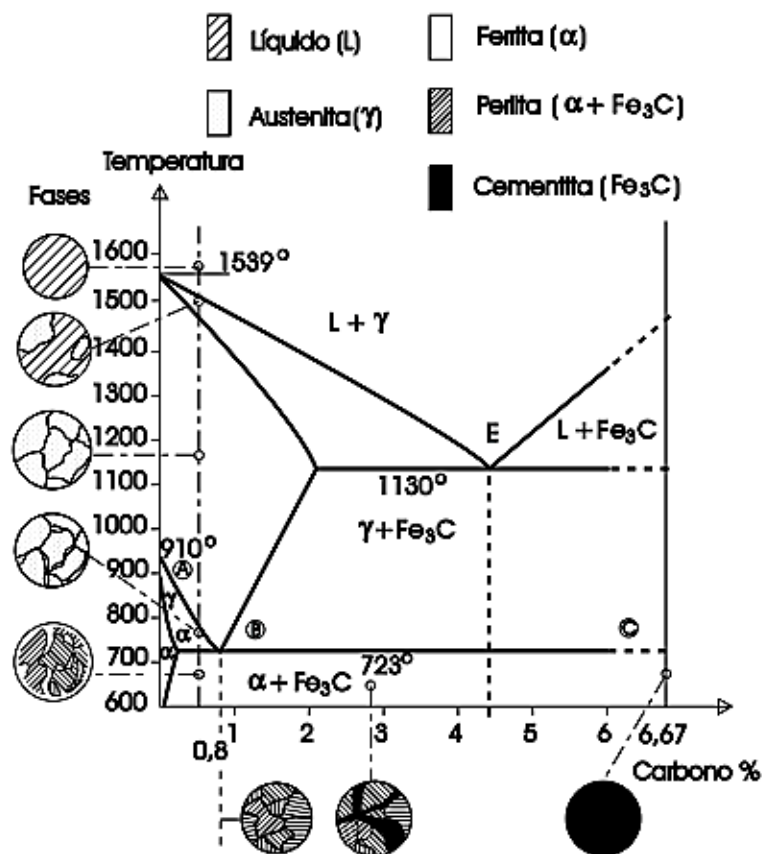


Figura 4. Diagrama de fase Hierro - Carbono [14]



## 1.5 Tratamientos Térmicos

Las propiedades de los materiales sufren variaciones y progresos como resultado de los procesos y transformaciones que implican difusión atómica. Para realizar cambios en los materiales es necesario emplear un tiempo razonable (del orden de horas), generalmente se trabaja a temperaturas elevadas, con la finalidad que la velocidad de difusión sea limitadamente rápida. A los procesos en los que se utiliza una temperatura alta se designan tratamientos térmicos (TT) y se emplean en las últimas fases de producción de los metales, cerámicas y materiales como los polímeros, con la aplicación de los tratamientos térmicos se logra obtener una mejora en las propiedades de los diversos materiales [15].

Según lo que se señala en los trabajos realizados por José Maldonado, Ricardo Rissi y Richard Budynas, [4], [12] y [16], los tratamientos térmicos se definen como el proceso en el cual el material es sometido a temperaturas elevadas, en este proceso se controla el tiempo y la temperatura, el objetivo de los tratamientos térmicos es la generación o transformación de la estructura cristalina o también el cambio de ciertas propiedades, en este transcurso del proceso se anulan la concentración de esfuerzos y se cambian las propiedades del material como la tenacidad, endurecimiento, ductilidad.

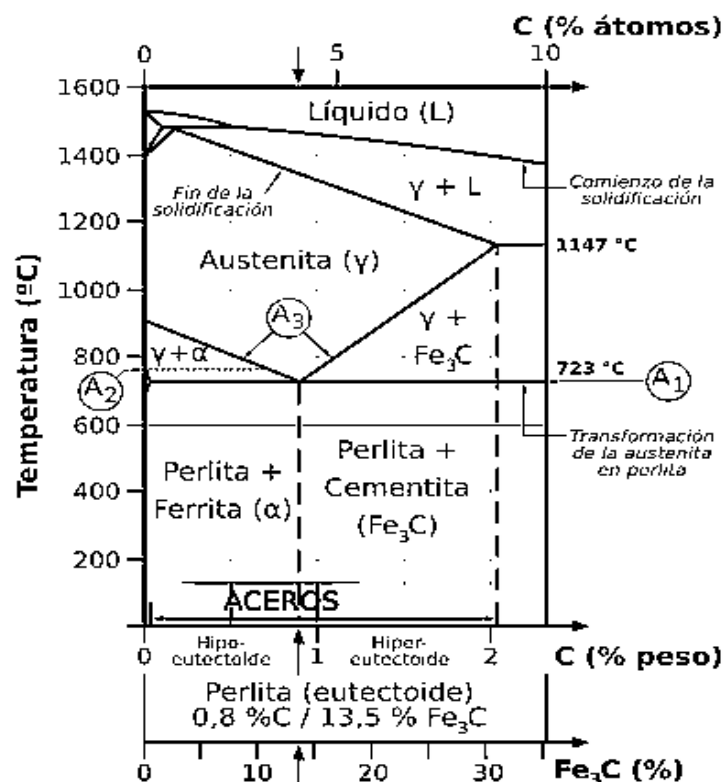


Figura 5. Diagrama Hierro - Carbono [17].

En la Figura 5 se puede apreciar de una manera más comprensible los cambios estructurales que se pueden generar en los aceros al aplicar una temperatura por un determinado tiempo, el cambio de fase de cada elemento variará dependiendo de la concentración de elementos aleantes en su estructura y por ende los efectos, se puede señalar que a mayor temperatura se encuentre el acero su estado será líquido [17].

En la industria la utilización de los tratamientos térmicos se ha visto que ha adquirido una gran relevancia, por motivos que con el pasar del tiempo, las constantes innovaciones, el mayor requerimiento de metales, se ha visto necesario implementarlos para obtener una mayor resistencia al desgaste y a la tensión [17].

### **1.5.1 Temple**

El tratamiento térmico denominado temple o templado puede ser el de mayor importancia, es aplicable para aceros aleados con la finalidad de incrementar su dureza y también la resistencia, para ello debe elevar la temperatura hasta que esta sea ligeramente superior a la crítica, para luego ser enfriado de una manera rápida o lenta, esto dependerá de la composición y de las dimensiones obtenidas en la pieza, de esta manera aquí se obtendrá la formación de austenita que comúnmente es a una temperatura inferior a los 350°C, los medios usados para el enfriamiento generalmente son agua o aceite [12].

Obtener un buen temple depende de varias causas que influyen como lo son: el tamaño de la pieza, tipo de acero, estado de su estructura y el medio de enfriamiento. Los medios para el enfriamiento son en aceite y en agua como los más conocidos [12].

De la Figura 6, se obtiene el ciclo térmico de un tratamiento denominado temple donde se observa de manera detallada como varía la temperatura durante todo el proceso, predominando así cada una de las etapas descritas como calentamiento etapa en la cual se eleva la temperatura hasta que se superior a la crítica [12].

Permanencia etapa en la cual la temperatura en el material es mantenida hasta llegar a un enfriamiento descrita como la última etapa, esta etapa se a conocer por que el material es enfriado en algún medio que proporcione la dureza, los medios suelen ser agua, aceite o sales [12].

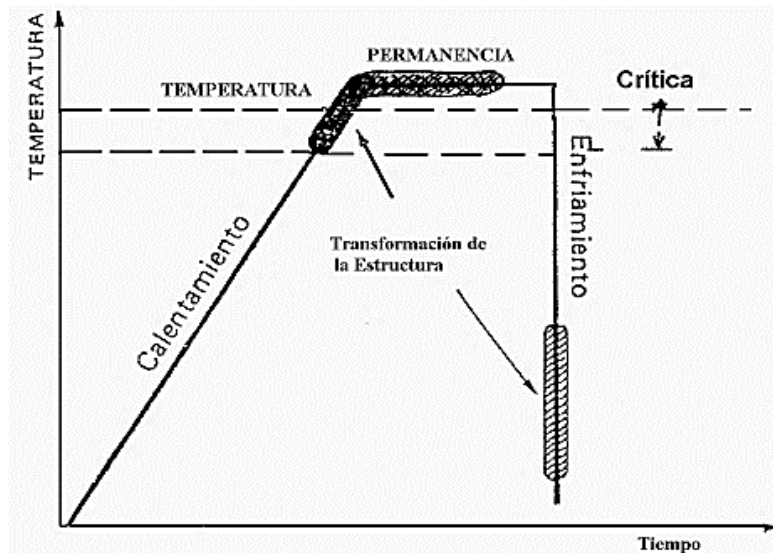


Figura 6. Ciclo térmico en un T.T de Temple [12].

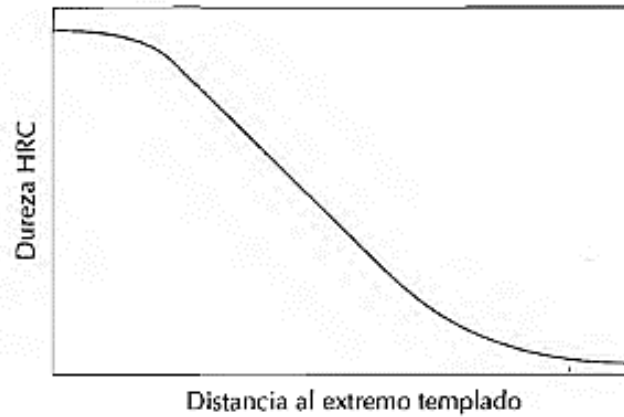
### 1.5.1.1 Medios de temple

Para obtener los resultados deseados en el tratamiento térmico, los medios de temple tienen una influencia determinante esto debido a que la efectividad dependerá de los medios mencionados, de la habilidad para endurecerse del acero, así los resultados obtenidos podrán variar dependiendo de la composición del acero, el medio de temple y de la temperatura aplicada [3].

Para medios de temple como aire, baños de metal o de sales donde el calor es transmitido vía conducción y convección principalmente, su puede señalar que se alcanzara rápidamente una velocidad de enfriamiento máxima inmediatamente que la pieza entre en contacto con el medio de enfriamiento, descendiendo gradualmente cuando el metal baje su temperatura [3].

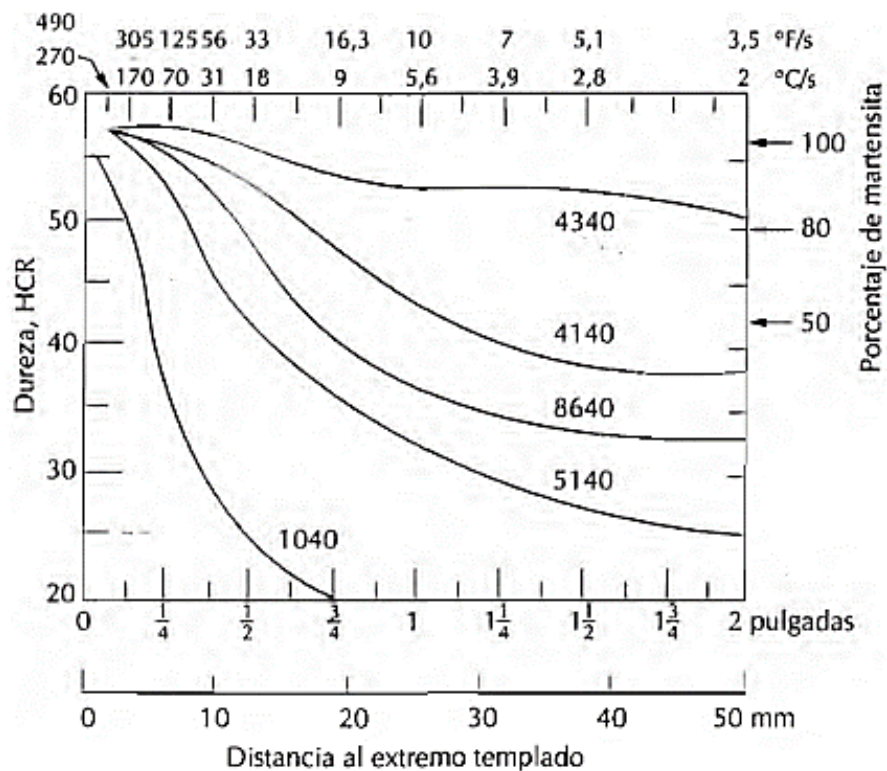
### 1.5.1.2 Curva de Templabilidad

En la Figura 7 se muestra la curva típica de templabilidad, donde se observa el punto más alto en el cual será mayor la dureza, como se afirmó anteriormente ira disminuyendo en función de la velocidad de enfriamiento mientras mayor sea el tiempo requerido para el enfriamiento la dureza será menor [15].



**Figura 7.** Gráfico Típico de Templabilidad [15].

Para el material mencionado, se observa la curva de templabilidad de este y 4 tipos de aceros más, con contenido de cantidades diferentes de elementos aleantes, de manera objetiva se observa que en todas las muestras del acero aleado se tiene una dureza de 57 HRC dicho valor depende únicamente del contenido de carbono en cada uno de los aceros aleados el cual es el mismo para todos los aceros. La característica que más sobresale en la gráfica se da en la curva que está relacionada con la de la templabilidad [15].



**Figura 8.** Curvas de templabilidad para cinco aceros aleados con contenido de carbono al 0,4% [15].

### 1.5.2 Revenido

Diferentes autores como Richard Budynas, José Flores, Serope Kalpakjian y Felipe Díaz en sus trabajos Diseño en Ingeniería Mecánica [16], Aceros y sus Aplicaciones [4], Manufactura, Ingeniería y Tecnología [5], Aceros, Estructuras y Tratamientos Térmicos [3], señalan al revenido como un tratamiento térmico que continúa al temple, por lo que su objetivo es modificar más no eliminar los efectos causados por el temple, debido a que una pieza de acero al ser endurecida por completo se vuelve muy dura, frágil y acumula altos esfuerzos residuales, con el revenido se incrementa la ductilidad y la tenacidad.

En el revenido el acero previamente templado es calentado a una temperatura específica esta dependerá de la composición del acero, la temperatura será inferior a la crítica  $723^{\circ}\text{C}$ , se recalienta hasta determinar una temperatura menor a la crítica esto durante un determinado tiempo para luego ser enfriado a temperatura ambiente, la temperatura a la que es recalentada dependerá de la composición del acero así como de la tenacidad o grado de dureza deseados [16].

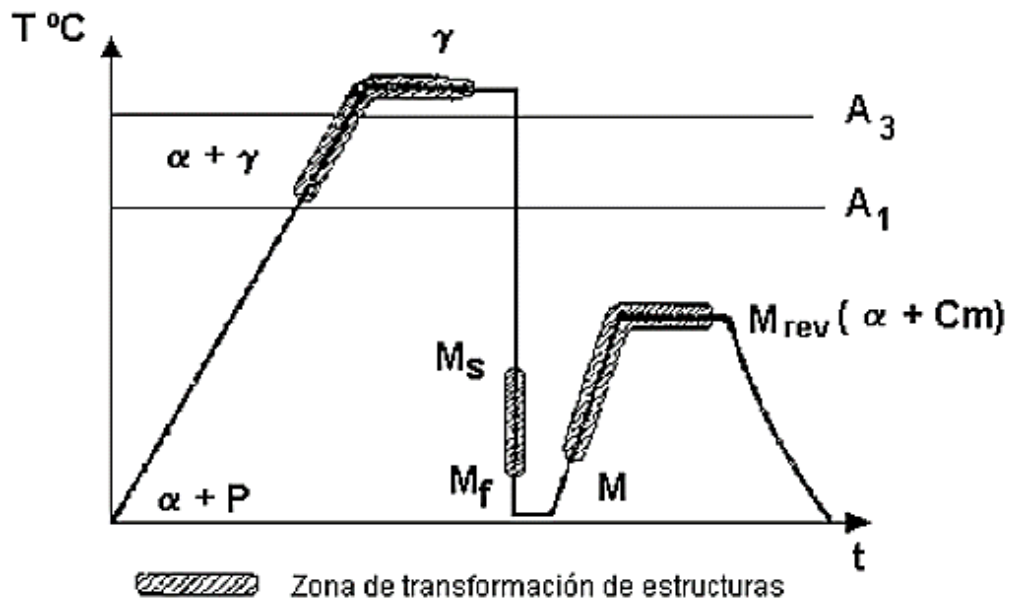


Figura 9. Ciclo Térmico utilizado en un T.T de Temple y Revenido [16].

La Figura 14 muestra el ciclo térmico utilizado en un tratamiento térmico de temple seguido de un revenido, observándose donde se generan las zonas de transformación de estructuras. En la maniobra de recalentamiento del acero se genera la liberación de carbón

que contiene la martensita, para que se dé la formación de cristales carburos, la estructura obtenida se denomina martensita revenida [16].

Existen un rango de temperaturas de entre 200°C – 450°C (400°F – 800°F), los cuales representan la zona divisoria para las aplicaciones que son requeridas para dureza y para las requeridas para tenacidad [3], si el requerimiento principal es el de tener una mayor dureza o resistencia al desgaste se realiza un revenido a una temperatura inferior a los 200°C.

### 1.5.2.1 Variables Principales del Revenido

La temperatura y el tiempo de exposición del material en el proceso de revenido son variables independientes, esto se debe a que si la temperatura es disminuida y se aumenta el tiempo se lograra obtener el mismo resultado si el proceso se diera incrementando la temperatura y disminuyendo el tiempo [3].

Las propiedades mecánicas así como la microestructura de un acero revenido dependerán de la temperatura aplicada, al igual que de la duración del revenido aplicado, esto se debe a que las partículas generadas se hacen progresivamente de mayor tamaño y en menor cantidad conforme el tiempo y la temperatura son incrementadas, el cambio estructural generado tiene como resultado una menor dureza y resistencia pero mayor tenacidad y dureza [3].

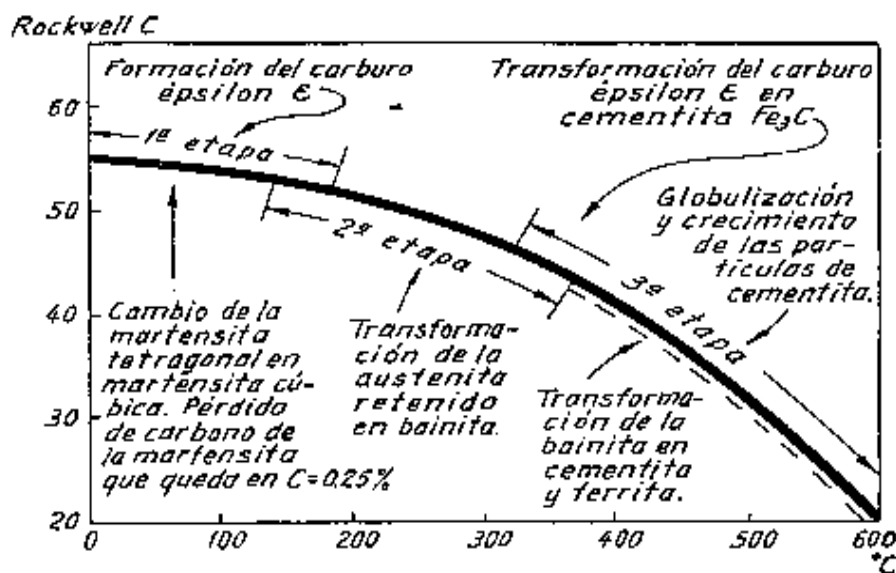


Figura 10. Etapas del revenido [3].

### 1.5.2.2 Influencia del tiempo de revenido

Para realizar el proceso de revenido se recomienda aproximadamente entre treinta minutos y tres horas. En la Figura 11 se puede observar que en un acero con contenido de 0,82% de carbono que ha sido templado y revenido a 650°C experimenta una pérdida de dureza, mientras se prolonga el revenido se obtiene un ablandamiento en los tres primeros minutos de una manera rápida y continua con la pérdida de dureza [1].

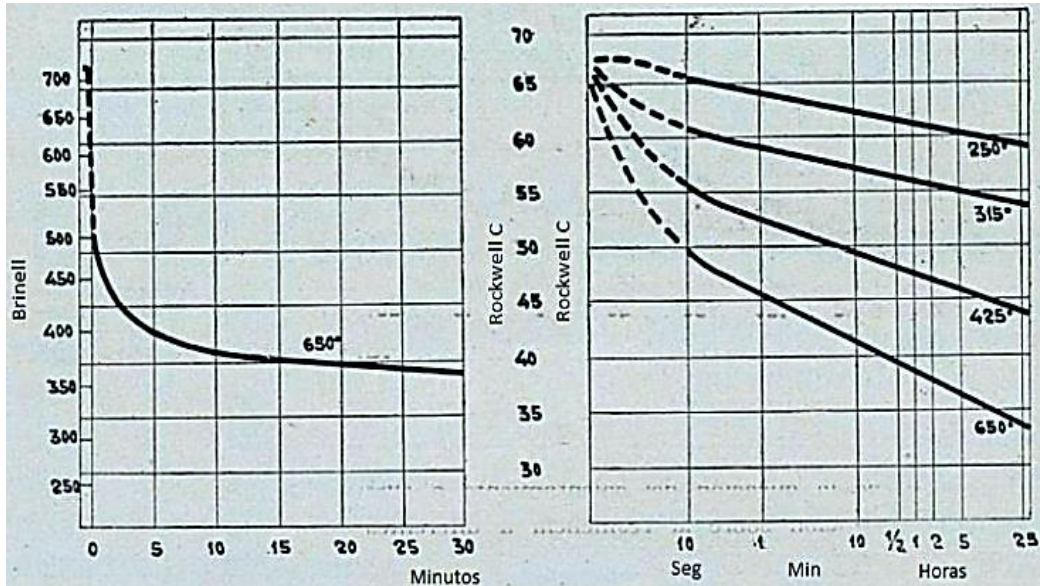
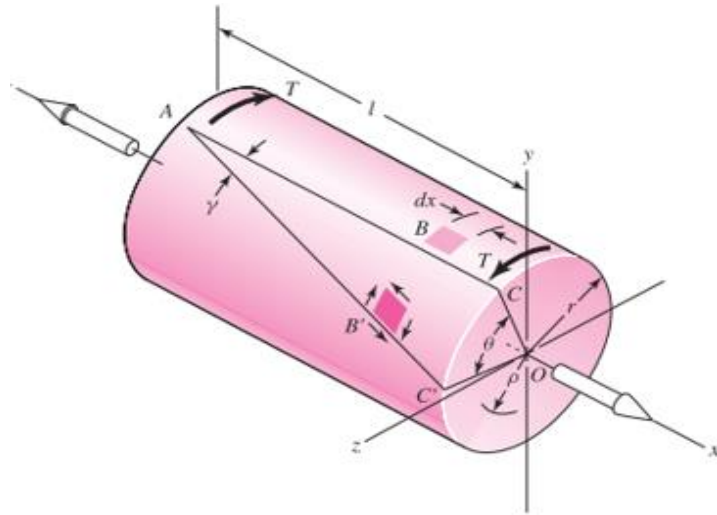


Figura 11. Influencia del tiempo de revenido en la dureza [1].

## 1.6 Torsión

De acuerdo con trabajos realizados por Robert Norton [18], Stephen Timoshenko[19] y Ferdinand Beer[20], se define a la torsión como un vector de momento que será colineal con respecto a un eje longitudinal, es también conocido como *vector de par de torsión*, el momento que suele ser aplicado se lo conocerá como torque, la torsión es común en ejes de transmisión de potencia, en tornillos o en situaciones donde el momento sea aplicado de manera paralela.

Como se observa en la Figura 12, se denota como es aplicado el par de torsión, en el cual se observa el desplazamiento circular de una sección transversal alrededor de un eje.



**Figura 12.** Representación de un Par de torsión [18].

### 1.6.1 Ángulo de Torsión

Se denota  $\theta$  al ángulo de torsión, que, por unidad de longitud, será directamente proporcional al momento torsor, y además inversamente proporcional a la rigidez torsional total denotada por  $GJ$ .

Debido al momento torsor se genera un ángulo de giro, en una barra sólida este ángulo vendrá medido en radianes y tiene la denotación [18].

$$\theta = \frac{Tl}{GJ}$$

donde se puede denotar a:

T = par de torsión

l = longitud

G = módulo de rigidez

J = segundo momento polar del área

### 1.6.2 Esfuerzo cortante

Para secciones circulares en cualquier elemento tomado en la superficie exterior tendrá un cortante, este cortante es conocido como cortante puro  $\tau$  el cual varía con respecto de



la posición, por lo que en el centro de la barra su valor será cero hasta alcanzar el valor máximo en el radio exterior[18]. La formulación de la torsión nos indica que el esfuerzo cortante máx. será proporcional al par torsional que genera dicho esfuerzo. Se desglosa la ecuación para calcular el esfuerzo cortante máximo de manera simple.

$$\tau_{max} = \frac{T * r}{I_p}$$

Donde denotamos a:

$\tau_{max}$ = Esfuerzo cortante máx	$\frac{N}{m^2} = Pa$
T: Par torsor	N.m
r: Radio	m
$I_p$ : Momento polar Inercia	$m^4$

### 1.6.3 Concentración de esfuerzos

El trabajo realizado por Robert Norton, Diseño de Máquinas[18], menciona la distribución de los esfuerzos en el interior de elementos cargados donde se analiza su distribución, donde se supone uniforme toda las secciones transversales de los elementos, sin embargo esto no sucede realmente.

Para expresar la concentración de esfuerzos en distinta geometría se lo hace con la ayuda del factor de concentración de esfuerzo geométrico cuando los esfuerzos existentes son normales y para esfuerzos cortantes se tiene un factor.

### 1.6.4 Deformación unitaria por cortante

La deformación unitaria producida por cortante viene relacionada por la ecuación descrita a continuación la que se da en la superficie exterior de la barra con el ángulo de torsión. La expresión  $d\theta/dx$  la cual señala la variación del ángulo de torsión  $\theta$  con respecto a una longitud de la barra [21].

De esta manera se denotará al ángulo de torsión a través de la ecuación:

$$\theta = \frac{d\phi}{dx}$$

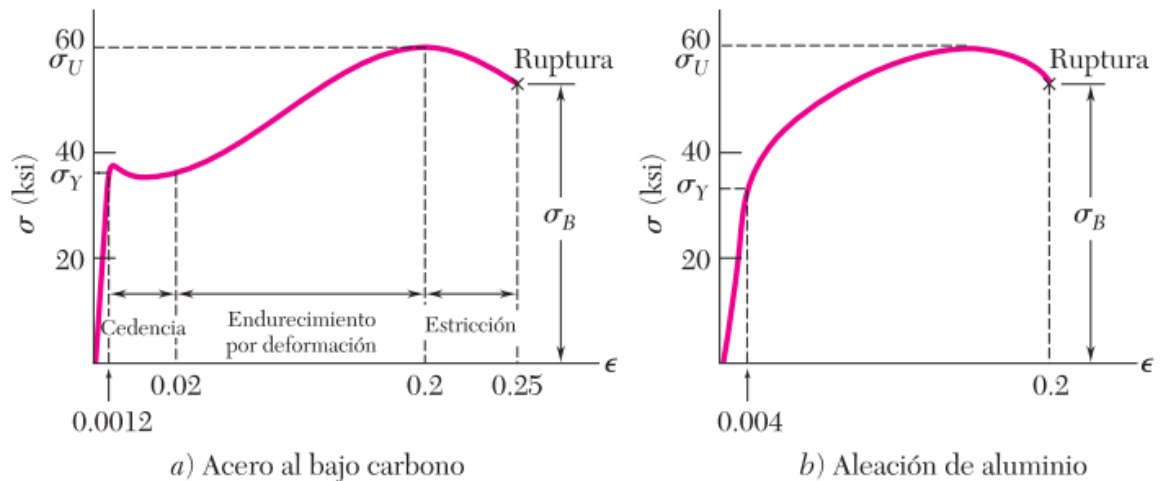
Cuando se tiene torsión pura, se obtiene que la razón de torsión viene dada por el ángulo de torsión total  $\phi$  dividido entre la longitud  $L$ , es decir,  $\theta = \phi/L$ . Por lo tanto, sólo para torsión pura, se obtiene  $\gamma_{max}$ , que estará en función del radio, el ángulo de torsión y la longitud involucrada, de esta manera se obtiene el cortante máximo a partir de la ecuación:

$$\gamma_{max} = r \frac{\phi}{L}$$

En donde  $\phi$  es el ángulo de torsión,  $r$  es el radio de la sección circular sometida a torsión, y  $L$  la longitud de la sección sometida a torsión [21].

### 1.6.5 Diagrama esfuerzo – deformación

Ferdinand señala en su trabajo, Mecánica de Materiales [22] el diagrama esfuerzo - deformación de distintos materiales varia en forma apreciable, por las características del ensayo aplicado, los resultados se verán reflejados al final de estos y se notarán afectados dependiendo de la temperatura, la velocidad o las especificaciones del ensayo empleado.



**Figura 13** Diagramas de esfuerzo-deformación de dos materiales dúctiles típicos [22].

El diagrama esfuerzo – deformación puede tener características comunes para varios grupos de materiales y también se los puede dividir en dos categorías basada en sus características para esto se tiene así los materiales frágiles y dúctiles.

En la Figura 13 se observa el gráfico de dos materiales típicos utilizados, un material dúctil en el cual se encuentra el acero estructural y varias de las aleaciones de otros materiales, en el cual se encuentra el acero 4140 el cual es un acero de medio carbono, este tipo de material se caracteriza por su capacidad de fluir a temperaturas nominales.

### **1.6.6 Ley de Hooke**

Al ser diseñados los elementos para resistir deformaciones eventualmente pequeñas en el cual involucra la pendiente de la gráfica esfuerzo – deformación, en este sentido, la deformación  $\epsilon$  es directamente proporcional al esfuerzo  $\sigma$  [20].

### **1.6.7 Módulo de rigidez**

Se define al módulo de rigidez como la interacción entre el esfuerzo cortante y el desplazamiento por unidad de longitud (también llamada deformación unitaria), se lo puede calcular de manera experimental mediante la pendiente de la curva creada en la gráfica Tensión – Deformación obtenidas de las pruebas de tracción que se suministraron a las probetas del material [23], el módulo de rigidez o corte es una respuesta del material ante la presencia de un esfuerzo que generara una deformación.

### **1.6.8 Módulo tangente**

Se define al módulo de tangente como la pendiente obtenida de la línea tangente a la curva tensión-deformación en un punto fijo localizado. El módulo tangente puede tomar valores distintos dependiendo del punto donde se lo requiere, el módulo tangente es igual al módulo de Young cuando el punto de tangencia cae dentro del rango lineal de la curva [24].

### **1.6.9 Relación de Poisson**

Se define como, la correspondencia entre: deformación unitaria lateral y la deformación unitaria axial, se denota con la letra griega  $\nu$  [20].

$$\nu = -\frac{\text{deformacion unitaria lateral}}{\text{deformacion unitaria axial}}$$

$$\nu = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} = -\frac{\epsilon_z}{\epsilon_y}$$

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_y}{E}, \quad \epsilon_y = \epsilon_z = \frac{\nu\sigma_x}{E},$$

### 1.6.10 Módulo de Compresibilidad o Módulo de Bulk

Se define al módulo de Bulk como la relación que evalúa la resistencia que tiene un material para su compresión de una manera uniforme, por lo que indica donde se requerirá presión para generar una disminución en su volumen, su medida vendrá dada como el módulo de elasticidad [22].

### 1.7 Descripción del desarrollo experimental

El presente trabajo se enfoca en validar los resultados obtenidos experimentalmente sobre los ensayos de torsión realizados a especímenes en estado de suministro, y también después de aplicar tratamientos térmicos de temple a 830°C - 860°C y revenido a 500°C, con la ejecución de simulaciones realizadas en el software Ansys Workbench, a través del Método de los Elementos Finitos.

Experimentalmente se desarrollaron los ensayos de torsión a probetas en estado de suministro y también a especímenes previamente templados a 830 °C - 860 °C y revenidos a 500 °C [1].

### 1.8 Método de prueba experimental

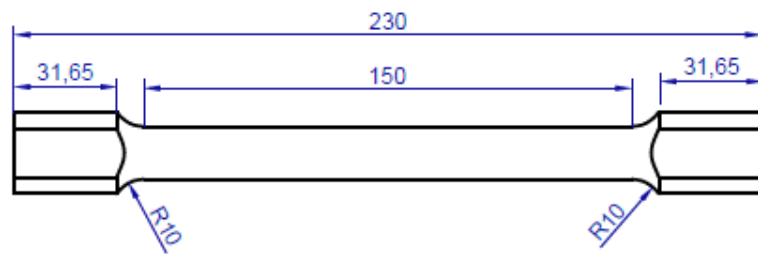
El procedimiento para el ensayo de torsión se maneja de acuerdo a la norma ASTM-E143, la cual manifiesta, que la probeta del ensayo se carga de forma incremental aumentando el par torsor externo uniformemente en el medidor, los cambios generados en el par de torsión y en las variaciones del ángulo de giro se establecen ascendentemente [2].

Se ejecutaron mediciones simultaneas de torque y ángulo de giro registrando los datos periódicamente [1].

## 1.9 Equipos e instrumentos

### 1.9.1 Especímenes para ensayos de torsión

Para los respectivos ensayos experimentales de torsión se utilizaron probetas fabricadas en acero AISI/SAE 4140. Los especímenes de prueba se deben diseñar según las especificaciones establecidas en la norma ASTM E143 y también en base a los requerimientos de la máquina que se va a utilizar para los respectivos ensayos de torsión [1]. Las medidas de las probetas se observan en la Figura 14.



**Figura 14.** Medidas del espécimen para ensayos de torsión

Elaborado por: Jorge Núñez & Alex Yanguisela

### 1.9.2 Máquina de prueba de ensayos de torsión experimentales

Para la realización de las respectivas pruebas de torsión, se utiliza la máquina (AVERY - 6609 CHG), propiedad de la Universidad de la Fuerzas Armadas ESPE [2], mediante la cual se encontraron datos resultantes de ángulo de torsión y torque para los diferentes especímenes sometidos al ensayo [1].



**Figura 15.** Máquina para ensayo de torsión [25].

### **1.10 Ensayo de torsión en estado de suministro**

Experimentalmente se realiza el ensayo de torsión a tres probetas en estado de suministro, posteriormente se realiza un análisis comparativo con los datos registrados en los ensayos.

Los valores conseguidos en las pruebas son el torque y el desplazamiento angular, de acuerdo a estos datos se calcula el esfuerzo cortante, y la deformación unitaria por corte para los especímenes en estado bonificado [2]. Con estos valores de la deformación unitaria por corte y el esfuerzo cortante debido a la torsión, se consigue la curva de esfuerzo-deformación por torsión. Los datos logrados del ensayo fueron medidos periódicamente hasta que la probeta alcance a la rotura [2].

### **1.11 Ensayo de torsión con TT de temple a 830 °C - 860 °C y revenido a 500 °C**

Luego de haber realizado los ensayos de torsión a probetas en estado de suministro, se procede a ejecutar los ensayos de torsión a probetas previamente templadas a 830 °C - 860 °C y revenidas a 500 °C, registrando los valores de ángulo de torsión y torque aplicados, para posteriormente calcular el esfuerzo cortante debido a la torsión y deformación unitaria [2], mismos datos que serán validados posteriormente con los resultados obtenidos mediante la simulación en el software Ansys Workbench.



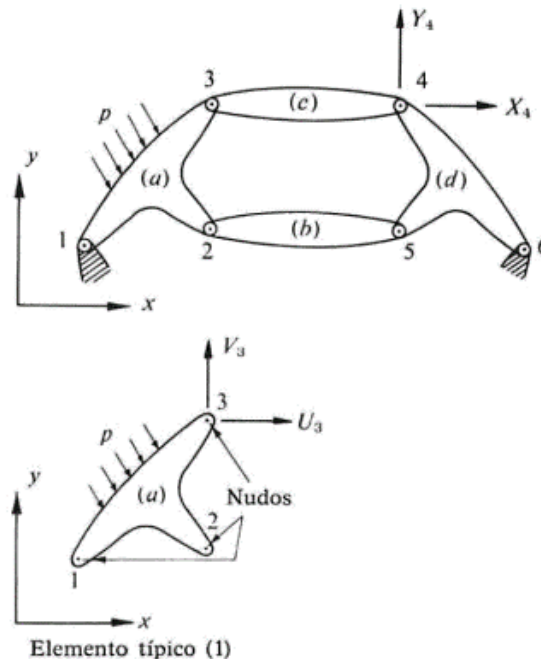
**Figura 16.** Ensayo de torsión a probetas con tratamiento térmico [2].

## CAPÍTULO II

### MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

Dentro de la ingeniería, el campo de análisis por elementos finitos ha llegado a ser una herramienta importante, uno de los motivos importantes que se puede destacar de este análisis es que ayuda a determinar el estado de tensión y deformación de un sólido el cual su geometría sea arbitraria que está sometida a operaciones externas [26].

Sea la Figura 17 mostrada, la cual visualiza una estructura plana que contiene varios elementos cada uno enlazados en los nudos, estos numerados de una manera distintiva desde 1 hasta  $n$  siendo el caso [26].



**Figura 17.** Estructura típica Formada por elementos Interconectados [26]

El análisis por método de elementos finitos surge por la necesidad de diseñar estructuras o cuerpos que requieren ser estudiados de una manera más profunda realizando una sucesión de análisis y modificaciones de diversas características, el objetivo principal de realizar este análisis es para lograr alcanzar una solución satisfactoria, ya sea esta de manera económica así como en términos de verificación de prerrequisitos funcionales y regulatorios [26].

Antes de que se diera a conocer el MEF, los análisis eran realizados de manera directa mediante la solución de ecuaciones derivadas parciales las cuales gobiernan el fenómeno, siempre tomando en cuenta las condiciones de borde o de frontera que sean necesarias.

### **1.12 Tipos de análisis**

Los tipos de análisis de los MEF surgen por la necesidad de resolver un análisis en la estructura, su clasificación viene dada en términos de su geometría, las acciones aplicadas y el modelo con su material constitutivo [27].

Aspectos importantes que se debe considerar en la fase previa al análisis de una estructura son:

- Análisis dinámico o estático
- Análisis lineal o no lineal
- Tipo de estructura
- 

#### ***1.12.1 Análisis dinámico o estático***

El análisis sobre la acción en la estructuras o elementos generalmente son de estado dinámico, el motivo a considerar es la fuerza de inercia que son asociadas a la aceleración a la que están sometidos los elementos, por tal motivo se deben tener en cuenta los efectos dinámicos. Sin embargo, en la mayoría de los casos se debe considerar que las acciones en un momento son lo suficientemente lentas o de valor pequeño por lo que hace que la fuerza de inercia sea insignificante, en este caso el análisis a realizarse es llamado estático [27].

#### ***1.12.2 Análisis lineal o no lineal***

En el análisis de una estructura sólida se debe considerar la influencia de la modificación de la geometría de la estructura en relación a la distribución de tensiones y esfuerzos, por lo que es recomendable realizar el análisis en base a la geometría inicial no perturbada [27].

#### ***1.12.3 Tipo de estructura***

El análisis por el tipo de estructura se la puede clasificar dependiendo de su geometría entre las que destacan las estructuras reticuladas, solidas o laminares [27].



### 1.13 Nociones básicas de MEF

Un correcto uso de los MEF está basado en su correcta formulación por lo que para ello se requiere de una ecuación integral, la cual será una suma de integrales de geometría simple con un subdominio del volumen, se puede de notar de la ecuación

$$\int_V f dV = \sum_{i=1}^n \int_{V_i} f dV$$

Cabe señalar que de la ecuación integral mencionada deriva de la aplicación de residuos pesados. Para la aplicación de la MEF en un análisis estructural, la formulación más intuitiva se basa en el Principio Virtual Works (PTV) [27].

### 1.14 Análisis por elementos finitos del comportamiento a torsión de las probetas de estudio

Para lograr datos teóricos de pruebas de torsión mediante MEF, se evaluarán las probetas con el módulo “Explicit Dynamics” del software Ansys Workbench, ya que se realizará un análisis de las variaciones de las propiedades mecánicas a la torsión en función del tiempo.

Dentro de un análisis de dinámica explícita el incremento de tiempo es proporcional a la dimensión más pequeña del elemento en el modelo, e inversamente proporcional a la velocidad del sonido en los materiales utilizados. Por lo general, los incrementos de tiempo son de 1 microsegundo y por esta razón se necesita miles de ciclos computacionales para la obtención de las soluciones [28].

### 1.15 Mallado

Los métodos de mallado comúnmente empleados en la simulación de elementos finitos tanto dinámico como estructural son los siguientes:

- Barrido de malla de volumen
- Malla de volumen dependiente del parche
- Malla dominante hexadecimal
- Parche de malla tetraédrica independiente

- Malla de volumen multizona
- Malla de caparazón dependiente del parche
- Parche de malla independiente
- 

Se debe buscar una malla uniforme y lisa en las regiones de interés para el análisis. En otra parte, el engrosamiento de la malla puede ayudar a reducir el tamaño general del problema a resolver [28]. El software usa un mallado establecido de manera predeterminada que proporciona una malla muy adecuada para análisis de dinámica explícita. La configuración de malla completa solo es aplicable a los análisis de dinámica explícita.

Se pueden usar otras preferencias físicas si se desea una mejor consistencia entre los modelos implícitos y los explícitos.

Se debe considerar la cantidad de elementos en el modelo y la calidad de la malla para producir pasos de tiempo resultantes más grandes y, por lo tanto, simulaciones más eficientes. Una malla gruesa a menudo puede ser utilizado para obtener información sobre la dinámica básica de un sistema, mientras que se requiere una malla más fina para investigar efectos materiales no lineales y de falla [28].

### **1.16 Parámetros de mallado**

Es necesario tomar en cuenta que la malla generada dependerá de diversos parámetros, entre los principales a considerar se tiene:

- Costos de recursos computacionales
- El efecto de la difusión numérica
- Tiempo necesario para crear la malla

Al ser el tiempo, un factor trascendental en el mundo de la ingeniería, se suele llevar a la selección de mallas no estructuradas, cuyos elementos empleados son tetraédricas, (en forma de triángulo) [29].

Cuando dichas geometrías tienen un grado de complejidad considerable, suele ser más conveniente aplicar un mallado del tipo triangular/tetraédrico. Sin embargo, para el caso

de simulaciones de dificultad media, se puede considerar la aplicación de una malla no estructurada del tipo cuadriláteras/hexahédricas, las cuales permiten mayores relaciones de aspecto [29].

### **1.17 Calidad de malla**

La calidad de la malla influye directamente en la exactitud y en la estabilidad de los diversos cálculos numéricos dentro de la simulación. Ciertas propiedades relacionadas con la calidad del mallado son: la distribución de nodos, suavidad, esquinamiento, relación de aspecto, etc. Una resolución pobre de la malla en zonas críticas como juntas, cambios de diámetro o curvaturas, pueden alterar considerablemente las características requeridas para un análisis confiable [29].

Se conoce como *esquinamiento* de una celda a la divergencia entre la forma de dicha celda y la forma de una celda cuadrilátera de igual volumen. Al tener celdas demasiado esquinadas pueden afectar los valores de la solución y disminuir la exactitud. Por otro lado, la *relación de aspecto* se conoce como la dimensión de la elongación de la celda [29].

Una malla es geoméricamente válida para poder ser aplicada a un análisis por MEF, si no hay intersección entre dos elementos pertenecientes a la malla [30].

Una mala calidad de malla se verá reflejada por una mala descripción de la física, una difusa solución o incluso en dificultades en la convergencia. Es por esto que se hace necesario una comprobación y mejoramiento de la métrica de mallado, la misma que indica información de elementos y nodos, además de enumerar los criterios de calidad señalando los respectivo valores máximos, mínimos, promedios y su desviación estándar [31].

### **1.18 Calidad geométrica de los elementos de una malla**

El grado de desviación de un elemento respecto al elemento regular de referencia se conoce como la distorsión de un elemento. La forma de cada tipo de elemento de referencia es distinta, entre estos se tiene:

- Triángulo equilátero en malla de triángulos

- Cuadrado en malla de cuadriláteros
- Tetraedro regular en malla de tetraedros
- Cubo en malla de hexaedros

Por ende, se conoce como calidad geométrica del elemento al nivel de aproximación entre el elemento y el elemento de referencia proporcionado, al mismo que se le fija una calidad geométrica óptima para su evaluación [32].

## CAPÍTULO III

### DESARROLLO DE ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITOS

#### 1.19 Análisis por elementos finitos de la probeta de suministro AISI4140

##### 1.19.1 Generación del material para el estado de suministro

Antes de iniciar un análisis por elementos finitos, es necesario configurar el material correspondiente al estudio designado. Los modelos de materiales (también llamados modelos constitutivos) son una abstracción matemática de la respuesta de un material a un tipo de carga aplicada o un fenómeno físico.

Los datos de los materiales se definen, modifican, mediante el módulo “Engineering Data” tanto para análisis térmicos como estructurales.

Las propiedades del material de mayor relevancia son: 1) Young’s Modulus, Poisson’s ratio, density, shear modulus y Bulk modulus. En la Figura 18 se presenta las propiedades suministro del Acero AISI 4140.

Properties of Outline Row 3: aisi4140			
	A	B	
1	Property	Value	
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	7865	kg m <sup>-3</sup>
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young's Modu...	
6	Young's Modulus	2E+05	MPa
7	Poisson's Ratio	0,3	
8	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa
9	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa
10	Bilinear Isotropic Hardening		
11	Yield Strength	1100	MPa
12	Tangent Modulus	1000	MPa

**Figura 18.** Propiedades del material en estado de suministro.

Elaborado por: Jorge Núñez & Alex Yanguisela

En base a la ficha técnica del material en estado de suministro, se ingresa el valor del módulo de Young o módulo de elasticidad de 200 GPa, la densidad de  $7865 \frac{kg}{m^3}$  y el coeficiente de Poisson de 0,3 [33].

El módulo de Bulk (Bulk Modulus), y el módulo de rigidez o módulo de corte (shear modulus), tienen un valor de:  $1,6667 \times 10^{11}$  [Pa] y  $7,6923 \times 10^{10}$  [Pa] respectivamente; valores que son automáticamente generados por el software al momento de ingresar los valores del módulo de Young junto con el coeficiente Poisson.

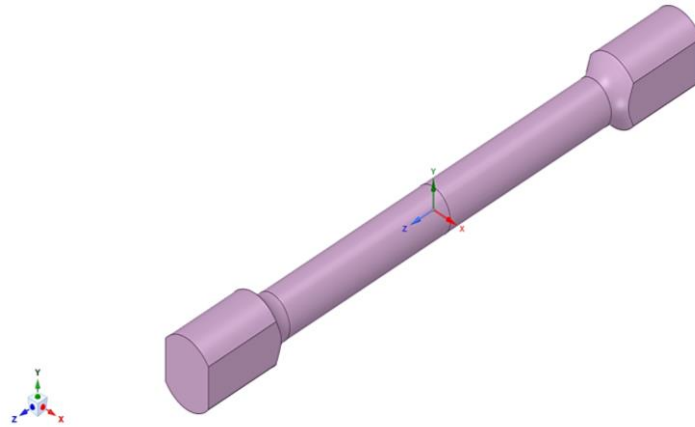
Con referencia en los datos experimentales, la resistencia a la fluencia se precisó un valor de 1100 MPa [1].

En base al apartado “Material Data” del software Ansys, el módulo tangencial usado para modelado en el material AISI/SAE 4140 en estado de suministro, es de 1000 MPa [34].

### **1.19.2 Configuración de la geometría**

ANSYS Workbench, posee dos modeladores de diseño vinculados a la opción “Geometry”. El primero es ANSYS DesignModeler, este modelador, se suele utilizar como un editor de geometría de modelos CAD existentes. El segundo es ANSYS SpaceClaim, esta herramienta permite editar y reparar geometrías importadas, en su entorno se pueden crear cualquier tipo de geometría y exportar a un gran número de formatos CAD.

La geometría presentada en la Figura 19, se generó, a partir del modelador ANSYS SpaceClaim. Se debe añadir que, la geometría presenta cada una de las dimensiones respectivas de una probeta para ensayos de torsión, mismo que, fue usado experimentalmente en base a la Norma ASTM e143 [1].



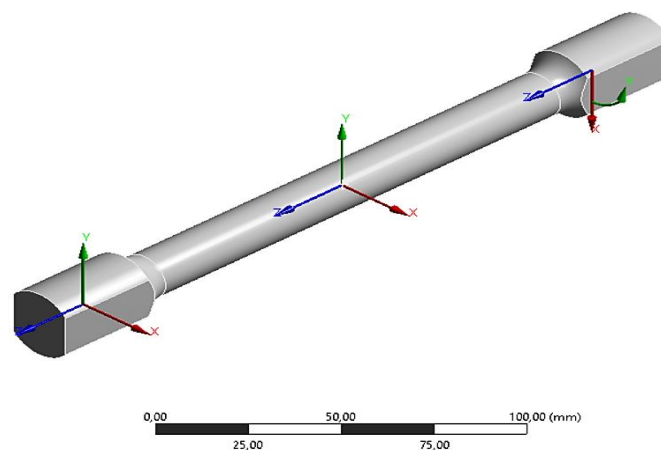
**Figura 19.** Geometría de la probeta modelado en ANSYS SpaceClaim.

Elaborado por: Jorge Núñez & Alex Yanguisela

En el centro de la geometría de la probeta se generó una proyección circular igual al diámetro, esto debido a que, facilita y precisa de mejor manera la configuración de las condiciones de frontera.

### 1.19.3 Sistemas de coordenadas

El sistema de coordenadas aplicado a la geometría consta de dos sistemas de referencia cartesiano y un sistema de referencia cilíndrico. En la Figura 20 se muestran el posicionamiento de los sistemas referenciales.

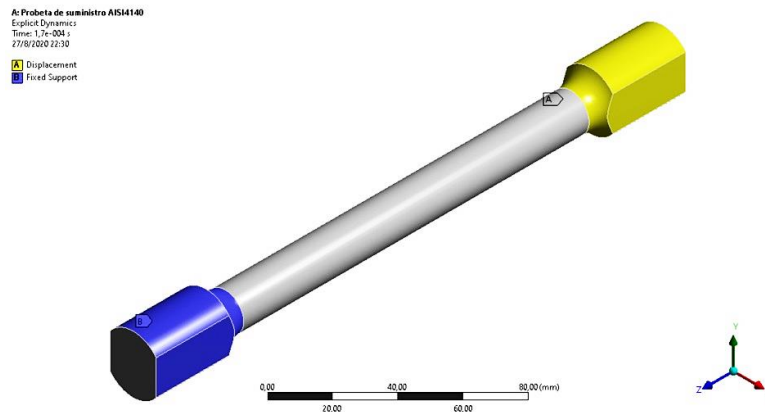


**Figura 20.** Sistemas de coordenadas referenciales de la geometría de la probeta.

Elaborado por: Jorge Núñez & Alex Yanguisela

### 1.19.4 Condiciones de frontera

Al realizar el respectivo ensayo, el espécimen se sujetó fijamente en su parte izquierda (azul) por un agarre alrededor de toda la periferia. En la parte derecha, por otro lado, la condición de frontera, emula un agarre de mandril; configurado con un desplazamiento angular de 360° en el sentido positivo del eje Y.



**Figura 21.** Condiciones de frontera en la geometría.

Elaborado por: Jorge Núñez & Alex Yanguisela

Las condiciones introducidas en el módulo dinámico en la sección de configuración del análisis se muestran en la Figura 22, en donde el tiempo final establecido es de una cuantía de 0,00011.

Step Controls	
Number Of Steps	1
Current Step Number	1
End Time	1,1e-004
Resume From Cycle	0
Maximum Number of Cycles	1e+07
Maximum Energy Error	0,1
Reference Energy Cycle	0
Initial Time Step	Program Controlled
Minimum Time Step	Program Controlled
Maximum Time Step	Program Controlled
Time Step Safety Factor	0,9
Characteristic Dimension	Diagonals
Automatic Mass Scaling	No

**Figura 22.** Condiciones para la configuración del análisis.

Elaborado por: Jorge Núñez & Alex Yanguisela



### 1.19.5 Parámetros del mallado

Una vez completada y validada la geometría en el modelador ANSYS SpaceClaim, se prosigue a generar un mallado, acorde a la geometría de la probeta propuesta.

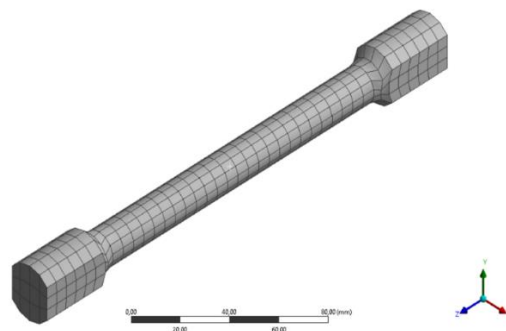
Los parámetros que se manejaron en el presente caso fueron: 1) el centro de ángulo de apertura se modificó a la opción “brusco”, 2) la opción de suavizado se modificó ha “mediano”, 3) la transición se mantuvo en “lenta” y 4) la resolución se mantuvo el valor por defecto. En la Figura 23 se puede apreciar las especificaciones sobre el mallado.

Display	
Display Style	Use Geometry Setting
<b>Defaults</b>	
Physics Preference	Explicit
Element Order	Linear
<input type="checkbox"/> Element Size	Default
<b>Sizing</b>	
Use Adaptive Sizing	Yes
Resolution	4
Mesh Defeaturing	Yes
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default
Transition	Slow
Span Angle Center	Coarse
Initial Size Seed	Assembly
Bounding Box Diagonal	232,22 mm
Average Surface Area	1106,4 mm <sup>2</sup>
Minimum Edge Length	15, mm

**Figura 23.** Parámetros de la generación del mallado.

Elaborado por: Jorge Núñez & Alex Yanguisela

El método de mallado, que se añadió, a parte de los parámetros modificados fue el tamaño de cara, estandarizando el tamaño del elemento a una medida de 4 mm. En la Figura 24, se puede observar el resultado del mallado aplicado a la probeta.



**Figura 24.** Mallado aplicado a la geometría.

Elaborado por: Jorge Núñez & Alex Yanguisela

### 1.19.6 Calidad del mallado

La calidad de malla se evalúa con la opción “Element Quality”, proporcionando la cuantía de la calidad, entre 0 y 1, para cada elemento, en donde, 1 muestra un cuadrado perfecto y 0 denuncia un volumen cero o negativo.

El valor promedio obtenido fue de 0.80, con un total de 840 nodos y 492 elementos. En la Figura 25 se muestra los valores máximos, mínimos y promedio del mallado obtenido y el método de evaluación del mallado.

Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Quality	Default (0.050000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Element Quality
<input type="checkbox"/> Min	0,37272
<input type="checkbox"/> Max	0,94899
<input checked="" type="checkbox"/> Average	0,80255
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,13128

Figura 25. Valores de calidad del mallado.

Elaborado por: Jorge Núñez & Alex Yanguisela

En la Figura 26, se puntualiza la convergencia del mallado a través de la calidad del elemento, que aplicó en la probeta; denotando los elementos más sobresalientes en el lado derecho. Este análisis provee una información esencial de la validez del mallado.

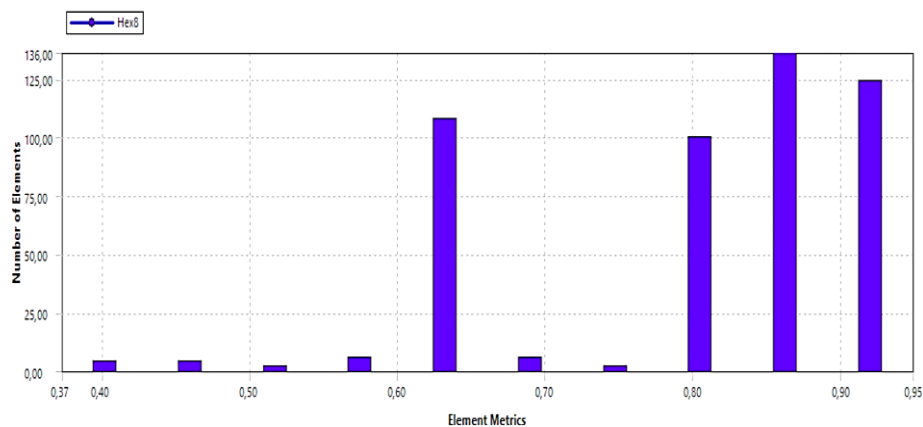


Figura 26. Convergencia del mallado.

Elaborado por: Jorge Núñez & Alex Yanguisela

### 1.19.7 Resultados de la simulación de la probeta en estado de suministro AISI 4140

Una vez precisados los datos del material y las condiciones de frontera; se prosigue a generar los resultados a través de la simulación por elementos finitos. Se debe resaltar que, el análisis formado, se encuentra en un estado transitorio. Los valores de Esfuerzo cortante máximo, alcanzados en la probeta base de suministro, indica un valor de 876,09 MPa.

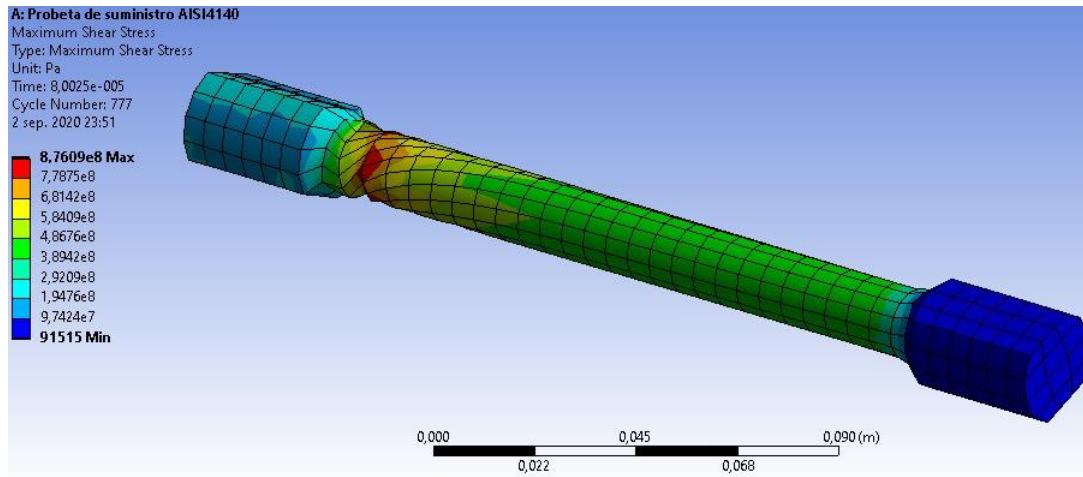


Figura 27. Valor del esfuerzo cortante máximo en probeta de suministro.

Elaborado por: Jorge Núñez & Alex Yanguisela

Como se puede observar en los resultados gráficos de la simulación de la probeta de suministro; la ruptura de la probeta se encuentra muy próximo al lugar en donde se fijó el sistema de referencia cilíndrico y el desplazamiento angular. En la Figura 28 se presenta la gráfica: esfuerzo cortante Vs. Deformación Unitaria.

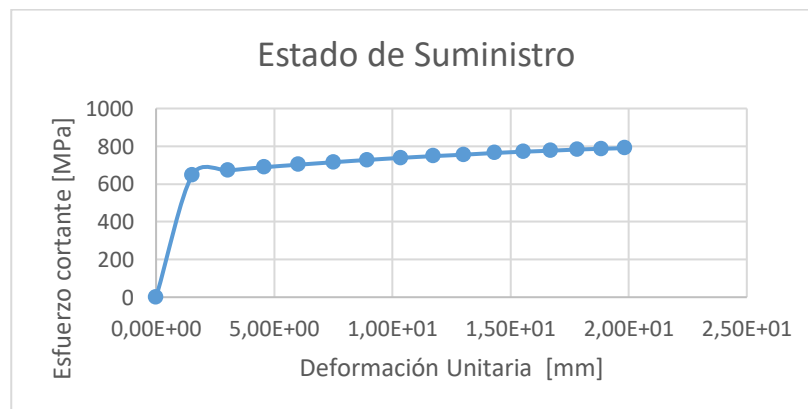


Figura 28. Gráfica Esfuerzo cortante vs Deformación Unitaria, en probeta de suministro.

Elaborado por: Jorge Núñez & Alex Yanguisela

Se debe señalar que, la ruptura obtenida en la Figura 27, es idéntica a dos de las tres probetas, analizadas en los ensayos de torsión experimentales [2].

En la Figura 29 se presenta los resultados que se obtuvieron experimentalmente de las probetas suministro sometidas al ensayo de torsión.



**Figura 29.** Probetas fracturadas en ensayo de torsión experimentalmente [2].

#### **1.19.8 Parametrización Esfuerzo cortante Vs. Desplazamiento Angular**

La parametrización presente en el software ANSYS; permite modificar una o más variables en función de otras, obteniendo una respuesta directa en los resultados objetivos. En este caso, se parametrizó el desplazamiento angular y el esfuerzo cortante.

Una vez analizado los esfuerzos cortantes en un rango de desplazamiento angular entre  $220^\circ$  -  $520^\circ$  en el eje de las abscisas, se encontró un valor promedio del esfuerzo cortante aplicado en el espécimen de suministro de 789,53MPa, en donde el valor mínimo fue de 730,76 MPa y el máximo de 876,09 MPa.

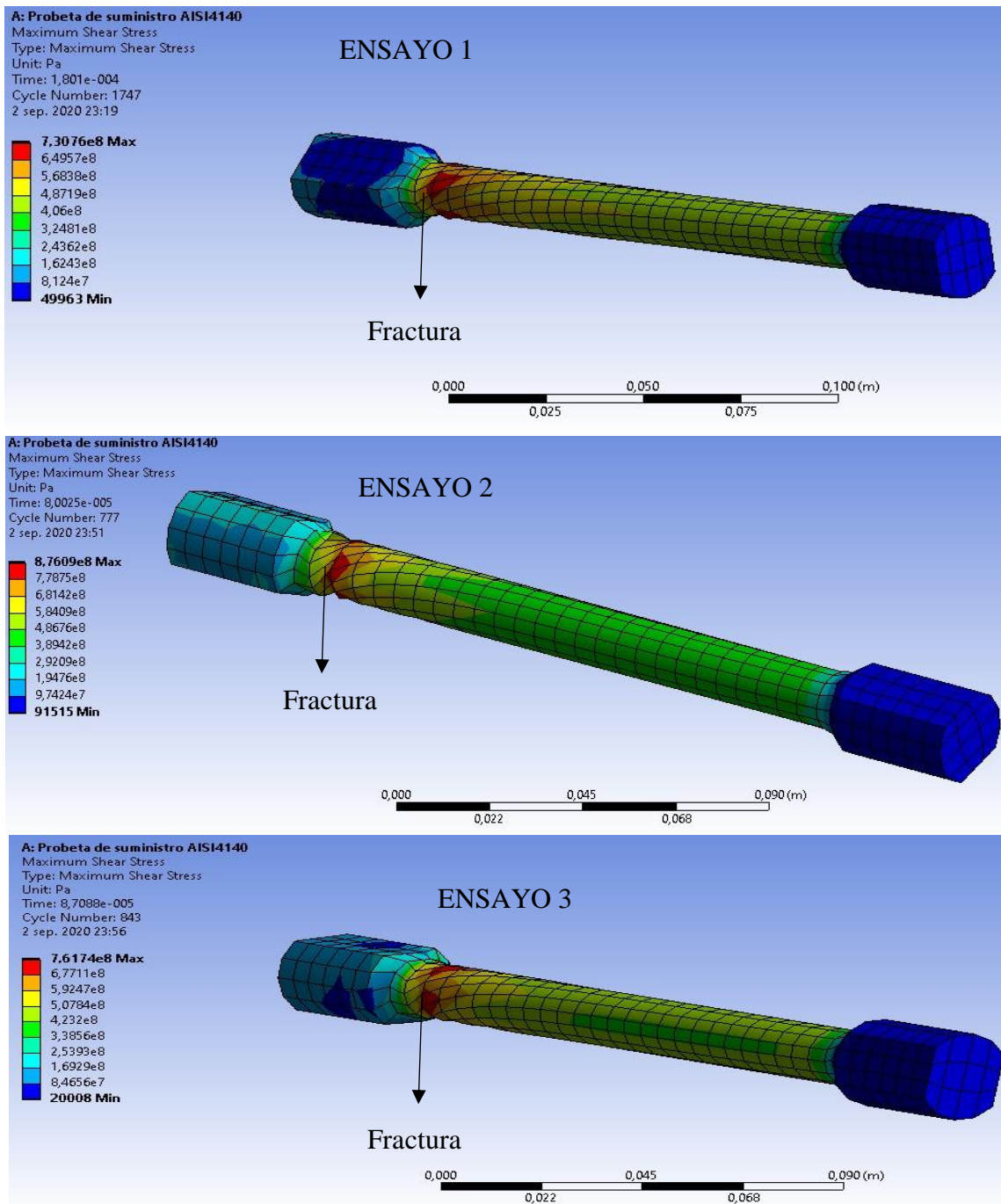


Figura 30. Resultados simulaciones de material en estado de suministro.

Elaborado por: Jorge Núñez & Alex Yanguisela

En la Tabla 3 se presenta los resultados que se obtuvieron en la parametrización tomando en cuenta como variable de cambio el desplazamiento angular y como variables de respuesta el esfuerzo cortante y la deformación unitaria.

**Tabla 3** Resultados de simulaciones de probetas en estado de suministro

<b>N° P</b>	<b>Desplazamiento angular</b> Grados	<b>Torque Máximo</b> N*m	<b>Esfuerzo cortante máximo</b> MPa	<b>Deformación unitaria</b> rad
<b>1</b>	220	587,348	730,76	0,335
<b>2</b>	520	704,157	876,09	0,339
<b>3</b>	360	612,248	761,74	0,344
<b>Media</b>	366.66	634,584	789,53	0,343

## **1.20 Análisis por elementos finitos de probetas con TT de temple a 830°C y revenido a 500 °C**

### **1.20.1 Generación del material**

Al ser un material con un tratamiento térmico es necesario generar modificaciones a la configuración del acero AISI/SAE 4140. Para ello es necesario disponer de una configuración en el módulo de “Engineering Data”, en el apartado “Toolbox”, justo en la sección de plasticidad.

Cabe mencionar que el módulo de elasticidad al presentar un tratamiento térmico se modifica levemente; en este caso se precisó un valor de 208,9 GPa registrado en el trabajo investigativo citado, para tratamientos térmicos a diferentes temperaturas de temple y revenido del acero AISI/SAE 4140 [35].

Para este caso, el módulo de Bulk (Bulk Modulus), y el módulo de rigidez o módulo de corte (shear modulus), tienen un valor de:  $1,7408 \times 10^{11}$  [Pa] y  $8,0346 \times 10^{10}$  [Pa] respectivamente; valores que son automáticamente generados por el software al momento de ingresar el Poisson’s ratio junto con Young’s Modulus.

Para el valor de la resistencia a la fluencia se precisó un valor de 1185 MPa, en base al estudio citado acerca de propiedades mecánicas del material AISI 4140 que se realizó con diferentes temperaturas de temple y también de revenido [36].

El módulo tangencial para simulación mediante elementos finitos del acero AISI/SAE 4140 con temple y revenido a 500 °C tiene un valor de 9,72 GPa en base al estudio citado [37].

En la Figura 31 se presenta la configuración prevista en análisis por elementos finitos.

Properties of Outline Row 3: aisi4140			
	A	B	
1	Property	Value	
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	7865	kg m <sup>-3</sup>
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young's Modu...	
6	Young's Modulus	2,089E+05	MPa
7	Poisson's Ratio	0,3	
8	Bulk Modulus	1,7408E+11	Pa
9	Shear Modulus	8,0346E+10	Pa
10	Bilinear Isotropic Hardening		
11	Yield Strength	1185	MPa
12	Tangent Modulus	9720	MPa

**Figura 31.** Propiedades del material con temple a 830° C y revenido 500° C.

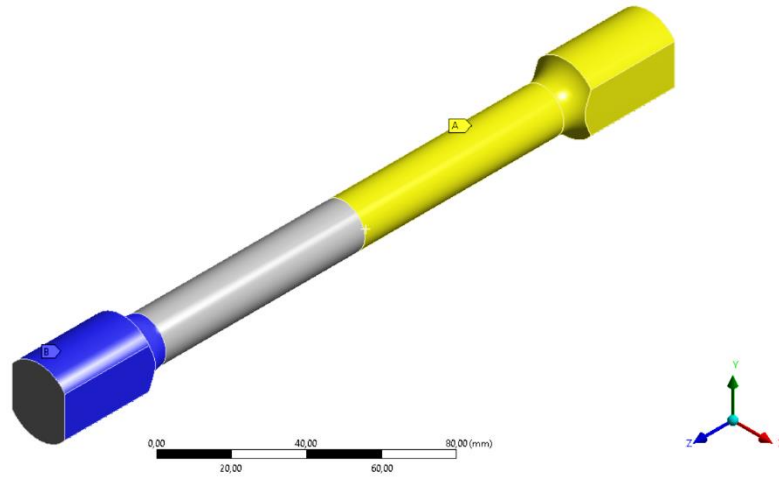
Elaborado por: Jorge Núñez & Alex Yanguisela

### 1.20.2 Condiciones de frontera

El ensayo de torsión ejecutado para la probeta con tratamiento térmico a 830 °C y un revenido a 500 °C, aplicó varias de las condiciones de frontera de la Sección 3.1.4 exceptuando la condición de frontera sección A, esto debido al requerimiento de una torsión más uniforme en el modelo. El desplazamiento angular utilizado fue de 1785,5° en el sentido positivo del eje Y.

En la Figura 32 se muestra las variaciones aplicadas en las condiciones de frontera.

B: Probeta Primer tratamiento AISI4140  
 Explicit Dynamics  
 Time: 1,6e-005 s  
 29/8/2020 19:12  
 A Displacement  
 B Fixed Support



**Figura 32.** Condiciones de frontera de la geometría con temple a 830° C, revenido 500° C.

Elaborado por: Jorge Núñez & Alex Yanguisela

Las condiciones introducidas en el módulo dinámico en la sección de configuración del análisis se muestran en la Figura 33, en donde el tiempo final establecido es de una cuantía de 0,00011.

Analysis Settings Preference	
Type	Program Controlled
<b>Step Controls</b>	
Number Of Steps	1
Current Step Number	1
End Time	1,6e-005
Resume From Cycle	0
Maximum Number of Cycles	1e+07
Maximum Energy Error	0,1
Reference Energy Cycle	0
Initial Time Step	Program Controlled
Minimum Time Step	Program Controlled
Maximum Time Step	Program Controlled
Time Step Safety Factor	0,9
Characteristic Dimension	Diagonals
Automatic Mass Scaling	No

**Figura 33.** Condiciones para el análisis del material con temple a 830° C, revenido 500° C.

Elaborado por: Jorge Núñez & Alex Yanguisela



### 1.20.3 Generación del mallado

El mallado aplicado para generar la simulación del modelo con tratamiento térmico a 830 °C y un revenido 500 °C. Presenta las siguientes configuraciones: 1) el centro de ángulo de apertura, se modificó a la opción “mediano”, 2) la opción de suavizado se elevó a “alto”, 3) la transición se mantuvo en “lenta” y 4) la resolución se elevó en una unidad; siendo el valor por defecto 4.

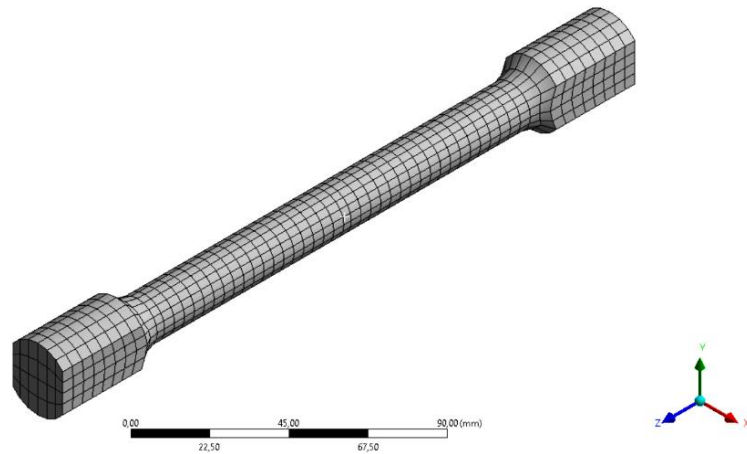
Display	
Display Style	Use Geometry Setting
Defaults	
Physics Preference	Explicit
Element Order	Linear
<input type="checkbox"/> Element Size	Default
Sizing	
Use Adaptive Sizing	Yes
Resolution	5
Mesh Defeaturing	Yes
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default
Transition	Slow
Span Angle Center	Medium
Initial Size Seed	Assembly
Bounding Box Diagonal	232,22 mm
Average Surface Area	1027,3 mm <sup>2</sup>
Minimum Edge Length	15, mm

**Figura 34.** Parámetros de generación del mallado, material con temple a 830° C y revenido 500° C.

Elaborado por: Jorge Núñez & Alex Yanguisela

La evaluación obtenida en el mallado fue de 0.80463, con un total de 2065 nodos y 1392 elementos. En la Figura 34 se presenta los valores evaluativos alcanzados tanto máximos, mínimos y promedio, con su respectivo método de evaluación del mallado.

El tamaño de elemento que se aplicó en toda su topología fue de 4 mm, permitiendo generar en gran cantidad elementos cúbicos; esto se puede denotar en la Figura 36.

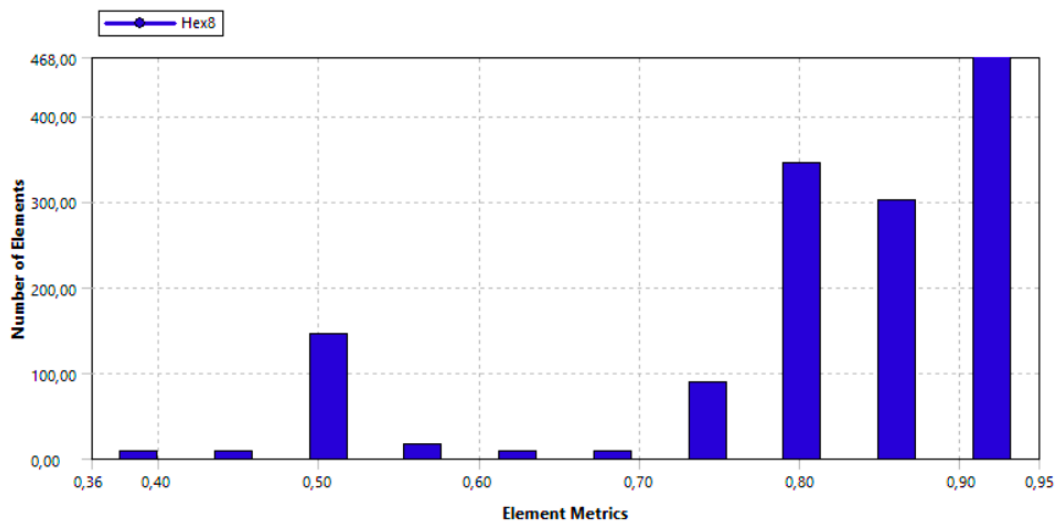


**Figura 35.** Mallado aplicado a la geometría del material con temple a 830° C y revenido 500° C.

Elaborado por: Jorge Núñez & Alex Yanguisela

En la Figura 36, se indica la convergencia del mallado evaluado por el método “calidad del elemento”.

Se debe señalar que la mayoría de elemento se encuentran en la región de Buenas y Muy buena calidad.



**Figura 36.** Convergencia del mallado de la geometría con temple a 830° C, revenido 500° C.

Elaborado por: Jorge Núñez & Alex Yanguisela

#### 1.20.4 Resultados de la simulación de probeta con TT de temple a 830 °C, revenido a 500 °C, en el acero AISI/SAE 4140

El análisis obtenido en el modelo de la probeta con tratamiento térmico a 830 °C y revenido de 500 °C; se puede observar en la Figura 37, en donde el Esfuerzo cortante promedio es de 1288.2 MPa

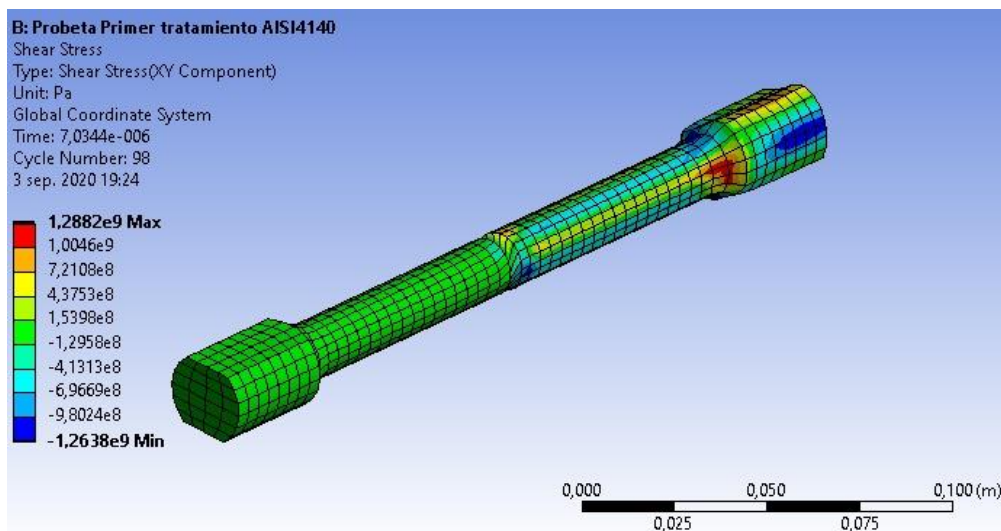


Figura 37. Valor del esfuerzo cortante promedio en probeta con temple a 830° C, revenido 500° C.

Elaborado por: Jorge Núñez & Alex Yanguisela

Como se puede observar en los resultados gráficos de la simulación de la probeta con un tratamiento térmico de temple a 830 °C y revenido a 500 °C; la ruptura de la probeta se encuentra en el medio del elemento, justo en uno de los ejes de referencia cartesianos, configurado en las condiciones de frontera. En la Figura 38 se presenta la gráfica: Esfuerzo cortante Vs. Deformación unitaria.

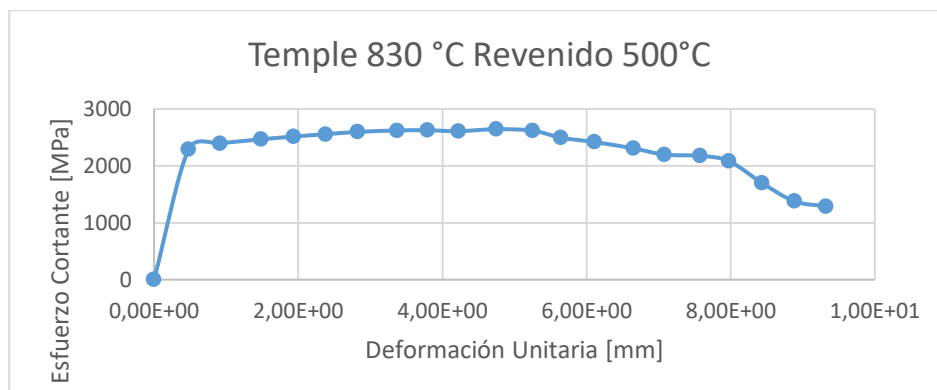


Figura 38. Gráfica Esfuerzo cortante vs Deformación, con temple a 830° C, revenido 500° C.

Elaborado por: Jorge Núñez & Alex Yanguisela

### 1.1.Parametrización Esfuerzo cortante Vs. Desplazamiento Angular

La parametrización presente en el software ANSYS; permite modificar una o más variables en función de otras, obteniendo una respuesta directa en los resultados objetivos. En este caso, se parametrizó el desplazamiento angular y el esfuerzo cortante.

Una vez analizado los esfuerzos cortantes en un rango de desplazamiento angular entre 1400° a 2100° en el eje de las abscisas. Se encontró un valor promedio del esfuerzo cortante en la probeta mediante una parametrización que nos arrojó resultado promedio de 1288,2 MPa, en donde el valor mínimo fue de 1050,11 MPa y el máximo de 1504,64 MPa.

A continuación, se presenta los resultados que se evidencian en la parametrización tomando en cuenta como variable de cambio el desplazamiento angular y como variables de respuesta el esfuerzo cortante y la deformación unitaria.

**Tabla 4** Resultados de simulación con temple a 830 °C y revenido a 500 °C

<b>N°</b>	<b>Desplazamiento angular</b>	<b>Torque Máximo</b> N.m	<b>Esfuerzo cortante máximo</b> MPa	<b>Deformación unitaria</b> rad
<b>1</b>	1995,5	1157,16	1439,71	1,489
<b>2</b>	2085,5	1209,35	1504,64	1,536
<b>3</b>	1545,5	896,22	1115,05	1,582
<b>4</b>	1455,5	844,03	1050,11	1,629
<b>5</b>	1635,5	948,41	1179,98	1,676
<b>6</b>	1995,5	1157,16	1439,71	1,722
<b>Media</b>	1785,5	1035,39	1288,2	1,606

Elaborado por: Jorge Núñez & Alex Yanguisela

## 1.21 Análisis por elementos finitos de probeta con temple 860°C y revenido 500 °C

### 1.21.1 Implementación del material

La configuración implementada en la probeta de acero AISI 4140 con un tratamiento térmico de 860 °C y un revenido de 500 °C. se modificó de igual manera la sección de plasticidad, tanto el módulo tangencial como la resistencia a la fluencia.

El módulo de elasticidad al presentar un tratamiento térmico se modifica levemente; en este caso se precisó un valor de 208,9 GPa registrado en el trabajo investigativo citado, para tratamientos térmicos a diferentes temperaturas de revenido y temple del material AISI 4140 [35].

Para este caso, el módulo de Bulk (Bulk Modulus), y el módulo de rigidez o módulo de corte (shear modulus), tienen un valor de:  $1,7408 \times 10^{11}$  [Pa] y  $8,0346 \times 10^{10}$  [Pa] respectivamente; valores que son automáticamente generados por el software al momento de ingresar el valor que tiene la razón de Poisson y el módulo de elasticidad o Young.







Properties of Outline Row 3: aisi4140			
	A	B	
1	Property	Value	
2	 Material Field Variables	 Table	
3	 Density	7865	kg m <sup>-3</sup>
4	 Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young's Modu...	
6	Young's Modulus	2,089E+05	MPa
7	Poisson's Ratio	0,3	
8	Bulk Modulus	1,7408E+11	Pa
9	Shear Modulus	8,0346E+10	Pa
10	 Bilinear Isotropic Hardening		
11	Yield Strength	1157	MPa
12	Tangent Modulus	9000	MPa

Figura 39. Propiedades del material con temple a 860° C y revenido 500° C.

Elaborado por: Jorge Núñez & Alex Yanguisela

En la Figura 39 se presenta la configuración generada en análisis por elementos finitos.

Para el valor de la resistencia a la fluencia se precisó un valor de 1157 MPa, en base al estudio citado de propiedades del material AISI 4140 con distintas temperaturas de revenido y temple [36].

El módulo tangencial para simulación mediante elementos finitos del acero AISI 4140 templado a 860 °C y con un revenido de 500 °C tiene un valor promedio de 9 GPa en base al estudio citado [37].

### **1.21.2 Generación del mallado**

El mallado es exactamente el mismo que se aplicó en la Sección (3.2.2) para generar la simulación del modelo con tratamiento térmico a 860 °C y un revenido de 500 °C.

Las configuraciones se mantuvieron de la siguiente manera: 1) el centro de ángulo de apertura, se modificó a la opción “mediano”, 2) la opción de suavizado se elevó a “alto”, 3) la transición se mantuvo en “lenta” y 4) la resolución se elevó en una unidad; siendo el valor por defecto 4.

La evaluación obtenida en el mallado fue de 0.80463, con un total de 2065 nodos y 1392 elementos. El tamaño de elemento que se aplicó en toda su topología fue de 4 mm, permitiendo generar en gran cantidad elementos hexaédricos. Se debe señalar que, la mayor parte de los elementos tienen una calidad Buena y Muy buena.

### **1.21.3 Condiciones de frontera**

Las condiciones de frontera se mantuvieron exactamente igual al de la Sección (3.2.3). El desplazamiento angular utilizado fue de 1380,3° en el sentido positivo del eje Y. Se debe añadir que el soporte fijo solo se encuentra en la periferia de la zona de empotramiento.

Las condiciones introducidas en el módulo dinámico en la sección de configuración del análisis se muestran en la Figura 40, en donde el tiempo final establecido es de una cuantía de 0,000009.

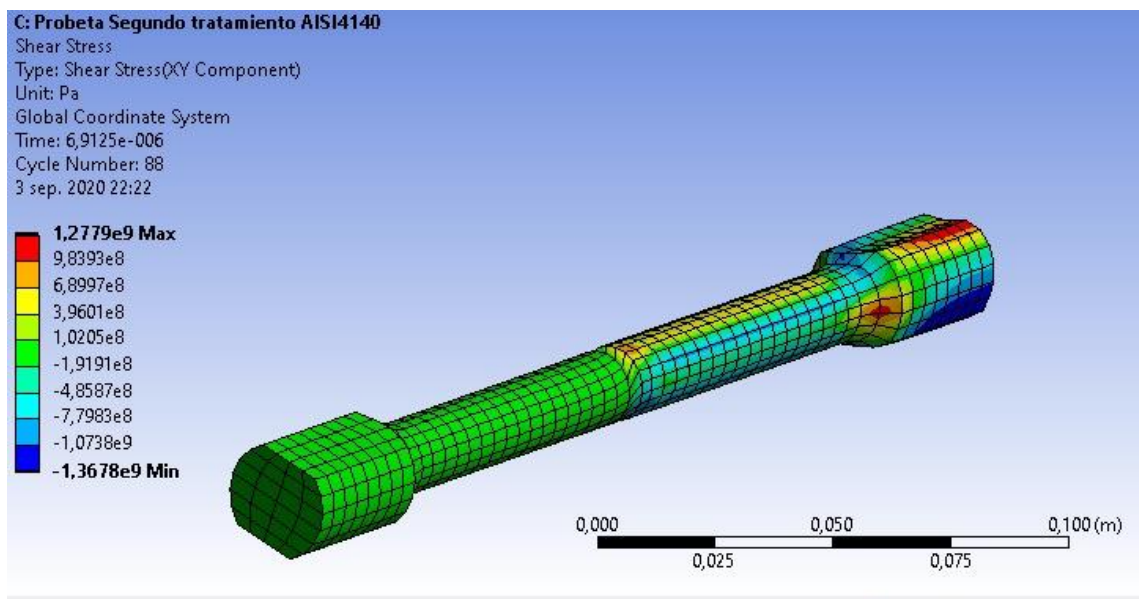
Analysis Settings Preference	
Type	Program Controlled
<b>Step Controls</b>	
Number Of Steps	1
Current Step Number	1
End Time	9,e-006
Resume From Cycle	0
Maximum Number of Cycles	1e+07
Maximum Energy Error	0,1
Reference Energy Cycle	0
Initial Time Step	Program Controlled
Minimum Time Step	Program Controlled
Maximum Time Step	Program Controlled
Time Step Safety Factor	0,9
Characteristic Dimension	Diagonals
Automatic Mass Scaling	No

**Figura 40.** Condiciones para el análisis del material con temple a 860° C, revenido 500° C.

Elaborado por: Jorge Núñez & Alex Yanguisela

#### 1.21.4 Resultados de la simulación de la probeta AISI/SAE 4140 con tratamiento térmico a 860 °C y un revenido 500 °C

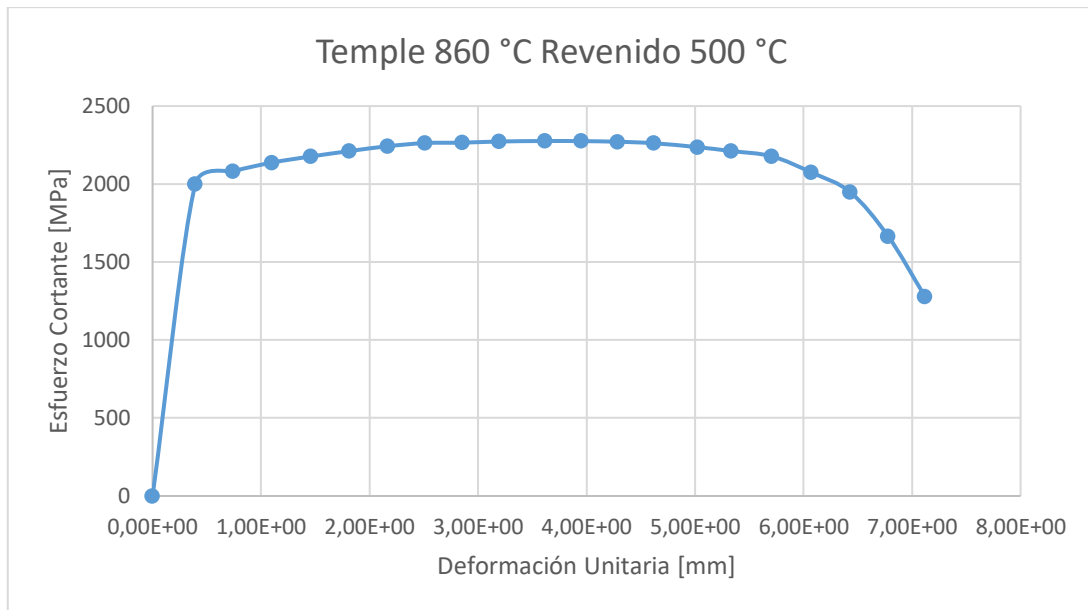
El análisis obtenido en el modelo de la probeta con tratamiento térmico a 860 °C y un revenido 500 °C; se puede observar en la Figura 41, en donde el Esfuerzo cortante promedio es de 1277,9 MPa.



**Figura 41.** Valor del esfuerzo cortante máximo en probeta con temple a 860° C, revenido 500° C.

Elaborado por: Jorge Núñez & Alex Yanguisela

En los resultados gráficos obtenidos en la simulación de la probeta con un tratamiento térmico y un revenido; se puede observar, la ruptura de la probeta se encuentra en medio, justo en uno de los ejes de referencia cartesianos. Por otra parte, en la Figura 42 se presenta la gráfica: esfuerzo cortante máximo Vs. Tiempo, se debe mencionar que esta gráfica presenta un total de 21 puntos.



**Figura 42.** Gráfica Esfuerzo cortante vs Deformación, con temple a 860° C, revenido 500° C.

Elaborado por: Jorge Núñez & Alex Yanguisela

### 1.21.5 Parametrización Esfuerzo cortante Vs. Desplazamiento Angular

La parametrización obtenida en el presente tratamiento térmico con los respectivos rangos de desplazamiento de 360° a 1840°, en donde el esfuerzo cortante máximo y mínimo obtenidos fue de 1694,22 MPa y 33,29 MPa respectivamente.

A continuación, en la siguiente tabla se presentan los datos presentados en la parametrización tomando en cuenta como variable de cambio el desplazamiento angular y como variables de respuesta el esfuerzo cortante y la deformación unitaria.



**Tabla 5** Resultados de simulación con temple a 860 °C y revenido a 500 °C

<b>Nº</b>	<b>Desplazamiento angular</b>	<b>Torque Máximo N*m</b>	<b>Esfuerzo cortante máximo MPa</b>	<b>Deformación unitaria rad</b>
<b>1</b>	1455,5	1083,05	1347,50	1,210
<b>2</b>	1455,5	1083,05	1347,50	1,257
<b>3</b>	1815,5	1350,94	1680,80	1,303
<b>4</b>	1365,5	1016,08	1264,18	1,350
<b>5</b>	1830,00	1361,73	1694,22	1,396
<b>6</b>	360,00	267,88	333,29	1,443
<b>Media</b>	1380,33	1027,12	1277,89	1,326

Elaborado por: Jorge Núñez &amp; Alex Yanguisela

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS

En función del desarrollo experimental y teórico sobre la evaluación del comportamiento mecánico a la torsión del material AISI / SAE 4140 dado los tratamientos térmicos realizados, se genera el siguiente análisis comparativo de los resultados para el caso en estado de suministro, tal como se puede observar en las Tablas 6 y 7 respectivamente.

**Tabla 6** Resultados experimentales en especímenes de suministro

Probeta/Ensayo	Despl. Angular (°)	Torque Máx. (N*m)	Esfuerzo cortante máximo (Mpa)	Deformación unitaria (rad)
1	220	602	748,53	0,204
2	520	700	870,38	0,484
3	360	700	870,38	0,335
<b>Media</b>	<b>366,67</b>	<b>667,33</b>	<b>829,76</b>	<b>0,341</b>

**Tabla 7** Resultados de simulación en estado de suministro

N° P	Desplazamiento angular Grados	Torque Máximo N*m	Esfuerzo cortante máximo MPa	Deformación unitaria rad
<b>1</b>	220	587,348	730,76	0,335
<b>2</b>	520	704,157	876,09	0,339
<b>3</b>	360	612,248	761,74	0,344
<b>Media</b>	<b>366.66</b>	<b>634,584</b>	<b>789,53</b>	<b>0,343</b>

Elaborado por: Jorge Núñez & Alex Yanguisela

Se evidencia que los valores del Esfuerzo cortante realizados experimentalmente tiene un promedio de **829,76 MPa** , con un ángulo de torsión de **366,67°** y una deformación unitaria de **0,341 rad**; valores muy cercanos a los obtenidos mediante el análisis por elementos finitos en el software; siendo el valor promedio del esfuerzo cortante de **789,53 MPa** con un ángulo de torsión de **366,6°** y una deformación unitaria de **0,343 rad**.

## 1.22 Comparación de fracturas experimentales vs simulación, de probetas en estado de suministro.



Figura 43. Probetas en estado de suministro fracturadas, ensayo de torsión experimentalmente [2].

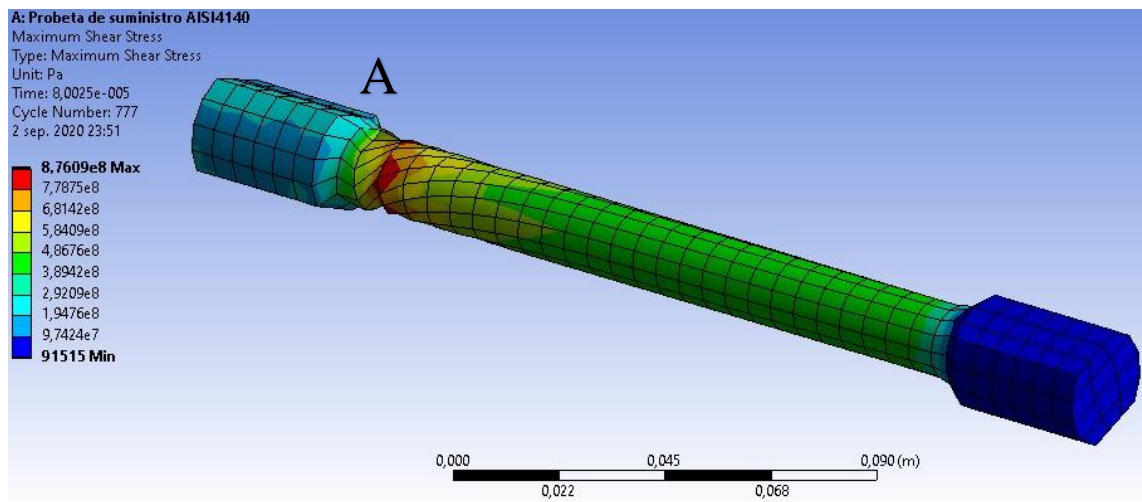


Figura 44. Fractura y Valor del esfuerzo cortante máximo (876,09 MPa) en probeta de suministro.

Elaborado por: Jorge Núñez & Alex Yanguisela

Como se evidencia en la Figura 44, en los datos resultantes gráficos de la simulación de la probeta de suministro; la ruptura de la probeta se encuentra muy próximo a la sección A, y es muy similar a dos de las tres probetas, analizadas en los ensayos de torsión realizados experimentalmente en la Figura 43.

### 1.23 Resultados de probetas con TT templadas a 830 °C y con revenido de 500 °C

**Tabla 8** Resultados experimentales con temple a 830 °C y revenido a 500 °C

PROBETA	Angulo de torsión (°)	Torque Máximo N*m	Esfuerzo cortante máximo (Mpa)	Deformación unitaria (rad)
1	1995,5	768	954,93	1,86
2	2085,5	868	1079,27	1,94
3	1545,5	880	1094,19	1,44
4	1455,5	850	1056,88	1,35
5	1635,5	890	1106,62	1,52
6	1995,5	800	997,72	1,86
<b>Media</b>	<b>1785,50</b>	<b>842,67</b>	<b>1048,27</b>	<b>1,66</b>

Fuente: Héctor Ñacata & Ángel Cherres

**Tabla 9** Resultados de simulación con temple a 830 °C y revenido a 500 °C

N°	Desplazamiento angular	Torque Máximo N.m	Esfuerzo cortante máximo MPa	Deformación unitaria rad
1	1995,5	1157,16	1439,71	1,489
2	2085,5	1209,35	1504,64	1,536
3	1545,5	896,22	1115,05	1,582
4	1455,5	844,03	1050,11	1,629
5	1635,5	948,41	1179,98	1,676
6	1995,5	1157,16	1439,71	1,722
<b>Media</b>	<b>1785,5</b>	<b>1035,39</b>	<b>1288,2</b>	<b>1,606</b>

Elaborado por: Jorge Núñez & Alex Yanguisela

Se observa que los valores del Esfuerzo cortante realizados experimentalmente con temple a 830 °C y revenido a 500 °C, tiene un valor promedio de **1048,27 MPa** , con un ángulo de torsión de **1785,5 °** y una deformación unitaria de **1,66 rad**; valores muy cercanos a los obtenidos mediante el análisis por elementos finitos en el software; siendo el valor promedio del esfuerzo cortante de **1288,2 MPa** con un ángulo de torsión de **1785,5 °** y una deformación unitaria de **1,606 rad**. El torque máximo promedio obtenido en la simulación tiene un valor de **1035,5 Nm**.

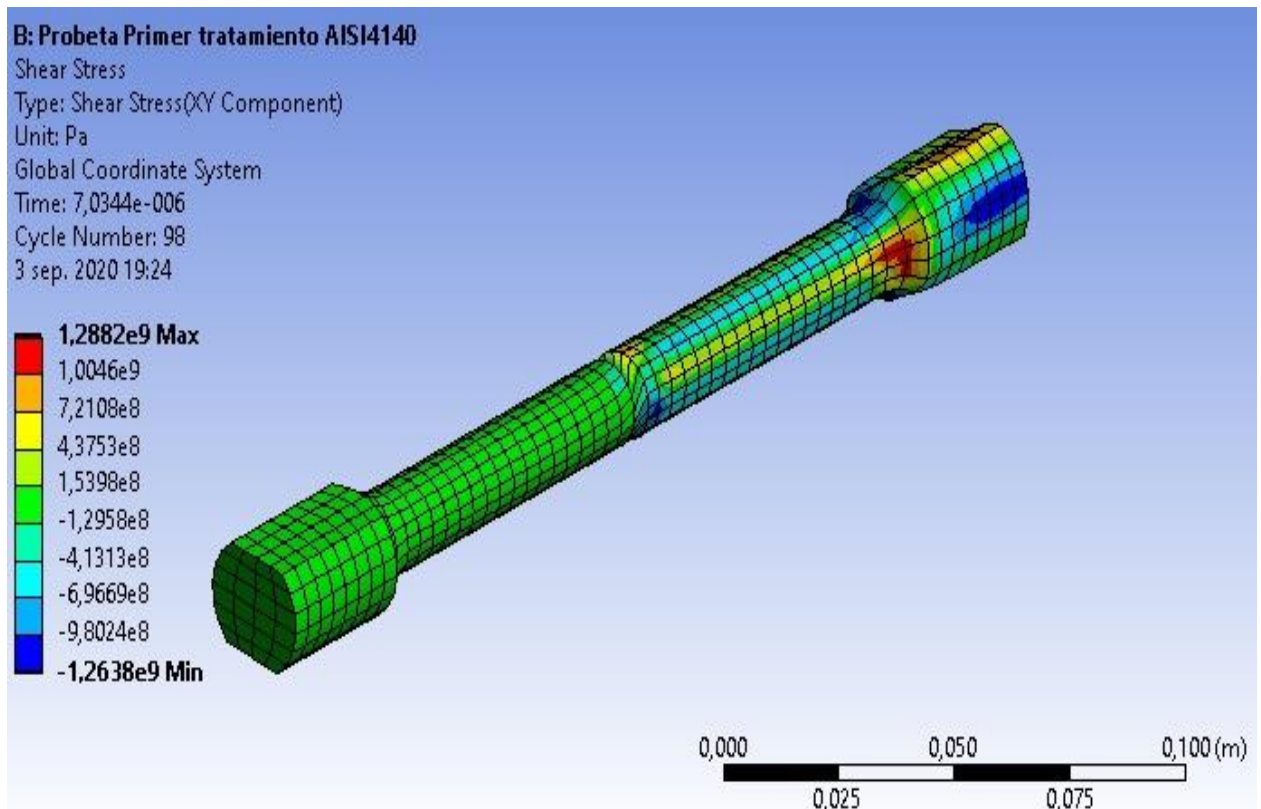
## 1.24 Comparación de fracturas experimentales vs simulación, de probetas con temple a 830 °C y revenido a 500°C



**Figura 45.** Probetas con temple a 830 °C y revenido a 500 °C, fracturadas en ensayo de torsión experimentalmente [2].

La mayoría de las probetas de ensayos de torsión realizados experimentalmente tienden a fracturarse en zonas cercanas a la zona central de la probeta como se evidencia en la Figura 45.

Para la simulación realizada a las probetas que fueron sometidas a un temple de 830°C y Revenido a 500°C en la Figura 46 se puede evidenciar la magnitud de esfuerzo máximo determinado.



**Figura 46.** Fractura y Valor del esfuerzo cortante máximo (1288,2 MPa) en probeta con temple a 830 °C y revenido a 500 °C.

Elaborado por: Jorge Núñez & Alex Yanguisela

Como se puede observar en la Figura 46, los resultados gráficos de la simulación de la probeta con temple a 830 °C y revenido a 500 °C; la ruptura de la probeta se encuentra en el punto medio de la sección torsionada, apariencia similar encontrada en los ensayos experimentales, así como el valor de esfuerzo cortante.

### 1.25 Resultados de especímenes con temple 860°C - revenido 500°C

Para la validación de ensayos experimentales previamente tratados térmicamente con temple 360° y revenido 500°C, se consideraron los valores correspondientes de los primeros 5 ensayos, despreciando el sexto por motivo de encontrarse fuera del rango lógico de resultados.

**Tabla 10** Resultados experimentales con temple a 860 °C y revenido a 500 °C

<b>PROBETA</b>	<b>Angulo torsión (°)</b>	<b>Torque máximo (N.m)</b>	<b>Esfuerzo cortante máximo (Mpa)</b>	<b>Deformación unit. (rad)</b>
1	1455,5	855	1063,11	1,36
2	1455,5	792	984,77	1,36
3	1815,5	853	1060,62	1,69
4	1365,5	851	1058,13	1,27
5	1830	853	1060,62	1,70
<b>Media</b>	<b>1380,33</b>	<b>837,83</b>	<b>1041,76</b>	<b>1,28</b>

Fuente: Héctor Nacata &amp; Ángel Cherres

**Tabla 11** Resultados de simulación, con temple a 860 °C y revenido a 500 °C

<b>N°</b>	<b>Desplazamiento angular</b>	<b>Torque Máximo N*m</b>	<b>Esfuerzo cortante máximo MPa</b>	<b>Deformación unitaria rad</b>
<b>1</b>	1455,5	1083,05	1347,50	1,210
<b>2</b>	1455,5	1083,05	1347,50	1,257
<b>3</b>	1815,5	1350,94	1680,80	1,303
<b>4</b>	1365,5	1016,08	1264,18	1,350
<b>5</b>	1830,00	1361,73	1694,22	1,396
<b>Media</b>	<b>1380,33</b>	<b>1027,12</b>	<b>1277,89</b>	<b>1,326</b>

Elaborado por: Jorge Núñez &amp; Alex Yanguisela

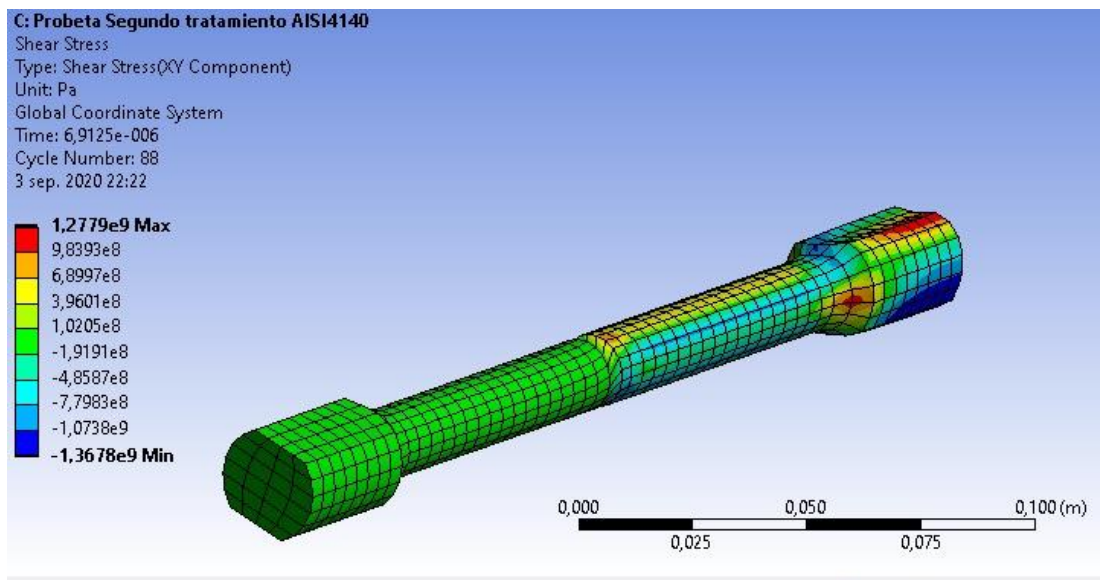
Se observa que los valores del Esfuerzo cortante realizados experimentalmente con un tratamiento de temple (860 °C) y revenido (500 °C), tiene un valor promedio de **1041,76 MPa** , con un ángulo de torsión de **1380,33 °** y una deformación unitaria de **1,28 rad**; valores acercados a los obtenidos mediante el análisis por elementos finitos en el software; siendo el valor promedio del esfuerzo cortante de **1054,428 MPa** con un ángulo de torsión de **1425,0 °** y una deformación unitaria de **1,326 rad**.

### 1.26 Comparación de fracturas experimentales vs simulación, temple 860 °C , revenido 500 °C.



**Figura 47.** Probetas templadas a 860 (°C), revenido 500 (°C), fracturadas en ensayo de torsión experimentalmente [2].

Fuente: Héctor Ñacata & Ángel Cherres



**Figura 48.** Fractura y Valor del esfuerzo cortante máximo (1277,9 MPa), en probeta con temple a 860° C, revenido 500° C.

Elaborado por: Jorge Núñez & Alex Yanguisela

Como se puede observar en la Figura 48, los resultados gráficos de la simulación de la probeta con temple a 860°C y revenido a 500°C; la ruptura de la probeta se encuentra cercana al centro de la sección torsionada. Por otro lado, la mayoría de las probetas de ensayos de torsión realizados experimentalmente tienden a fracturarse en zonas



ligeramente cercanas al extremo en donde se aplicó el par torsor de la probeta, como se evidencia en la Figura 47.

### 1.27 Comparación simplificada de resultados

**Tabla 12** Recopilación de resultados experimentales

<b>COMPARACION DE RESULTADOS</b>				
PROBETA	Ángulo de torsión (Grados)	Torque Máximo N.m	Esfuerzo cortante máx (Mpa)	Deformación unitaria (rad)
SUMINISTRO	366,67	667,33	829,76	0,341
TEMPLE 830°C Y REVENIDO A 500°C	1785,50	842,67	1048,27	1,66
TEMPLE 860°C Y REVENIDO A 500°C	1380,33	837,83	1041,76	1,28

**Tabla 13** Recopilación de resultados obtenidos en simulación

<b>COMPARACIÓN DE RESULTADOS</b>				
PROBETA	Ángulo de torsión (Grados)	Torque Máximo N*m	Esfuerzo cortante máx. (Mpa)	Deformación unitaria (rad)
SUMINISTRO	366,6	634,58	789,53	0,343
TEMPLE 830°C Y REVENIDO A 500°C	1785,5	1035,39	1288,2	1,606
TEMPLE 860°C Y REVENIDO A 500°C	1380,33	1027,12	1277,89	1,326

Elaborado por: Jorge Núñez & Alex Yanguisela

Al comparar los resultados experimentales se obtiene que los valores máximos de torque aplicado y esfuerzo cortante se dan en los especímenes que se realizó un TT de temple 830°C y revenido 500°C; siendo estos valores: **842,67Nm** y **1048,27Mpa** respectivamente.

Al comparar los datos que se obtuvieron mediante simulaciones en software Ansys, coincide que los valores máximos de torque aplicado y esfuerzo cortante producido se obtuvieron en probetas tratadas mediante un temple de 830 °C y revenido de 500 °C; siendo estos valores: **1035,39 Nm** y **1288,2 Mpa** respectivamente. Sin embargo, dichos

valores no superan por mucho a los obtenidos mediante tratamiento térmico de temple a 860°C y revenido a 500°C; siendo estos valores: **1027,12 Nm** y **1277,89 Mpa** respectivamente.

## 1.28 Análisis de Error Porcentual

*Tabla 14 Análisis del error porcentual de resultados generales*

	Torque	Error Porcentual (%)	Esfuerzo Cortante	Error Porcentual (%)	Deformación Unitaria	Error Porcentual (%)
SUMINISTRO						
EXPERIMENTAL	667,33	4,90	829,76	4,85	0,341	0,293
SIMULACION	634,58		789,53		0,34	
TEMPLE 830°C, R500°C						
EXPERIMENTAL	842,67	22,87	1048,27	22,88	1,66	3,012
SIMULACION	1035,39		1288,2		1,61	
TEMPLE 860°C, R500°C						
EXPERIMENTAL	837,83	22,59	1041,76	22,65	1,28	3,906
SIMULACION	1027,12		1277,8		1,33	

## CONCLUSIONES

- Se concluye de forma acertada que el comportamiento del material AISI/SAE 4140 al ser sometido a ensayos de torsión según la Norma ASTM-E143 de manera experimental se lo puede replicar de manera computacional con la ayuda del software ANSYS obteniendo resultados con una alta confiabilidad.
- Se validó los resultados de esfuerzo cortante al ingresar los datos del material en estado de suministro del acero AISI/4140 en el software ANSYS, obteniendo un valor medio del torque de 634,58 N\*m y esfuerzo cortante de 789,53 MPa, para un ángulo de torsión de 366,6°.
- Se confirma que, al generar la simulación torsional de probetas con tratamientos térmicos de: temple a 830 °C-860 °C y revenido a 500 °C, en el Software “ANSYS” del módulo Explicit Dynamics, se obtuvieron valores medio del torque de 1035,39 Nm y 1027,12 Nm y esfuerzo cortante de 1288,2 MPa y 1277,89 MPa, para un ángulo de torsión de 1785,5° y 1380,33° respectivamente.
- De la simulación realizada a las probetas en estado de suministro y tratadas térmicamente por temple y revenido; la fractura se da en la zona similar para el caso de las probetas ensayadas experimentalmente.
- Se concluye que los resultados más óptimos se obtienen con un tratamiento térmico de temple a 830 °C y revenido a 500 °C ya que se obtuvo un mayor valor del esfuerzo cortante soportado y torque aplicado.
- En base al cálculo del error porcentual, se evidencia que para probetas en estado de suministro los valores de torque, esfuerzo cortante y deformación unitaria obtenidos mediante simulaciones en el software Ansys son bastante cercanos a los experimentales realizados en laboratorio; arrojando una diferencia porcentual de 4,90 % , 4,85 % y 0,293% respectivamente.
- En base al cálculo del error porcentual, se evidencia que los valores de torque, esfuerzo cortante y deformación unitaria obtenidos mediante simulaciones en el software Ansys para probetas con tratamientos térmicos de temple a 830 °C-860

°C y revenido a 500 °C, son ligeramente cercanos a los experimentales realizados en laboratorio; arrojando una diferencia porcentual de alrededor del 22%.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda utilizar software especializados para tratamientos térmicos para obtener las propiedades de los materiales cuando la estructura y sus características han sido modificadas por cualquier tratamiento, sea este temple o revenido para de esta manera obtener resultados más exactos al momento de realizar un análisis por elementos finitos.
- Es necesario conocer de una manera prolija las propiedades mecánicas del material, así como su geometría, para así de esta manera poder ingresar datos más confiables al software de simulación y así evitar posibles resultados lejanos a la realidad.
- Las condiciones de frontera o también conocidas como variables de control deberán ser correctamente establecidas para evitar comportamientos diferentes a los experimentales al momento de realizar la simulación.
- Es recomendable manejar un estudio paralelo, tanto experimental como computacional, al momento de trabajar con materiales, de esta manera se logrará obtener una mejor validación de la información, con la que podremos conocer de manera acertada el comportamiento de los materiales sometidos a distintas condiciones de trabajo.
- El recurso computacional es muy recomendable a la hora de trabajar con materiales y sus diferentes aplicaciones, es una herramienta que nos guiará a tener una idea clara de los posibles resultados y pronósticos, optimizando tiempo y recursos.
- Se recomienda hacer una simplificación de la geometría a simular, debido al alto consumo computacional que pueden consumir secciones de geometría que pudiesen ser consideradas despreciables.
- Para obtener un mejor análisis por elementos finitos se recomienda usar un software especializado que disponga de una base de datos en la que conste los valores de las propiedades del material a estudiar.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. G. Ñacata Simbaña and A. E. Cherres Ramirez, “Análisis de la variación de la resistencia a la torsión del acero AISI/SAE 4140 tratado térmicamente por temple a 830°C - 860°C y revenido a 500°C,” *Tesis*, 2019.
- [2] H. G. Ñacata and A. A. Cherres, “Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito,” *Tesis*, vol. 04, pp. 1–100, 2019, [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5081/1/UPS-CYT00109.pdf>.
- [3] M. I. F. Díaz, D. E. L. Castillo, and M. I. A. R. Solís, “Aceros, Estructuras Y tratamientos Termicos,” p. 159, 2012.
- [4] I. J. L. M. Flores, “Aceros y sus Aplicaciones,” p. 142, 1996.
- [5] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*, 5ta ed. 2002.
- [6] D. R. Askeland, “Ciencia e Ingeniería de los Materiales,” vol. 3ra edición. p. 737, 1998.
- [7] S. Suministros Tecnicos S.A, “AISI 4140 Steel.” p. 3, 2017.
- [8] Bohler S.A, “Aceros Especiales,” “42 CrMo4-SAE 4140,” vol. 53, no. 9. pp. 1689–1699, 2015, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [9] American Society for Testing and Materials, “ASTM E 415, Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry,” *ASTM Int.*, pp. 1–11, 2017, doi: 10.1520/E0415-15.2.
- [10] J. D. Carvajal Gualoto and J. A. Garzón Andrade, “Evaluación de la resistencia a la tracción y dureza del acero AISI/SAE 4140, tratado térmicamente por temple y revenido,” *Tesis*, pp. 1–100, 2019.
- [11] L. López, “Aceros y fundiciones,” 2015. .
- [12] I. R. R. Rissi, “Aleaciones metálicas,” pp. 1–60, 2005.
- [13] F. J. Belzunce, “Aceros Y Fundiciones,” 2001.
- [14] ITEA, *Metalurgia aplicada*. 2018.
- [15] J. r W I L L I k M D . C A L L I S T E R, “Ciencia e Ingeniería de los Materiales,” *Univ. Utah.*, 2012.
- [16] R. G. Budynas and K. J. Nisbett, *Diseño en Ingeniería Mecánica*, Octava edición, vol. 8va Edición. 2008.
- [17] ITEA, “Tratamientos Termicos del Acero.,” 2012, p. 25.
- [18] R. L. Norton, *Diseño de Máquinas*, Cuarta Edición. 2011.

- [19] J. M. Gere and S. P. Timoshenko, *Mecánica de Materiales*, Segunda ed. 1986.
- [20] F. Beer, J. Russell Johnston, and J. T. De Wolf, *Mecánica de Materiales*, Cuarta edi. .
- [21] J. M. Gere and B. J. Goodno, *Mecánica de Materiales*, Octava., vol. 1, no. 3. CENGAGE LEARNING, 2016.
- [22] F. P. Beer, E. J. Russell Johnston, J. T. DeWolf, and D. F. Mazurek, *Mecánica de Materiales*, Sexta Edic. 2013.
- [23] Full Mecánica, “Módulo de rigidez,” *Definiciones y conceptos de Mecánica*, 2014.
- [24] Y. Köksal and S. Penez, “Propiedades De Los Materiales,” *Metrologia*, 2015. .
- [25] “UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO,” 2018.
- [26] O. C. Zienkiewics, *El método de los elementos finitos - Google Libros*. 2007.
- [27] Á. F. M. Azevedo, “Metodo Dos Elementos Finitos.,” *Tec.*, vol. 51, no. 437, pp. 241–248, 2003.
- [28] ANSYS, “ANSYS Explicit Dynamics Analysis Guide,” no. January, p. 394, 2020, [Online]. Available: <http://www.ansys.com>.
- [29] E. Correa Allepuz, “ANEXO I: Influencia de la Calidad de Malla en las Simulaciones . Uso de Condiciones de Contorno Periódicas,” *Univ. Sevilla*, pp. 145–161, 2007.
- [30] M. Vénere, “Optimización de la calidad de mallas de elementos finitos mediante cambios localizados de topología,” *Métodos numéricos para cálculo y diseño en Ing. Rev. Int.*, vol. 13, no. 1, pp. 3–14, 1997.
- [31] J. G. Ardila-Marín, D. A. Hincapié-Zuluaga, and J. A. Sierra-del-Río, “Independencia De Malla En Tubos Torsionados Para Intercambio De Calor: Caso De Estudio,” *Rev. la Fac. Ciencias*, vol. 5, no. 1, pp. 124–140, 2016, doi: 10.15446/rev.fac.cienc.v5n1.54231.
- [32] A. Coll, “Mejora de la calidad de mallas para Elementos Finitos.”
- [33] ThyssenKrupp, “Aceros y Servicios,” pp. 1–5, 2010, [Online]. Available: [http://www.thyssenkrupp.cl/archivos/SAE\\_-\\_4140.pdf](http://www.thyssenkrupp.cl/archivos/SAE_-_4140.pdf).
- [34] F. S. Thursday *et al.*, “Project \*,” pp. 1–12, 2020.
- [35] E. N. Las, P. Mec, and N. D. E. L. Acero, “Efecto de la temperatura de revenido en la,” 2016.
- [36] F. Metal *et al.*, “AISI 4140 Steel , oil quenched , 13 mm ( 0 . 5 in . ) round [ 845 ° C ( 1550 ° F ) quench , 540 ° C ( 1000 ° F ) temper ] MatWeb , Your Source for

Materials Information - WWW . MATWEB . COM / MatWeb , Your Source for  
Materials Information - WWW . MATWEB . ,” pp. 1–2.

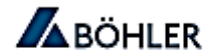
- [37] D. Chaouch, S. Guessasma, and A. Sadok, “Finite Element simulation coupled to optimisation stochastic process to assess the effect of heat treatment on the mechanical properties of 42CrMo4 steel,” *Mater. Des.*, vol. 34, pp. 679–684, 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2011.05.026.



ANEXOS  
FICHA TÉCNICA ACEROS BOHLER DEL ECUADOR

VCL

AISI : 4140  
DIN : 42 Cr Mo 4  
W N°: 1.7223/25



Tipo de aleación promedio : C 0,41 Cr 1,1 Mo 0,2 Si 0,2 Mn 0,7 %  
Color de identificación : Verde - Blanco  
Estado de suministro : Bonificado 250 - 350 HB Típico, Ver tabla inf.  
Largo estándar : 3,5 - 6 metros,

Acero especial de bonificación con aleación de cromo molibdeno.

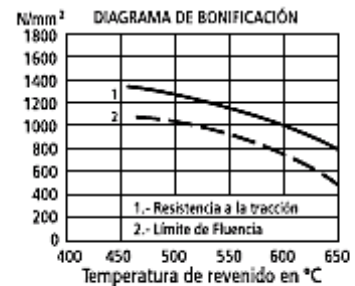
Muy resistente a la tracción y a la torsión, como también a cambios de flexión. Se suministra en estado bonificado, lo que permite, en la mayoría de los casos, su aplicación sin necesidad de tratamiento térmico adicional.

APLICACIONES: Partes de maquinaria y repuestos de dimensiones medianas, con grandes exigencias en las propiedades arriba mencionadas y también ciertos elementos para la construcción de motores, engranajes, pernos, tuercas, pines, émbolos, árboles de transmisión, ejes de bombas, cañones de armas para la cacería.

27

INDICACIONES PARA EL TRATAMIENTO TÉRMICO

Forjado: 1050 - 850 °C  
Normalizado: 840 - 880 °C  
Recocido: 690 - 720 °C  
Enfriamiento lento en el horno  
Temple: al aceite 830 - 860 °C  
al agua 820 - 850 °C  
Dureza obtenible: 52 - 56 HRC  
Revenido : 540 - 680 °C  
Nitruar: 580 °C



Resistencia en estado Recocido		CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS EN ESTADO BONIFICADO						
máx. N/mm²	Dureza Brinell máx.	Diámetro mm.		Límite de fluencia N/mm²	Resistencia a la tracción N/mm²	Elongación (Lo = 5d) % mín.	Estricción % mín.	Resiliencia según DVM Joule
		desde	hasta					
770	241	16	16	835	1030 - 1250	10	40	34
		40	40	715	930 - 1130	11	45	41
		100	100	595	830 - 1030	12	50	41
		160	160	530	730 - 900	13	55	41
		160	250	490	690 - 840	14	55	41

Soldadura: Consultar con nuestro Departamento Técnico

20

# FICHA TÉCNICA IVAN BOHMAN

ACEROS

Aceros bonificados para maquinaria

► Cód. IBCA: 709  $\approx$  42 CrMo4  $\approx$  AISI 4140



## Información general

709 es un acero aleado para construcción de maquinaria, que posee una alta resistencia especialmente en medidas pequeñas y medianas. Como norma, el 709 es suministrado templado y revenido (temple tenaz bonificado), por lo que no se requeriría un tratamiento térmico posterior, a no ser que así lo exija la aplicación y en ese caso, se templaría en aceite para obtener propiedades mecánicas más elevadas.

709 es apropiado para templarse por flama e inducción y susceptible de nitrurar.

Análisis típico %	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
42CrMo4	0,38 - 0,45	< 0,30	0,60 - 0,90	0,025	0,025	0,90 - 1,20	0,15 - 0,30
AISI 4140	0,38 - 0,45	0,15 - 0,35	0,75 - 1,00	0,030	0,040	0,80 - 1,10	0,15 - 0,25
Código de color	Dorado / Verde						
Equivalencias	AISI / SAE (4140) DIN (42CrMo4)		W.Nr (1.7225) JIS (SCM4)		AFNOR (42CD4)		

## Aplicaciones

- Industria Automotriz**  
Ejes, bielas, árboles de transmisión, cigüeñales, etc.
- Maquinaria**  
Engranajes de temple por flama, inducción o nitruración, partes de bombas, ejes de reductores, árboles de turbinas a vapor, tornillería de alta resistencia.
- Industria petrolera**  
Taladros, brocas, barrenos, cuerpos de escaradores, vástagos de pistón.

## Propiedades mecánicas

### En condición de suministro

Resistencia a la tracción	90 - 105 kg/mm <sup>2</sup>
Esfuerzo de cedencia	70 kg/mm <sup>2</sup>
Longación, A5	min 12 %
Reducción de área, Z	min 50 %
Resistencia al impacto, KU	aprox. 25 J
Dureza	275 - 320 HB

*Nota:* Estas propiedades mecánicas se dan hasta a 100 mm. Medidas mayores, favor consultar.

## Tratamiento térmico

### Recocido blando

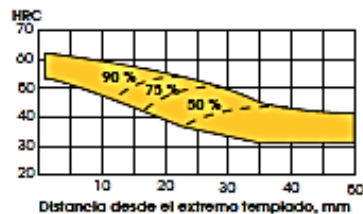
(680 - 720 °C): Mantener a la temperatura por 2 horas. Enfriar en el horno con una velocidad de 15 °C/h hasta los 600 °C y luego libremente al aire.

### Alivio de tensiones

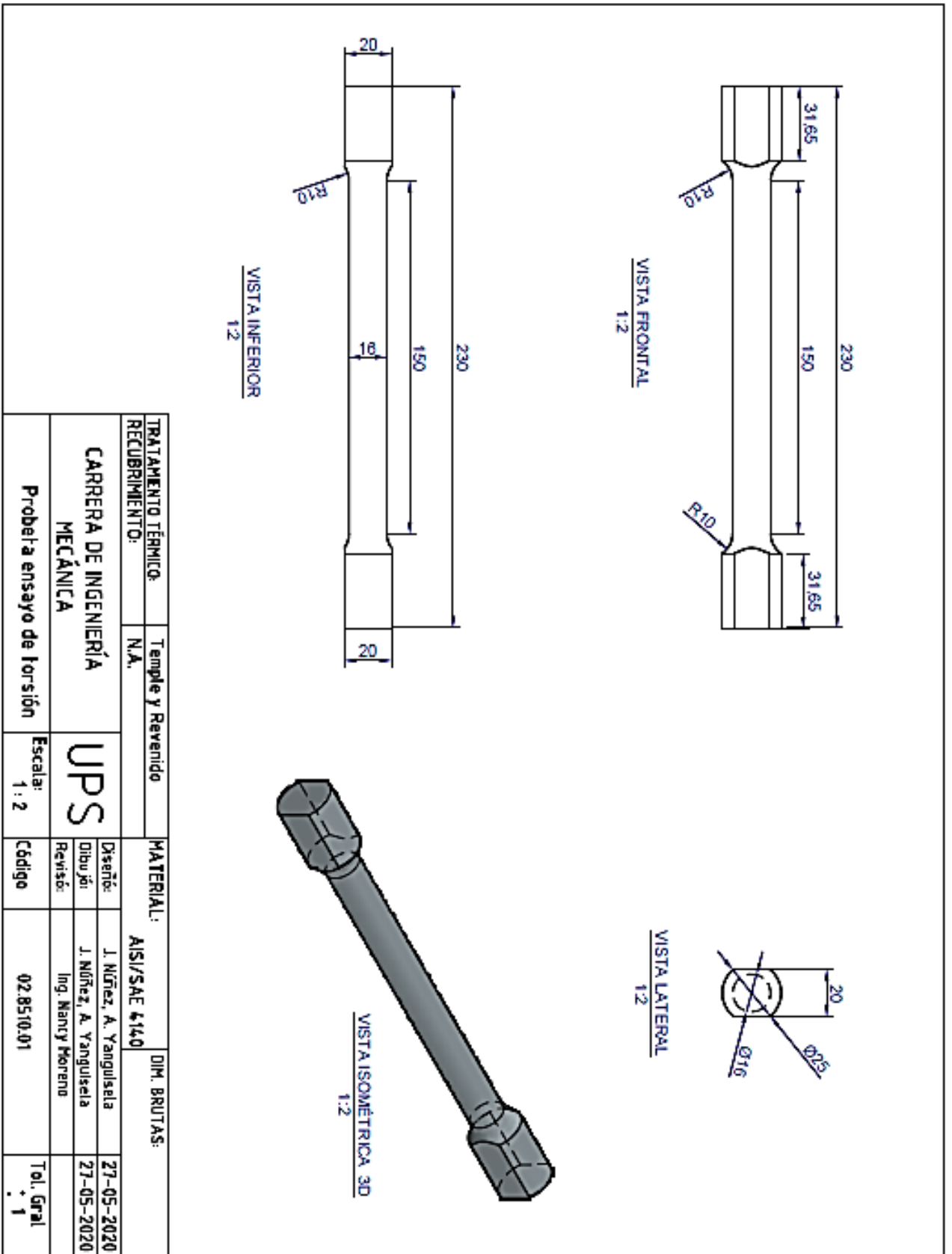
(450 - 650 °C): El acero templado tenaz deberá ser calentado hasta aproximadamente 50 °C por debajo de la temperatura usada para el revenido (como standard el 709 es suministrado revenido a 600 °C). Mantenerlo a esta temperatura durante 1/2 a 2 horas. Enfriar en el horno hasta los 450 °C y luego libremente al aire.

### Temple

(830 - 850 °C): Con enfriamiento en aceite: El tiempo de mantenimiento en minutos cuando ha alcanzado la temperatura de temple es 0.7 x espesor o diámetro en milímetros. Interrumpir el enfriamiento a los 125 °C y luego reventar inmediatamente.



# DIMENSIONES DE PROBETAS



## ENSAYOS EXPERIMENTALES



Fuente: Héctor Ñacata, Ángel Cherres