

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA MECÁNICA**

**Proyecto técnico previo a la obtención del título de:  
INGENIERA MECÁNICA E INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA:  
DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y DUREZA DEL  
ACERO AISI/SAE 4340, TRATADO TÉRMICAMENTE POR TEMPLE A 860  
°C Y REVENIDO A 280 °C, 320 °C Y 380 °C.**

**AUTORES:  
ANDREA ISABEL CHOLANGO GAVILANES  
JORGE ALEJANDRO ZAPATA CAUTULLIN**

**TUTOR:  
MILTON SALOMÓN JAMI LEMA**

**Quito, septiembre del 2020**

## CESIÓN DE DERECHOS

Nosotros, Andrea Isabel Cholango Gavilanes, con Cédula de Identidad N° 1715130991 y Jorge Alejandro Zapata Cautullin, con Cédula de Identidad N° 1723411540 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 intitulado: “DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y DUREZA DEL ACERO AISI/SAE 4340, TRATADO TÉRMICAMENTE POR TEMPLE A 860 °C Y REVENIDO A 280 °C, 320 °C Y 380 °C.”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniera Mecánica e Ingeniero Mecánico, 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.



.....

Andrea Isabel Cholango Gavilanes  
C.I.:1715130991



.....

Jorge Alejandro Zapata Cautullin  
C.I.:1723411540

Quito, septiembre del 2020.

## **DECLARATORIA DE COAUTORÍA**

Yo, Milton Salomón Jami Lema declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Trabajo de Titulación: “DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y DUREZA DEL ACERO AISI/SAE 4340, TRATADO TÉRMICAMENTE POR TEMPLE A 860 °C Y REVENIDO A 280 °C, 320 °C Y 380 °C.”, realizado por Andrea Isabel Cholango Gavilanes y Jorge Alejandro Zapata Cautullin, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, septiembre de 2020



Milton Salomón Jami Lema

C.I.:1707254171

## **DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTO**

Este trabajo está dedicado a mis padres, Luis y Cecilia, que de la manera más amorosa han guiado mi vida con consejos acertados; a mis hermanos, Carlos y Nahir, que son mi motivación y hacen de mi vida un arcoíris con conversaciones largas hasta la media noche... besos infinitos y un poco de locura; a mi novio, David, quien con paciencia y una sonrisa hace de mis días caóticos un poco más llevaderos y es cómplice de cada una de mis metas.

Agradezco que, hoy, pueda cumplir uno de mis más grandes sueños gracias al apoyo que me brindó mi familia, mi novio, mis amigos y mi compañero, Jorge, a lo largo de este camino.

Finalmente, quiero expresar mi profunda gratitud a la Universidad Politécnica Salesiana y a mi tutor, Ingeniero Milton Salomón Jami Lema, quienes crean profesionales y personas con valores.

*Andrea Isabel*

El presente trabajo de investigación está dedicado, primero a Dios, por darme la fuerza y sabiduría para afrontar todas las dificultades encontradas en el camino, al igual que a mis padres Galo y Jaqueline por haberme guiado y apoyado durante todo este tiempo hasta alcanzar un propósito de vida y poder estudiar la carrera que más me gusta. Con su sacrificio y motivación me han enseñado a luchar por mis sueños, sin importar los obstáculos que se me atraviesen.

Agradezco a mi hermano menor, Andrés, y a mi hija Isabella por ser la motivación más grande para superarme cada día y poder demostrarles que los sueños, aunque sean difíciles no son imposibles de alcanzar. A mi novia, Carolina, que desde el inicio de la carrera me ha apoyado; a mi familia que, con su ayuda, me permitió cumplir un objetivo más de vida; en especial, a mi prima, Patricia, que siempre fue un apoyo incondicional en este trayecto. Al igual que a mi compañera, Andrea, por su dedicación a la hora de realizar este trabajo; y, finalmente, a mis compañeros que a lo largo de este tiempo han ido superando todos los obstáculos que se nos presentaron en el camino.

*Jorge Alejandro*

## ÍNDICE GENERAL

CESIÓN DE DERECHOS .....	i
DECLARATORIA DE COAUTORÍA.....	ii
DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTO .....	iii
ÍNDICE GENERAL.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xi
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	xiii
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
INTRODUCCIÓN .....	xvii
CAPÍTULO I.....	1
MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Propiedades mecánicas del acero AISI/SAE 4340 según proveedores .....	1
1.1.1. Propiedades mecánicas del acero AISI/SAE 4340 – V 155 según Aceros Voestalpine .....	1
1.1.2. Propiedades mecánicas del acero AISI/SAE 4340 – 705 según Ivan Bohman.....	1
1.2. Composición química del acero AISI/SAE 4340 según proveedores .....	2
1.2.1. Composición química del acero AISI/SAE 4340 – V 155 según Aceros Voestalpine.....	2
1.2.2. Composición química del acero AISI/SAE 4340 – 705 según Ivan Bohman.....	2
1.3. Aplicaciones del acero AISI/SAE 4340 .....	2
1.4. Tratamiento térmico .....	3
1.4.1. Etapas del tratamiento térmico.....	3
1.4.2. Medios de enfriamiento para los tratamientos térmicos .....	4
1.5. Tratamientos térmicos empleados en el proyecto .....	5
1.5.1. Temple.....	5
1.5.2. Revenido .....	6
1.6. Tratamiento térmico recomendado para AISI/SAE 4340 .....	6
1.7. Microestructura del acero .....	7
1.7.1. Ferrita .....	7

1.7.2.	Cementita .....	7
1.7.3.	Perlita .....	7
1.7.4.	Austenita .....	8
1.7.5.	Martensita.....	8
1.7.6.	Martensita revenida.....	8
1.8.	Diagrama TTT (Tiempo-Temperatura-Transformación) .....	9
1.9.	Curva tensión-deformación .....	10
1.9.1.	Zona elástica.....	11
1.9.2.	Punto de fluencia.....	11
1.9.3.	Zona plástica .....	11
1.10.	Puntos y zonas del diagrama esfuerzo-deformación.....	12
1.10.1.	Límite de proporcionalidad .....	12
1.10.2.	Módulo de elasticidad .....	13
1.10.3.	Límite elástico .....	13
1.10.4.	Porcentaje de alargamiento .....	13
1.11.	Dureza.....	15
1.11.1.	Tipos de ensayo de dureza.....	15
1.11.2.	Durómetro .....	16
CAPÍTULO II .....		17
ANÁLISIS Y ALTERNATIVAS .....		17
2.1.	Elección de variables .....	17
2.1.1.	Aplicación de ANOVA .....	17
2.2.	Diseño de probetas .....	18
2.3.	Procedimiento del tratamiento térmico aplicado.....	18
2.3.1.	Procedimiento de temple a 860 °C .....	18
2.3.2.	Procedimiento de revenido.....	20
2.3.3.	Descripción del equipo utilizado en el temple .....	22
2.3.4.	Descripción del equipo utilizado en el revenido .....	23
2.4.	Procedimiento del ensayo de espectroscopia de emisión óptica .....	24
2.4.1.	Norma empleada .....	25
2.4.2.	Probeta normalizada.....	26
2.4.3.	Descripción del equipo utilizado.....	26
2.5.	Procedimiento del ensayo de dureza .....	26
2.5.1.	Norma empleada .....	27

2.5.2.	Probeta normalizada.....	27
2.5.3.	Descripción del equipo utilizado.....	27
2.6.	Procedimiento del ensayo a tracción .....	29
2.6.1.	Norma empleada .....	30
2.6.2.	Probeta normalizada.....	30
2.6.3.	Descripción del equipo utilizado.....	31
CAPÍTULO III.....		33
ANÁLISIS Y RESULTADOS.....		33
3.1.	Introducción.....	33
3.2.	Microestructura del acero AISI/SAE 4340.....	33
3.2.1.	Microestructura del material en estado de suministro.....	33
3.2.2.	Microestructura del material en el proceso de revenido .....	34
3.3.	Resultados de ensayo espectroscopia en estado de suministro .....	34
3.4.	Análisis estadístico .....	35
3.4.1.	Análisis estadístico de resultados de dureza .....	36
3.4.2.	Análisis estadístico de resultados de tracción .....	41
3.5.	Resultados de ensayo de dureza .....	46
3.5.1.	Resultados de ensayo de dureza en estado de suministro .....	46
3.5.2.	Resultados de ensayo de dureza después del temple a 860 °C.....	47
3.5.3.	Resultados de ensayo de dureza después del tratamiento térmico.....	48
3.6.	Resultados de ensayo de tracción .....	54
3.6.1.	Resultados de ensayo de tracción en estado de suministro .....	54
3.6.2.	Resultados de ensayo de tracción después del tratamiento térmico.....	56
CAPÍTULO IV.....		70
ANÁLISIS DE COSTOS.....		70
4.1.	Costos .....	70
CONCLUSIONES .....		71
RECOMENDACIONES .....		73
REFERENCIAS.....		74
ANEXOS		



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Etapas del tratamiento térmico .....	4
<b>Figura 2.</b> Diagrama de temperatura de revenido vs dureza.....	6
<b>Figura 3.</b> Diagrama TTT de una eutectoide .....	9
<b>Figura 4.</b> Funcionamiento del equipo para ensayos de tracción .....	10
<b>Figura 5.</b> Curva tensión-deformación (a) materiales dúctiles, (b) materiales frágiles .....	11
<b>Figura 6.</b> Curva tensión-deformación para materiales dúctiles.....	12
<b>Figura 7.</b> Puntos y zonas del diagrama esfuerzo-deformación para materiales dúctiles .....	12
<b>Figura 8.</b> Dimensiones de las probetas de acuerdo a la norma ASTM E8.....	18
<b>Figura 9.</b> Proceso del temple a 860 °C.....	20
<b>Figura 10.</b> Proceso del revenido a 280 °C enfriado en aceite .....	21
<b>Figura 11.</b> Proceso de revenido a 280 °C enfriado al ambiente .....	21
<b>Figura 12.</b> Proceso de revenido a 280 °C enfriado en el horno.....	22
<b>Figura 13.</b> Horno N7/H NABERTHERM utilizado para temple.....	23
<b>Figura 14.</b> Horno N15 / 65 HA para revenido .....	24
<b>Figura 15.</b> Durómetro Phase II 900-365 .....	28
<b>Figura 16.</b> Preparación del equipo para ensayos de tracción .....	29
<b>Figura 17.</b> Ruptura de acero en estado de suministro sometido al ensayo de tracción .....	30
<b>Figura 18.</b> Dimensión de las probetas para el ensayo a tracción .....	31
<b>Figura 19.</b> TestResources 300 para ensayos a tracción.....	32
<b>Figura 20.</b> Microestructura del acero AISI/SAE 4340 en estado de suministro.....	33
<b>Figura 21.</b> Resultados obtenidos en el software Minitab de temperatura de revenido vs dureza.....	40
<b>Figura 22.</b> Resultados obtenidos en el software Minitab de tipo de enfriamiento vs dureza .....	40
<b>Figura 23.</b> Intervalos de dureza en los diferentes tipos de enfriamiento.....	41
<b>Figura 24.</b> Resultados obtenidos en el software Minitab de temperatura de revenido vs resistencia a la tracción.....	44
<b>Figura 25.</b> Intervalos de la resistencia a la tracción vs temperatura de revenido obtenido en el software Minitab.....	45

<b>Figura 26.</b> Resultados obtenidos en el software Minitab de tipo de enfriamiento vs resistencia a la tracción .....	45
<b>Figura 27.</b> Diagrama Temperatura de revenido vs Resistencia a la tracción.....	46
<b>Figura 28.</b> Valores promedio de dureza del material base .....	47
<b>Figura 29.</b> Valores de dureza a la temperatura de 280 °C.....	50
<b>Figura 30.</b> Valores de dureza a la temperatura de 320 °C.....	50
<b>Figura 31.</b> Valores de dureza a la temperatura de 380 °C.....	51
<b>Figura 32.</b> Variación porcentual de los valores máximos de dureza .....	51
<b>Figura 33.</b> Comparación de los valores del catálogo con los valores experimentales a la temperatura de revenido 280 °C .....	52
<b>Figura 34.</b> Comparación de los valores del catálogo con los valores experimentales a la temperatura de revenido 320 °C .....	52
<b>Figura 35.</b> Comparación de los valores del catálogo con los valores experimentales a la temperatura de revenido 380 °C .....	53
<b>Figura 36.</b> Comparación de los valores del catálogo y los experimentales en el diagrama dureza-temperatura a 280 °C .....	53
<b>Figura 37.</b> Comparación de los valores del catálogo y los experimentales en el diagrama dureza-temperatura a 320 °C .....	54
<b>Figura 38.</b> Comparación de los valores del catálogo y los experimentales en el diagrama dureza-temperatura a 380 °C .....	54
<b>Figura 39.</b> Probeta de material base después del ensayo a tracción.....	55
<b>Figura 40.</b> Diagrama de la resistencia a la tracción a temperatura de 280 °C enfriado al ambiente, horno y en aceite.....	57
<b>Figura 41.</b> Variación porcentual de la resistencia a la tracción a la temperatura de 280 °C.....	58
<b>Figura 42.</b> Diagrama de la resistencia a la tracción a temperatura de 320°C enfriado al ambiente, horno y en aceite.....	58
<b>Figura 43.</b> Variación porcentual de la resistencia a la tracción a la temperatura de 320 °C.....	59
<b>Figura 44.</b> Diagrama de la resistencia a la tracción a temperatura de 380°C enfriado al ambiente, horno y en aceite.....	59
<b>Figura 45.</b> Variación porcentual de la resistencia a la tracción a la temperatura de 380 °C.....	60

<b>Figura 46.</b> Diagrama comparativo de la resistencia a la tracción de los valores máximos con el valor de temple obtenidos en el ensayo a tracción.....	60
<b>Figura 47.</b> Valores mínimos y máximos obtenidos en el ensayo a tracción .....	61
<b>Figura 48.</b> Diagrama del módulo de Young a la temperatura de revenido de 280 °C .....	63
<b>Figura 49.</b> Diagrama de la variación porcentual para el módulo de Young a la temperatura de 280 °C .....	63
<b>Figura 50.</b> Diagrama del módulo de Young a la temperatura de revenido de 320 °C .....	64
<b>Figura 51.</b> Diagrama de la variación porcentual para el módulo de Young a la temperatura de 320 °C .....	64
<b>Figura 52.</b> Diagrama del módulo de Young a la temperatura de revenido de 380 °C .....	65
<b>Figura 53.</b> Diagrama de la variación porcentual para el módulo de Young a la temperatura de 380 °C .....	65
<b>Figura 54.</b> Variación porcentual máxima para cada temperatura de revenido.....	66
<b>Figura 55.</b> Diagrama de valores máximo y mínimos del módulo de Young .....	66
<b>Figura 56.</b> Diagrama esfuerzo deformación material base vs revenido 280-O.....	67
<b>Figura 57.</b> Diagrama esfuerzo deformación material base vs revenido 380-H.....	68
<b>Figura 58.</b> Valores promedios del porcentaje de elongación .....	68
<b>Figura 59.</b> Porcentaje de elongación en probetas revenidas y material base .....	69
<b>Figura 60.</b> Gráfico comparativo de dureza y resistencia a la tracción para 280 °C, 320 °C, 380 °C .....	69

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Propiedades mecánicas del acero AISI/SE 4340, según catálogo de Aceros Voestalpine.....	1
<b>Tabla 2.</b> Condiciones de suministro del acero AISI/SAE 4340, según catálogo de Ivan Bohman .....	1
<b>Tabla 3.</b> Composición química del acero AISI/SAE 4340, (V 155), según catálogo de Aceros Voestalpine.....	2
<b>Tabla 4.</b> Composición química del acero AISI/SAE 4340, según catálogo de Ivan Bohman .....	2
<b>Tabla 5.</b> Severidad del temple, a diferentes medios de enfriamiento en función a la temperatura y velocidad de circulación.....	4
<b>Tabla 6.</b> Tratamiento térmico recomendado para el acero AISI/SAE 4340 por Aceros Voestalpine.....	7
<b>Tabla 7.</b> Escala de dureza Rockwell .....	15
<b>Tabla 8.</b> Designación de la temperatura y método de enfriamiento de cada probeta	17
<b>Tabla 9.</b> Dimensión de probetas de ensayo a tracción de acuerdo a la norma ASTM E8 .....	18
<b>Tabla 10.</b> Datos de placa del horno N7/H NABERTHERM .....	23
<b>Tabla 11.</b> Datos de placa del horno N15/ 65 HA .....	24
<b>Tabla 12.</b> Norma ASTM E-415.....	25
<b>Tabla 13.</b> Características técnicas del espectrómetro Foundry-Master Xpert.....	26
<b>Tabla 14.</b> Datos de placa del equipo TestResources R315 .....	31
<b>Tabla 15.</b> Datos de placa del equipo WAW-1000D.....	32
<b>Tabla 16.</b> Comparación de la composición química del acero AISI/SAE 4340 .....	34
<b>Tabla 17.</b> Factores y valores experimentales obtenidos.....	35
<b>Tabla 18.</b> Resultados obtenidos para los ensayos de dureza con la técnica estadística de análisis estadístico ANOVA.....	39
<b>Tabla 19.</b> Resultados obtenidos para los ensayos a tracción con la técnica estadística de análisis estadístico ANOVA.....	44
<b>Tabla 20.</b> Resultados de los ensayos de dureza al material base.....	46
<b>Tabla 21.</b> Valores promedios de dureza, varianza y desviación estándar del material base.....	46
<b>Tabla 22.</b> Valores de dureza después del proceso de temple a 860 °C .....	47

<b>Tabla 23.</b> Valores promedio de dureza, varianza y desviación estándar después del proceso de temple a 860 °C .....	48
<b>Tabla 24.</b> Resultados de ensayos de dureza .....	48
<b>Tabla 25.</b> Valores de la resistencia a la tracción del material base .....	55
<b>Tabla 26.</b> Valores recomendados por el distribuidor Aceros Voestalpine .....	55
<b>Tabla 27.</b> Resultados obtenidos de los ensayos a tracción .....	56
<b>Tabla 28.</b> Valores del ensayo a la resistencia a la tracción .....	57
<b>Tabla 29.</b> Cálculos realizados a partir de los datos obtenidos en el ensayo de tracción .....	62
<b>Tabla 30.</b> Promedios de la elongación, módulo de Young y reducción de área .....	62
<b>Tabla 31.</b> Costos del proyecto .....	70

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

- **Revenido:** Es un tratamiento térmico que se realiza a los metales templados, la cual consiste en un calentamiento más bajo que el del templado y un enfriamiento más lento para disminuir las tensiones internas que se ocasionan con el templado. Con el revenido se disminuye un poco la dureza y resistencia [1].
- **Resistencia a la tracción:** Es el valor máximo de tensión en el diagrama esfuerzo deformación convencional [2].
- **Temple:** Se define como un ciclo térmico que comprende un calentamiento del material, seguido de un enfriamiento hasta una temperatura baja, siguiendo unas condiciones de enfriamiento en función de los resultados buscado [3].
- **Deformación unitaria:** Es la relación que existe entre la deformación total y la longitud inicial del elemento, que establece la deformación del elemento sometido a esfuerzo de tensión o compresión axial [4]. En conclusión, la deformación unitaria de un cuerpo no es uniforme en todo su volumen, por lo que el cambio en la geometría de cualquier segmento de línea dentro del cuerpo puede variar considerablemente en toda su longitud [5].
- **Austenita:** Existen dos procesos muy importantes para la formación de la austenita, la primera es la microestructura inicial y el segunda la velocidad de calentamiento. Su estructura cristalina (CCCa) del hierro y aleaciones del hierro y carbono [6].
- **Martensita:** La martensita es una fase que se observa comúnmente en aleaciones que presenta dos morfologías. Es una transformación de posiciones internas de deformación elevada, como el caso de la intersección de dos o más dislocaciones. En esta transformación no existe la difusión y, por lo tanto, no se rigen por la cinética de transformación de Avramí [7].

- **Dureza:** Es una propiedad del acero a la oposición de ser penetrado por un objeto, lo cual provocaría una deformación plástica permanente [8].
- **Módulo de elasticidad:** Tensión dividida por deformación ( $\sigma/\epsilon$ ), en la región elástica de un diagrama esfuerzo-deformación convencional de un metal [2].

## RESUMEN

El presente trabajo muestra un estudio del comportamiento del acero AISI/SAE 4340 tratado térmicamente con temple a 860 °C y revenido a tres diferentes temperaturas de 280 °C, 320°C y 380 °C, comparando la resistencia a la tracción y dureza de forma experimental con los valores proporcionados por el catalogo.

Para este propósito en el Capítulo I se mencionan los tratamientos térmicos utilizados y métodos de enfriamiento, los cuales asignan características mecánicas al material de acuerdo a cada temperatura utilizada. Así mismo especifica las propiedades y composición química de este acero en estado de suministro según catálogos del distribuidor.

A su vez en el Capítulo II se detallan los procedimientos, la normativa utilizada, como, por ejemplo, la Norma ASTM E10 para los ensayos de dureza y la Norma ASTM E8 para ensayos a tracción. Además, se especifican la espectrometría óptica de las muestras, elección de variables, diseño de probetas y tratamiento térmico aplicado.

En el Capítulo III se analiza los resultados obtenidos a partir de los ensayos destructivos y no destructivos con el fin de comparar valores y obtener el material más adecuado. A continuación, se aplica un análisis de varianza multifactorial ANOVA, la cual permite conocer la influencia de la temperatura y del método de enfriamiento sobre sus propiedades mecánicas.

Para finalizar la investigación, el tratamiento térmico proporciona una mayor dureza y resistencia a la tracción en comparación con las probetas en estado de suministro; sin embargo, en base a los resultados obtenidos y un análisis estadístico se concluye que las mejores características para dureza y resistencia a la tracción se logran con un temple de 860°C y revenido de 280°C con aceite durixol W25 de mediana velocidad de enfriamiento.

**Palabras claves:** resistencia, tracción, acero AISI/SAE 4340, térmico, temple, revenido.



## ABSTRACT

This work shows a study of the behavior of AISI / SAE 4340 steel thermally treated with quenching at 860 °C and tempering at three different temperatures of 280 °C, 320°C and 380 °C. Comparing the tensile strength and hardness in an experimental way with the values provided by the catalogue.

For this purpose, chapter I mentions the heat treatments used and cooling methods, which assign mechanical characteristics to the material according to each temperature used. It also specifies the properties and chemical composition of this steel in the state of supply according to the distributor's catalogues.

In turn, Chapter II details the procedures, the regulations used, such as the ASTM E10 standard for hardness tests and the ASTM E8 standard for tensile tests. In addition, the optical spectrometry of the samples, choice of variables, specimen design and applied heat treatment are specified.

Chapter III analyses the results obtained from destructive and non-destructive tests in order to compare values and obtain the most suitable material. Next, a multifactorial analysis of variance ANOVA is applied which allows knowing the influence of temperature and the cooling method on its mechanical properties.

Finally, the heat treatment provides greater hardness and tensile strength compared to the specimens in the state of supply, however based on the results obtained and a statistical analysis, it is concluded that the best characteristics for hardness and tensile strength are achieved with a temper of 860 ° C and tempering at 280 ° C with medium speed durixol W25 oil.

**Keywords:** strength, traction, AISI / SAE 4340 steel, thermal, quenching, tempering.

## INTRODUCCIÓN

En el sector industrial, la utilización del acero AISI/SAE 4340 va en aumento por su alta resistencia mecánica y tenacidad en estado bonificado. Sin embargo, para mejorar sus propiedades mecánicas, el fabricante recomienda realizar tratamientos térmicos dentro de un rango de temperaturas. En el caso del temple la temperatura se encuentra entre los 830 °C a 860 °C utilizando aceite como método de enfriamiento, obteniendo una dureza entre los 54 a 56 HRC y una temperatura de revenido entre los 550 °C a 600 °C. de 30 a 35 HRC.

En esta investigación se decidió realizar con un temple a 860 °C y variar las temperaturas de revenido a 280 °C, 320 °C y 380 °C para evaluar las propiedades mecánicas obtenidas antes y después del tratamiento térmico verificando que los valores se encuentren dentro de las especificaciones establecidas por el catálogo de Voestalpine High Performance Metals del Ecuador S.A.

El acero AISI/SAE 4340 tiene diversas aplicaciones; sin embargo, la más utilizada es en piezas de maquinaria industrial que se encuentran sometidas a esfuerzos combinados como por ejemplo piezas de maquinaria pesada, cigüeñales, árboles de levas, entre otros. Estas piezas necesitan una alta resistencia a la tracción para poder soportar y garantizar un buen trabajo; debido a esto se utiliza temperaturas de revenido de acuerdo a las necesidades del cliente.

En la actualidad, la utilización de software para la comprobación de procesos es muy importante, debido a esto se utilizará el programa de “*Minitab*” para comprobar el porcentaje de influencia entre la temperatura de revenido y los métodos de enfriamiento en las propiedades mecánicas del material.

Hoy por hoy, existe una gran variedad de aceros comerciales entre ellos se destaca el acero AISI/SAE 4340 por su alto esfuerzo de fluencia de 65 a 75 kg/mm<sup>2</sup>, razón por la cual es aplicado cuando se requiere soportar esfuerzos combinados. Sin embargo, no existe un análisis de las propiedades mecánicas de estos elementos después de realizar un tratamiento térmico asegurando así que cumpla con los requerimientos del cliente. En muchos casos el procedimiento para realizar el tratamiento térmico no

es el correcto debido a la falta de información por parte del distribuidor lo que genera cambios micro-estructurales desencadenando fallas en el elemento o una vida útil menor a la esperada.

Los tratamientos térmicos aplicados a diversos tipos de acero han permitido mejorar las propiedades mecánicas haciendo que este se vuelva versátil en su uso y aplicación, razón por la cual, el problema de estudio está orientado al análisis de la resistencia a la tracción del acero AISI/SAE 4340 antes y luego de ser sometido a un tratamiento térmico de temple a 860 °C y revenido a tres diferentes temperaturas 280 °C, 320 °C y 380 °C con probetas diferentes, que se encuentran por debajo de lo recomendado por el catálogo (550 - 600 °C) con distintos tipos de enfriamiento.

Cabe destacar que el catálogo de Voestalpine High Performance Metals del Ecuador S.A. recomienda trabajar con una dureza de 54 a 56 HRC para maximizar sus propiedades. No obstante, el análisis realizado por la Carrera de Ingeniería Mecánica, a través de los autores del presente Trabajo de Titulación, en el Laboratorio de Ciencias de Materias y en el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Universidad Politécnica Salesiana comprueban que es necesario emplear más recursos al realizar un doble revenido para obtener valores cercanos a los estipulados por el distribuidor.

El objetivo general consiste en determinar la resistencia a la tracción y dureza del acero AISI/SAE 4340, tratado térmicamente por temple a 860 °C y revenido a 280 °C, 320 °C y 380 °C.

Los objetivos específicos son:

- Identificar las necesidades y estudiar la situación actual de los comercializadores de acero más importantes en el mercado.
  
- Definir el proceso de construcción de probetas de acuerdo a la Norma ASTM.
  
- Validar el material base tratado térmicamente por temple y revenido para certificar su dureza y resistencia a la tracción.

- Comparar el porcentaje de error catálogo - ensayos, mediante resultados experimentales.

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO

### 1.1. Propiedades mecánicas del acero AISI/SAE 4340 según proveedores

#### 1.1.1. Propiedades mecánicas del acero AISI/SAE 4340 – V 155 según Aceros Voestalpine

La Empresa de Aceros Voestalpine High Performance Metals del Ecuador S.A., distribuye el acero AISI/SAE 4340 en estado bonificado. Algunas de sus propiedades mecánicas se pueden observar en la Tabla 1 de acuerdo a su diámetro [9].

**Tabla 1.** Propiedades mecánicas del acero AISI/SE 4340, según catálogo de Aceros Voestalpine [9]

Diámetro (mm)	Límite de Fluencia (N/mm <sup>2</sup> )	Resistencia a la Tracción (N/mm <sup>2</sup> )
≤ 16	1000	1200 – 1400
≤ 16 ≤40	900	1100 – 1300
≤40 ≤100	800	1000 – 1200
≤100 ≤160	700	900 – 1100
≤160 ≤250	600	800– 950

#### 1.1.2. Propiedades mecánicas del acero AISI/SAE 4340 – 705 según Ivan Bohman

Según Bohman [10], este acero tiene la más alta resistencia mecánica del mercado además de una buena tenacidad como se muestra en la Tabla 2. Es distribuido en estado bonificado por lo que no se requiere tratamiento térmico, sin embargo, se puede mejorar sus propiedades con temple al aceite o nitrurado.

**Tabla 2.** Condiciones de suministro del acero AISI/SAE 4340, según catálogo de Ivan Bohman [10]

<b>Resistencia a la tracción</b>	90 - 110 kg/mm <sup>2</sup>
<b>Esfuerzo de cedencia</b>	70 kg/mm <sup>2</sup>
<b>Elongación</b>	min 12 %
<b>Reducción de área,</b>	min 45 %
<b>Resistencia al impacto</b>	aprox. 20 J
<b>Dureza</b>	270 - 330 HB

## 1.2. Composición química del acero AISI/SAE 4340 según proveedores

### 1.2.1. Composición química del acero AISI/SAE 4340 – V 155 según Aceros Voestalpine

La combinación del níquel y cromo hace que el acero V 155 obtenga un límite elástico elevado, generando una mayor resistencia contra impacto y fatiga, mientras tanto el molibdeno le proporciona un aumento en la templabilidad y reducción de fragilidad en el revenido [11].

En la Tabla 3 se puede observar la composición química de este acero con sus respectivos porcentajes.

**Tabla 3.** Composición química del acero AISI/SAE 4340, (V 155), según catálogo de Aceros Voestalpine [9]

AISI	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Mo	%Ni
4340	0.34	0.30	0.50	1.5	0.20	1.5

### 1.2.2. Composición química del acero AISI/SAE 4340 – 705 según Ivan Bohman

El acero distribuido por Iván Bohman contiene aproximadamente 1.65 – 2.00% Ni, 0.70 – 0.90% Cr y 0.20 – 0.30% Mo como se observa en la Tabla 4 [10].

**Tabla 4.** Composición química del acero AISI/SAE 4340, según catálogo de Ivan Bohman [10]

AISI	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Mo	%Ni
4340	0.38 – 0.43	0.15 – 0.35	0.60 – 0.80	0.70 – 0.90	0.20– 0.30	1.65 - 2.00

## 1.3. Aplicaciones del acero AISI/SAE 4340

Debido a sus destacadas propiedades mecánicas este tipo de aceros pueden ser sometidos a altos esfuerzos por lo tanto son utilizados en grandes piezas, brazos de dirección, hélices de aviones, rodillos de transportadoras, ejes de leva, ruedas dentadas, piezas de chasis [9].

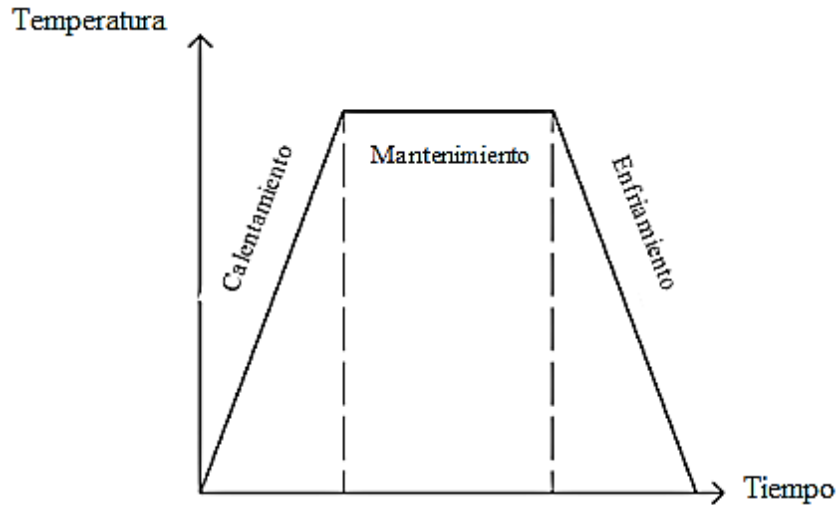
#### 1.4. Tratamiento térmico

Los tratamientos térmicos utilizados para este proyecto se detallan en la sección 1.5, sin embargo, es imprescindible mencionar su fundamentación. Estos consisten con calentar y enfriar el material transformando de forma parcial o total su fase y estructura cristalina mejorando sus propiedades mecánicas (dureza, resistencia y la elasticidad). Para el investigador Andrade [12], este proceso tiene una gran relevancia, dando propiedades específicas al material de acuerdo a la necesidad.

##### 1.4.1. Etapas del tratamiento térmico

Las etapas del tratamiento térmico son tres, como se describen a continuación observa en la Figura 1.

- **Calentamiento:** Esta etapa puede ser de calentamiento continuo o de forma escalonada, uno de los factores a tomar en cuenta es la variación de temperatura no sea demasiado brusco, (temperatura de 500 °C a velocidad baja), debido a que puede ser peligroso o dañar el proceso, otro factor es controlar la rapidez del calentamiento requerido para obtener el tratamiento térmico deseado.
- **Permanencia:** Este proceso depende de la rapidez con la que se calienta el material, debido que debe tener un calentamiento uniforme en toda su superficie, se debe controlar el tiempo del tratamiento térmico con el fin de completar la nueva estructura, en base a la relación de mayor rapidez de calentamiento necesitara un mayor tiempo de permanencia.
- **Enfriamiento:** Para este proceso se utiliza distintos fluidos dependiendo del material y las propiedades a obtener, los medio para enfriar el tratamiento térmico más utilizados son el agua, aire, aceite, salmuera, (mezcla de agua y cloruro de sodio), entre otros [13].



**Figura 1.** Etapas del tratamiento térmico [13]

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

#### 1.4.2. Medios de enfriamiento para los tratamientos térmicos

Para los investigadores Peralta y Moreno [14], el método de enfriamiento en los tratamientos térmicos es muy importantes debido que cada tipo de proceso, (temple, revenido, entre otros), posee un enfriamiento diferente. Existen varios tipos de fluidos que se utilizan para enfriar una trata miento térmico como el agua, aire, aceite, mercurio, entre otros. Mediante este proceso se puede obtener diferente tipo de dureza, formando una estructura martensítica.

En el proceso del temple, existen varios métodos de enfriamiento en la Tabla 5 se puede observar la comparación entre el agua y el aceite rápido a diferentes temperaturas y velocidad de circulación, en este proceso se duplican o triplican la severidad del material [15].

**Tabla 5.** Severidad del temple, a diferentes medios de enfriamiento en función a la temperatura y velocidad de circulación [15]

Medio	Temperatura del Medio °C	Velocidad de circulación m/s	Severidad
		0	1.1
Agua	32	0.25	2.1
		0.51	2.7
		0.76	2.8
		55	0



		0.25	0.6
		0.51	1.5
		0.76	2.4
		0	0.5
Aceite rápido	60	0.25	1.0
		0.51	1.1
		0.76	1.5

## 1.5. Tratamientos térmicos empleados en el proyecto

Existe varios tipos de tratamiento térmicos, para esta investigación se va a tomar en cuenta solo dos tipos los cuales se va a profundizar a continuación.

### 1.5.1. Temple

Según Travieso et al. [16], el temple es el proceso donde el material se debe calentar hasta alcanzar una temperatura alta, en el caso del acero 4340 los catálogos del distribuidor recomienda las temperaturas 860 °C, para luego ser enfriado rápidamente aumentando su dureza y resistencia mecánica. Este proceso posee varias etapas, la primera consiste en calentar la pieza uniformemente toda su superficie hasta llegar a la temperatura de estabilidad de la austenita, donde el diagrama TTT, (Figura 3), determinará el tiempo que debe mantenerse a esa temperatura para luego ser enfriado de forma controlada y rápida con el fin de obtener la martensita que consiste en incrementar el carbono del material aumentando su dureza. Existen varios factores a tomar al momento de realizar el temple.

- **Composición química:** La gran variedad de aleaciones suele variar la conductividad térmica siendo menor que los aceros al carbono.
- **Temperatura:** Los aceros de media aleación como el acero 4340, soportan temperaturas más altas que van desde 830 °C a los 860 °C.
- **Tamaño de grano:** Existe acero de grano fino y austenita homogénea que permite obtener mejores propiedades como la tenacidad [17].

### 1.5.2. Revenido

Para el investigador García [17], el revenido se debe realizar a materiales que ya hayan pasado el proceso de temple, debido que la martensita es demasiado frágil, se necesita elevar la resistencia del material. Este tratamiento térmico pretende modificar los efectos del temple disminuyendo la dureza y la resistencia con la eliminación de tensiones internas. En el revenido la velocidad de enfriamiento no es un factor que influye en el resultado final por ese motivo generalmente se suele enfriar con aire, existen varias etapas al momento de realizar el proceso de revenido. Las temperaturas de revenido se encuentran entre 200 a 250 °C, generando una dureza aproximada de 500 HB y las más altas se encuentran desde 500 a 700 °C. El tiempo para el proceso de revenido se encuentra entre 1 a 2 horas o una hora por pulgada de grueso, en la Figura 2 se puede observar una gráfica la cual representa la temperatura del revenido en función a la dureza [10].

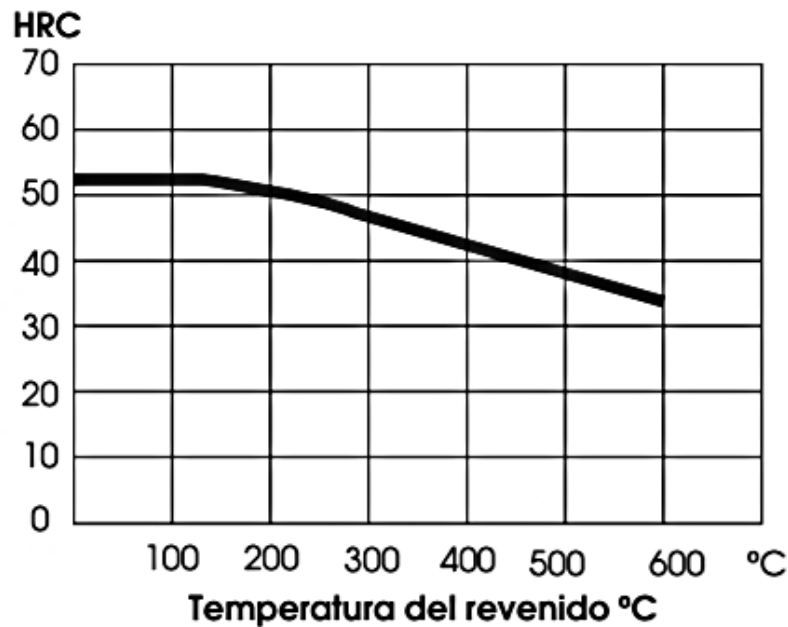


Figura 2. Diagrama de temperatura de revenido vs dureza [10]

### 1.6. Tratamiento térmico recomendado para AISI/SAE 4340

El objetivo del tratamiento térmico es mejorar las propiedades mecánicas del material, para lo cual se debe tener en consideración la temperatura de calentamiento, velocidad de enfriamiento y tiempo. En la Tabla 6 se muestra las temperaturas recomendadas para un tratamiento térmico según aceros Voestalpine.

**Tabla 6.** Tratamiento térmico recomendado para el acero AISI/SAE 4340 por Aceros Voestalpine [9]

<b>Forjado</b>	1050 – 850°C	Enfriamiento lento en el horno o en material termoaislante
<b>Recocido</b>	650 – 700°C (248 HB)	Enfriamiento regulado en el horno.
<b>Temple</b>	830 – 860°C al aceite	Enfriamiento en aceite o baño de sales.
<b>Dureza</b>	54 – 56 HRC	Dureza máxima 248 Brinell.
<b>Revenido</b>	550 – 600°C	Enfriamiento al aire libre, se lo debe efectuar de inmediato después del temple.

## 1.7. Microestructura del acero

Existen varias formas alotrópicas del hierro que dependen tanto de la temperatura como de su contenido de carbono [18].

### 1.7.1. Ferrita

La ferrita se cristaliza en una estructura BCC (red cubica centrada en el cuerpo), considerada el constituyente más dúctil de los aceros [19]. Presenta una resistencia a la ruptura de 280 MPa, una ductilidad del 35% y una dureza de 90 HBC (unidades Brinell) aproximadamente [20].

La ferrita tiene una solubilidad máxima de carbono del 0.025% a 727°C, y 0.008% a temperatura ambiente por este motivo muchos autores la consideran como hierro  $\alpha$  puro [21].

### 1.7.2. Cementita

La cementita,  $Fe_3C$  contiene 6.67% y 93.33% en masa de carbono y hierro respectivamente, posee una dureza superior a 68 HRC (unidades Rockwell C) volviéndose así muy frágil [20].

### 1.7.3. Perlita

La perlita es una estructura eutectoide del acero que está formado por capas alternativas de ferrita y cementita, tiene seis partes de hierro por una de carbono, 88% de ferrita y 12% de cementita. Su dureza depende del espacio interlaminar

provocado por la velocidad de enfriamiento del acero ya sea en el horno (perlita grosera) con 200 HB (unidades Brinell) o al aire con 250 HB [20].

La perlita se origina a los 727 °C, a través de un enfriamiento lento o por medio de una transformación de la austenita a temperatura constante entre 650 a 725°C [21].

- **Forma laminar:** Consiste en láminas alternadas de las dos fases cuyo espacio interlaminar depende de las condiciones de obtención del acero, siendo que dicho espacio es inversamente proporcional a la dureza [19].
- **Forma globular:** La cementita sometida a un incremento de temperatura inferior a 727°C adopta una forma globular en la masa de ferrita, tomando así el nombre de perlita globular [21]. Este tipo de estructura es útil cuando se requiere ablandar un acero que va a ser mecanizado. Se utiliza Nital que reacciona con la ferrita que se encuentra junto al borde de los glóbulos de cementita haciendo que estos aparezcan oscurecidos [19].

#### **1.7.4. Austenita**

La austenita se presenta en aceros aleados con presencia de elementos como níquel, manganeso, cobalto y cobre, con una dureza de 300 HB y una resistencia aproximada de 1050 MPa a temperatura ambiente [20]. En los aceros al carbono la temperatura de formación de la austenita es de 727°C [21].

#### **1.7.5. Martensita**

La martensita se muestra en forma de agua y su cristalización en la red es tetragonal [19]. Sus propiedades físicas varían con el contenido de carbono, tiene una resistencia mecánica de 1700 a 2500 MPa, una dureza de 58 HRC a 68 HRC (unidades Rockwell C) [20]. La martensita es una transformación de la austenita casi instantánea a bajas temperaturas [21].

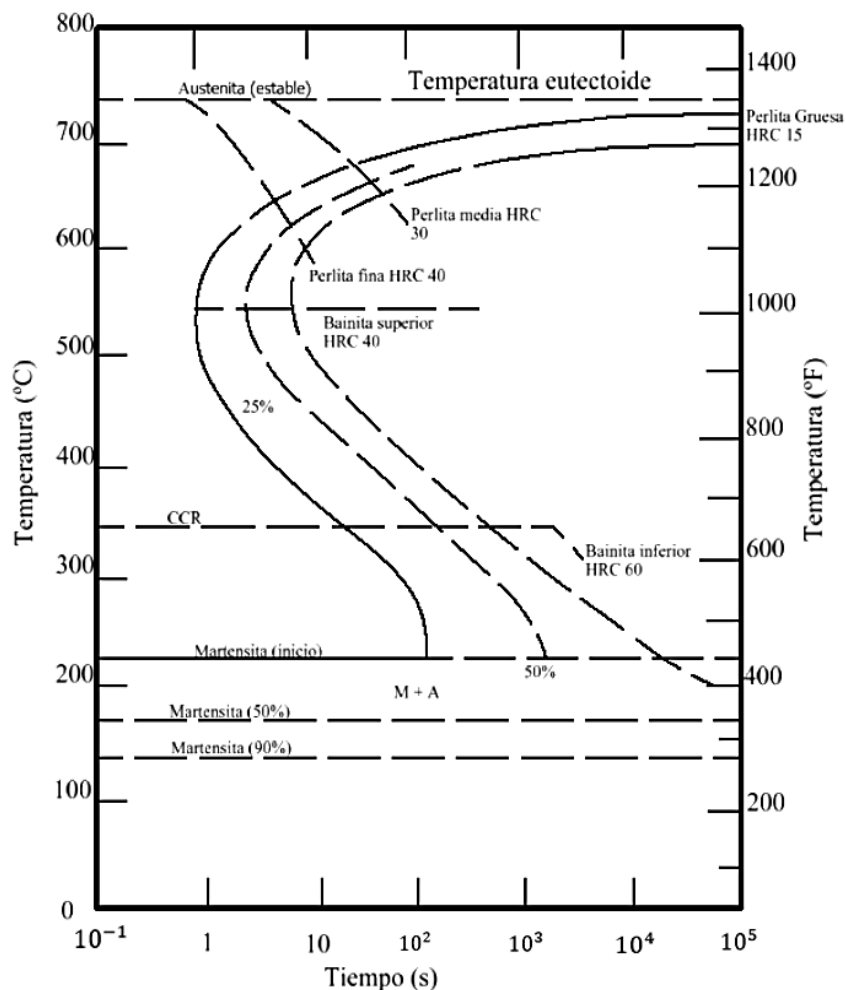
#### **1.7.6. Martensita revenida**

Conjunto de micro - constituyentes resultantes de someter a la martensita a un tratamiento térmico de revenido. Su aspecto micro - estructural puede variar notablemente en función de la temperatura y del tiempo de revenido [20].

### 1.8. Diagrama TTT (Tiempo-Temperatura-Transformación)

En los tratamientos térmicos se utilizan la curva TTT, (o diagramas de transformación isotérmica), para determinar la transformación de la austenita a diferentes temperaturas para cada tipo de acero. En este diagrama el eje de las ordenadas representa la temperatura y el eje de las abscisas representa el tiempo de la transformación, como se muestra en la Figura 3 [22].

La investigadora Pérez [23], expresa que los diagramas de transformación isotérmica sirven para realizar el cambio de estructura del material, mediante la determinación de la velocidad de enfriamiento necesaria para obtener el tratamiento térmico deseado. Para alcanzar la fase requerida se debe llegar al punto crítico el cual consiste en alterar las propiedades físicas y mecánicas del material, afectada por la disminución de la porosidad que reduce la conductividad térmica de la aleación.

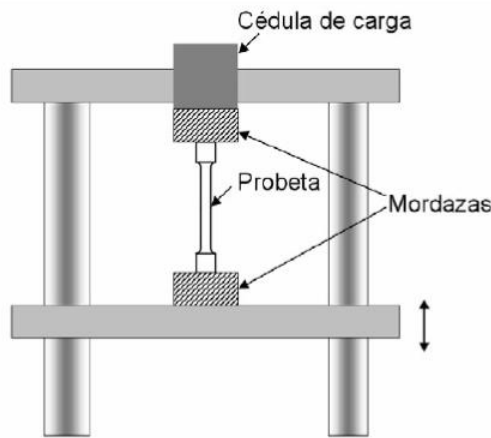


**Figura 3.** Diagrama TTT de una eutectoide [22]

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

### 1.9. Curva tensión-deformación

La curva tensión-deformación se obtiene mediante el ensayo a tracción, (como se muestra la Figura 4). Este diagrama consta de distintas regiones, la primera es la zona elástica que está representada por el módulo de young, donde al aplicar una carga se deforma las propiedades del material, sin embargo, al ser retirada la probeta vuelva a su estado inicial. Luego de superar la región elástica comienza la zona plástica, al contrario de la zona anterior la deformación que se produce es permanente, en este punto se obtiene la tensión máxima del material, ( $\sigma_v$ ), como se muestra en la Figura 5. A partir de esta región la probeta va a sufrir encuellamiento reduciendo su área provocando la rotura del material [24].

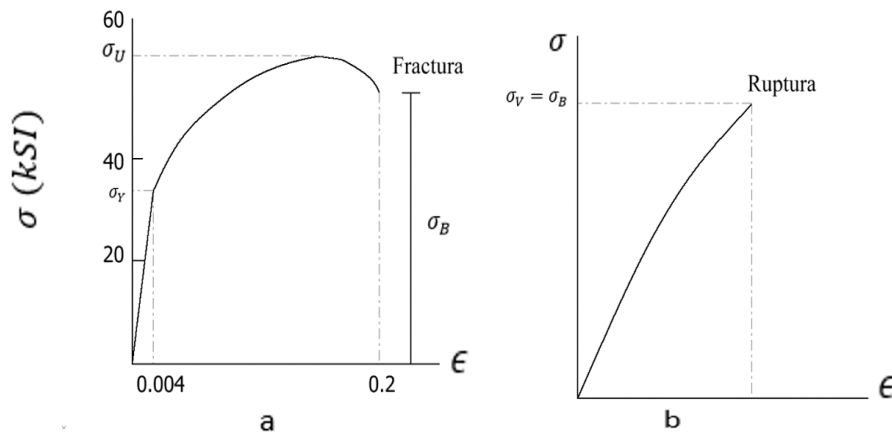


**Figura 4.** Funcionamiento del equipo para ensayos de tracción [24]

La curva se construye con la obtención de datos de la fuerza aplicada en la probeta (tensión),  $\sigma$ , y el alargamiento del material (elasticidad),  $\epsilon$ , que es la variación de tamaño con respecto a su longitud inicial [24].

Los diagramas tensión-deformación tiene muchos factores que varían los valores del ensayo, el primero es el tipo de material, el segundo es la temperatura de la probeta y el tercero la velocidad de aplicación de la pre carga (carga inicial). Para los materiales dúctiles los cuales soportan mayores esfuerzos, la curva tensión-deformación incrementa su longitud, como se muestra en la Figura 5 (a) y regresando a su estado inicial al momento de retirar la carga. Sin embargo, luego de alcanzar su punto de cedencia la probeta aumenta su tamaño y disminuye su diámetro llegando a fracturar el material formando un ángulo de  $45^\circ$ . En los materiales frágiles a

diferencia de los dúctiles no existe una prolongación de tamaño en el material, como se observa en la Figura 5 (b), la ruptura se genera casi inmediatamente produciéndose perpendicularmente a la carga [25].



**Figura 5.** Curva tensión-deformación (a) materiales dúctiles, (b) materiales frágiles [25]

### 1.9.1. Zona elástica

Díaz et al. [26], subrayan la importancia de la identificación de las regiones elástica y plástica del material en la curva tensión-deformación, (Figura 6). La deformación elástica es una línea recta continua que llega hasta el punto de cedencia, es cuando al material se le aplica una carga que puede soportar sin perder sus propiedades mecánicas, al momento de retirar la fuerza ejercida sobre él vuelve a su estado inicial. En esta parte de la curva se estudia la capacidad de carga y la deformación del material.

### 1.9.2. Punto de fluencia

En la Figura 6 se representa la transición de la zona elástica a la zona plástica e indica una deformación permanente del material debido a una carga aplicada. En ciertos materiales la dicha transición a la zona plástica es abrupta, dicha transición se denomina punto de fluencia o cedencia [27].

### 1.9.3. Zona plástica

En la investigación realizada por Mafla [28], expresa que la zona plástica o zona de fluencia, como se observa en la Figura 6, es donde se deforma el material sin llegar a la ruptura, sin embargo, llega a un punto sin retorno donde el material no vuelve a su

estado original como pasa en la zona elástica. Las probetas pierden su dimensionamiento original de forma perpendicular a la carga.

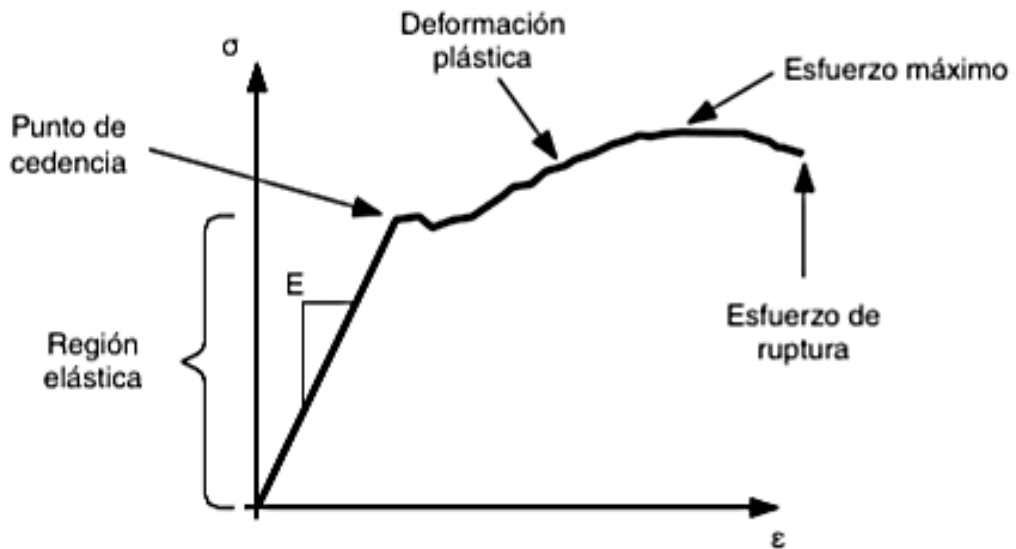


Figura 6. Curva tensión-deformación para materiales dúctiles [26]

## 1.10. Puntos y zonas del diagrama esfuerzo-deformación

### 1.10.1. Límite de proporcionalidad

En la Figura 7 se puede observar la región lineal, es el cual está regido por la ley de Hooke, donde existe una proporcionalidad entre la tensión y la deformación [29].

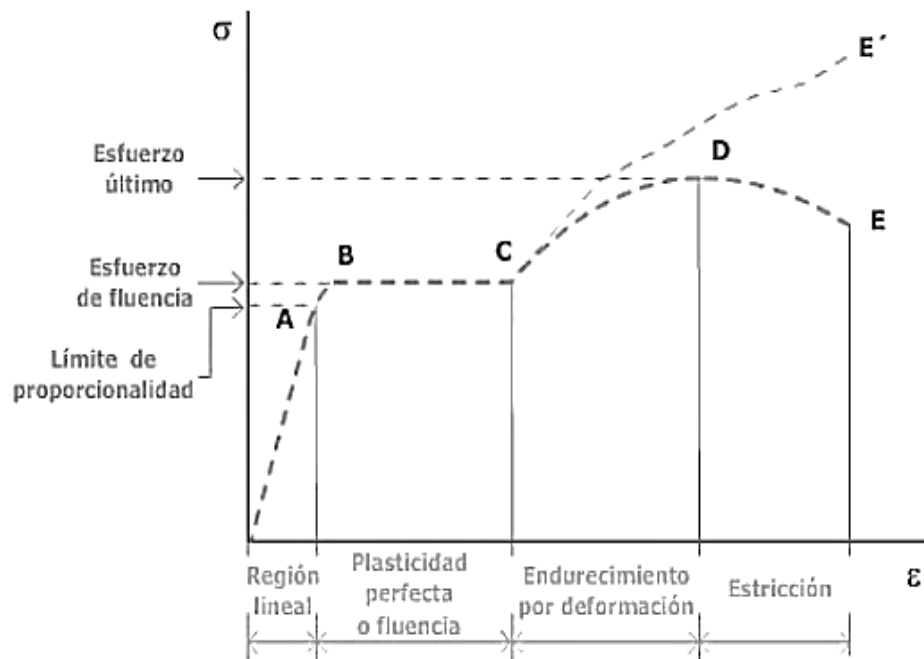


Figura 7. Puntos y zonas del diagrama esfuerzo-deformación para materiales dúctiles [29]



### 1.10.2. Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad o también llamado el módulo de Young es un parámetro que varía dependiendo del material utilizado. Es la relación entre la fuerza aplicada al material y su la deformación que sufre. Esta propiedad hace que el material sufra deformaciones reversibles por la acción de fuerzas externas [30]. Este módulo se puede observar en el diagrama esfuerzo-deformación, (Figura 7).

El módulo de young se calcula utilizando la ley de Hooke con se muestra en la Ecuación 1:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (1)$$

Donde:

**E:** Módulo de elasticidad

**$\sigma$ :** Esfuerzo máximo aplicado

**$\epsilon$ :** Deformación unitaria producida en el material.

En esta región el material es elástico, debido a esto cuando la fuerza aplicada es retirada el material vuelve a su forma original [27].

### 1.10.3. Límite elástico

El límite elástico también es conocido como periodo elástico es un dato muy importante en el diseño debido a que una tensión más allá de este punto genera una deformación permanente en el material [31]. En la Figura 5 (a) se observa a la tensión máxima donde se cumple la elasticidad siguiendo la Ecuación 1.

### 1.10.4. Porcentaje de alargamiento

Es la variación de tamaño que sufre una probeta luego de haber sido sometida al ensayo de tracción, cuya posición inicial está normalizada [32], como se observa en la Ecuación 2:

$$\% \delta = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100 = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 \quad (2)$$

Donde:

$\% \delta$ : Porcentaje de alargamiento

$l$ : Longitud final

$l_0$ : Longitud inicial

#### **1.10.5. Esfuerzo último a la tensión**

Es la carga máxima que se puede aplicar a un material sin llegar al punto de ruptura. Este esfuerzo se da cuando la fuerza aplicada en el ensayo a tracción es igual a la resistencia a la tensión del material iniciando la estricción y la fractura de la probeta [33]. En la Ecuación 3 se observa la fórmula utilizada:

$$\sigma_{ult} = \frac{F_{ult}}{A} \quad (3)$$

Donde:

$\sigma_{ult}$ : Esfuerzo último a la tensión

$F_{ult}$ : Carga máxima a la cual falla la probeta, en N

$A$ : Área de la sección transversal de la probeta, en mm

#### **1.10.6. Esfuerzo de ruptura**

Es la fuerza utilizada en los ensayos a tracción hasta llegar al punto de ruptura de la probeta, tomando en cuenta que este valor depende del material utilizado [31].

#### **1.10.7. Porcentaje de reducción de área**

Es la variación del área en la zona de ruptura de la probeta, para este parámetro se necesita conocer el área inicial y final de la probeta, [31], como se muestra en la Ecuación 4:

$$R_A \% = \frac{A_f - A_0}{A_0} \cdot 100 \quad (4)$$

## 1.11. Dureza

Dureza se define por la resistencia a la deformación del material mediante la indentación de otro, se la mide mediante ensayos de dureza y puede estar dado en: Brinell, Vickers, entre otros [32].

### 1.11.1. Tipos de ensayo de dureza

- **Ensayo de dureza Brinell:** Para garantizar este ensayo se realiza siguiendo la norma STM E10-14 (Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials) que se realiza con un maquina calibrada que utiliza una esfera como indentador contra el material de ensayo [34]. Este proceso se mide en función a una carga aplicada y del diámetro dejado por el penetrador esférico que puede ser de acero endurecido o carbono de tungsteno [35].
- **Ensayo de dureza Rockwell:** Según Ferreira, [35], este ensayo determinar la dureza de un material mediante la aplicación de una carga sobre el penetrador hacia la superficie del material, en función a la penetración alcanzado mediante la colocación de cargas se determina la dureza. Para los materiales con una aleación dura se utilizan penetradores de diamante en forma de cono de 120° con una punta redondeada. Para este tipo de ensayos se una carga menor (preliminar) de 3 Kgf y la mayor va entre 100 y 150 Kgf. Existe escalas de dureza Rockwell como se presenta en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Escala de dureza Rockwell [36]

Escala Rockwell	Símbolo de dureza	Penetrador	Carga (kg)	Aplicación
A	HRA	Cono	60	Carburos cementados y cerámicos.
B	HRB	Esfera de 1/16"	100	Metales no ferrosos, aceros de baja resistencia.
C	HRC	Cono	150	Metales ferrosos, aceros de herramientas y de alta resistencia.
D	HRD	Cono	100	Aceros de alta resistencia.
E	HRE	Esfera de 1/8"	100	Aluminio.
F	HRF	Esfera de 1/16"	60	Materiales suaves, polímeros

- **Ensayo de dureza Vickers:** Este tipo de ensayo es considerado como micro - dureza debido a las cargas y las magnitudes que se utiliza, a diferencia de los otros ensayos este utiliza un penetrador de geometría piramidal de base cuadrada, donde las caras laterales forman un ángulo de  $136^\circ$ , el penetrador es forzado sobre la superficie de la probeta aplicando cargas desde 1 gf a 1000 gf. Esta carga se aplica por medio de un microscopio obteniendo una impresión cuadrada para medir sus diagonales dando como resultado la dureza del material [35].

### **1.11.2. Durómetro**

Son instrumentos utilizados para medir la dureza de los materiales provenientes del caucho natural y sintético, plásticos, vidrio acrílico, acetatos, resina de fundición, poliéster, termoplásticos, PVC, entre otros, son instrumentos portátiles y de alta precisión. Existen dos tipos de durómetros el digital y el análogo, este instrumento combina el peso de carga roscada según las normas ASTM D2240 y DIN 53505 para realizar las mediciones [37].

## CAPÍTULO II

### ANÁLISIS Y ALTERNATIVAS

#### 2.1. Elección de variables

Este proyecto tiene en cuenta seis variables importantes para determinar las características finales que tendrá el acero AISI/SAE 4340 después del tratamiento térmico.

- Temperatura de revenido: 280, 320 y 380 °C.
- Método de enfriamiento en el revenido: Aceite, en el horno y al ambiente.

##### 2.1.1. Aplicación de ANOVA

Este proyecto aplicará una técnica estadística denominada ANOVA, la misma que involucra todas las variables para determinar el número exacto de probetas necesarias a evaluar. La Tabla 8 indica las permutaciones posibles con las variables mencionada anteriormente.

**Tabla 8.** Designación de la temperatura y método de enfriamiento de cada probeta

Designación	T. de revenido (°C)	Método de enfriamiento
R280-W1	280	Ambiente
R280-W1		Ambiente
R280-H1		Horno
R280-H2		Horno
R280-O1		Aceite
R280-O2		Aceite
R320-W1	320	Ambiente
R320-W2		Ambiente
R320-H1		Horno
R320-H2		Horno
R320-O1		Aceite
R320-O2		Aceite
R380-W1	380	Ambiente
R380-W2		Ambiente
R380-H1		Horno
R380-H2		Horno
R380-O1		Aceite
R380-O2		Aceite

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

## 2.2. Diseño de probetas

Las probetas son mecanizadas de acuerdo a las especificaciones de la norma ASTM E8 la cual corresponde al ensayo estándar de tracción como se muestra en la Figura 8 y Tabla 9.



**Figura 8.** Dimensiones de las probetas de acuerdo a la norma ASTM E8 [38]

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

**Tabla 9.** Dimensión de probetas de ensayo a tracción de acuerdo a la norma ASTM E8 [38]

Díámetro nominal	in (0.500)	mm (12.7)
G – longitud del calibre.	$2.000 \pm 0.005$	$50.8 \pm 0.127$
D – diámetro.	$0.500 \pm 0.010$	$12.7 \pm 0.254$
R – radio mínimo del filete.	$\frac{3}{8}$	9.525
A – longitud de la sección reducida.	$2 \frac{1}{4}$	57.15

Las probetas mecanizadas cubren un total de 21 de las cuales 18 son destinadas para tratamiento térmico y 3 en la forma de suministro (bonificado), una vez mecanizadas serán identificadas con relación a la temperatura de revenido a la que serán sometidas para un mejor control del proceso.

## 2.3. Procedimiento del tratamiento térmico aplicado

### 2.3.1. Procedimiento de temple a 860 °C

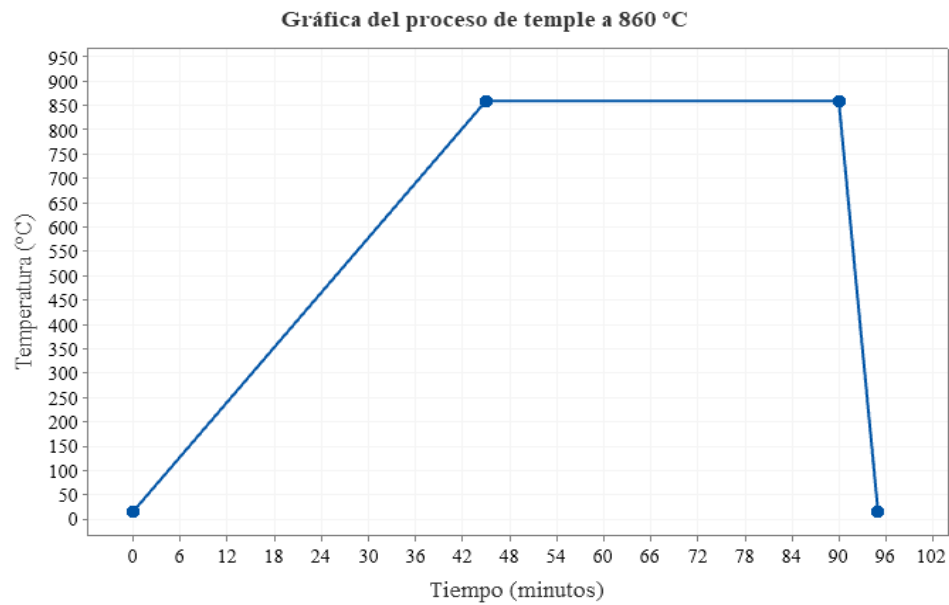
Para este proceso se toma en consideración tres factores vitales como la temperatura de austenización del material, el tiempo de sostenimiento y la velocidad de enfriamiento [39].

- El primer proceso a realizar es el calentamiento del material, esto depende del acero y de la dureza deseada. El calentamiento se debe realizar hasta que el material alcance la temperatura de austenización que otorgan los catálogos en

los cuales se indica que 860 °C corresponde al acero AISI/SAE 4340. El proceso se debe iniciar con el horno a temperatura ambiente hasta alcanzar la temperatura anteriormente dicha [16].

- El segundo proceso es el tiempo de sostenimiento, después de calentar el material hasta la temperatura de austenización se debe mantener a dicha temperatura para que todo el material realice el proceso del temple y la austenita BCC se transforme en austenita FCC [39]. El tiempo de permanencia máximo es de 1 hora [10].
- Después de finalizar el tiempo de sostenimiento se realiza la etapa de enfriamiento del material el cual se realiza con aceite refinado de petróleo (durixol W25) con un movimiento constante para favorecer la formación de la martensita.

En la Figura 9 se observa el proceso de templado comenzado por el tiempo de subida el cual tuvo una duración de 45 minutos desde una temperatura ambiente, (16 °C), hasta llegar a 860 °C, luego se pasa a la parte de estabilización donde se permanece a dicha temperatura hasta que la probeta alcance la temperatura de temple en toda su superficie, (45 minutos) y por último se realiza el proceso de enfriamiento que se realizó en aceite en un tiempo de 5 minutos hasta que la probeta vuelva a temperatura ambiente.



**Figura 9.** Proceso del temple a 860 °C

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

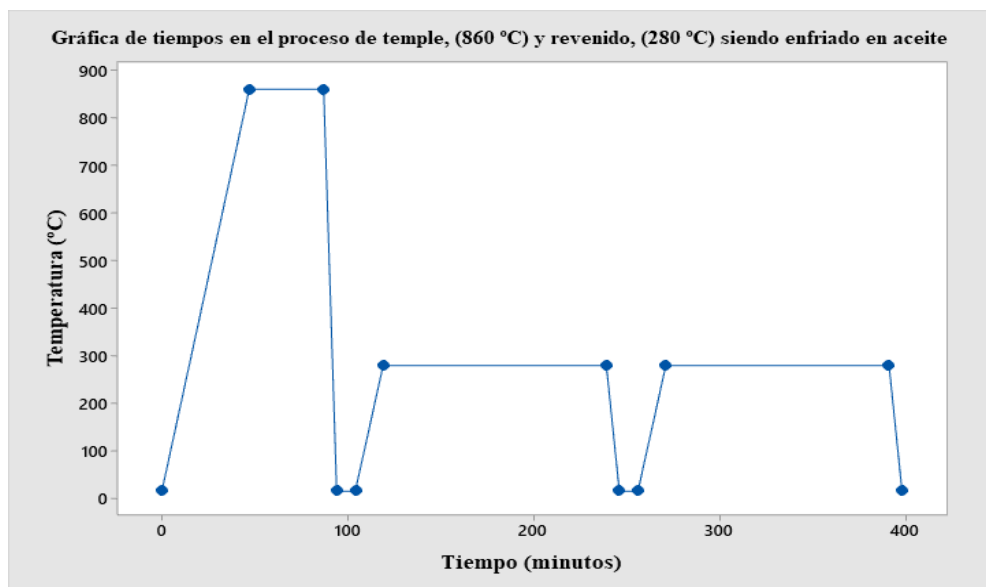
### 2.3.2. Procedimiento de revenido

El revenido es un proceso que se realiza después del temple, disminuyendo la fragilidad de los aceros. El procedimiento es el mismo que el temple, sin embargo, existe algunas diferencias.

- La temperatura del revenido debe ser inferior a la temperatura de austenización, (860 °C), del acero AISI/SAE 4340. Se realiza el revenido a 280, 320 y 380 °C. Estas temperaturas fueron consideradas debido a que este rango de temperaturas 280 a 380°C da lugar a la fragilización por martensita revenida.
- El tiempo de sostenimiento mostrado en catálogos sugiere de 1 a 2 horas con una temperatura de 550 °C [10]. Es decir, 1.96 veces más que la temperatura mínima de revenido seleccionada para este proyecto (280 °C), por lo que se decidió realizar un doble revenido con un tiempo de 2 horas cada uno para que la estructura interna logre el revenido deseado.
- El método de enfriamiento se realiza en aceite, en horno y al ambiente.

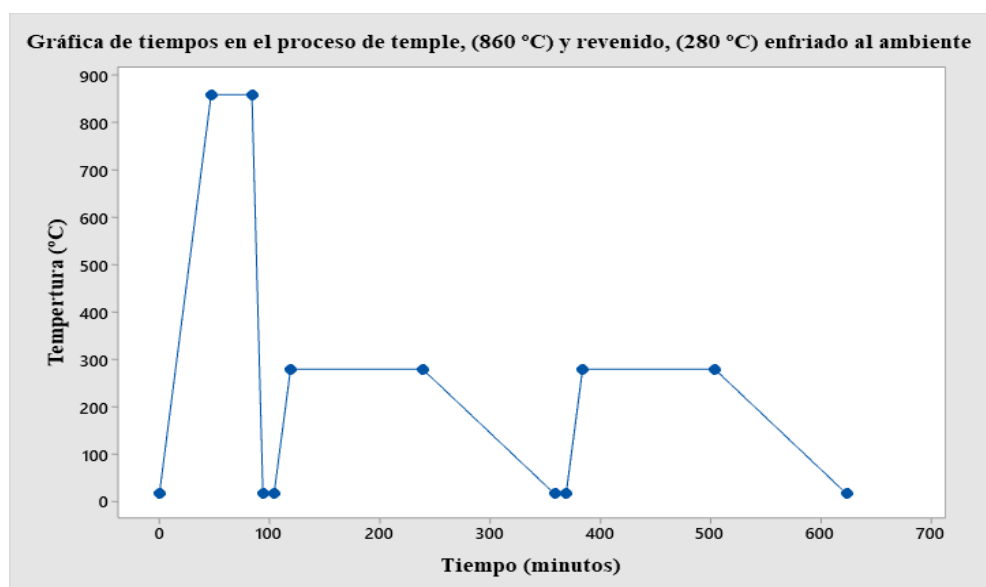


En el caso del revenido se utilizó tres temperaturas diferentes: 280, 320 y 380 °C. A su vez se tiene tres métodos de enfriamiento: aceite, ambiente y horno. En la Figura 10, 11 y 12 se utilizan la temperatura de 280° C, para representar la variación entre los tres métodos de enfriamiento. El procedimiento para el revenido es el mismo que se realizó en el temple. No obstante, es importante mencionar que el tiempo de enfriamiento difiere para cada método, es así que el tiempo de enfriamiento en aceite es de 7 minutos en aceite, 2 horas al ambiente y 5 horas en horno.



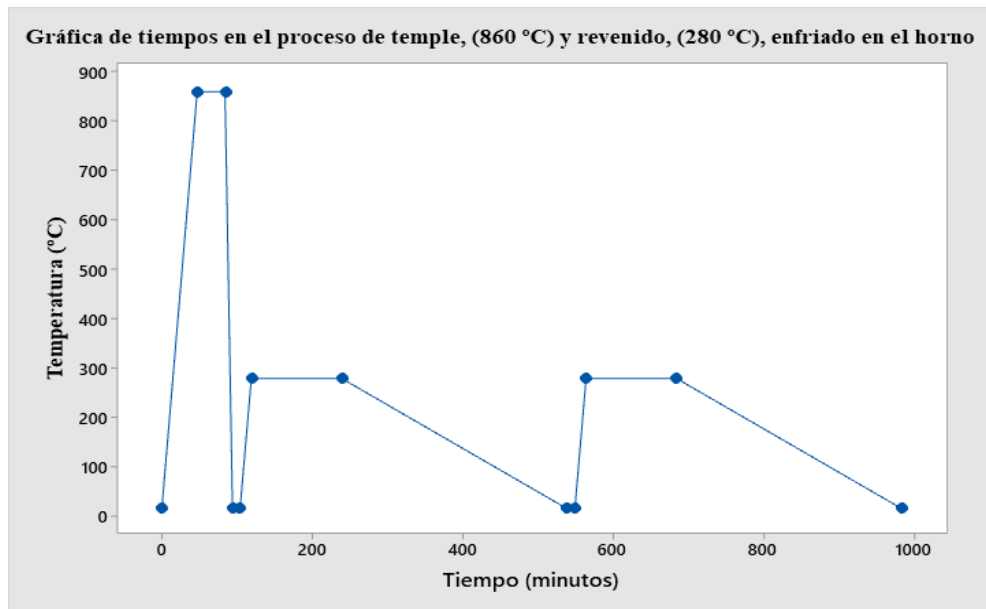
**Figura 10.** Proceso del revenido a 280 °C enfriado en aceite

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango



**Figura 11.** Proceso de revenido a 280 °C enfriado al ambiente

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango



**Figura 12.** Proceso de revenido a 280 °C enfriado en el horno

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

### 2.3.3. Descripción del equipo utilizado en el temple

En la Figura 13 se aprecia el horno de templado/endurecimiento N7/H NABERTHERM que forma parte del laboratorio de la Universidad Politécnica Salesiana, cuyas características se detallan a continuación y sus datos de placa se observan en la Tabla 10.

- Temperatura máxima 1280 °C.
- Calentamiento en tres lados: laterales y suelo.
- Los elementos calefactores en los tubos de soporte garantizan la radiación libre del calor.
- Aislamiento multilaminado con ladrillos refractarios ligeros en la cámara del horno.
- Movimiento de puerta mediante amortiguador de presión de gas [40].

**Tabla 10.** Datos de placa del horno N7/H NABERTHERM [40]

Características del equipo	
Modelo	N 7/H
Número	215755
Año	2010
V	220
Hz	60
A	13.0
KW	3.0
T máx.	1280 °C



**Figura 13.** Horno N7/H NABERTHERM utilizado para temple

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

#### **2.3.4. Descripción del equipo utilizado en el revenido**

En la Figura 14 se observa el horno de cámara de convección forzada N15 / 65 HA utilizado para realizar el revenido a distintas temperaturas en las probetas. Los datos de placa se ilustran en la Tabla 11 y sus características son las siguientes:

- Temperatura máxima 650 °C.
- Deflectores de aire de acero inoxidable en el horno para una circulación de aire óptima.

- Puerta abatible con bisagra en el lado derecho.
- Circulación de aire horizontal.
- Uniformidad de temperatura  $\pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$  [41].

**Tabla 11.** Datos de placa del horno N15/ 65 HA [41]

Características del equipo	
Modelo	N 15/65 HA
Número	215758
Año	2010
V	220
Hz	60
A	12.3
KW	2.7
T máx.	650 $^{\circ}\text{C}$



**Figura 14.** Horno N15 / 65 HA para revenido  
Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

#### 2.4. Procedimiento del ensayo de espectroscopia de emisión óptica

El ensayo de espectroscopia de emisión óptica se utiliza para conocer la composición química de los metales y aleaciones. Este tipo de ensayos son utilizados para conocer

el porcentaje de elemento químico que se encuentre en el material. El procedimiento se debe llevar a cabo en laboratorios debidamente equipados, debido que se puede determinar 21 elementos de unas aleaciones (altas y baja) y de aceros al carbono simultáneamente por el método de chispa atómica espectrometría de vacío [42].

#### 2.4.1. Norma empleada

La norma empleada para este tipo de análisis en materiales metálicos es la ASTM-E415. La norma da un mejor rendimiento con materiales son de estado metalúrgicos similar composición [43]. En la Tabla 12 se puede observar los documentos de referencia que indica la norma ASTM.

**Tabla 12.** Norma ASTM E-415 [42]

<b>Norma</b>	<b>Descripción</b>
E29	Práctica para el uso de dígitos significativos en los datos de prueba para determinar la conformidad con las especificaciones.
E135	Terminología relacionada con la química analítica de metales, minerales y materiales relacionados.
E305	Práctica para el establecimiento y curvas de control de emisión atómica espectroquímico analíticos.
E350	Métodos de ensayo para el análisis químico de acero al carbono, de baja aleación, acero, acero magnético al silicio, lingotes de hierro forjado.
E406	Práctica para el uso de atmósferas controladas en el análisis espectroquímico.
E1019	Métodos de ensayo para la determinación de carbono, azufre, nitrógeno y oxígeno en el acero, hierro, níquel y aleaciones de cobalto mediante diversas técnicas de combustión y la fusión.
E1329	Práctica para la verificación y uso de gráficos de control en el análisis espectroquímico.
E1601	Práctica para la realización de un estudio entre laboratorios para evaluar el desempeño de un método analítico.
E1763	Guía de interpretación y uso de los resultados entre laboratorios de ensayo de métodos de análisis químico.
E1806	Metodología para el muestreo de acero y hierro para la determinación de la composición química.
E1950	Práctica para notificar los resultados de métodos de análisis químico
E2972	Guía para la producción, pruebas y asignación de valores de propios de materiales de referencia para metales, minerales y otros materiales relacionados.

#### 2.4.2. Probeta normalizada

Para el procedimiento de este ensayo una muestra del material debe ser cortado una muestra de tamaño grande, (sin ninguna medida en específico) y el grosor suficiente para la máquina, (la medida se encuentra entra 10 mm a 38 mm normalizado) [43].

#### 2.4.3. Descripción del equipo utilizado

El equipo que se utilizara en este ensayo es de la marca Oxford y su modelo es Foundry-Master Xpert, la cual tiene una gama espectral de 130 a 800mm que permite detectar la composición química de cualquier material metálico. Sus características se detallan a continuación [44].

- Sistema óptico de vacío para mejor transparencia de luz de baja longitud de onda.
- Libre de contaminación debido a la trampa de aceite y al filtro de niebla de aceite.
- Estación de trabajo de PC externa que incorpora la última tecnología.

La Tabla 13 denota las características técnicas del equipo utilizado en los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana.

**Tabla 13.** Características técnicas del espectrómetro Foundry-Master Xpert [44]

Características del equipo	
Modelo	Foundry-Master Xpert
Peso	100 kg / 200 lb
V	90 -250
Hz	50 -60
A	12.3
W	600

#### 2.5. Procedimiento del ensayo de dureza

Las mediciones de dureza se obtienen directamente del indicador de la máquina dada por la acción del penetrador.

- Las superficies a medir deben ser lisas o con una rugosidad menor a  $0,4\mu\text{m}$  y evitar tomar las mediciones en las escaras debido a tratamientos térmicos.
- La superficie a ser medida debe estar perpendicular al eje vertical reduciendo el desplazamiento en lo posible.
- Se recomienda tomar al menos 6 medidas para obtener un promedio y descartar los valores que presenten una desviación alta.

### **2.5.1. Norma empleada**

Este ensayo toma como base el método de prueba estándar para dureza Rockwell en materiales metálicos de la norma ASTM E18-14 para garantizar un correcto procedimiento del mismo y tener una alta confiabilidad en los resultados [45].

### **2.5.2. Probeta normalizada**

No existe una probeta normalizada para realizar un ensayo de dureza, sin embargo, para evitar problemas de indentación en la probeta la norma ASTM E18-14 manifiesta un espesor al menos 10 veces la profundidad de la huella, además es importante tener en cuenta que el mecanizado no debe suponer un aumento de temperatura en las superficies a medir ya que podría afectar en los resultados del ensayo [32].

### **2.5.3. Descripción del equipo utilizado**

El equipo a utilizar en el ensayo de dureza es Phase II 900-365 Digital Rockwell Hardness Tester en el laboratorio de la Universidad Politécnica Salesiana mostrada en la Figura 15 que cuenta con las siguientes características:

- Carga principal: 60 Kgf, 100 Kgf, 150 KGF.
- Aplicación de fuerza de prueba: peso muerto.
- Control de fuerza de prueba: motorizado.
- Pantalla de resultados: Lectura digital LCD de alta definición.

- Resolución: 0.1HR.
- Memoria / Salida: 500 Pruebas / USB.
- Capacidad Vertical: 7.87"
- Profundidad de garganta: 6.50 "
- Altura: 28.34 "
- Ancho: 7.87 "
- Profundidad: 21.60 " [46]



**Figura 15.** Durómetro Phase II 900-365  
Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango



## 2.6. Procedimiento del ensayo a tracción

Para los investigadores Cabrera y Koller [47], este tipo de ensayos miden la resistencia del acero el cual se encuentra sometido a una fuerza estática a una velocidad normalizada, la probeta se encuentra una tensión gradual hasta llegar al momento de ruptura. Este ensayo permite conocer el módulo de elasticidad del material, coeficiente de poisson, límite elástico, límite de fluencia, entre otros.

- Para este ensayo se deben ajustar las mordazas de la máquina previamente para evitar accidentes potenciales como se muestra en la Figura 16.
- Es necesario tomar las dimensiones de la probeta tanto su longitud inicial como el diámetro de la sección reducida y registrarlos.
- Mientras el ensayo se está ejecutando es importante observar que no exista deslizamiento de la probeta.
- La máquina mostrará la gráfica esfuerzo deformación una vez fracturado el material.



**Figura 16.** Preparación del equipo para ensayos de tracción

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

### 2.6.1. Norma empleada

La norma utilizada para el ensayo de tracción es la ASTM E8M-04, esta prueba proporciona información de la fuerza y ductilidad de materiales metálicos.

El procedimiento para este tipo de ensayo comienza con la medición y registro de las probetas, preparación de la máquina al controlar su precarga, la velocidad de la prueba, entre otros parámetros más [48]. En este proceso la probeta es ajustada a los extremos aplicando una carga hace que el material se deforme y luego rompa en el medio, sin embargo, la carga ejercida y tiempo de fallo de la probeta depende del tipo de acero, en la Figura 17 se observa la reducción de sección y posterior ruptura del material [49].

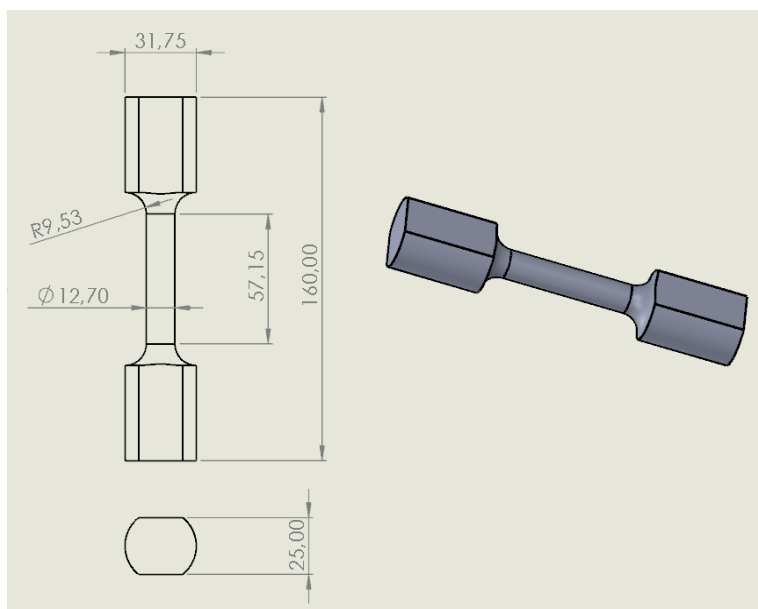


**Figura 17.** Ruptura de acero en estado de suministro sometido al ensayo de tracción

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

### 2.6.2. Probeta normalizada

En el ensayo a tracción se puede utilizar dos tipos de probetas las cilíndricas y rectangulares [38]. En esta investigación se utiliza el tipo cilíndrico bajo la norma ASTM E8M-04, con un aplanado en los extremos libres para mayor estabilidad de la probeta y sujeción de las mordazas como lo indica la Figura 18.



**Figura 18.** Dimensión de las probetas para el ensayo a tracción

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

### 2.6.3. Descripción del equipo utilizado

#### - Equipo 1

El equipo 1 se encuentra en la Universidad Politécnica Salesiana, donde se realizaron los ensayos para las probetas de material base, una de sus características principales es que posee doble columna, es de la serie 300 de TestResources, mostrada en la Figura 19 sus datos de placa se pueden observar en la Tabla 14.

**Tabla 14.** Datos de placa del equipo TestResources R315 [50]

Datos de placa		
<b>Fuerza estática</b>	33750 lb	150 KN
<b>Velocidad mínima</b>	0.01 in/min	0.25 mm/min
<b>Velocidad máxima</b>	12.0 in/min	300 mm/min
<b>Longitud de la carrera</b>	49 in	1220 mm



**Figura 19.** TestResources 300 para ensayos a tracción

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

- **Equipo 2**

En el equipo 2 se realizó los ensayos para las probetas con los tratamientos térmicos de temple y revenido, debido que la máquina posee una mayor fuerza. El modelo de la máquina es WAW-1000D de la marca JINAN HENSGRAND INSTRUMENT CO. LTD. En la Tabla 15 observa las características técnicas del equipo.

**Tabla 15.** Datos de placa del equipo WAW-1000D [51]

<b>Datos de placa</b>	
<b>Marca</b>	JINAN HENSGRAND INSTRUMENT CO. LTD
<b>Modelo</b>	WAW-1000D
<b>Serie</b>	6836-07-13
<b>Intervalo de medida</b>	60-600 KN
<b>Velocidad mínima</b>	0.25 mm/min
<b>Velocidad máxima</b>	100 mm/min
<b>Longitud de la carrera</b>	700 mm

## CAPÍTULO III

### ANÁLISIS Y RESULTADOS

#### 3.1. Introducción

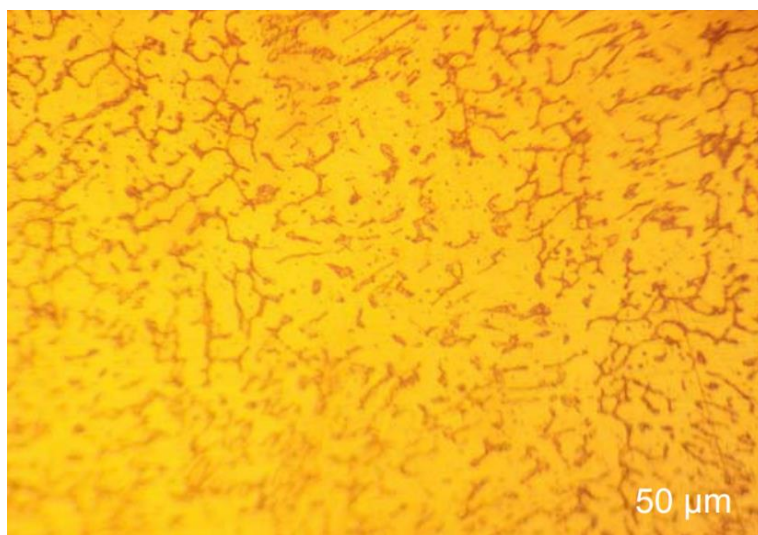
Los resultados que se especifican a continuación se obtienen a partir de las pruebas mecánicas descritas en capítulo anterior. Estos resultados permiten analizar las propiedades mecánicas del acero AISI/SAE 4340 tanto en estado de suministro como tratado térmicamente con diferentes temperaturas de revenido y métodos de enfriamiento.

Se aplicará el análisis de varianza ANOVA multifactorial para determinar el número exacto de probetas a ensayar de acuerdo a las variables temperatura de revenido y método de enfriamiento dado que la norma ASTM no lo especifica. Además, este análisis permite interpretar los errores basados en el estudio de la media, desviación estándar y varianza de los resultados de los ensayos.

#### 3.2. Microestructura del acero AISI/SAE 4340

##### 3.2.1. Microestructura del material en estado de suministro

En la investigación realizada por Ruiz [52], se observa las etapas de transformación de la martensita a una estructura de cementita, ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), formada por una composición de carbono del 6.67% y de hierro de 93.33% dispersa en ferrita con una estructura cristalina BCC, como se observa en la Figura 20.



**Figura 20.** Microestructura del acero AISI/SAE 4340 en estado de suministro [52]

### 3.2.2. Microestructura del material en el proceso de revenido

Es importante relacionar las propiedades de las microestructuras (martensita, bainita, cementita y austenita) detalladas en la sección 1.7 con las temperaturas de revenido escogidas para el proyecto.

#### - Revenido entre 150 °C a 200 °C

Se produce una segregación de carbono hacia las dislocaciones y precipitación de carburo. Además, se genera tetragonalidad de la martensita reducida o desaparecida y la estructura se aprecia similar a una bainita inferior. A esta temperatura se produce un incremento de la tenacidad ideal para trabajos que necesiten alta resistencia mecánica y resistencia a la fatiga [53].

#### - Revenido entre 201 °C a 300 °C

En esta temperatura se descompone la austenita retenida a bainita, se utiliza para herramientas en trabajos en frío [53].

#### - Revenido entre 301 °C a 400 °C

Las partículas de carburo épsilon se transforman en cementita y austenita en la frontera del grano. Se disminuye la tenacidad del material debido al fenómeno conocido como fragilización de la martensita revenida [53].

### 3.3. Resultados de ensayo espectroscopia en estado de suministro

El análisis de espectrofotometría para determinar la composición química del material se ve reflejado en la Tabla 16, el cual compara los resultados del ensayo con los valores proporcionados por el catálogo del distribuidor y la norma ASTM 29, para así poder concluir que dicho material corresponde al acero AISI/SAE 4340.

**Tabla 16.** Comparación de la composición química del acero AISI/SAE 4340

Designación	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Mo	%Ni
MB-1	0.322	0.117	0.767	1.58	0.208	1.47
Voestalpine	0.34	0.30	0.50	1.5	0.20	1.5
ASTM 29	0.38-0.43	0.15-0.35	0.60-0.80	0.38-0.46	0.20-0.30	1.75-2.00

### 3.4. Análisis estadístico

En la investigación realizada se tomaron en cuenta seis variables diferentes, las cuales son la temperatura de revenido, (280 °C, 320 °C y 380 °C), y el método de enfriamiento, (aceite, ambiente y horno), por este motivo se decidió utilizar la técnica estadística de análisis de varianza llamada ANOVA. El uso de esta técnica realiza un análisis de varianza con las medias de uno o más factores comparándolas con las variables de respuesta, (en este caso la dureza y la resistencia a la tracción).

En la Tabla 17 se indica los resultados obtenidos a partir de los ensayos de dureza y tracción en los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana y la empresa ILPM. Ltda, luego de haber realizado un temple a 860 ° y doble revenido, (280 °C, 320 °C y 380 °C), con 2 horas de estabilización por cada revenido, siguiendo las directrices de la página 14 del manual de tratamientos térmicos de Voestalpine High Performance Metals del Ecuador S.A [54].

**Tabla 17.** Factores y valores experimentales obtenidos

<b>Designación</b>	<b>Tipo de enfriamiento (revenido)</b>	<b>Temperatura de revenido</b>	<b>Dureza (HRC)</b>	<b>Resistencia a la Tracción (MPa)</b>
R280-W1	Ambiente	280	48,06	1577
R280-W1	Ambiente	280	48,04	1576
R280-H1	Horno	280	48,62	1607
R280-H2	Horno	280	48,01	1575
R280-O1	Aceite	280	48,77	1621
R280-O2	Aceite	280	48,55	1618
R320-W1	Ambiente	320	47,85	1565
R320-W2	Ambiente	320	47,90	1567
R320-H1	Horno	320	47,32	1540
R320-H2	Horno	320	47,75	1580
R320-O1	Aceite	320	47,95	1571
R320-O2	Aceite	320	47,98	1572
R380-W1	Ambiente	380	46,30	1497
R380-W2	Ambiente	380	46,24	1491
R380-H1	Horno	380	45,98	1479
R380-H2	Horno	380	46,05	1483
R380-O1	Aceite	380	46,74	1510
R380-O2	Aceite	380	46,63	1502

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

Para la ejecución de la técnica ANOVA, primero se debe obtener otros datos como por ejemplo los grados de libertad, suma de cuadrados totales, entre otros.

### 3.4.1. Análisis estadístico de resultados de dureza

#### - Grados de libertad

*Grados de libertad total:*

$$DF_{total} = \text{Número de pruebas} - 1 \quad (5)$$

$$DF_{total} = 18 - 1 = \mathbf{17}$$

*Grados de libertad para factores:*

$$DF = \text{Número de niveles} - 1 \quad (6)$$

$$DF = 2 - 1 = \mathbf{1}$$

*Grado de libertad para el error:*

$$DF_e = DF_{total} - DF * \text{factores} \quad (7)$$

$$DF_e = 17 - (1) \cdot (2) = \mathbf{15}$$

#### - Suma de cuadrados totales

$$\sum_{i=1}^n yi^2 \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n yi^2 = (48.06^2 + 48.04^2 + 48.62^2 + \dots + 46.05^2 + 46.74^2 + 46.63^2)$$

$$\sum_{i=1}^n yi^2 = \mathbf{40602.22}$$

$$C.F. = \left(\frac{1}{n}\right) \cdot (\sum_{i=1}^n yi)^2 \quad (9)$$

$$C.F. = \frac{(48.06 + 48.04 + \dots + 46.05 + 46.74 + 46.63)^2}{18}$$

$$C.F. = \mathbf{40587.804}$$

$$ST = \sum_{i=1}^n yi^2 - C.F. \quad (10)$$

$$ST = 40602.22 - 40587.804 = 14.417$$



- **Varianza**

*Temperatura*

$$\sum_{k=1}^L \left(\frac{1}{n}\right) \cdot \left[\sum_{i=1}^n (AKi)\right]^2 \quad (11)$$

$$SA_1 = \frac{(48.06 + 48.04 + 48.62 + 48.01 + 48.77 + 48.55)^2}{6} = SA_1 = 14021.5$$

$$SA_2 = \frac{(47.85 + 47.90 + 47.32 + 47.75 + 47.95 + 47.98)^2}{6} = SA_2 = 13704.26$$

$$SA_3 = \frac{(46.30 + 46.24 + 45.98 + 46.05 + 46.74 + 46.63)^2}{6} = SA_3 = 12875.107$$

$$SA_{total} = 14021.5 + 13704.26 + 12875.11 - 40587.804$$

$$\mathbf{SA_{total} = 13.064}$$

*Enfriamiento*

$$SB_1 = \frac{(48.06 + 48.04 + 47.85 + 47.90 + 46.30 + 46.24)^2}{6} = SB_1 = 13479.612$$

$$SB_2 = \frac{(48.62 + 48.01 + 47.32 + 47.75 + 45.98 + 46.05)^2}{6} = SB_2 = 13417.119$$

$$SB_3 = \frac{(48.77 + 48.55 + 47.95 + 47.98 + 46.74 + 46.63)^2}{6} = SB_3 = 13691.837$$

$$SB_{total} = 13479.612 + 13417.119 + 13691.837 - 40587.804$$

$$\mathbf{SB_{total} = 0.765}$$

- **Varianza del factor**

*Temperatura*

$$VA = \frac{SA}{DF} \quad (12)$$

$$VA = \frac{13.064}{2} = \mathbf{6.532}$$

*Enfriamiento*

$$VB = \frac{0.765}{2} = \mathbf{0.382}$$

- **Error**

*Temperatura*

$$e_A = ST - (SA) \quad (13)$$

$$e_A = 14.417 - (13.064) = e_A = \mathbf{1.352}$$

*Enfriamiento*

$$e_B = 14.417 - (0.765) = e_B = \mathbf{13.652}$$

**- Error de la varianza**

*Temperatura*

$$Ve_A = \frac{Se_A}{DFe} \tag{14}$$

$$Ve_A = \frac{1.352}{15} = \mathbf{0.0902}$$

*Enfriamiento*

$$Ve_B = \frac{13.652}{15} = \mathbf{0.9101}$$

**- Prueba de Fisher**

*Temperatura*

$$VFA = \frac{v_A}{v_e} \tag{15}$$

$$VFA = \frac{6.532}{0.0902} = \mathbf{72.456}$$

*Enfriamiento*

$$VFB = \frac{0.382}{0.9101} = \mathbf{0.4199}$$

**- Porcentaje de influencia**

*Temperatura*

$$\%P = SA \cdot \frac{1}{ST} \cdot 100 \tag{16}$$

$$\%P = 13.064 \cdot \frac{1}{14.417} \cdot 100 = \mathbf{90.62\%}$$

*Enfriamiento*

$$\%P = 0.764 \cdot \frac{1}{14.417} \cdot 100 = \mathbf{5.30\%}$$

Como se puede observar la técnica estadística de análisis de varianza llamada ANOVA, dio como resultado que la temperatura es el factor más determinante para la dureza, con un porcentaje de influencia del 90.62% a comparación del método de enfriamiento que solo abarca un 5.30% y en la prueba de Fisher dio como resultado 72.456 para la temperatura de revenido y 0.419 para el método de enfriamiento. En la Tabla 18 se puede apreciar los resultados obtenidos por el análisis en ANOVA.

**Tabla 18.** Resultados obtenidos para los ensayos de dureza con la técnica estadística de análisis estadístico ANOVA

Variables	ST	S	V	e	Ve	Prueba de Fisher	Porcentaje de influencia
<b>Temperatura de revenido</b>	14.417	13.064	6.532	1.352	0.0902	72.456	90.62%
<b>Tipo de enfriamiento</b>	14.417	0.765	0.382	13.652	0.9101	0.419	5.30%

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

Donde:

**ST:** Suma de cuadrados totales

**S:** Varianza

**V:** Varianza del factor

**e:** Error

**Ve:** Error de varianza

Para confirmar que los datos obtenidos son reales, se decidió utilizar el software llamado “Minitab”, el cual es una herramienta especializada para cálculos estadísticos. En las Figuras 21 y 22 se detallan los resultados obtenidos en el software Minitab de temperatura de revenido vs dureza y tipo de enfriamiento vs dureza. Mientras en la Figura 23 se representa el intervalo de dureza que se generar en los diferentes tipos de enfriamientos.

*Temperatura de revenido vs dureza.*

### Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Temperatura de revenido	2	13.064	6.53217	72.46	0.000
Error	15	1.352	0.09015		
Total	17	14.417			

### Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.300255	90.62%	89.37%	86.49%

**Figura 21.** Resultados obtenidos en el software Minitab de temperatura de revenido vs dureza

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

Donde:

**GL:** Grados de libertad

**SC Ajust.:** Suma de cuadrados

**MC Ajust.:** Medias cuadráticas

**Valor F:** Prueba Fisher

**Valor p:** Niveles críticos

*Tipo de enfriamiento vs dureza.*

### Análisis de Varianza

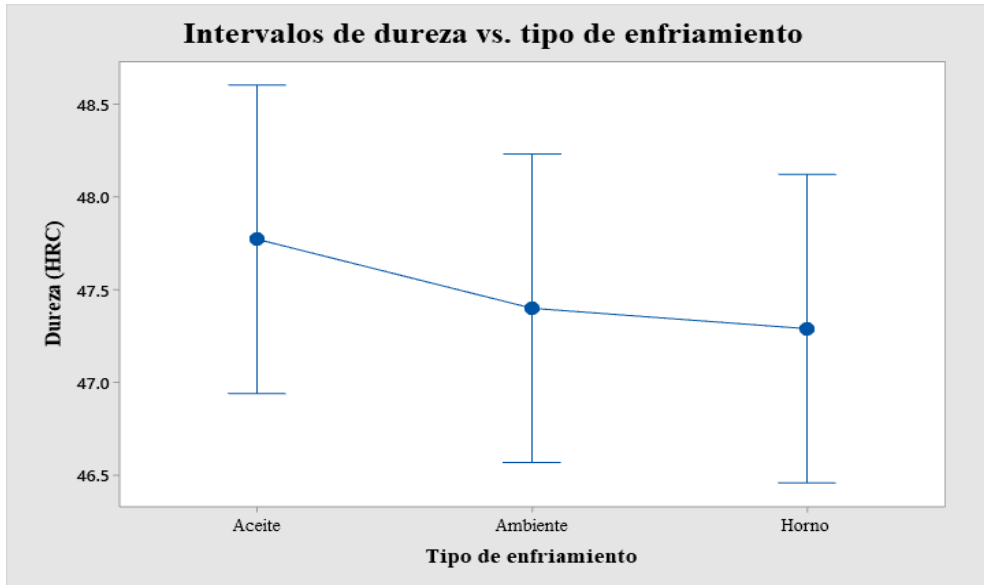
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tipo de enfriamiento	2	0.7645	0.3822	0.42	0.665
Error	15	13.6522	0.9101		
Total	17	14.4166			

### Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.954015	5.30%	0.00%	0.00%

**Figura 22.** Resultados obtenidos en el software Minitab de tipo de enfriamiento vs dureza

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango



**Figura 23.** Intervalos de dureza en los diferentes tipos de enfriamiento  
Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

### 3.4.2. Análisis estadístico de resultados de tracción

#### - Grados de libertad

*Grados de libertad total:*

$$DF_{total} = 18 - 1 = 17$$

*Grados de libertad para factores:*

$$DF = 2 - 1 = 1$$

*Grado de libertad para el error:*

$$DF_e = 17 - (1) \cdot (2) = 15$$

#### - Suma de cuadrados totales

$$\sum_{i=1}^n yi^2 = (1577^2 + 1576^2 + 1607^2 + \dots + 1483^2 + 1510^2 + 1502^2)$$

$$\sum_{i=1}^n yi^2 = 43378207$$

$$C.F. = \left(\frac{1}{n}\right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n yi\right)^2 = \frac{(1577 + 1576 + \dots + 1483 + 1510 + 1502)^2}{18}$$

$$C.F. = \mathbf{43341153.4}$$

$$ST = 43378207 - 43341153.4 = \mathbf{37053.611}$$

- **Varianza**

*Temperatura*

$$SA_1 = \frac{(1577 + 1576 + 1607 + 1575 + 1621 + 1618)^2}{6} = SA_1 = 15276912.67$$

$$SA_2 = \frac{(1565 + 1567 + 1540 + 1580 + 1571 + 1572)^2}{6} = SA_2 = 14711004.2$$

$$SA_3 = \frac{(1497 + 1491 + 1479 + 1483 + 1510 + 1502)^2}{6} = SA_3 = 13386240.7$$

$$SA_{total} = 15276912.67 + 14711004.2 + 13386240.7 - 43341153.4$$

$$SA_{total} = \mathbf{33004.111}$$

*Enfriamiento*

$$SB_1 = \frac{(1577 + 1576 + 1565 + 1567 + 1497 + 1491)^2}{6} = SB_1 = 14331421.5$$

$$SB_2 = \frac{(1607 + 1575 + 1540 + 1580 + 1479 + 1483)^2}{6} = SB_2 = 14303616$$

$$SB_3 = \frac{(1621 + 1618 + 1571 + 1572 + 1510 + 1502)^2}{6} = SB_3 = 14707872.7$$

$$SB_{total} = 14331421.5 + 14303616 + 14707872.7 - 43341153.4$$

$$SB_{total} = \mathbf{1756.778}$$

- **Varianza del factor**

*Temperatura*

$$VA = \frac{33004.11}{2} = \mathbf{16502.056}$$

*Enfriamiento*

$$VB = \frac{1756.778}{2} = \mathbf{878.389}$$

- **Error**

*Temperatura*

$$e_A = 37053.611 - (33004.111) = e_A = \mathbf{4049.5}$$

*Enfriamiento*

$$e_B = 37053.611 - (1756.778) = e_B = \mathbf{35296.833}$$

- **Error de la varianza**

*Temperatura*

$$Ve_A = \frac{4049.5}{15} = \mathbf{269.967}$$

*Enfriamiento*

$$Ve_B = \frac{35296.833}{15} = \mathbf{2353.122}$$

- **Prueba de Fisher**

*Temperatura*

$$VFA = \frac{16502.056}{269.967} = \mathbf{61.126}$$

*Enfriamiento*

$$VFB = \frac{878.389}{2353.122} = \mathbf{0.373}$$

- **Porcentaje de influencia**

*Temperatura*

$$\%P = 33004.11 \cdot \frac{1}{37053.611} \cdot 100 = \mathbf{89.07\%}$$

*Enfriamiento*

$$\%P = 1756.778 \cdot \frac{1}{37053.611} \cdot 100 = \mathbf{4.74\%}$$

En la Tabla 19 se observa los resultados obtenidos del ensayo a tracción mediante la técnica llamada ANOVA, el cual determinar que la temperatura es el factor más

importante para obtener mejor resistencia a la tracción, con un porcentaje de influencia de un 89.07% a comparación del tipo de enfriamiento que es un 4.74% y la prueba Fisher con un valor de 61.126 para la temperatura y 0.373 para el tipo de enfriamiento.

**Tabla 19.** Resultados obtenidos para los ensayos a tracción con la técnica estadística de análisis estadístico ANOVA

Variables	ST	S	V	e	Ve	Prueba de Fisher	Porcentaje de influencia
Temperatura de revenido	37053.61	33004.11	16502.06	4049.5	269.97	61.13	89.07%
Tipo de enfriamiento	37053.61	1756.78	878.39	35296.83	2353.12	0.373	4.74%

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

Como en el caso anterior se utiliza el programa de Minitab para verificar los resultados obtenidos, en la Figura 24 y 25 se observa los resultados de temperatura de revenido vs resistencia a la tracción y en la Figura 26 el tipo de enfriamiento vs resistencia a la tracción.

*Temperatura de revenido vs resistencia a la tracción.*

#### Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Temperatura de revenido	2	33004	16502.1	61.13	0.000
Error	15	4049	270.0		
Total	17	37054			

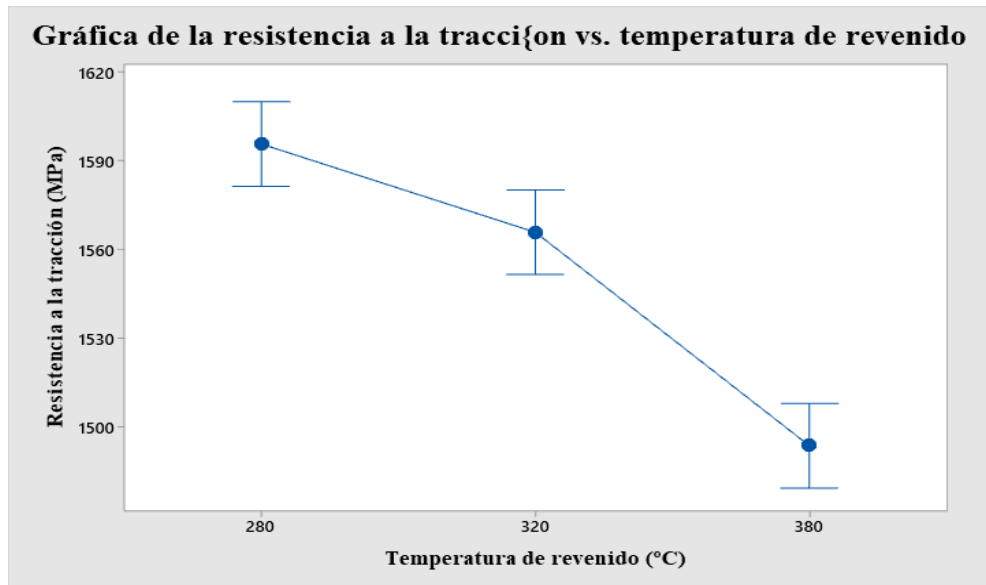
#### Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
16.4307	89.07%	87.61%	84.26%

**Figura 24.** Resultados obtenidos en el software Minitab de temperatura de revenido vs resistencia a la tracción

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango





**Figura 25.** Intervalos de la resistencia a la tracción vs temperatura de revenido obtenido en el software Minitab

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

*Tipo de enfriamiento vs resistencia a la tracción.*

### Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tipo de enfriamiento	2	1757	878.4	0.37	0.695
Error	15	35297	2353.1		
Total	17	37054			

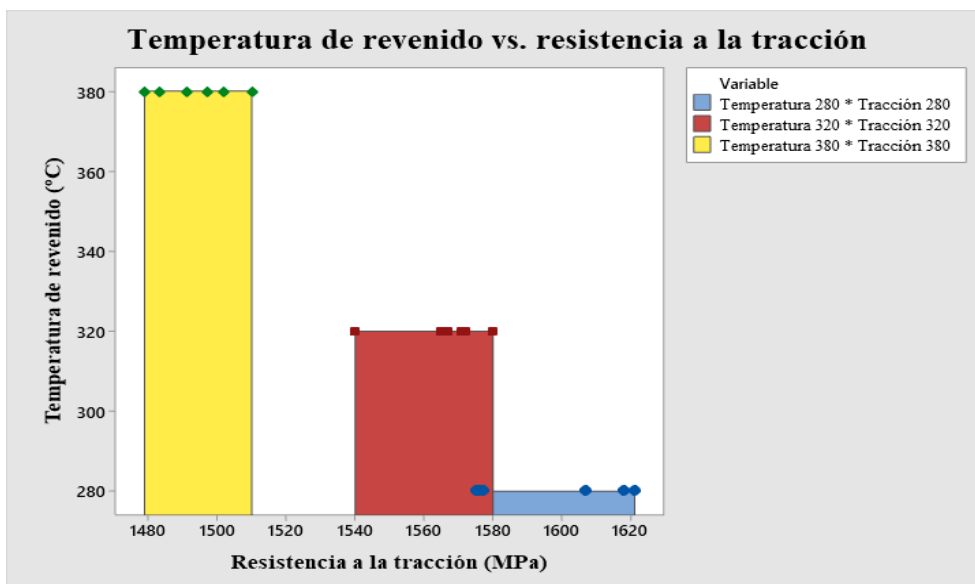
### Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
48.5090	4.74%	0.00%	0.00%

**Figura 26.** Resultados obtenidos en el software Minitab de tipo de enfriamiento vs resistencia a la tracción

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

En la Figura 27 se observa la relación entre temperatura de revenido vs resistencia a la tracción, dando como resultado que la resistencia a la tracción disminuye al momento de aumentar la temperatura como se demuestra en el gráfico, la resistencia a la tracción es menor con una temperatura de 380 °C a diferencia a la temperatura de 280 °C.



**Figura 27.** Diagrama Temperatura de revenido vs Resistencia a la tracción

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

### 3.5. Resultados de ensayo de dureza

#### 3.5.1. Resultados de ensayo de dureza en estado de suministro

Según aceros Böhler la dureza del acero AISI/SAE 4340 oscila entre 24 a 38 HRC en estado de suministro, es decir, bonificado. El ensayo de dureza tomados de las probetas de material base (MB-1 y MB-2) se refleja en la Tabla 20.

**Tabla 20.** Resultados de los ensayos de dureza al material base

Designación	M1	M2	M3	M4	M5
MB-1	33,2	33,3	33,6	33,2	33,3
MB-2	33,6	33,1	33,6	32,5	33,6

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

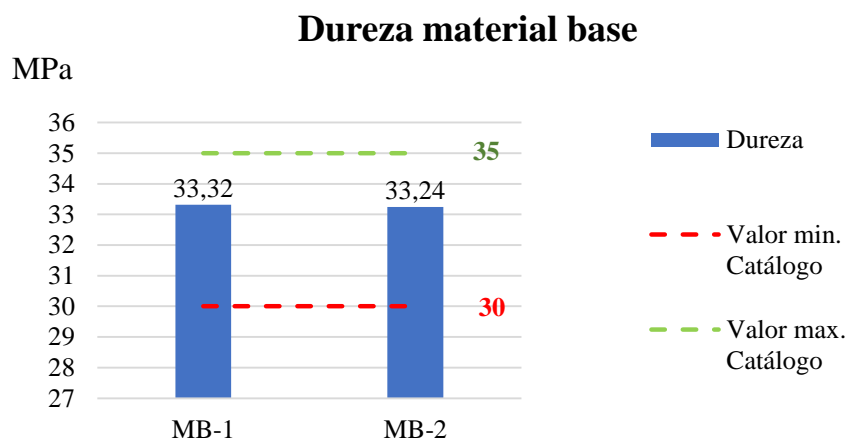
**Tabla 21.** Valores promedios de dureza, varianza y desviación estándar del material base

Designación	Media	Varianza	Desv. estándar
MB-1	33,32	0,0216	0,1469
MB-2	33,24	0,1896	0,4354

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

## Análisis

En la Tabla 21 se observa los valores promedio de la dureza, los cuales son de 33.32 para la probeta 1 y de 33.24 para la probeta 2. Estos valores se encuentran ubicados en el rango de 30 a 35 HRC especificado por el distribuidor, aceros Voestalpine [11], como se muestra en la Figura 28. En el caso de la desviación estándar mayor y la varianza es mayor en la probeta 2, lo que quiere decir que los valores la dureza fluctúan más en la probeta 2, (33.6, 33.1, 32.5), que en la probeta 1, (33.2, 33,3 y 33.6).



**Figura 28.** Valores promedio de dureza del material base

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

### 3.5.2. Resultados de ensayo de dureza después del temple a 860 °C

Los valores de dureza obtenidos en la Tabla 22 fueron tomados después de haber sometido a las probetas (T-1 y T-2) únicamente a temple de 860 °C.

**Tabla 22.** Valores de dureza después del proceso de temple a 860 °C

Designación	M1	M2	M3	M4	M5
T-1	49,8	49,5	49,8	49,9	49,9
T-2	49,7	49,1	49,3	49,6	49,7

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

**Tabla 23.** Valores promedio de dureza, varianza y desviación estándar después del proceso de temple a 860 °C

Designación	Media	Varianza	Desv. estándar
T-1	49,78	0,0216	0,1469
T-2	49,48	0,0576	0,24

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

### Análisis

En la Tabla 23 se observa el promedio de los valores de dureza, al igual que en el material base la probeta 2 posee mayor desviación estándar y varianza, debido a que los valores de dureza fluctúan más en dicha probeta, (49.7, 49.1, 49.3, 49.6), que en la probeta 1, (49.8, 49.5, 49.9).

La dureza esperada según el catálogo es de 54 a 56 HRC para un temple correspondiente a 860 °C [9]. Sin embargo, en los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana se obtiene un aproximado de 50 HRC debido a un temple sin precalentado y con un tiempo de estabilización de 45 min, lo que representa un error del 7,40%.

### 3.5.3. Resultados de ensayo de dureza después del tratamiento térmico

**Tabla 24.** Resultados de ensayos de dureza

Identificación de probeta	Tipo de enfriamiento	Temperatura de revenido	Dureza (HRC)
R280-W1	Ambiente	280	48,06
R280-W2	Ambiente	280	48,04
R280-H1	Horno	280	48,62
R280-H2	Horno	280	48,01
R280-O1	Aceite	280	48,77
R280-O2	Aceite	280	48,55
R320-W1	Ambiente	320	47,85
R320-W2	Ambiente	320	47,90
R320-H1	Horno	320	47,32
R320-H2	Horno	320	47,75
R320-O1	Aceite	320	47,95
R320-O2	Aceite	320	47,98

R380-W1	Ambiente	380	46,30
R380-W2	Ambiente	380	46,24
R380-H1	Horno	380	45,98
R380-H2	Horno	380	46,05
R380-O1	Aceite	380	46,74
R380-O2	Aceite	380	46,63

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

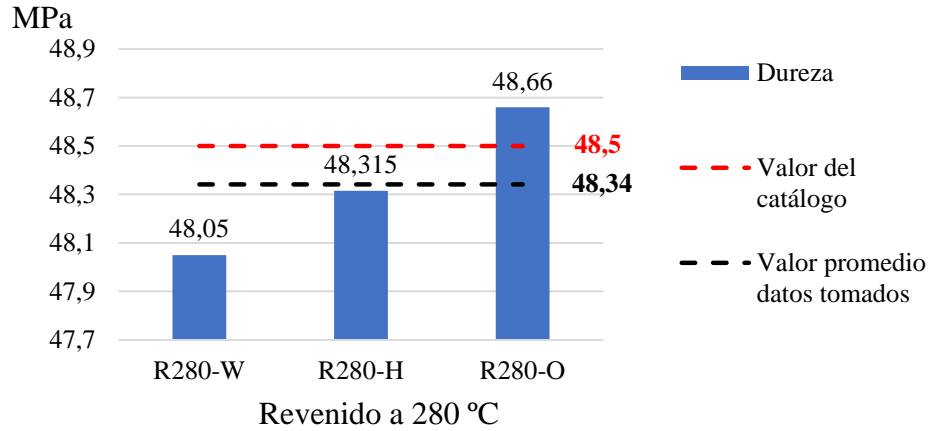
### **Análisis**

En la Tabla 24 se identifica los valores obtenidos en los ensayos de dureza con su respectiva identificación, después de haberse realizado el revenido a tres temperaturas diferentes, (280 °C, 320 °C y 380 °C), con tres diferentes métodos de enfriamiento, (aceite, ambiente y horno). En este caso se puede observar que a menor temperatura la dureza aumenta.

No se encuentra disponible un diagrama de dureza vs revenido con temperaturas por debajo de los 400 °C por parte del distribuidor Voestalpine High Performance Metals del Ecuador S.A [11]. Sin embargo, el proyecto tiene como referencia el catálogo de su homólogo Ivan Bohman C. A [10], dado que ambos poseen valores bastante similares a partir de dicha temperatura.

El catálogo [10], indica que a una temperatura de 280 °C se obtiene una dureza aproximada de 48.5 HRC, mientras en los ensayos realizados se obtuvo un valor promedio de 48.34 HRC. Los valores máximos y mínimos de dureza corresponden al enfriamiento en aceite (48,66 HRC) y ambiente (48,05 HRC) respectivamente, como se muestra en la Figura 29.

### Dureza a la temperatura de 280 °C

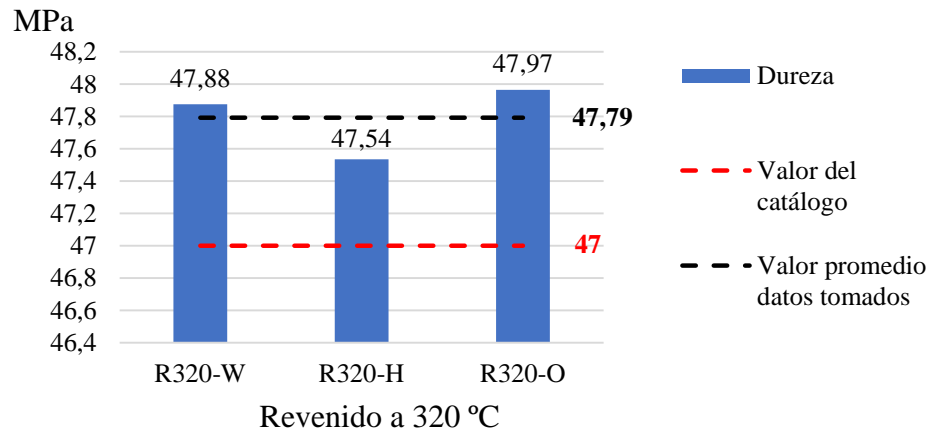


**Figura 29.** Valores de dureza a la temperatura de 280 °C

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

En la Figura 30 se observa los valores de dureza obtenidos después del revenido a 320 °C, con un promedio de 47.79 HRC, en correspondencia con el catálogo de referencia [10]. Además, se observa nuevamente que en general el método de enfriamiento en aceite se destaca con una mayor dureza.

### Dureza a la temperatura de 320 °C

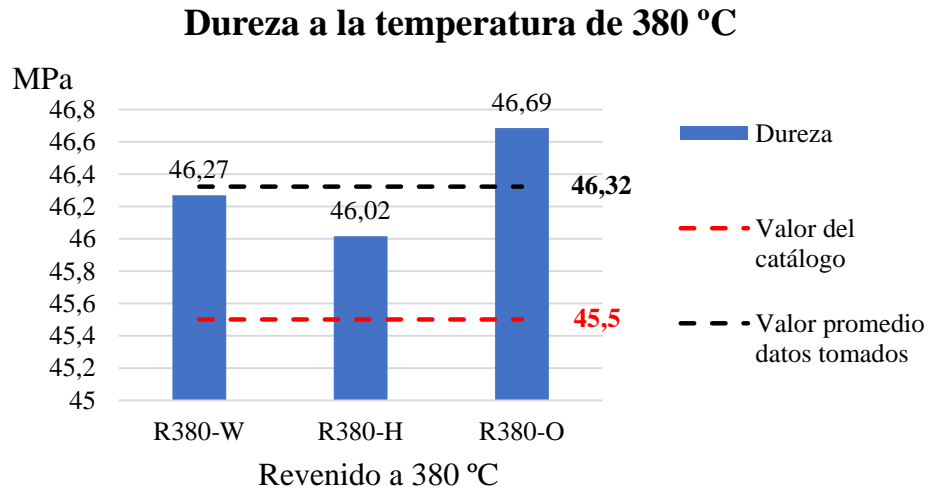


**Figura 30.** Valores de dureza a la temperatura de 320 °C

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

Y en la última temperatura de 380 °C se obtuvo un valor promedio de 46.32 HRC, el cual se encuentra en el rango establecido por el catálogo de referencia [10], (45,5 HRC) y de la misma manera la menor dureza se obtuvo con el enfriado al horno con

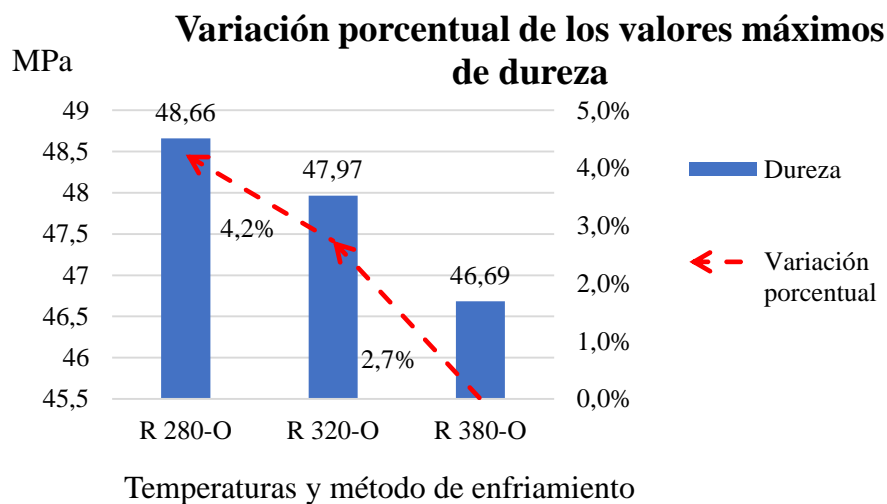
un valor de 45,02 HRC y la mayor se obtuvo siendo enfriado en aceite con una dureza de 46,69 HRC, como se muestra en la Figura 31.



**Figura 31.** Valores de dureza a la temperatura de 380 °C

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

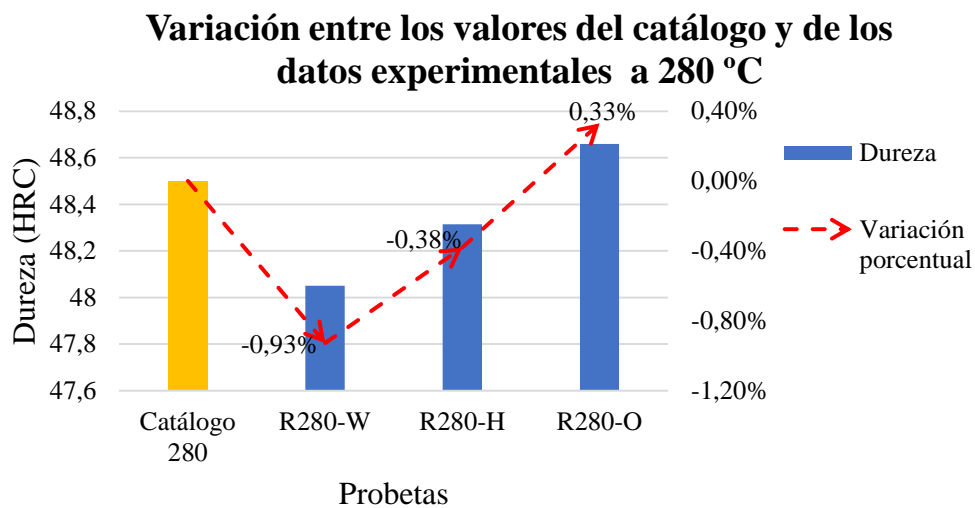
La Figura 32 presenta un resumen de los valores máximos de dureza correspondientes a cada temperatura (280 °C, 320 °C, 380 °C). El cual indica que existe un patrón, donde el método de enfriamiento en aceite es el que genera mayor dureza, además de situar a la temperatura de 280 °C como la mejor por un 4,2% con respecto a la temperatura de 380 °C.



**Figura 32.** Variación porcentual de los valores máximos de dureza

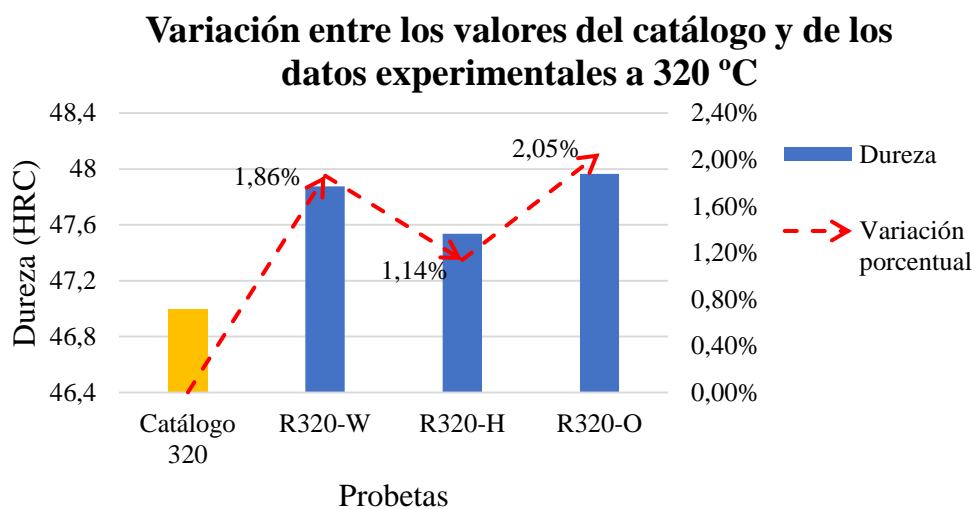
Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

En la Figura 33 se observa que existe una variación máxima del 0,33% entre las probetas revenidas a una temperatura de 280 °C y los valores dados por el catálogo de referencia [10]. A la temperatura de 320 °C se puede apreciar una máxima variación del 2,05% en las probetas enfriadas al horno con respecto a los datos del catálogo, como se muestra en la Figura 34. Finalmente, en la Figura 35 se visualiza que la variación máxima que se obtiene con el método de enfriamiento en aceite es de 2,60%.



**Figura 33.** Comparación de los valores del catálogo con los valores experimentales a la temperatura de revenido 280 °C

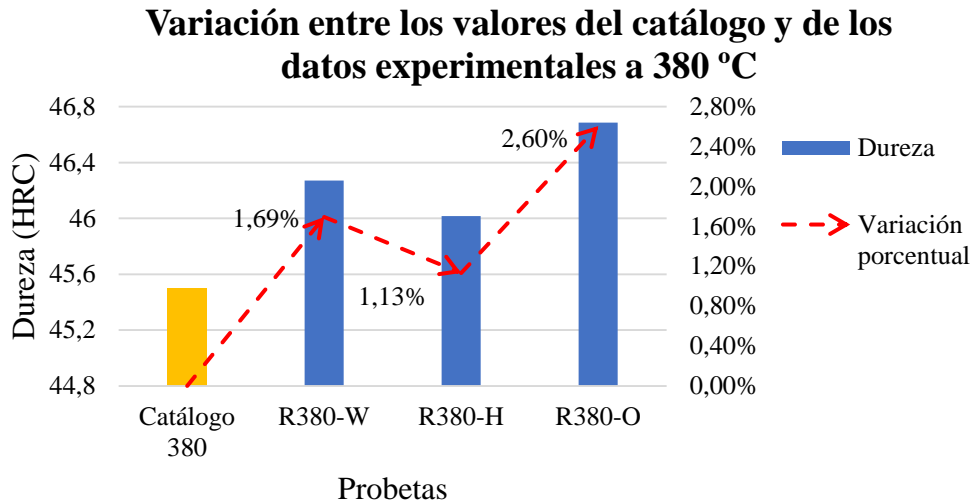
Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango



**Figura 34.** Comparación de los valores del catálogo con los valores experimentales a la temperatura de revenido 320 °C

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

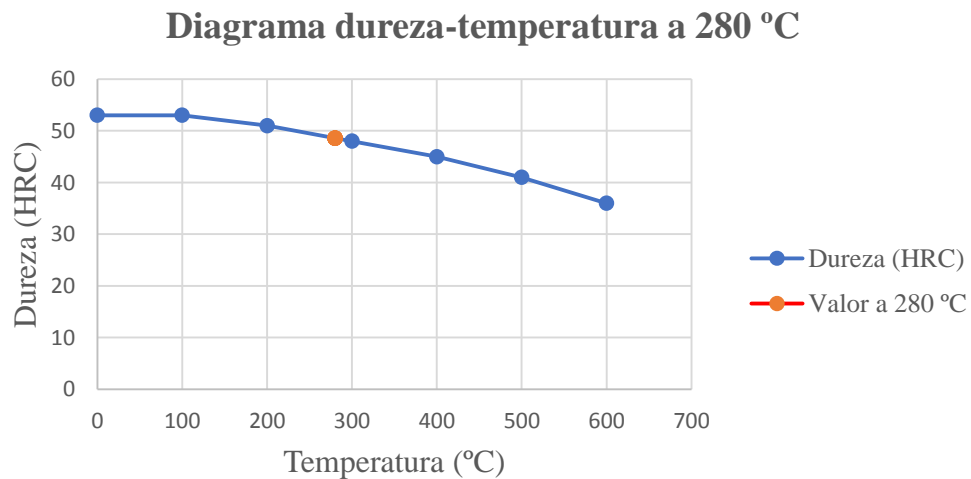




**Figura 35.** Comparación de los valores del catálogo con los valores experimentales a la temperatura de revenido 380 °C

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

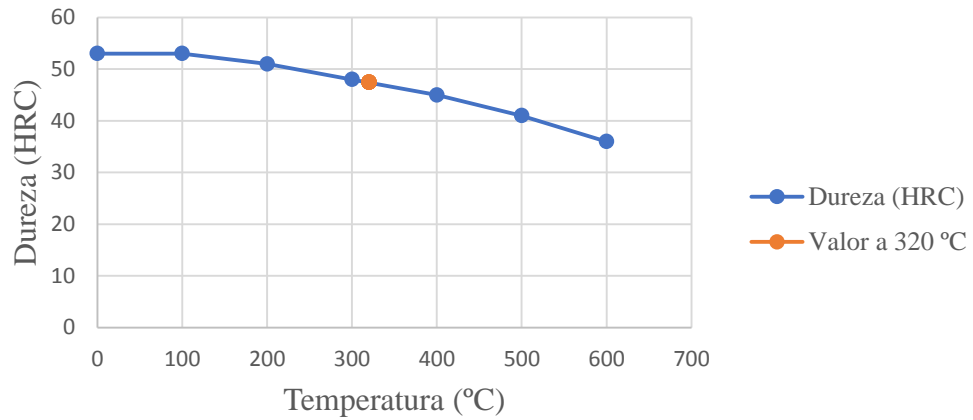
En base a los resultados obtenidos, las Figuras 36, 37 y 38 muestran una comparación de datos experimentales frente al catálogo de referencia, comprobando que la dureza después de un doble revenido (280 °C, 320 °C, 380 °C) cumple con las especificaciones del fabricante con rangos de variación aceptables.



**Figura 36.** Comparación de los valores del catálogo y los experimentales en el diagrama dureza-temperatura a 280 °C

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

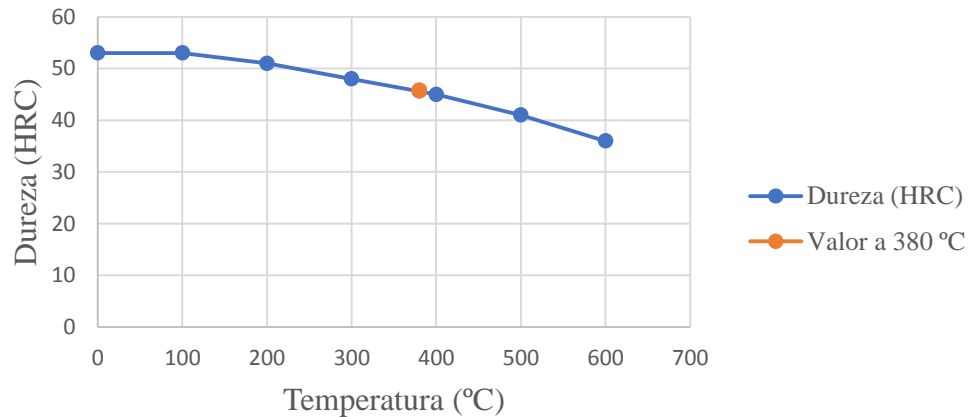
### Diagrama dureza-temperatura a 320 °C



**Figura 37.** Comparación de los valores del catálogo y los experimentales en el diagrama dureza-temperatura a 320 °C

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

### Diagrama dureza-temperatura a 380 °C



**Figura 38.** Comparación de los valores del catálogo y los experimentales en el diagrama dureza-temperatura a 380 °C

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

## 3.6. Resultados de ensayo de tracción

### 3.6.1. Resultados de ensayo de tracción en estado de suministro

El catálogo del distribuidor, aceros Böhrer, indica para el acero AISI/SAE 4340 una resistencia a la tracción de 1000 – 1180 MPa. En la Tabla 25 se muestra los datos correspondientes a ensayo de tracción en el material base.

**Tabla 25.** Valores de la resistencia a la tracción del material base

Designación	Diámetro mm	Ao mm <sup>2</sup>	Carga	Límite de	Carga	Resistencia a la
			de fluencia KN	fluencia (Sy) MPa	máxima KN	tracción (SUT) MPa
MB-1	12,57	124,10	123,7	835	138,6	1105
MB-2	12,6	123,70	125,5	832	139,1	1109

Elaborado por: Jorge Zapata &amp; Andrea Cholango

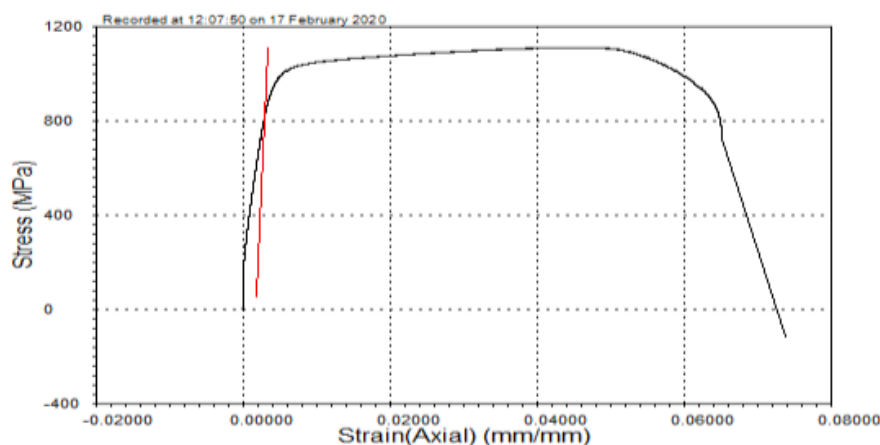
En la Tabla 26 se obtiene una resistencia a la tracción promedio de 1107 MPa, lo cual verifica que el material ensayado es acero AISI/SAE 4340.

**Tabla 26.** Valores recomendados por el distribuidor Aceros Voestalpine

	Media	Varianza	Desviación Estándar
<b>Carga de fluencia KN</b>	124,6	1,62	1,27
<b>Límite de fluencia (Sy) MPa</b>	833,5	4,5	2,12
<b>Carga máxima KN</b>	138,85	0,125	0,353
<b>Resistencia a la tracción (SUT) MPa</b>	1107	8	2,83

Elaborado por: Jorge Zapata &amp; Andrea Cholango

Por su parte en la Figura 39 se puede observar el diagrama esfuerzo deformación del material en estado de suministro obtenido a través del ensayo de tracción, en el cual se puede identificar la zona elástica y la zona plástica.

**Figura 39.** Probeta de material base después del ensayo a tracción

Elaborado por: Jorge Zapata &amp; Andrea Cholango

### 3.6.2. Resultados de ensayo de tracción después del tratamiento térmico

Los datos obtenidos a través del ensayo de tracción de las probetas revenidas a 280 °C, 320 °C, 380 °C con métodos de enfriamiento: al aceite, al horno y al ambiente se detallan en la Tabla 27, en la cual se observa la carga de fluencia, límite de fluencia y resistencia a la tracción. Teniendo en cuenta que los ensayos fueron realizados con una humedad relativa del 60% y a una temperatura ambiente de 20 °C aproximadamente. Así mismo, en la Tabla 28 se refleja el promedio de la resistencia a la tracción par cada temperatura y tipo de enfriamiento para un mejor manejo de datos.

**Tabla 27.** Resultados obtenidos de los ensayos a tracción

Designación	Diámetro mm	Ao mm <sup>2</sup>	Lf mm	Carga	Límite de	Carga máxima KN	Resistencia a la tracción (SUT) MPa
				de fluencia KN	fluencia (Sy) MPa		
R280-W1	12,56	123,90	57,3	159,7	1289	195,4	1577
R280-W2	12,55	123,70	57,4	158,96	1285	194,96	1576
R280-H1	12,69	126,48	58,2	165,2	1306	203,2	1607
R280-H2	12,6	124,69	57,8	162,4	1302	196,4	1575
R280-O1	12,67	126,08	57,4	165,1	1309	204,4	1621
R280-O2	12,65	125,68	57,4	164,77	1311	203,35	1618
R320-W1	12,29	118,63	56,2	156	1315	185,6	1565
R320-W2	12,67	126,08	56,5	166,4	1320	197,6	1567
R320-H1	12,38	120,37	56,9	155,9	1295	185,4	1540
R320-H2	12,33	119,40	56,7	155,1	1299	188,6	1580
R320-O1	12,69	126,48	58,5	164,2	1298	198,7	1571
R320-O2	12,59	124,49	56,8	162,9	1309	195,70	1572
R380-W1	12,29	118,63	56,0	152,9	1289	177,6	1497
R380-W2	12,51	122,92	57,0	155,7	1267	183,3	1491
R380-H1	12,68	126,28	58,1	159,6	1264	186,8	1479
R380-H2	12,63	125,28	57,1	158,99	1265	186,39	1483
R380-O1	12,52	123,11	57,9	160,6	1305	185,9	1510
R380-O2	12,55	123,70	57,9	161,06	1302	185,80	1502

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

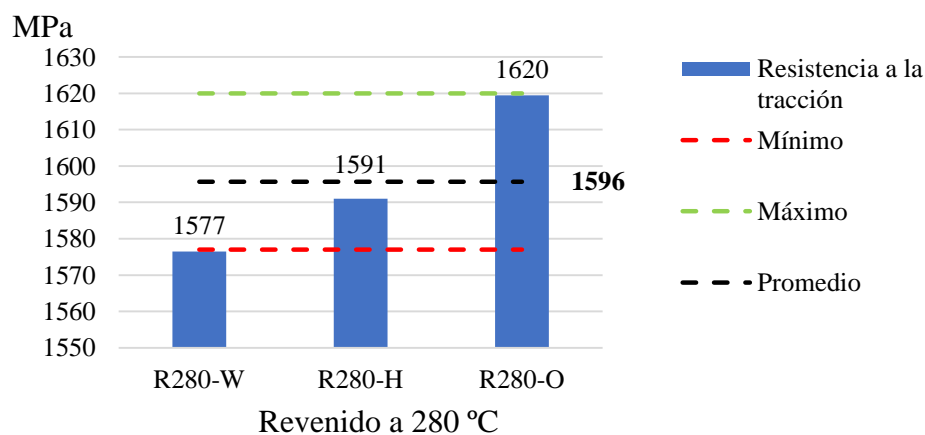
**Tabla 28.** Valores del ensayo a la resistencia a la tracción

Designación	Resistencia a la tracción (SUT) MPa
R280-W	1577
R280-H	1591
R280-O	1620
R320-W	1566
R320-H	1560
R320-O	1572
R380-W	1494
R380-H	1481
R380-O	1506

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

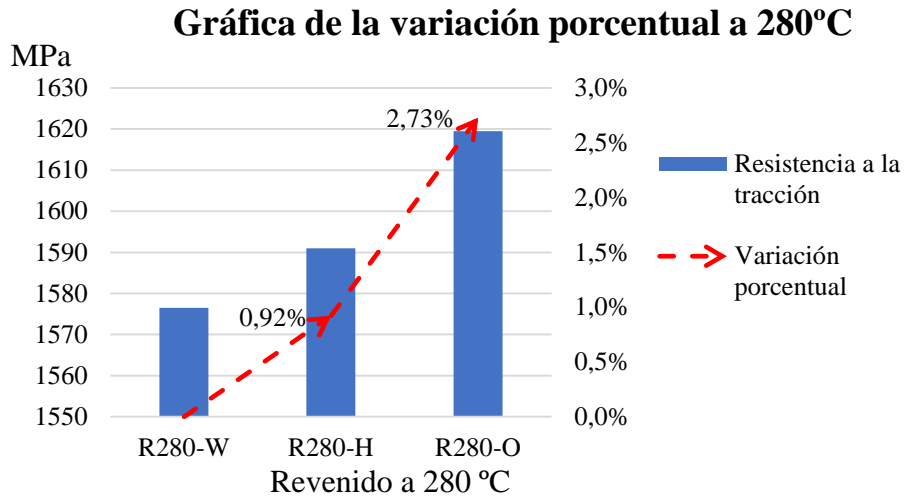
Conforme los datos mostrados en la Figura 40, las probetas revenidas a 280 °C, la resistencia a la tracción tiene un valor máximo de 1620 MPa y un valor mínimo de 1577 MPa correspondientes al enfriamiento en aceite y al ambiente respectivamente, con un promedio de 1591 MPa. Además, existe una variación del 2,73% entre estos valores pico, como se observa en la Figura 41.

**Gráfica de la resistencia a la tracción a 280 °C**



**Figura 40.** Diagrama de la resistencia a la tracción a temperatura de 280 °C enfriado al ambiente, horno y en aceite

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

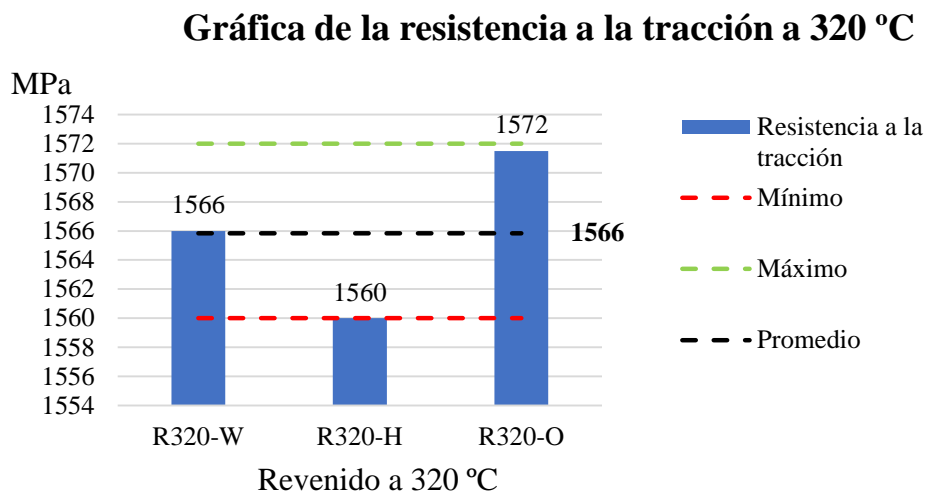


**Figura 41.** Variación porcentual de la resistencia a la tracción a la temperatura de 280 °C

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

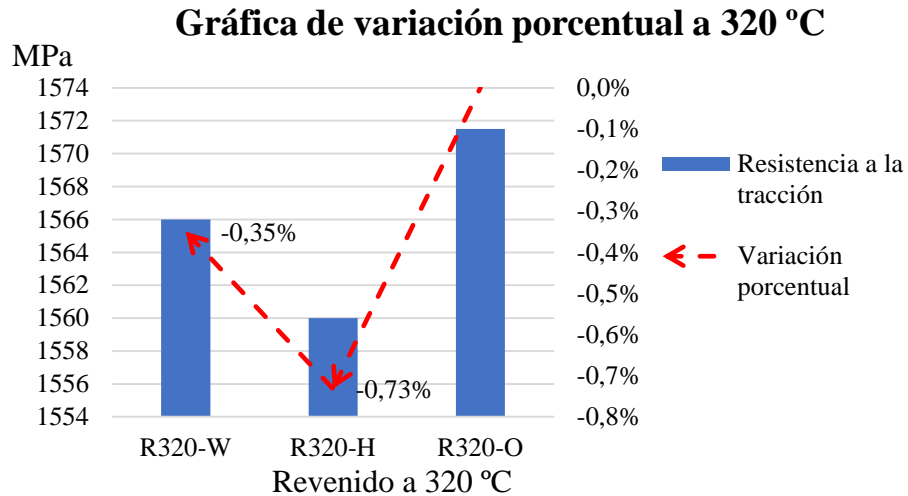
En cuanto a la resistencia a la tracción obtenida para las probetas revenidas a una temperatura de 320 °C se puede apreciar un promedio 1566 MPa.

Al igual que el material revenido a 280 °C, el enfriamiento en aceite se posiciona como el más óptimo con un valor de 1572 MPa, Figura 42. Además, se observa que dicho enfriamiento tiene una reducción del 0,73% en relación con el enfriamiento al horno, (Figura 43).



**Figura 42.** Diagrama de la resistencia a la tracción a temperatura de 320°C enfriado al ambiente, horno y en aceite

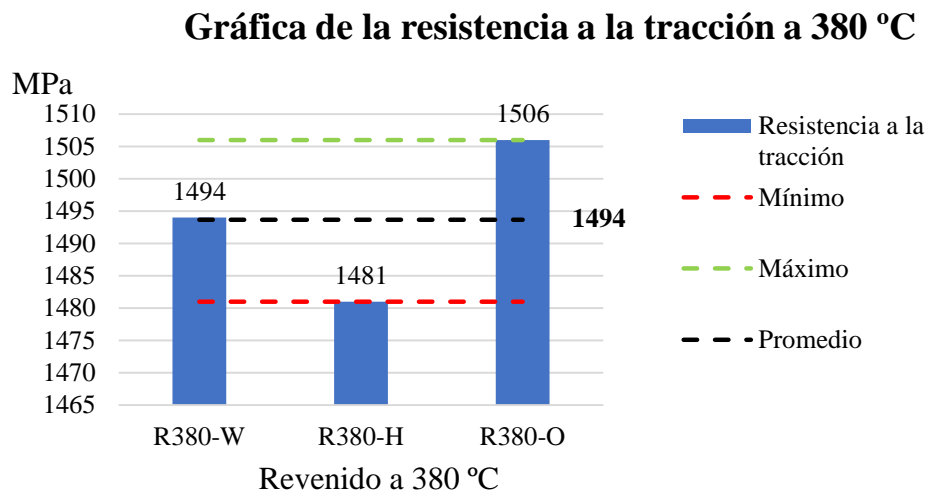
Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango



**Figura 43.** Variación porcentual de la resistencia a la tracción a la temperatura de 320 °C

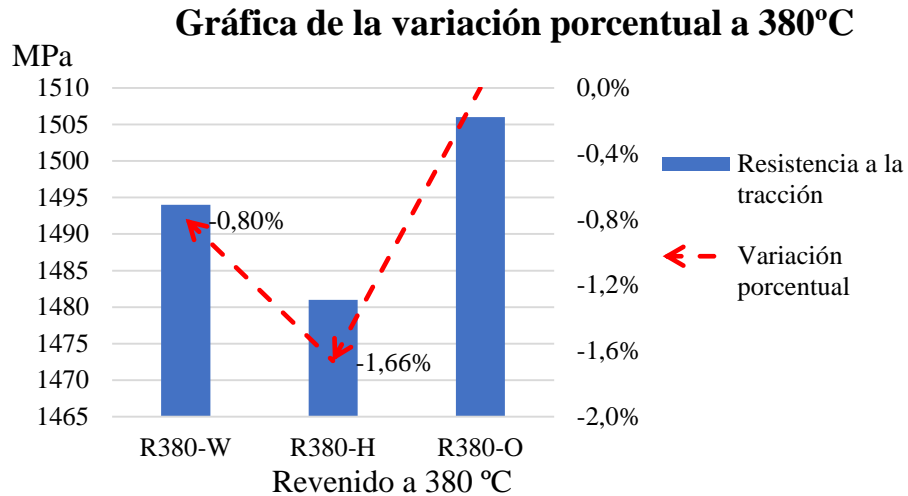
Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

En el caso del material revenido 380 °C presenta un promedio de 1494 Mpa en su resistencia a la tracción, además se observa que un enfriamiento rápido (en aceite) mejora esta propiedad mecánica dando como resultado un valor de 1506 MPa, Figura 44, con una diferencia del 1,66% con respecto al valor mínimo correspondiente al enfriamiento horno, Figura 45.



**Figura 44.** Diagrama de la resistencia a la tracción a temperatura de 380°C enfriado al ambiente, horno y en aceite

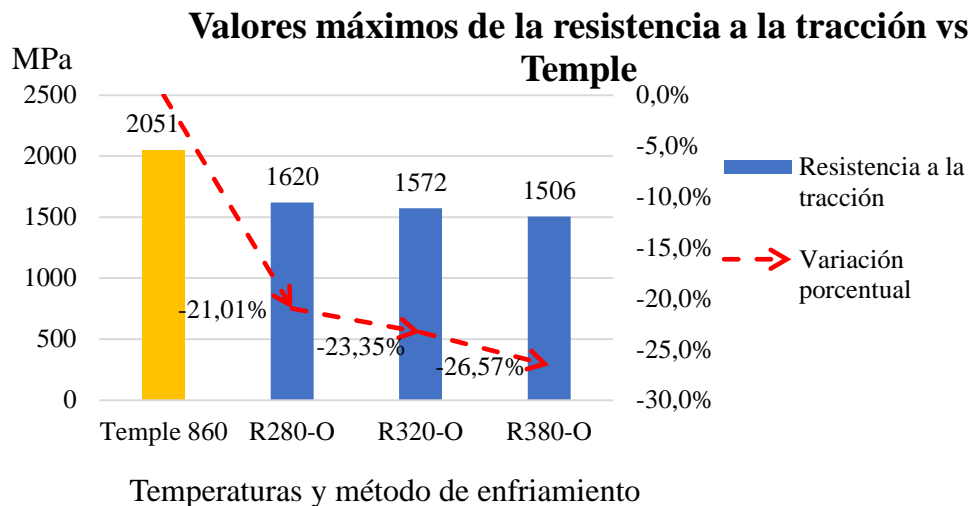
Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango



**Figura 45.** Variación porcentual de la resistencia a la tracción a la temperatura de 380 °C

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

En la Figura 46 muestra un resumen de las probetas con mayor resistencia a la tracción para cada temperatura de revenido. En la cual se verifica, que el revenido implica la reducción en la resistencia del material del 21,01% para la temperatura de 280 °C, seguido 23,35% para la temperatura de 320 °C y 26,57% para 380 °C con respecto a la resistencia obtenida con un temple a 860 °C.



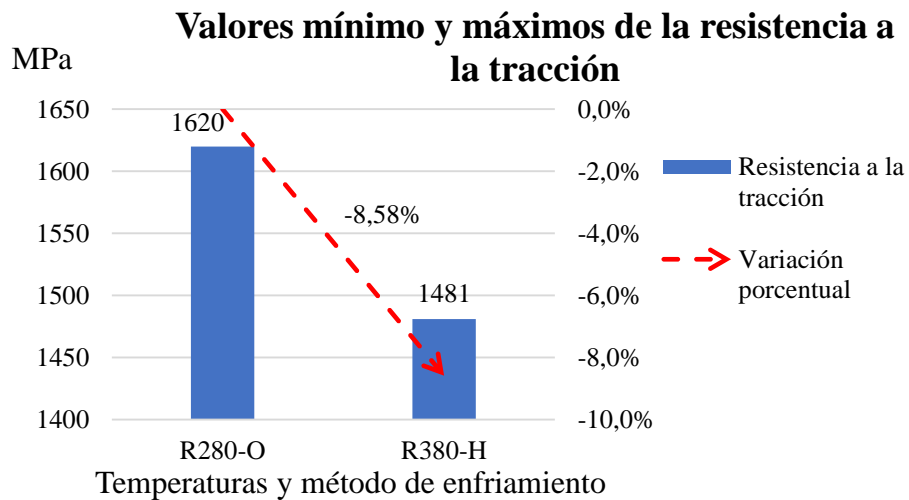
**Figura 46.** Diagrama comparativo de la resistencia a la tracción de los valores máximos con el valor de temple obtenidos en el ensayo a tracción

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

Con una comparación entre valores extremos de la resistencia a la tracción del acero AISI/SAE 4340 revenido a 280, 320 y 380 °C con diferentes tipos de enfriamiento,



(Figura 47), es posible afirmar que la temperatura adecuada para obtener la mayor resistencia a la tracción es de 280 °C con un enfriamiento rápido, no obstante, la probeta revenida a 380 °C presenta una disminución en dicha propiedad mecánica del 8,58%.



**Figura 47.** Valores mínimos y máximos obtenidos en el ensayo a tracción

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

Con los datos recopilados de la Tabla 27 por medio del ensayo de tracción, se calcula la deformación unitaria, módulo de Young, porcentaje de reducción de área, elongación y se lo presenta en la Tabla 29, así como sus promedios en la Tabla 30 para interpretar el comportamiento del acero AISI/SAE 4340.

**Tabla 29.** Cálculos realizados a partir de los datos obtenidos en el ensayo de tracción

<b>Elongación (50 mm) %</b>	<b><math>\Delta L</math> mm</b>	<b>Deformación unitaria</b>	<b>Módulo de Young MPa</b>	<b>Af mm<sup>2</sup></b>	<b>Reducción del área %</b>
14,6%	7,28	0,1456	8853	108,15	12,7%
14,9%	7,43	0,1486	8647	107,70	12,9%
16,4%	8,21	0,1642	7954	108,64	14,1%
15,6%	7,8	0,156	8346	107,86	13,5%
14,8%	7,42	0,1484	8821	109,79	12,9%
14,8%	7,39	0,1478	8870	109,50	12,9%
12,4%	6,21	0,1242	10588	105,52	11,0%
12,9%	6,45	0,129	10233	111,67	11,4%
13,8%	6,91	0,1382	9370	105,75	12,1%
13,3%	6,66	0,1332	9752	105,37	11,8%
16,9%	8,46	0,1692	7671	108,18	14,5%
13,6%	6,82	0,1364	9597	109,55	12,0%
12,0%	6,02	0,1204	10706	105,88	10,7%
13,9%	6,97	0,1394	9089	107,88	12,2%
16,1%	8,07	0,1614	7831	108,73	13,9%
14,2%	7,12	0,1424	8883	109,67	12,5%
15,8%	7,89	0,1578	8270	106,33	13,6%
15,9%	7,93	0,1586	8209	106,77	13,7%

Elaborado por: Jorge Zapata &amp; Andrea Cholango

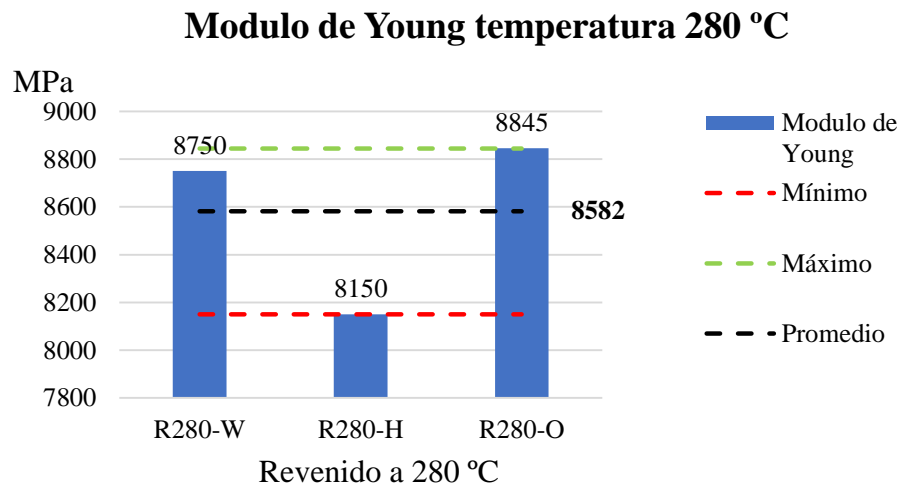
**Tabla 30.** Promedios de la elongación, módulo de Young y reducción de área

<b>Designación</b>	<b>Elongación (50 mm) %</b>	<b>Módulo de Young MPa</b>	<b>Reducción del área %</b>
R280-W	14,7%	8750	12,8%
R280-H	16,0%	8150	13,8%
R280-O	14,8%	8845	12,9%
R320-W	12,7%	10410	11,2%
R320-H	13,6%	9561	11,9%
R320-O	15,3%	8634	13,2%
R380-W	13,0%	9897	11,5%
R380-H	15,2%	8357	13,2%
R380-O	15,8%	8240	13,7%

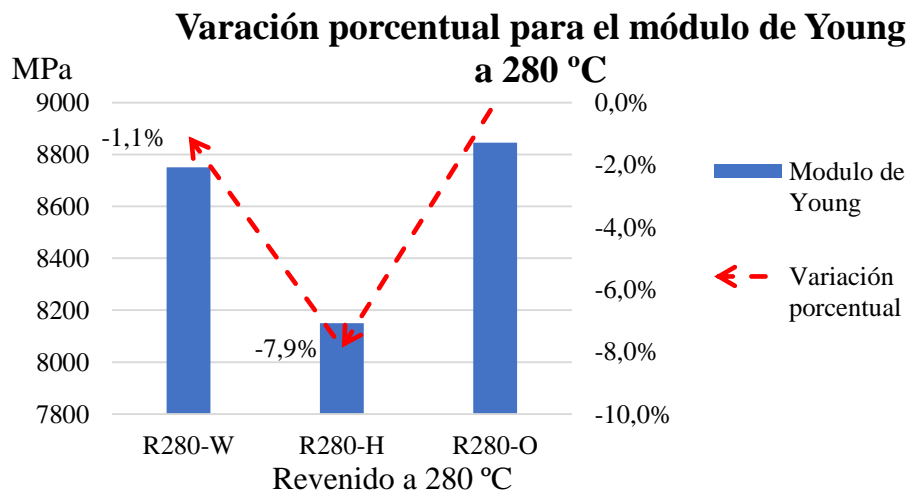
Elaborado por: Jorge Zapata &amp; Andrea Cholango

Para analizar la zona elástica del material ensayado es indispensable tomar en cuenta el módulo de Young.

En la Figura 48 se indica un promedio de 8582 MPa para esta propiedad en el material revenido a 280 °C. Al mismo tiempo se observa que la probeta enfriada en aceite, presenta el máximo valor correspondiente al módulo Young con 8845 MPa, con una rigidez 7,9% mayor con respecto a la probeta enfriada al horno como se muestra en la Figura 49, lo cual afirma que soporta más esfuerzo antes de deformarse.



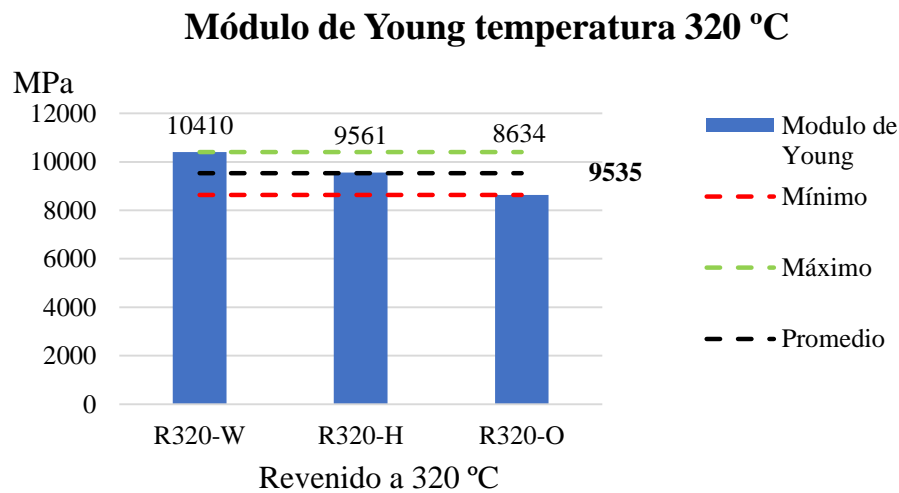
**Figura 48.** Diagrama del módulo de Young a la temperatura de revenido de 280 °C  
Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango



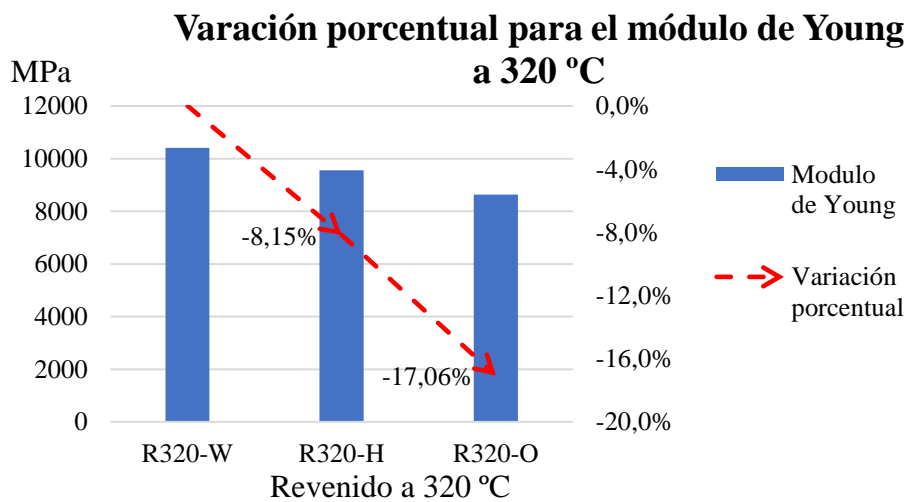
**Figura 49.** Diagrama de la variación porcentual para el módulo de Young a la temperatura de 280 °C  
Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

En el resultado derivado del material revenido a 320 °C, indica un valor promedio de 9535 MPa en su módulo de elasticidad obtenido de los tres métodos de enfriamiento, conforme a la Figura 50.

Existe una diferencia del 17.06% en la rigidez del material entre las probetas que fueron sometidas a un enfriamiento rápido y las probetas que fueron enfriadas al ambiente, Figura 51, siendo esta última la de menor rigidez.

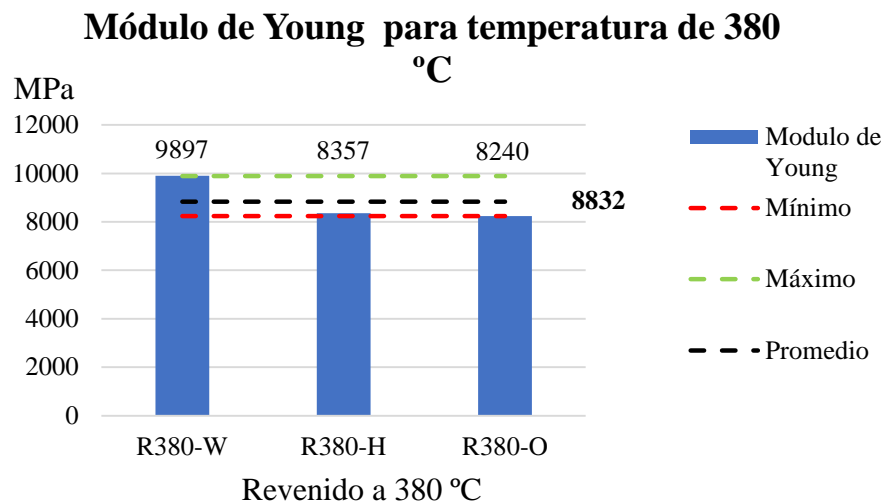


**Figura 50.** Diagrama del módulo de Young a la temperatura de revenido de 320 °C  
Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

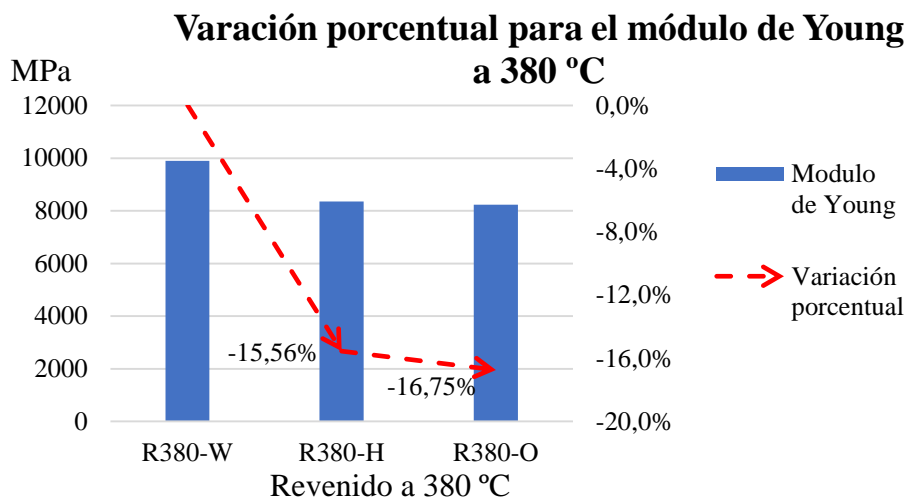


**Figura 51.** Diagrama de la variación porcentual para el módulo de Young a la temperatura de 320 °C  
Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

En la Figura 52, se advierte un promedio de 8832 MPa en el módulo de elasticidad para el material revenido a 380 °C, teniendo un máximo en el enfriamiento al ambiente con 9897 MPa. Por otra parte, se evidencia que el enfriamiento en aceite es tan solo 1.19% menor al enfriamiento en el horno, como se muestra en la Figura 53.



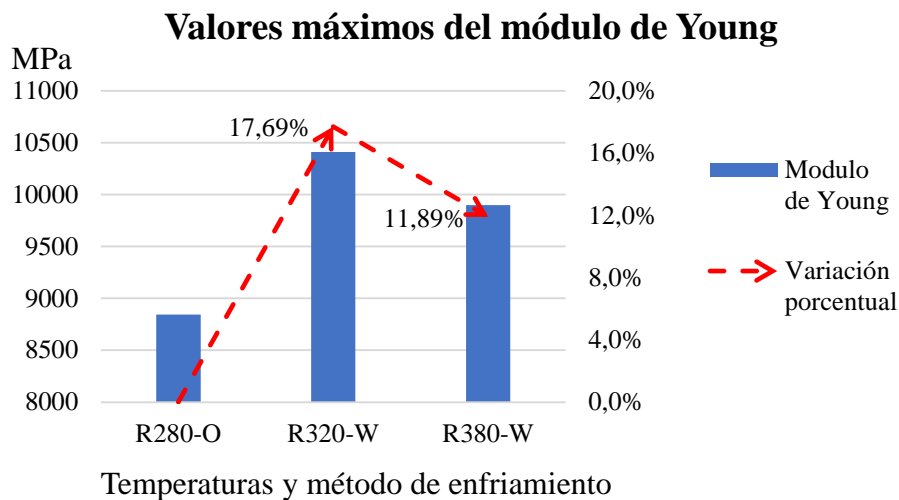
**Figura 52.** Diagrama del módulo de Young a la temperatura de revenido de 380 °C  
Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango



**Figura 53.** Diagrama de la variación porcentual para el módulo de Young a la temperatura de 380 °C  
Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

Dentro de este marco se toma los valores más altos de módulo de Young para el material a revenido 280, 320 y 380 °C.

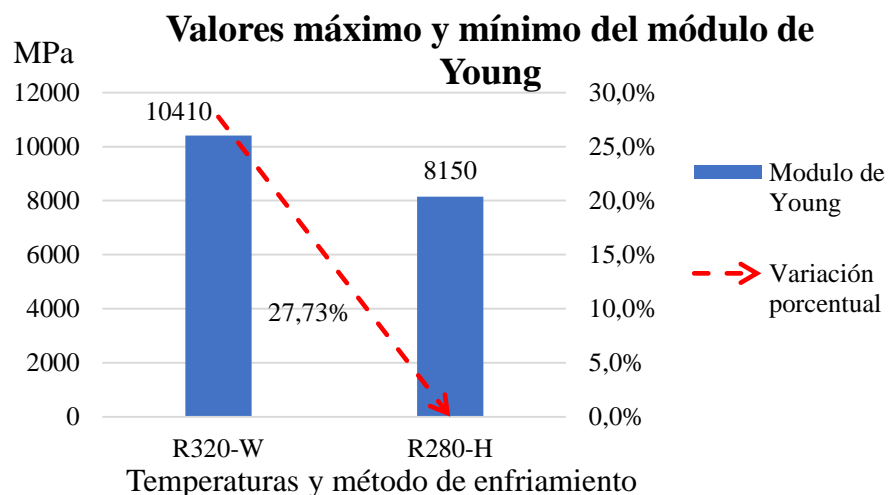
Si bien es cierto el revenido a 320 °C y enfriado al ambiente se destaca como el más rígido, el revenido a 380 °C exhibe una disminución del 5,8% como se observa en la Figura 54.



**Figura 54.** Variación porcentual máxima para cada temperatura de revenido

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

La Figura 55 indica que las probetas revenidas a 280 °C con un enfriamiento en el horno se advierten como las menos rígidas del todo el material ensayado, puesto que presenta un decremento de 27,73% con respecto al material revenido a 320 °C enfriado al ambiente, siendo este, el mejor puntuado en cuanto a módulo de elasticidad.



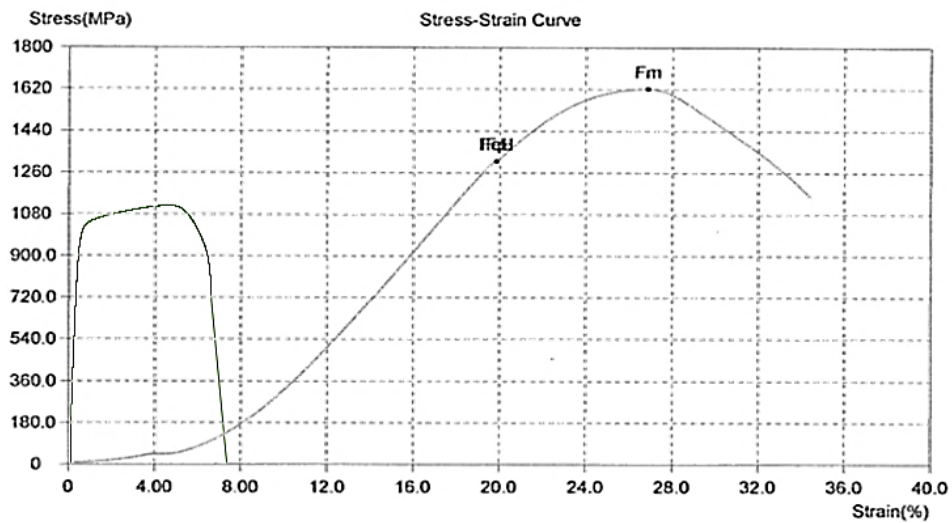
**Figura 55.** Diagrama de valores máximo y mínimos del módulo de Young

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

Dentro de la zona plástica, intrínsecamente se encuentra el análisis de ductilidad que se define como una propiedad que posee el material para deformarse y formar hilos antes de su ruptura. Se evalúa de manera indirecta a través del porcentaje de elongación [55].

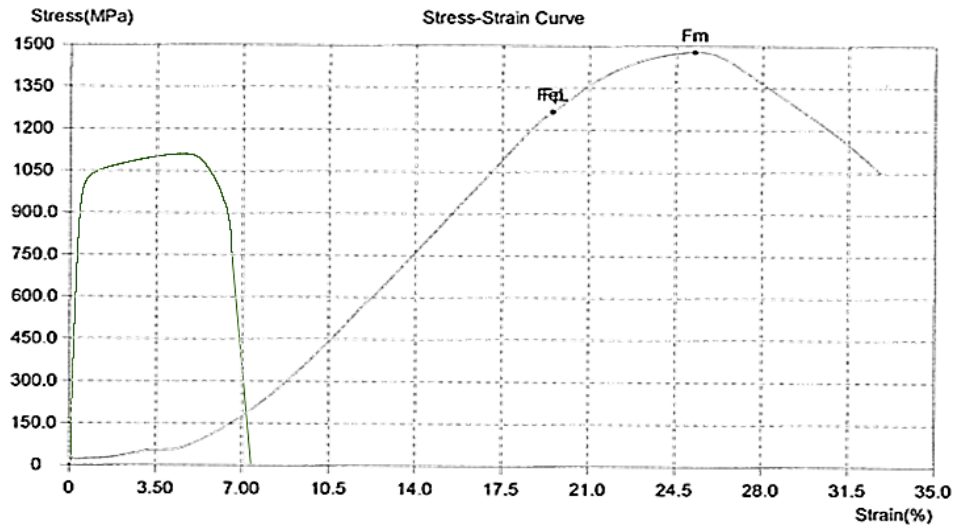
Adicionalmente autores relacionan a la composición química de la martensita o austenita retenida con la ductilidad [56].

Para objetivo visual, las Figuras 56 y 57 comparan el diagrama esfuerzo deformación del material base con las probetas revenidas a 280-O y 380-O, los cuales se definieron como valor máximo y mínimo correspondientes a resistencia a la tracción.



**Figura 56.** Diagrama esfuerzo deformación material base vs revenido 280-O

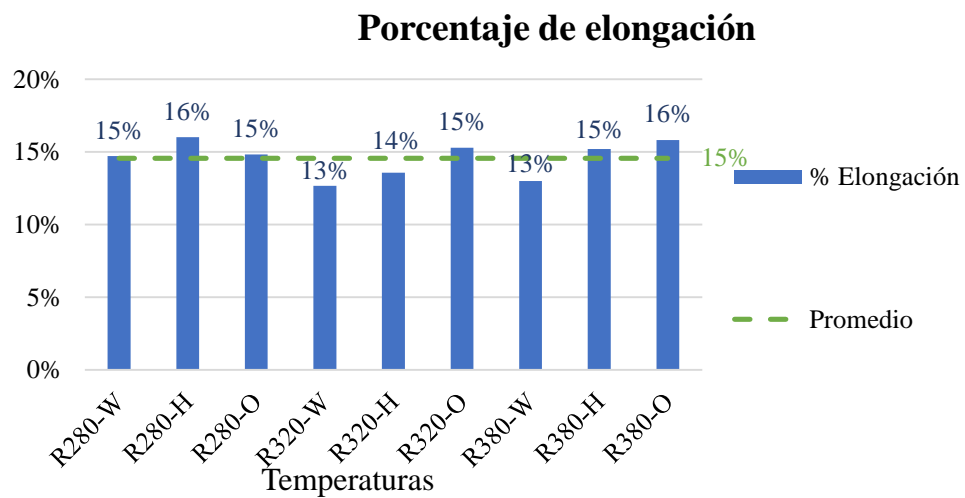
Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango



**Figura 57.** Diagrama esfuerzo deformación material base vs revenido 380-H

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

En la Figura 58 se muestra el porcentaje de elongación para cada temperatura de revenido y método de enfriamiento, la cual indica que no existen diferencias sustanciales en cuanto a la ductilidad del material, teniendo un promedio entre ellas de 15 %.



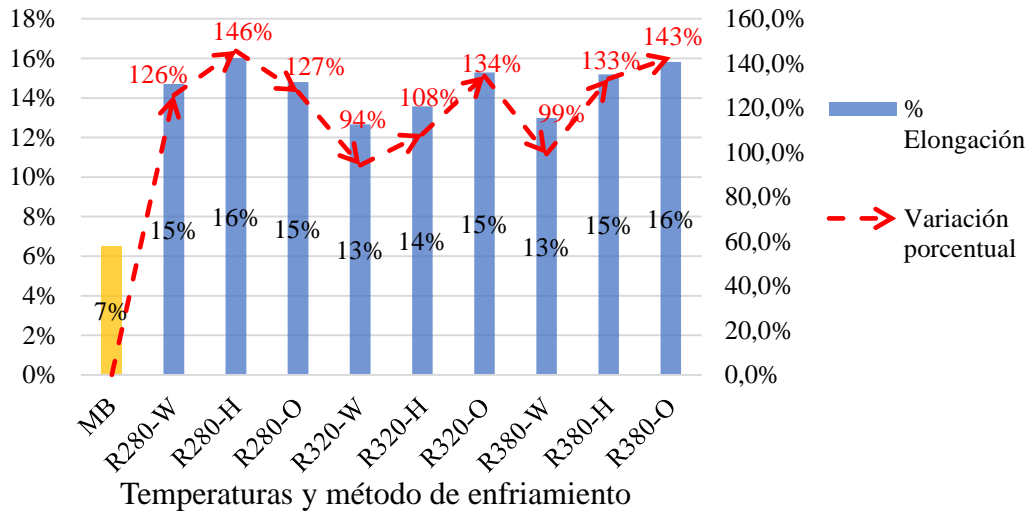
**Figura 58.** Valores promedios del porcentaje de elongación

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

La Figura 59 se evidencia un incremento mayor al 100 % en la ductilidad para todas las probetas luego del revenido con respecto al material en estado de suministro.



### Variación del porcentaje de elongación en probetas revenidas y material base

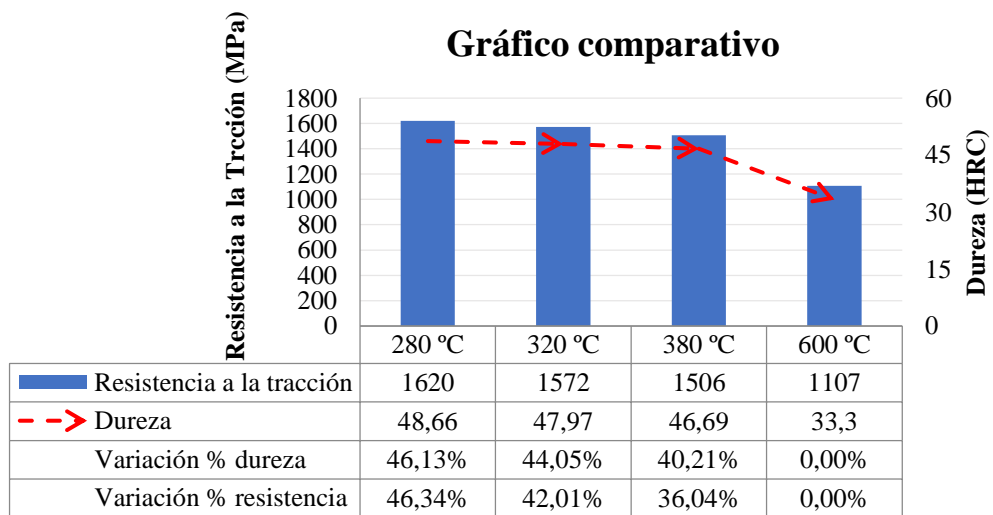


**Figura 59.** Porcentaje de elongación en probetas revenidas y material base

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

### Análisis general

Fue posible incrementar la dureza hasta en un 46,13 % y la resistencia a la tracción en un 46,34% con una temperatura de 280 °C con respecto al estado de suministro, Figura 60, lo que significa una ventaja para las aplicaciones que requieren soportar grandes esfuerzos.



**Figura 60.** Gráfico comparativo de dureza y resistencia a la tracción para 280 °C, 320 °C, 380 °C

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

Además, con las temperaturas seleccionadas 280, 320 y 380 °C las propiedades mecánicas del material concuerdan con lo especificado por el catálogo, sin embargo,

para este propósito fue necesario realizar un doble revenido con un tiempo de estabilización de 2 horas por cada revenido. Por lo que, el desconocimiento del correcto procedimiento de un tratamiento térmico genera un material con diferentes propiedades a lo requerido.

## CAPÍTULO IV ANÁLISIS DE COSTOS

### 4.1. Costos

El costo estimado del proyecto es desglosado en la Tabla 31, el cual se subdivide en costo de material, fabricación de probetas, ensayos y tratamientos térmicos, lo que genera un costo total de 1.881,76\$ dólares.

**Tabla 31.** Costos del proyecto

		Cant.	Valor unitario	Valor total
<b>Material</b>	Acero AISI/SAE 4340/ V155 20.00 mm	4.50 m	\$ 3,68	\$ 71,76
	Fabricación de probetas	20	\$ 15,00	\$ 300,00
<b>Tratamiento térmico</b>	Temple y revenido	18	\$ 20,00	\$ 360,00
	Ensayo de espectrometría	1	\$ 50,00	\$ 50,00
<b>Ensayos</b>	Ensayo de dureza	20	\$ 25,00	\$ 500,00
	Ensayo de tracción	20	\$ 30,00	\$ 600,00
<b>TOTAL</b>				<b>\$ 1.881,76</b>

Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

Dado que el proyecto es un análisis de propiedades del material y tratamiento térmico, con dimensiones bajo la norma ASTM y aplicación estadística para conocer el número de probetas por cada variable (temperaturas y métodos de enfriamiento), el costo es elevado.

No obstante, un análisis microestructural podría incurrir en un valor adicional de 100\$ dólares por cada probeta, ascendiendo el costo total del proyecto a 3881,76\$ dólares.

## CONCLUSIONES

- Por medio de los ensayos realizados al acero AISI/SAE 4340 tratado térmicamente por temple a 860 °C y revenido a 280 °C, 320 °C y 380 °C, se determinó que el proceso más adecuado en cuanto a valores de resistencia a la tracción y dureza fue el correspondiente a la temperatura de 280 °C con 1620 MPa y con una dureza de 48,43 HRC, enfriado posterior al revenido en aceite. Adicionalmente se demostró a través del análisis de varianza multifactorial ANOVA que el método de enfriamiento en el revenido provoca una influencia mínima del 5,30% en la dureza y 4,74% en la resistencia mecánica del material.
- En las empresas Voestalpine High Performance Metals del Ecuador S.A., Dipac e Ivan Bohman C. A, recomiendan tratar al acero AISI/SAE 4340 térmicamente por temple (830 °C a 860 °C) y revenido (550 °C a 600 °C) con el objetivo de obtener una dureza en temple de 54 a 56 HRC y en 30 a 35 HRC estado bonificado. Se concluye que para llegar a estos valores mencionados es necesario realizar un doble revenido.

- Las probetas utilizadas en los ensayos fueron diseñadas bajo las especificaciones de la norma ASTM E8 para ensayos destructivos que contempla dimensiones de la probeta, velocidad de prueba y humedad relativa. Además, se consideró la norma ASTM E180-14 para ensayos de dureza, evitando errores de lectura.
- El acero AISI/SAE 4340 suministrado por Voestalpine High Performance Metals del Ecuador S.A, uno de los principales distribuidores en el Ecuador, según un ensayo de composición química contiene: 0.322% de C, 0.117 % de Si, 0.767% de Mn, 1.58 % de Cr, 0.208% de Mo, 1.47 % de Ni, validando en material según la norma ASTM 29.
- En la comparación catálogo y resultados experimentales se evidencia un error del 7,40% en la dureza respecto al temple de 860 °C debido a un temple sin precalentamiento. Sin embargo, al decidir realizar un doble revenido con 2 horas de tiempo de estabilización para cada revenido a las temperaturas de 280°C, 320°C y 380°C, se logra reducir el error al 0,32%, 0,98% y 1,5% para cada temperatura; en el caso de la resistencia a la tracción el catálogo de referencia indica 1602 MPa para 280 °C, 1525 MPa para 320 °C y 1462 MPa para 380°C, que representa un error del 1,12%, 3,08% y 3,00%. Esto indica que el tiempo de revenido es un factor fundamental para obtener las propiedades deseadas.

## **RECOMENDACIONES**

- Se recomienda validar las propiedades mecánicas y químicas del material base, (acero AISI/SAE 4340), mediante el certificado de calidad suministrado por el distribuidor y los ensayos respectivos para comprobar que se trata del mismo acero antes de darle alguna aplicación.
- Se debe tener en cuenta utilizar normas como ASTM E8M-04 para el diseño de las probetas y un buen proceso de mecanizado para obtener la menor discrepancia dimensional, además se debe evitar el sobrecalentamiento debido a que puede generar concentradores de esfuerzos en el material y cambios micro-estructurales indeseados.
- De acuerdo a la investigación realizada se recomienda un análisis previo en la aplicación del material, determinando cargas y esfuerzos actuantes en la pieza

para poder elegir la temperatura de revenido correcta, dado que a menor temperatura aumenta las propiedades mecánicas.

- Para realizar los tratamientos térmicos es recomendable considerar la literatura técnica y catálogos del distribuidor para garantizar una correcta transformación micro - estructural que permita obtener las propiedades mecánicas deseadas.

## REFERENCIAS

- [1] B. Pérez and J. Valiente, *Elementos fijos*. México D.F., México: Editex, 2016.
- [2] W. Smith and J. Hashemi, *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*, Cuarta. México D.F, México: Mc Graw-Hill, 2014.
- [3] L. López Vázquez, *Aceros y fundiciones*, Primera. Alicante, España: Club Universitario, 2015.
- [4] A. Valencia Rey, “Comparación de deformaciones unitarias y desplazamientos utilizando una armadura,” Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Piedecuesta, 2015.
- [5] R. Hibbeler, *Mecánica de materiales*. México D.F., México: Pearson, 2017.
- [6] F. Castro and B. Schulz, “La formación de austenita en aceros de bajo carbono,” *Univ. Santiago Chile*, vol. 34, no. 22, pp. 19–23, 2018.
- [7] S. Ferraris and C. Danón, “Desdoblamiento de la transformación martensítica en un acero F82H de activación neutrónica reducida,” *Rev. Mater.*, vol. 23, no.

- 2, 2018.
- [8] N. Guzmán, “Análisis de la resistencia a la tensión y dureza de un acero SAE 1045 sometido a diferentes tratamientos térmicos: temple, criogenia y revenido a 400 °C,” Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2017.
- [9] Aceros Böhler del Ecuador, “Acero AISI/SAE 4340,” Quito, Ecuador.
- [10] C. Ivan Bohman, “Aceros bonificados para maquinaria,” 2018. [Online]. Available:<https://www.ivanbohman.com.ec/wp-content/uploads/2016/02/705.pdf>.
- [11] Aceros Böhler del Ecuador, “Catálogo de aceros,” Quito, Ecuador.
- [12] D. Andrade Montalvo, “Dimensionamiento y construcción de un horno para baño de sales para el taller de procesos de producción mecánica,” Escuela Politécnica Nacional, 2010.
- [13] F. Quispe Ochoa, “Diseño de un horno de tratamiento térmico hasta 700°C para turbinas pelton de la central hidroeléctrica San Gabán II,” Universidad Nacional del Altiplano, 2018.
- [14] L. Peralta Mahecha and J. Moreno Gonzalez, “Influencia de los tratamientos térmicos a temperaturas intercríticas IHT y tratamiento criogénicos y un posterior revenido de 15, 30 y 45 minutos a la resistencia a la fatiga de un acero AISI/SAE 4140,” Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2017.
- [15] F. Martínez Pérez, “Procedimiento para la adecuada selección de aceros y de su tecnología de tratamientos térmicos,” *Rev. Ciencias Técnicas Agropecu.*, vol. 25, no. 2, pp. 58–64, 2016.
- [16] A. Travieso, Y. Mesen, and J. Bartels, “Tratamiento térmico: Temple y Revenido,” *Inst. Tecnología Costa Rica*, pp. 1–11, 2015.
- [17] E. García Cueto, “Influencia de la temperatura del revenido en un acero aleado,” Universidad de Cantabria, 2016.
- [18] L. Vilorio Rivas and L. Bohórquez Petro, “Efecto de la temperatura de revenido en la microestructura y en las propiedades mecánicas del acero AISI 4140,” Universidad de Córdoba, 2016.
- [19] D. Domínguez Alonso and A. Gómez Moreno, “Caracterización microestructural de un acero de bajo carbono y contenido de manganeso cercanos al 1.5%, templado a temperaturas intercríticas y revenido,” Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2017.
- [20] S. Moreno Sánchez and U. Español Marroquin, “Comparación

- microestructural de los aceros 1020, 1045 y 8620 templados desde temperaturas intercríticas y revenido,” Universidad Fisrital Francisco José de Caldas, 2018.
- [21] F. Díaz del Castillo, “Ingeniería de materiales,” Universidad nacional Autónoma de México, 2016.
- [22] J. Fidalgo Sánchez, M. Fernández Pérez, and N. Fernández Fernández, *Tecnología industrial II*. Madrid, España: Paraninfo S.A., 2016.
- [23] T. Pérez Latorre, “Estudio microestructural del acero pulvimetalúrgico Bohler K390 microclean a diferentes secuencias de enfriamiento,” Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2019.
- [24] V. Blázquez Martínez, V. Lorenzo, and B. Del Río López, *Ingeniería y ciencia de los materiales metálicos*. Madrid, España: Dextra Editorial S.L., 2014.
- [25] F. Beer, R. Johnston, J. DeWolf, and D. Mazurek, *Mecánica de materiales*, Séptima. México D.F., México: Mc Graw-Hill, 2017.
- [26] V. Díaz de León, V. González, J. Rosete, and N. Díaz de León, *Mecánica de materiales: Teoría y aplicación*, Primera. México D.F., México: Patria educación, 2018.
- [27] J. Garavito, “Protocolo para ensayos de tensión,” *Esc. Colomb. Ing.*, 2012.
- [28] A. Mafla Botina, “Metodologías de análisis y evaluación del comportamiento de edificios en concretos reforzados dentro del rango inelástico,” Universidad Nacional de Colombia, 2018.
- [29] O. Pacheco, “Propiedades de los materiales,” 2015. [Online]. Available: [https://www.academia.edu/9958164/Clase\\_2\\_PROPIEDADESMECANICAS](https://www.academia.edu/9958164/Clase_2_PROPIEDADESMECANICAS).
- [30] E. Cordova Quispe and R. Valverde Farfán, “Modelamiento y evaluación comparativa de la resistencia característica de la albañilería y módulo de elasticidad de unidades tipo blocker de la ciudad de cusco, modificado con acero y polipropileno frente a albañilería tradicional, 2019,” Universidad Andina de Cusco, 2019.
- [31] H. Valencia Ramírez, “Análisis de los materiales utilizados en la construcción de un cigueñal de un vehículo chino marca Saic Wuling modelo mini van pasajeros 1000 cc mediante ensayos destructivos y no destructivos,” Universidad Tecnológica Equinoccial, 2016.
- [32] P. Ñauta Uzhca and C. Riera Morocho, “Caracterización de propiedades mecánicas de los aceros para construcción de maquinaria que se comercializan



- en el Ecuador,” Universidad Politécnica Salesiana, 2015.
- [33] J. Alarcón Gutiérrez and J. Olarte Flórez, “Esfuerzo máximo de tensión paralela a la fibra y determinación del módulo de elasticidad de la guadua angustifolia del municipio de Pitalito-Huila,” Universidad Surcolombiana, 2019.
- [34] ASTM, “ASTM international,” 2018. [Online]. Available: <https://www.astm.org>.
- [35] J. Ferreira Neto, “Evaluación del efecto de los tratamientos térmicos de temple, revenido y criogenización en la microestructura y dureza del acero Hadfield,” Universidad de Moa, 2019.
- [36] L. Contreras Bravo, L. Vargas Tamayo, and R. Ríos Linares, *Procesos de fabricación en polímeros y cerámicos*, Primera. Bogotá, Colombia: Ediciones de la U, 2018.
- [37] E. Saavedra Castillo, “Estudio de las características para valorar mangueras automotrices D1 y D2 mediante norma SAE 20R4,” Universidad Internacional del Ecuador, 2016.
- [38] F. Guzhñay Miranda, “Estudio del comportamiento del acero A36 mediante ensayos de tracción para determinar fallas en elementos estructurales, mediante las normas ASTM E-8,” Universidad Técnica de Ambato, 2012.
- [39] H. Patiño and B. Rosero, “Tratamiento termico de temple, influencia del medio de enfriamiento,” *J. Cienc. e Ing.*, vol. 8, no. October, p. 7, 2016.
- [40] Nabertherm, “Hornos de cámara calentamiento eléctrico.” [Online]. Available: [https://www.nabertherm.com/produkte/details/es/additivefertigung\\_kammeroeffen](https://www.nabertherm.com/produkte/details/es/additivefertigung_kammeroeffen).
- [41] Nabertherm, “Hornos de cámara de convección forzada <675 litros calentados eléctricamente.” [Online]. Available: [https://www.nabertherm.com/produkte/details/en/thermprozesstechnik\\_1-umlufthofen](https://www.nabertherm.com/produkte/details/en/thermprozesstechnik_1-umlufthofen).
- [42] CYPMA, “ASTM E415 método de prueba estándar para el análisis de carbono y de baja aleación de acero, por espectrometría de emisión atómica,” 2016. [Online]. Available: <http://cypma.mx/quimico/astm-e415/>.
- [43] N. ASTM, “El análisis de carbono y de baja aleación de acero-Spark por espectrometría de emisión atómica,” 2016.
- [44] O. Instruments, “FOUNDRY-MASTER Xpert.” [Online]. Available:

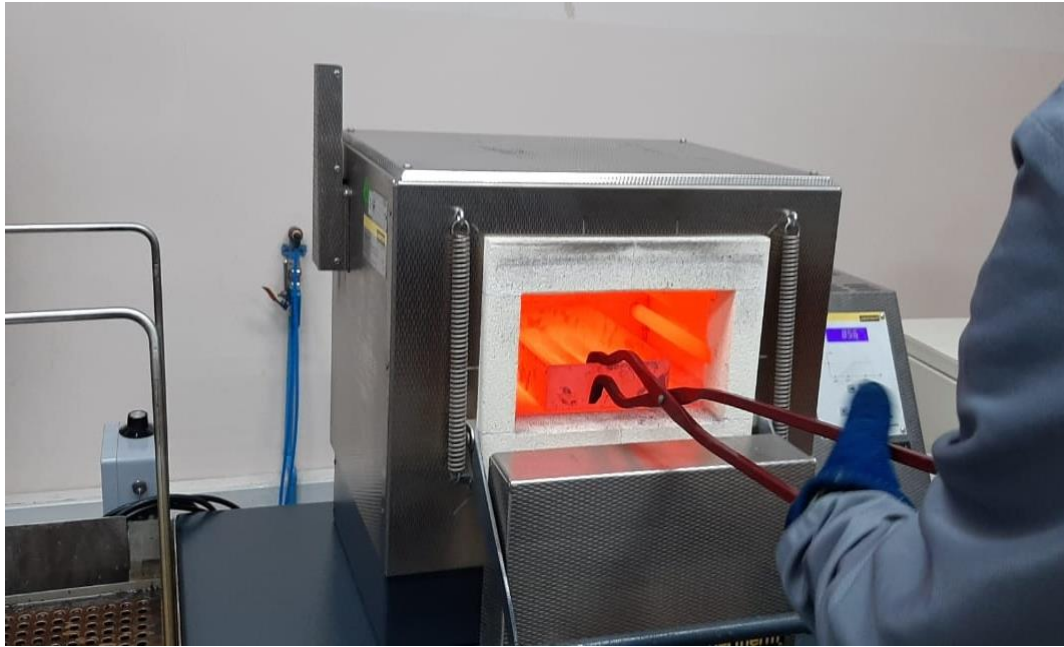
<http://www.brownstone-asiatech.com/admin/uploads/products/attachments/146/foundry-master-xpert-brochure-english.pdf>.

- [45] N. ASTM, “Standard test method for Brinell Hardness of Metallic Materials,” 2012. [Online]. Available: <https://www.astm.org/Standards/E10.htm>.
- [46] Calright Instruments, “900-365 Digital Rockwell Hardness Tester.” [Online]. Available: <https://calright.com/wp-content/uploads/2018/03/3030.pdf>.
- [47] A. Cabrera Rendon and M. Koller Granja, “Comportamiento a tracción del acero estructural, según norma NTC 2289, de diferentes fabricantes de acero de refuerzo en el mercado,” Universidad Católica de Colombia, 2017.
- [48] ASTM, “Métodos de prueba estándar para pruebas de tensión de materiales metálicos.”
- [49] A. Montalvo Paspuezan, “Máquina universal de ensayos destructivos: sistema de control y supervisión de datos,” Universidad Técnica del Norte, 2018.
- [50] TESTRESOURCES, “Model 314R & 315R Universal Test Machines.” [Online]. Available: <https://www.testresources.net/media/pdf/archive/315R.pdf>.
- [51] I. E. C. LTDA, “Laboratorio Nacional de Metrología Certificado de Calibración.” Quito, Ecuador, 2019.
- [52] A. Ruiz Magaña, “Dominios magnéticos en piezas de acero AISI 4340 soldado con electrodos revestidos,” Instituto Superior Minero Metalúrgico, 2015.
- [53] J. García Robledo, “Instrumentación de un péndulo para observar los cambios de tenacidad de: un acero 4140 templado y revenido, fragilización por hidrógeno en un acero 1018 y fragilización por radiación en un acero inoxidable 316,” Instituto Politécnico Nacional, 2011.
- [54] Aceros Boehler del Ecuador S. A, “Manual tratamientos térmicos de aceros especiales,” 2019.
- [55] G. Alegre Gago, “Estudio de la influencia en la resistencia y ductilidad de las fibras de carbono utilizadas como reforzamiento de vigas de concreto armado.”
- [56] R. Rodríguez Baracaldo, J. M. Arroyo Osorio, and Y. Parra Rodríguez, “Influencia del proceso de revenido en el comportamiento mecánico de un acero de fase dual de uso industrial automotriz.”



## **ANEXOS**

**Anexo 1.** Proceso de Temple al acero AISI/SAE 4340



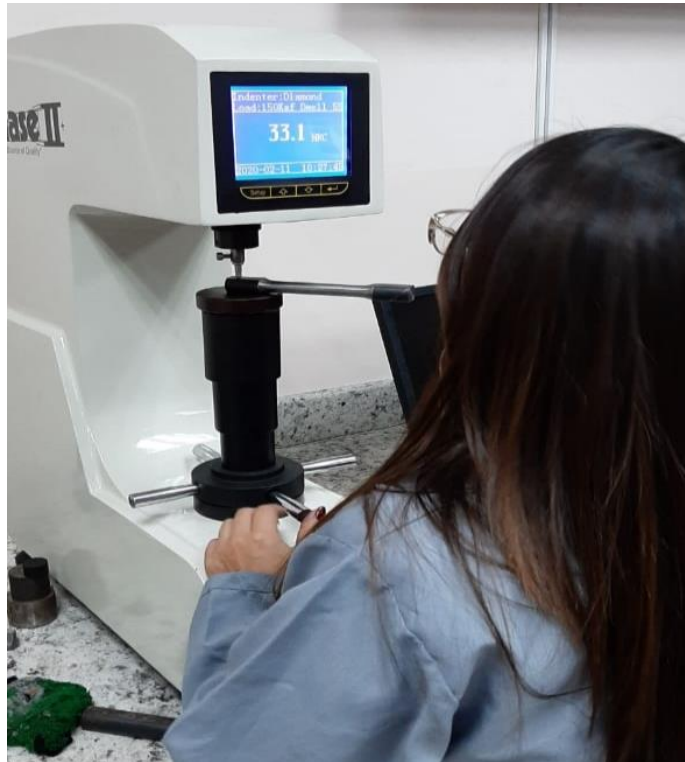
Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

**Anexo 2.** Proceso de enfriamiento en aceite al temple



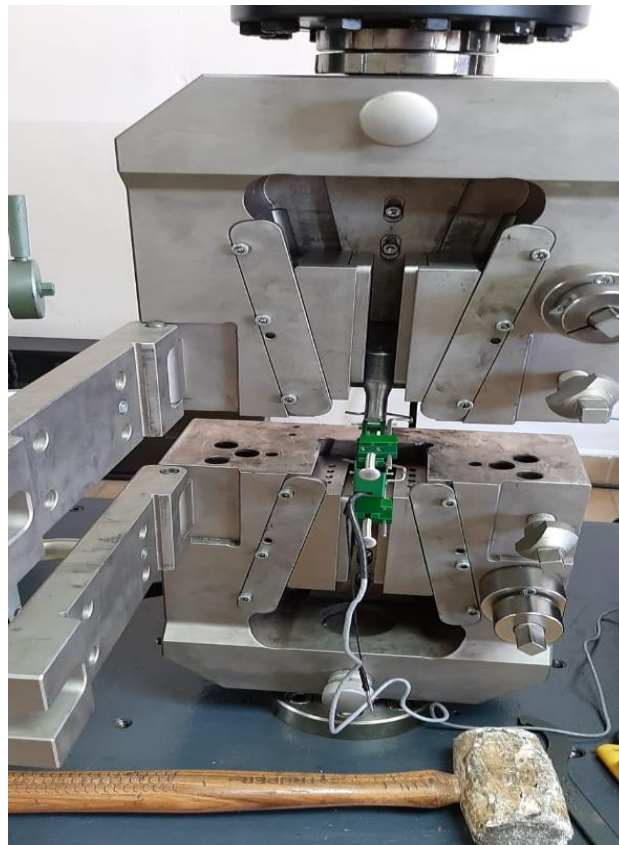
Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

**Anexo 3. Ensayo de dureza al material base**



Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

**Anexo 4. Ensayo de tracción al acero AISI/SAE 4340**



Elaborado por: Jorge Zapata & Andrea Cholango

Anexo 5: Certificado de calidad del acero AISI/SAE 4340



**MILL TEST CERTIFICATE**

ISO 9001; IATF 16949; ISO 14001 Y OHSAS 18001

Azkoitia Plant

ULSWER INDUSTRIAL SIDA S.L. S.A.  
 C/ La Serraneta s/n, 48100 AZKOITIA (Bizkaia)  
 T. +34 94 500 0000  
 www.sidenor.com



Product Made in Spain

CUSTOMER: ODS BV	WORKS REFERENCE: 2056309
REFERENCE: 4501079198	SALES ORDER: 318303-1
PRODUCT NR:	HEAT NUMBER: 203553
MASTER REFERENCE: 202400	ROLLED: 02.03.2019

<b>REQUIRED PRODUCT</b>			
34CrNiMo6AV/EXM-Mecamax ROUND BARS AS ROLLED QUENCHING+TEMPER 20-0,5/+0,5mm EN 10060, Tol normal			
6.000/7.000mm NORMAL			
<b>EXPEDITION</b>	<b>DELIVERY:</b> 0080657559	<b>WEIGHT (KG):</b> 6.976	<b>BUNDLES:</b> 3
			<b>UNITS:</b> 406

<b>MADE ACCORDING TO</b>	
EN 10060 - OCT. 2003; EN 10083-1 - 01.08.2006; EN 10083-3; 2006/AC - 01.08.2006	
EN 10204 :2004 OCT. 2004 3.1; ODS G346R-SIDENOR- 1 --; ODS NDE DATASHEET UT-1-1 - -	

<b>CHEMICAL ANALYSIS OF HEAT</b>										<b>U: % HEAT NUMBER: 203553</b>	
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Ca	H	
Min.	0,300	0,500			0,020	1,300	1,300	0,150	0,0015		
Max.	0,380	0,800	0,400	0,025	0,035	1,700	1,700	0,300	0,0030	0,00020	
Car.	0,320	0,740	0,320	0,010	0,024	1,570	1,420	0,214	0,0019	0,00014	

<b>INCLUSIONS (MICROINCLUSIONS)</b>	
Standard (DIN 50602 - .09.1985); Type/method (K); K (O): K4 4,5	

<b>MECHANICAL PROPERTIES AS SUPPLIED (CONDITIONS)</b>	
Temperature of: (1): Quenching 860°C; Time: (1): 40Minutes; Cooling: (1): Oil	
Temperature of: (2): Tempering 560°C; Time: (2): 80Minutes; Cooling: (2): Water	

<b>MECHANICAL PROPERTIES AS SUPPLIED (TEST)</b>	
Specimen Test location: Nucleus	
Standard (ISO 6892-1 - . . . .2016); Tensile direction: Longitudinal	
Ts (1.100/1.300MPa): 1.145MPa; Ys (Rp(0,2%)) >= 900MPa; Rp(0,2%) 1.034MPa; El. (5d >= 10%): 5d 15,7%	
Z (>= 45%): 58,8%	
Standard (ISO 148-1 - 2016)	
Notch impact direction: Longitudinal; Notch Impact sample type (KV): KV; K (1): 63J; K (2): 65J; K (3): 67J	
K (average) (>= 45J): 65J; K (single) (>= 31,5J): 63J; Surface hardness (>= 223HB): 347/355HB	
Notch impact direction: Longitudinal; Notch Impact sample type (CHARPY-V): CHARPY-V	
Notch Impact Temp. (-20°C): -20°C; K (1): 59J; K (2): 60J; K (3): 62J; K (average) (>= 42J): 60,33J	
K (single) (>= 29,4J): 59J	
Notch impact direction: Longitudinal; Notch Impact sample type (CHARPY-V): CHARPY-V	
Notch Impact Temp. (-40°C): -40°C; K (1): 43J; K (2): 44J; K (3): 44J; K (average) (>= 42J): 43,67J	
K (single) (>= 29,4J): 43J	

<b>ADDITIONAL TESTS</b>	
Standard (DIN 50601 - .08.1985); Grain size: 6	

<b>NON DESTRUCTIVE TESTS</b>	
U.T. standard (EN 10308-2001); U.T. type/method (quality class 3); ULTRASONIC INSPECTION 100% : O.K.	

<b>ADDITIONAL INFORMATION</b>	
Reduction ratio: 108,94; Magnetism: <= 8A/cm	
EAF ROUTE, VACUUM DEGASSED. CONTINUOUS CASTING, 185 X 185 mm.	

Material melted and manufactured 100% in Spain through the Electric Arc Furnace and Vacuum Degassing route.  
 Steel not exposed to Mercury, or to any other metal alloy that is liquid, at ambient temperatures during processing or while in Sidenor's possession.  
 The Product is free from radioactivity (<0,1Bq/g concerning Co-60).  
 Steel products were not repaired by welding.

TECHNOLOGY & QUALITY CERTIFIES THAT THE PRODUCT FULL FILLS THE ORDER'S SPECIFICATIONS





# MILL TEST CERTIFICATE

ISO 9001; IATF 16949; ISO 14001 Y OHSAS 18001

**Azkoitia Plant**

ALUMINIO Y ACERO INDUSTRIALES S.L. S.A.  
C/1. Suroeste s/n, 48733 Azkoitia (48942) Bizkaia  
TEL: 94520222 FAX: 94520222  
www.sidenor.com



Product Made in Spain

CUSTOMER: ODS BV	WORKS REFERENCE: 2056309
REFERENCE: 4501079198	SALES ORDER: 318303-1
PRODUCT NR:	HEAT NUMBER: 203553
MASTER REFERENCE: 202400	ROLLED: 02.03.2019

100% anti mix test performed.

## CERTIFICADO DE CALIDAD

CLIENTE: INDUMEVER  
 FACTURA: 591789948  
 GRADO DE ACERO: ACERO AISI/SAE 4340/V155  
 DIMENSIONES: Rd 20.00MM  
 VALIDO PARA ESTA DIMENSION  
 08.01.2020  
 ING. MARCO LOOR  
 VOESTALPINE HIGH PERFORMANCE  
 METALS DEL ECUADOR S.A.

TECHNOLOGY & QUALITY CERTIFIES THAT THE PRODUCT FULL FILLS THE ORDER'S SPECIFICATIONS





**Anexo 6:** Certificado de calibración del equipo de ensayo de dureza



21 Industrial Avenue • Upper Saddle River NJ 07458  
 Telephone (201) 962-7373 • Fax (201) 962-8353  
 E-Mail: [info@phase2plus.com](mailto:info@phase2plus.com)

**Certificate of Calibration for Rockwell Hardness Tester**

Model: 900-365      Serial No. 20JA142015      Date: February 19, 2015  
 Temperature: 21°C      Humidity: 30%      Method: ASTM E18  
 QC Technician: SJT      Diamond Indentor: n/a

Verification of Test Force				
	Standard Value	Reading Force	Error	Maximum Error ASTM E18
Pre-load (kgf)	10	10.03	+0.03%	±2%
Full load (kgf)	60	60.04	+0.07%	±0.75%
	100	100.15	+0.15%	±0.65%
	150	150.13	+0.09%	±0.60%

Verification of Depth Measuring Device			
Given Depth Movement in Microns	Depth Reading by Hardness Tester	Error	Maximum Error ASTM E18
60µm	60.1µm	+0.1µm	±1µm
110µm	110.3µm	+0.3µm	±1µm
160µm	159.8µm	-0.2µm	±1µm

Indirect Verification										
Standard Blocks	Test Results					Avg.	Error	Maximum Error	Repeatability	Maximum Repeatability
	H1	H2	H3	H4	H5					
83.7HRA	83.5	83.7	83.9	83.8	83.7	83.7	0	±0.5	0.4	1.0
92.9HRB	92.2	93.0	92.9	93.0	93.2	92.9	0	±1.0	1.0	1.5
63.5HRC	63.1	63.1	63.4	63.2	63.4	63.2	-0.3	±0.5	0.2	1.0
46.7HRC	46.6	46.7	46.5	46.7	46.8	46.7	0	±1.0	0.3	1.0
29.1HRC	29.0	29.3	29.5	29.4	29.2	29.3	+0.2	±1.0	0.5	2.0

The above testing machine has been verified to the requirements of ASTM E18. All test blocks used for calibration are NIST traceable and conform to ASTM E18-14.

*[Signature]*  
 Approved By:

• Material Testing Instruments • Machine Tool Accessories • Precision Measuring Tools •  
[www.phase2plus.com](http://www.phase2plus.com)



Anexo 7: Certificado de calibración del equipo de ensayo de tracción



Certificate of Calibration

Measured points are IN TOLERANCE

Equipment Owner: Quion Tranferencias

ATTN Fredy Quintuna  
P/O # 2016-TS-203

System:	1608018-01		
System Type:	Tension	Transducer Model:	1210FEY-50K-B
Controller M/N:	R Controller	Tranducer S/N:	580115
Controller S/N:	1608018-01C	Rated Force:	33721 lbf
Frame M/N:	315	Transducer Output:	4.20531 mV/V
Frame S/N:	1608018-01F	Calibration Channel:	LOAD
Relative Humidity:	17%	Calibration File:	50KLBF_580115_T
Temperature:	66°F	Calibration Date:	16-Dec-2016

CALIBRATION EQUIPMENT USED:

Manufacturer	Verification Agency	Model	S/N	Cal Date	Cal Due
Interface, Inc.	Interface, Inc.	INDICATOR, 9840	90120		
Interface, Inc.	Interface, Inc.	1020AF-25K-B	332409	25-Jul-2016	25-Jul-2017
Interface, Inc.	Interface, Inc.	1232AF-100K-B	429009	26-Jul-2016	26-Jul-2017

Above Standards are traceable to the National Institute of Standards and Technology.

Calibration Data					
Applied Load (Pounds)	Percent Range	System Readout (Pounds)	Error % Reading	Error % Range	In Tolerance?
668.80	2.0%	670.38	0.2362	0.0047	YES
1,355.60	4.0%	1362.80	0.5311	0.0214	YES
2,723.30	8.1%	2735.45	0.4461	0.0360	YES
4,707.00	14.0%	4699.62	0.1568	0.0219	YES
6,773.00	20.1%	6763.53	0.1398	0.0281	YES
13,487.00	40.0%	13479.51	0.0555	0.0222	YES
20,451.00	60.6%	20443.70	0.0357	0.0216	YES
27,062.00	80.3%	27069.79	0.0288	0.0231	YES
33,458.00	99.2%	33476.68	0.0558	0.0554	YES
Average			0.1873	0.0260	

New calibration

This calibration performed In System at Test Resources

Procedure Followed based on ASTM E-4

\* Tolerance - Load:

Plus or minus 1% of reading up to 100% of range

Calibration Performed by: Devin Kasprovicz  
Calibration Reviewed by: Andrew Thorson



# Certificate of Calibration

Measured points are IN TOLERANCE

Equipment Owner: Quion Tranferencias

ATTN: Fredy Quintana  
P/O # 2016-TS-203

System:	1608018-01	
System Type:	Compression	Transducer Model:
Controller M/N:	R Controller	1210FEY-50K-B
Controller S/N:	1608018-01C	Tranducer S/N:
Frame M/N:	315	580115
Frame S/N:	1608018-01F	Rated Force:
Relative Humidity:	17%	33721 lbf
Temperature:	66°F	Transducer Output:
		4.20531 mV/V
		Calibration Channel:
		LOAD
		Calibration File:
		50Klbf_580155_C
		Calibration Date:
		16-Dec-2016

**CALIBRATION EQUIPMENT USED:**

Manufacturer	Verification Agency	Model	S/N	Cal Date	Cal Due
Interface, Inc.	Interface, Inc.	INDICATOR, 9840	90120		
Interface, Inc.	Interface, Inc.	1020AF-25K-B	332409	25-Jul-2016	25-Jul-2017
Interface, Inc.	Interface, Inc.	1232AF-100K-B	429009	26-Jul-2016	26-Jul-2017

Above Standards are traceable to the National Institute of Standards and Technology.

Calibration Data						
Applied Load (Pounds)	Percent Range	System Readout (Pounds)	Error % Reading	Error % Range	In Tolerance?	
670.70	2.0%	673.87	0.4726	0.0094	YES	
1,343.10	4.0%	1352.36	0.6894	0.0275	YES	
2,714.20	8.0%	2738.79	0.9060	0.0729	YES	
4,715.00	14.0%	4702.08	0.2740	0.0383	YES	
6,757.00	20.0%	6747.94	0.1341	0.0269	YES	
13,518.00	40.1%	13529.96	0.0885	0.0355	YES	
20,193.00	59.9%	20206.87	0.0687	0.0411	YES	
27,038.00	80.2%	27029.31	0.0321	0.0258	YES	
33,464.00	99.2%	33467.74	0.0112	0.0111	YES	
Average			0.2974	0.0320		

New calibration

This calibration performed In System at Test Resources

Procedure Followed based on ASTM E-4

\* Tolerance - Load:

Plus or minus 1% of reading up to 100% of range

Calibration Performed by: Devin Kasproicz  
Calibration Reviewed by: Andrew Thorson

**Anexo 8:** Certificado de calibración del equipo de ensayo de tracción ILPM



**LABORATORIO NACIONAL DE METROLOGÍA  
CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN**

**DIVISIÓN DE PRESIÓN Y FUERZA**

Laboratorio de Fuerza

**Número de Certificado:** LNM-F-201900055D

**Adhesivo N°:** 07001

**Fecha de Calibración:** 2019-07-04

**Instrumento de Medida:** MAQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS

**Marca:** JINAN HENSGRAND INSTRUMENT CO. LTD

**Modelo o Tipo:** WAW-1000D

**Serie:** 6836-07-13

**Intervalo de Medida:** (60-600) KN COMPRESION

**Código de Identificación:** ENS-23

**Propietario:** ILPM ENGINEERING CIA. LTDA.

**Dirección:** Emilio Estrada N54-139 y Oruña. DM QUITO - PICHINCHA

**Observaciones:** Se emplea una velocidad de calibración de 0,2 mm/min

El Servicio Ecuatoriano de Normalización, realizó en el laboratorio de la empresa, la calibración del instrumento arriba descrito, utilizando Patrones de Referencia trazables a la unidad de Fuerza del Sistema Internacional de Unidades, SI, y al patrón nacional, pertenecientes al Laboratorio Nacional de Metrología.

La calibración fue realizada bajo un Sistema de Gestión de la Calidad conforme con la NTE INEN-ISO/IEC 17025:2006.

Los resultados de la calibración y su incertidumbre se exponen en las páginas siguientes y son parte de este documento, además se refieren al momento y condiciones en que se realizó la calibración.

El LNM no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado del instrumento calibrado.

Es responsabilidad del cliente establecer la fecha de una nueva calibración del instrumento. El tiempo de validez de los resultados contenidos en éste Certificado, depende tanto de las características del instrumento como de las prácticas de manejo y uso.

El usuario está obligado a tener el instrumento recalibrado en intervalos apropiados.

El presente certificado de calibración certifica los valores obtenidos expresados como los resultados de las calibraciones y no constituye un certificado de aptitud para el uso del patrón, instrumento o equipo.

Este documento no significa certificación de calidad y no debe ser utilizado con fines publicitarios. Prohibida su reproducción parcial, la reproducción total deberá hacerse con la autorización escrita de la Dirección Ejecutiva.

**Fecha de emisión:** 2019-07-29

Ing. Sebastián Vicente Laguna

**Responsable de División de Presión y Fuerza**

Propietario: ILPM ENGINEERING CIA. LTDA.

Número de Certificado: LNM-F-201900055D

Fecha de Calibración: 2019-07-04

**INCERTIDUMBRE DE MEDIDA:** La incertidumbre de medida obtenida equivale al doble de la incertidumbre combinada, es decir cubre un intervalo de confianza de aproximadamente el 95 % asumiendo una distribución normal, y se la estimó de acuerdo a la Guía para la Expresión de la Incertidumbre en las Mediciones (GUM) publicada por la ISO.

**PROCEDIMIENTO UTILIZADO:** Procedimiento LNM PC 39 "Procedimiento de calibración de máquinas de ensayos uniaxiales", basado en la Norma Internacional ISO 7500-1

**INTERVALO DE CALIBRACIÓN:** (60-600) kN COMPRESION

Rango: 600 kN División de Escala: 0,05 kN

**CONDICIONES AMBIENTALES:**

T <sub>o</sub> (°C)	T <sub>r</sub> (°C)
21,3	22,0

**PATRONES Y EQUIPOS UTILIZADOS:**

Celda de Carga

Marca: HBM Serie: 0028XOB Certificado: 33518 DKD-K-00101

Amplificador MGCplus; ML38B

Marca: HBM Serie: 801128372 Certificado: 24944 DKD-K-00101

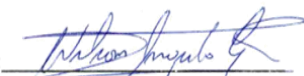
**TABLA DE CALIBRACIÓN EN UNIDADES DEL INSTRUMENTO**

Fuerza Indicada kN	Fuerza Verdadera Aplicada					Error kN	U k=2 kN	U k=2 %
	1ª serie kN	2ª serie kN	3ª serie kN	4ª serie kN	Promedio kN			
0,00	0,00	0,00	0,00	*****	0,00	0,00	*****	*****
60,00	60,45	61,44	59,83	*****	60,57	-0,57	0,94	1,55
120,00	121,34	119,61	118,01	*****	119,65	0,35	1,93	1,61
180,00	179,92	182,69	180,72	*****	181,11	-1,11	1,65	0,91
240,00	243,57	241,84	243,57	*****	243,00	-3,00	1,16	0,48
300,00	301,69	301,41	299,04	*****	300,71	-0,71	1,69	0,56
360,00	360,85	362,52	363,12	*****	362,16	-2,16	1,38	0,38
420,00	424,10	422,49	423,33	*****	423,30	-3,30	0,97	0,23
480,00	482,84	483,87	483,96	*****	483,56	-3,56	0,78	0,16
540,00	542,09	541,84	542,79	*****	542,24	-2,24	0,66	0,12
600,00	602,19	606,07	608,31	*****	605,52	-5,52	3,60	0,59

**TABLA DE PARÁMETROS RELATIVOS SEGÚN LA NORMA ISO 7500-1**

Fuerza Indicada kN	Exactitud q (%)	Repetibi. b (%)	Reversibili. v (%)	Cero f0 (%)	Resolución relativa a (%)	Clase de exactitud
60,0	0,94	2,66	*****	0,38	0,08	3
120,0	0,29	2,78	*****	0,38	0,04	3
180,0	0,61	1,53	*****	0,38	0,03	2
240,0	1,23	0,71	*****	0,38	0,02	2
300,0	0,24	0,88	*****	0,38	0,02	1
360,0	0,60	0,63	*****	0,38	0,01	1
420,0	0,78	0,38	*****	0,38	0,01	1
480,0	0,74	0,23	*****	0,38	0,01	1
540,0	0,41	0,17	*****	0,38	0,01	0,5
600,0	0,91	1,01	*****	0,38	0,01	1

Calibrado por:

  
WILSON ANGULO CRUZ

Técnico de Laboratorio

Revisado por:

  
SEBASTIAN VICENTE LAGUNA

Responsable de División.



LNM 19 451

Distrito Metropolitano de Quito,

DESPACHADO 05 AGO 2019

Dirección Técnica de Metrología  
Laboratorio Nacional de Metrología,  
LNM  
Valle de los Chillos-Conocoto  
Telef: (593-2) 3 931-010 al 3 931-019

Ingeniero  
Iván Estupiñán  
**REPRESENTANTE**  
**ILPM ENGINEERING CIAL LTDA.**  
Emilio Estrada N54-139 y Oruna  
Telef. (593-2) 2 812-094  
Ciudad

De nuestra consideración:

Atendiendo su pedido, técnicos del Servicio Ecuatoriano de Normalización, realizaron en las instalaciones de la empresa, la calibración en la magnitud de fuerza de **1 (una)** máquina universal de ensayos.

Adjunto encontrará el Certificado de Calibración No. LNM-F-201900055D

Atentamente,

  
**Ing. Israel Carrión**  
**DIRECTOR TECNICO DE**  
**METROLOGIA**

“CONFIANZA INTERNACIONAL EN LAS CALIBRACIONES REALIZADAS POR EL LABORATORIO NACIONAL DE MASA DEL INEN, el Laboratorio de Masa del INEN obtuvo el Reconocimiento Internacional de sus Capacidades de Medición y Calibración (CMCs), lo que significa que los Certificados de Calibración emitidos por este Laboratorio son consecuentes con las CMCs que se incluyen en el Apéndice C del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo (ARM-CIPM) redactado por el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM). Bajo el ARM del CIPM, todos los institutos participantes reconocen la validez de los certificados de calibración y medición emitidos por los otros institutos participantes para las magnitudes, rangos e incertidumbres de medición especificados en el Apéndice C (para más detalles ver <http://www.bipm.org>). Sus CMCs, se encuentran aprobadas en el Apéndice C del ARM-CIPM desde el 09 de septiembre del 2011.

Alcance: Rango de 1 mg a 2 kg para una Clase de Exactitud OIML E2”

Anexo 9: Registro de ensayos de espectrometría Universidad Politécnica Salesiana.

FMX 52U0016      Optik 52U0017

Sample :

Alloy : FE\_150      Mode : PA 22/01/2020 12:03:01

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Pb
2	95.4	0.312	0.117	0.758	0.0169	0.0233	0.0045
5	95.5	0.309	0.121	0.756	0.0161	0.0220	0.0033
6	95.4	0.319	0.117	0.778	0.0162	0.0234	0.0037
7	95.3	0.336	0.122	0.773	0.0172	0.0237	0.0038
13	95.4	0.321	0.114	0.768	0.0162	0.0231	0.0029
14	95.4	0.336	0.113	0.765	0.0169	0.0227	0.0032
<b>Average</b>	<b>95.4</b>	<b>0.322</b>	<b>0.117</b>	<b>0.767</b>	<b>0.0166</b>	<b>0.0230</b>	<b>0.0035</b>

	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb
2	1.56	0.209	1.48	0.0205	0.0027	0.0097	< 0.0005
5	1.57	0.206	1.46	0.0197	0.0033	0.0091	< 0.0005
6	1.59	0.206	1.46	0.0197	0.0022	0.0096	< 0.0005
7	1.59	0.215	1.50	0.0209	0.0027	0.0098	< 0.0005
13	1.57	0.206	1.46	0.0195	0.0012	0.0093	< 0.0005
14	1.58	0.208	1.45	0.0199	< 0.0010	0.0096	< 0.0005
<b>Average</b>	<b>1.58</b>	<b>0.208</b>	<b>1.47</b>	<b>0.0200</b>	<b>0.0021</b>	<b>0.0095</b>	<b>&lt; 0.0005</b>

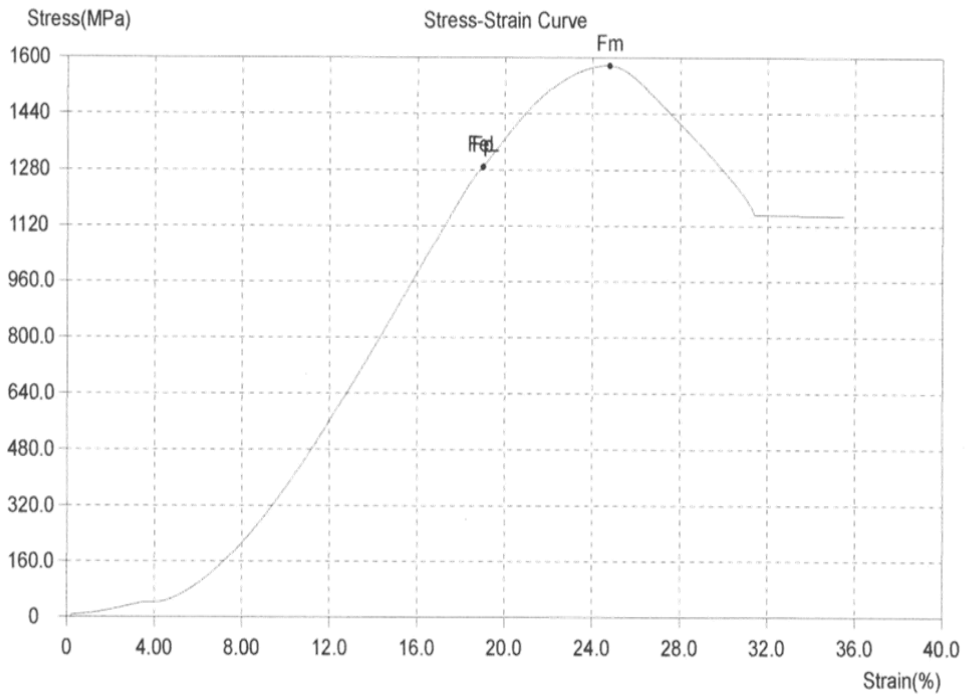
	Ti	V	W	Sn	B	Ca	Zr
2	0.0010	0.0058	< 0.0100	0.0015	0.0015	0.0001	0.0036
5	0.0028	0.0063	< 0.0100	0.0017	0.0012	< 0.0001	0.0046
6	0.0030	0.0064	< 0.0100	0.0015	0.0014	0.0001	0.0045
7	0.0023	0.0067	< 0.0100	< 0.0010	0.0013	< 0.0001	0.0041
13	0.0014	0.0057	< 0.0100	0.0012	0.0012	< 0.0001	0.0036
14	0.0011	0.0057	< 0.0100	0.0010	0.0013	< 0.0001	0.0035
<b>Average</b>	<b>0.0019</b>	<b>0.0061</b>	<b>&lt; 0.0100</b>	<b>0.0013</b>	<b>0.0013</b>	<b>&lt; 0.0001</b>	<b>0.0040</b>

	Zn	Bi	As	Se	Sb
2	0.0026	0.0162	0.0042	0.0114	0.0054
5	0.0027	0.0159	0.0035	0.0123	< 0.0030
6	0.0027	0.0162	0.0036	0.0129	< 0.0030
7	0.0026	0.0163	0.0037	0.0117	0.0039
13	0.0025	0.0157	0.0033	0.0116	0.0033
14	0.0026	0.0157	0.0033	0.0117	0.0046
<b>Average</b>	<b>0.0026</b>	<b>0.0160</b>	<b>0.0036</b>	<b>0.0119</b>	<b>0.0037</b>

**Anexo 10:** Registro de ensayos de tracción ILPM.

**ILPM CIA LTDA**  
**REGISTRO DE ENSAYO DE TRACCION**

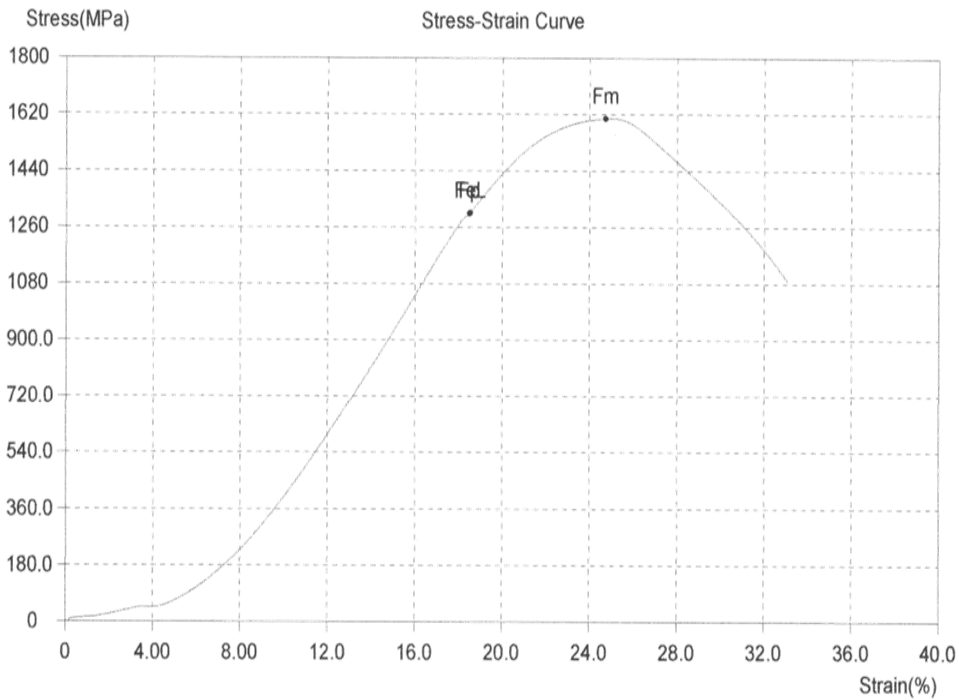
Customer/Informe	ANDREA CHOLANGO / ILPM-2020-210		
Probeta No.	R280-WI		
TestDate	2020-06-10	Type	Circle
Size(mm)	12.56	So(mm <sup>2</sup> )	123.90
Lo(mm)	50	Lu(mm)	57.28
Fm(kN)	195.4	SUT(MPa)	1577
FeL(kN)	159.7	SY(MPa)	1289





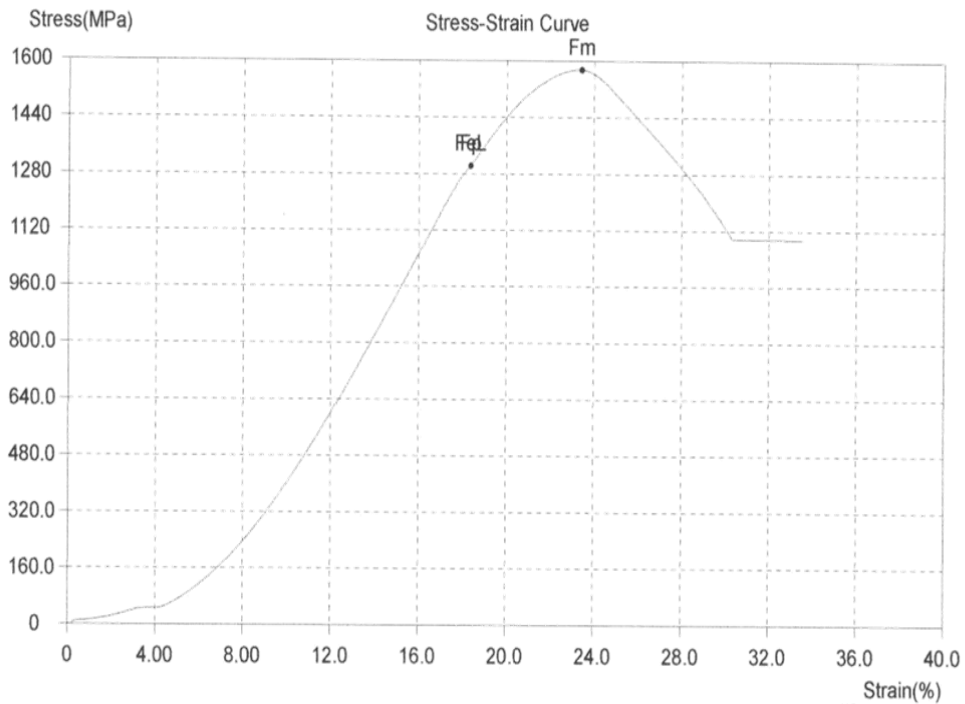
**ILPM CIA LTDA**  
**REGISTRO DE ENSAYO DE TRACCION**

Customer/Informe	ANDREA CHOLANGO / ILPM-2020-210		
Probeta No.	R280-H1		
TestDate	2020-06-10	Type	Circle
Size(mm)	12.69	So(mm <sup>2</sup> )	126.48
Lo(mm)	50	Lu(mm)	58.21
Fm(kN)	203.2	SUT(MPa)	1607
FeL(kN)	165.2	SY(MPa)	1306



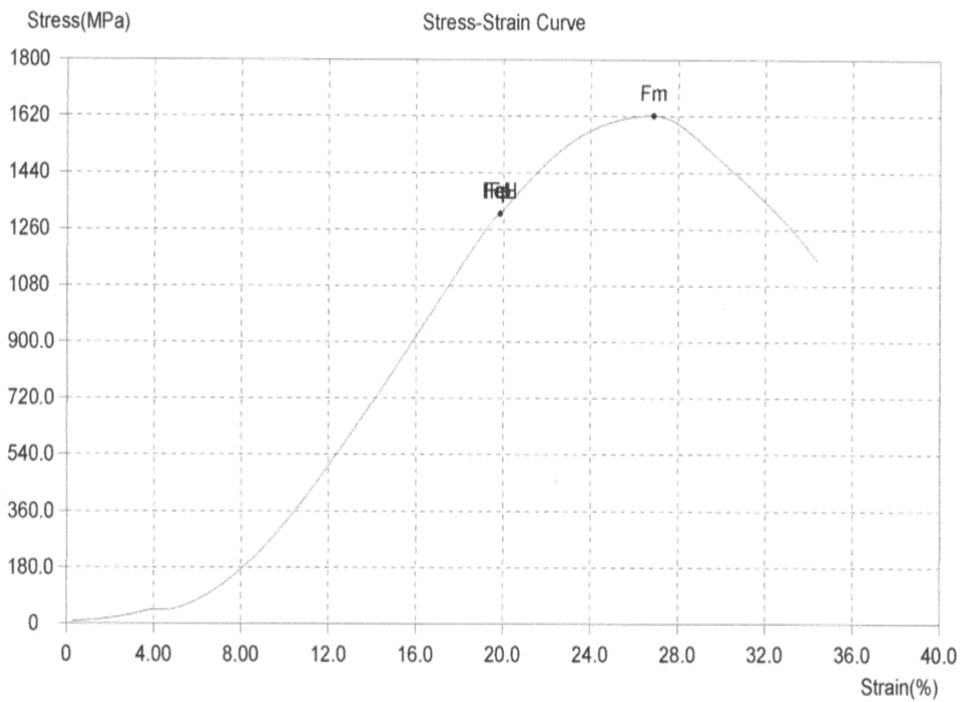
**ILPM CIA LTDA**  
**REGISTRO DE ENSAYO DE TRACCION**

Customer/Informe	ANDREA CHOLANGO / ILPM-2020-210		
Probeta No.	R280-H2		
TestDate	2020-06-10	Type	Circle
Size(mm)	12.60	So(mm <sup>2</sup> )	124.69
Lo(mm)	50	Lu(mm)	57.80
Fm(kN)	196.4	SUT(MPa)	1575
FeL(kN)	162.4	SY(MPa)	1302



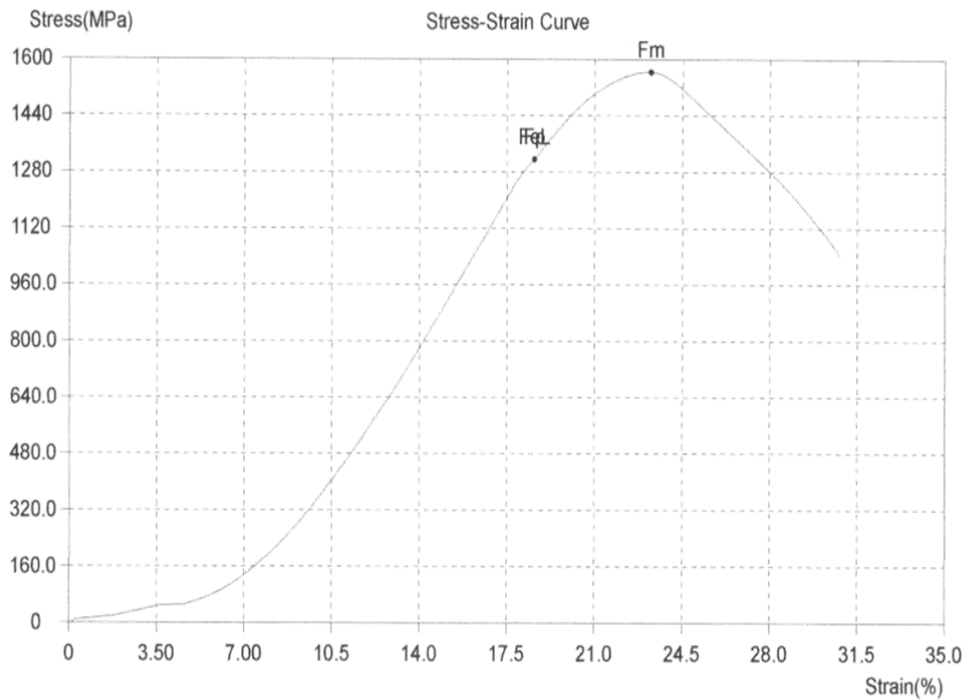
**ILPM CIA LTDA**  
**REGISTRO DE ENSAYO DE TRACCION**

Customer/Informe	ANDREA CHOLANGO / ILPM-2020-210		
Probeta No.	R280-01		
TestDate	2020-06-10	Type	Circle
Size(mm)	12.67	So(mm <sup>2</sup> )	126.08
Lo(mm)	50	Lu(mm)	57.42
Fm(kN)	204.4	SUT(MPa)	1621
FeL(kN)	165.1	SY(MPa)	1309



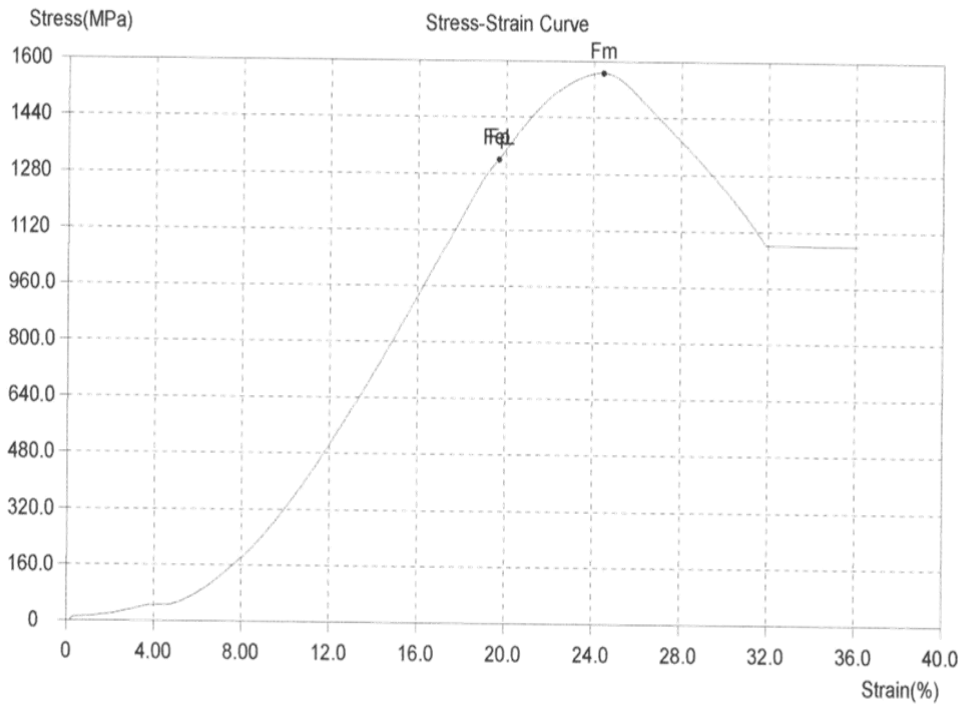
**ILPM CIA LTDA**  
**REGISTRO DE ENSAYO DE TRACCION**

Customer/Informe	ANDREA CHOLANGO / ILPM-2020-210		
Probeta No.	R320-W1		
TestDate	2020-06-10	Type	Circle
Size(mm)	12.29	So(mm <sup>2</sup> )	118.63
Lo(mm)	50	Lu(mm)	56.21
Fm(kN)	185.6	SUT(MPa)	1565
FeL(kN)	156.0	SY(MPa)	1315



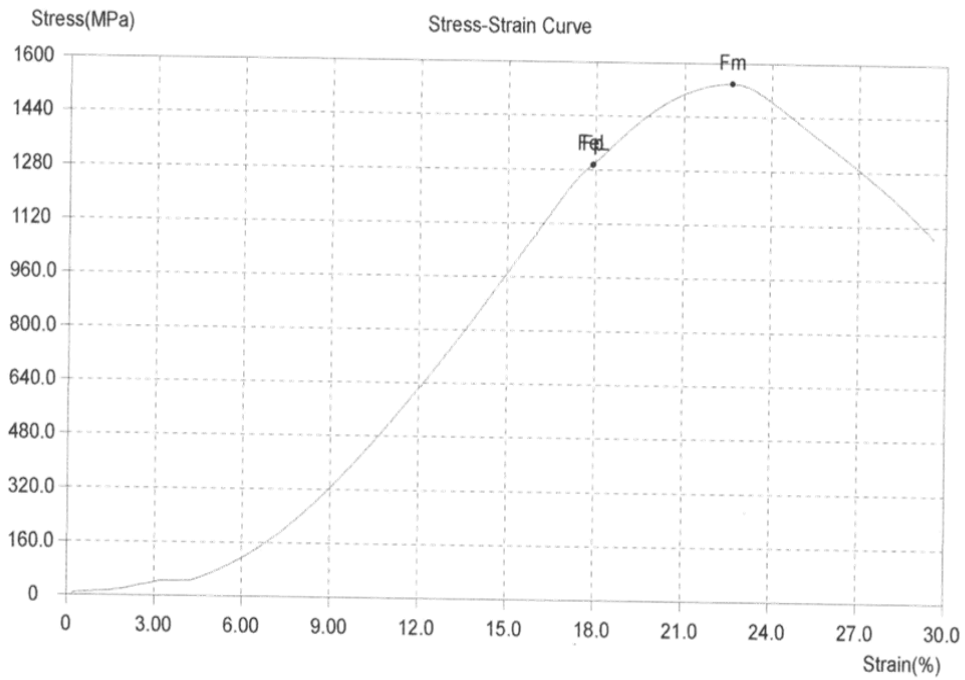
**ILPM CIA LTDA**  
**REGISTRO DE ENSAYO DE TRACCION**

Customer/Informe	ANDREA CHOLANGO / ILPM-2020-210		
Probeta No.	R320-W2		
TestDate	2020-06-10	Type	Circle
Size(mm)	12.67	So(mm <sup>2</sup> )	126.08
Lo(mm)	50	Lu(mm)	56.45
Fm(kN)	197.6	SUT(MPa)	1567
FeL(kN)	166.4	SY(MPa)	1320



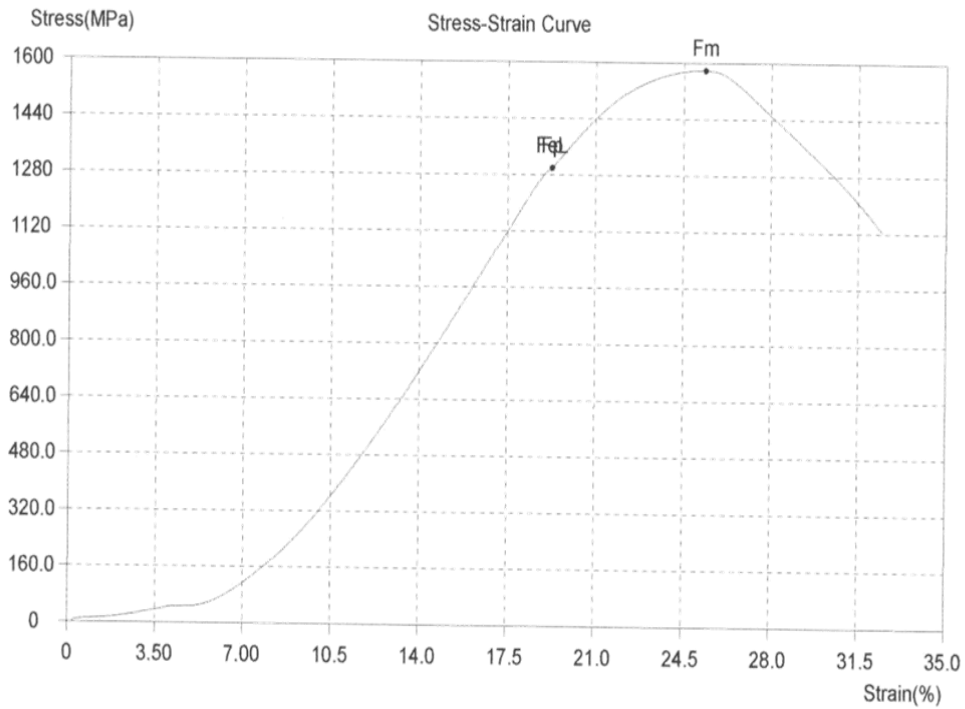
**ILPM CIA LTDA**  
**REGISTRO DE ENSAYO DE TRACCION**

Customer/Informe	ANDREA CHOLANGO / ILPM-2020-210		
Probeta No.	R320-H1		
TestDate	2020-06-10	Type	Circle
Size(mm)	12.38	So(mm <sup>2</sup> )	120.37
Lo(mm)	50	Lu(mm)	56.91
Fm(kN)	185.4	SUT(MPa)	1540
FeL(kN)	155.9	SY(MPa)	1295



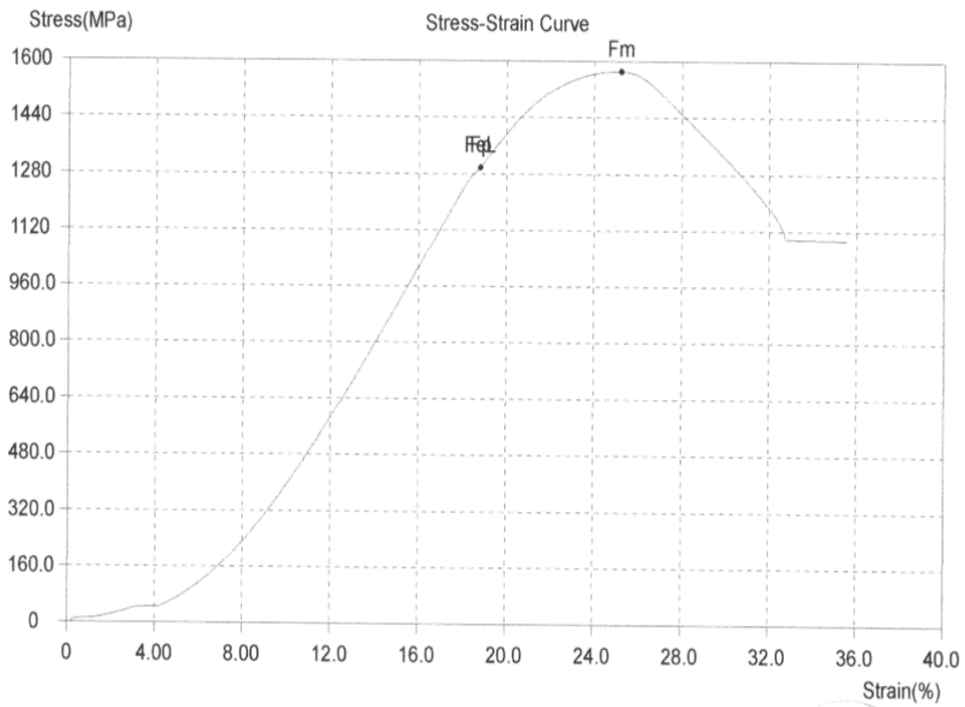
**ILPM CIA LTDA**  
**REGISTRO DE ENSAYO DE TRACCION**

Customer/Informe	ANDREA CHOLANGO / ILPM-2020-210		
Probeta No.	R320-H2		
TestDate	2020-06-10	Type	Circle
Size(mm)	12.33	So(mm <sup>2</sup> )	119.40
Lo(mm)	50	Lu(mm)	56.66
Fm(kN)	188.6	SUT(MPa)	1580
FeL(kN)	155.1	SY(MPa)	1299



**ILPM CIA LTDA**  
**REGISTRO DE ENSAYO DE TRACCION**

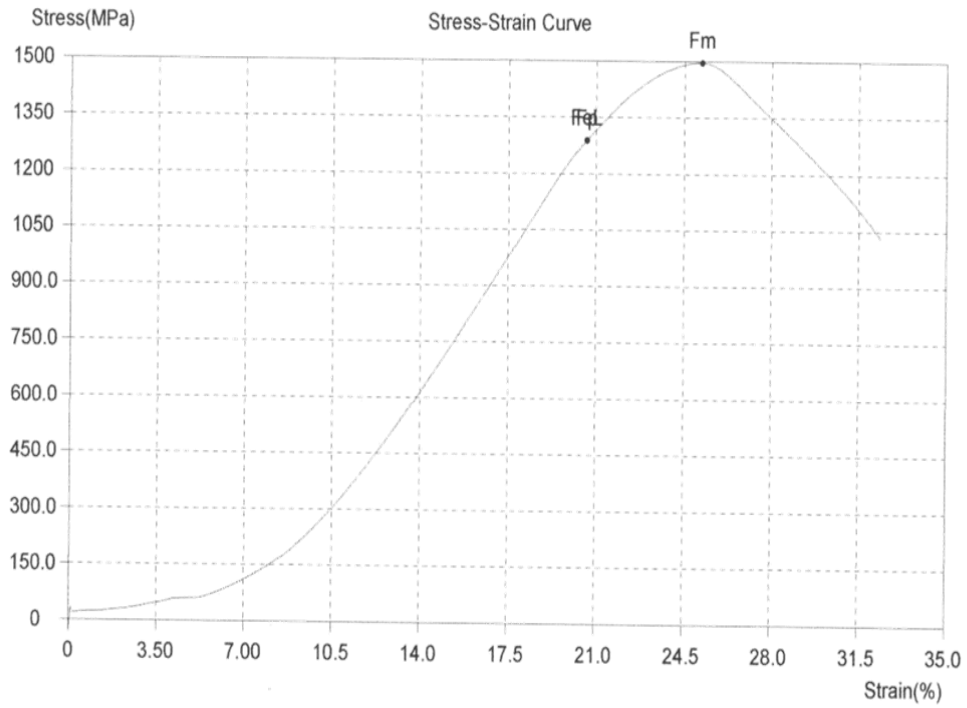
Customer/Informe	ANDREA CHOLANGO / ILPM-2020-210		
Probeta No.	R320-O1		
TestDate	2020-06-10	Type	Circle
Size(mm)	12.69	So(mm <sup>2</sup> )	126.48
Lo(mm)	50	Lu(mm)	58.46
Fm(kN)	198.7	SUT(MPa)	1571
FeL(kN)	164.2	SY(MPa)	1298





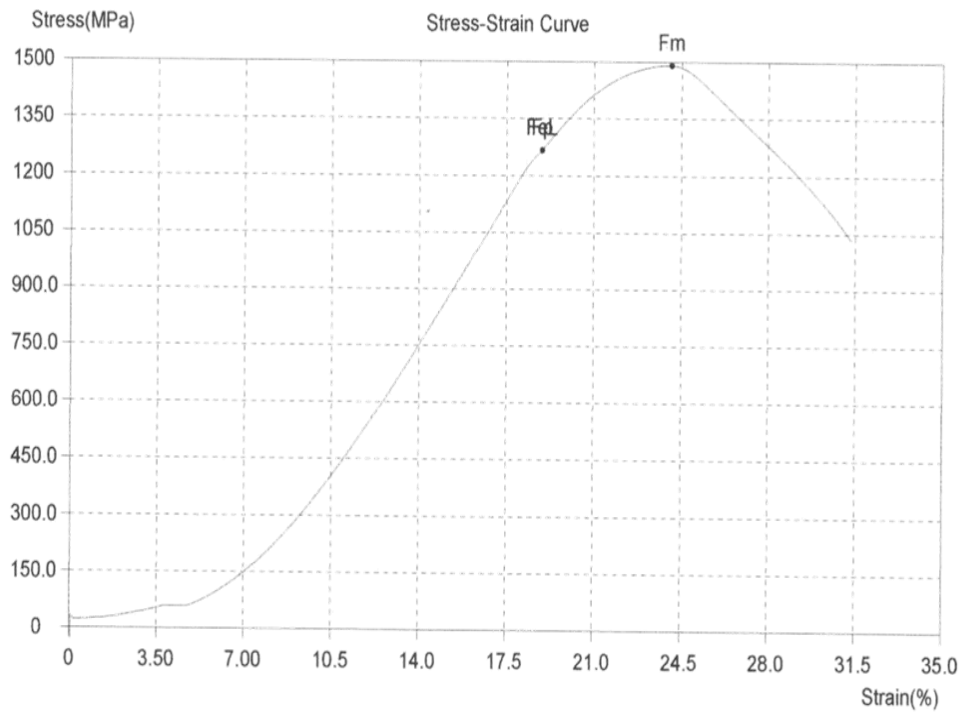
**ILPM CIA LTDA**  
**REGISTRO DE ENSAYO DE TRACCION**

Customer/Informe	ANDREA CHOLANGO / ILPM-2020-210		
Probeta No.	R380-W1		
TestDate	2020-06-10	Type	Circle
Size(mm)	12.29	So(mm <sup>2</sup> )	118.63
Lo(mm)	50	Lu(mm)	56.02
Fm(kN)	177.6	SUT(MPa)	1497
FeL(kN)	152.9	SY(MPa)	1289



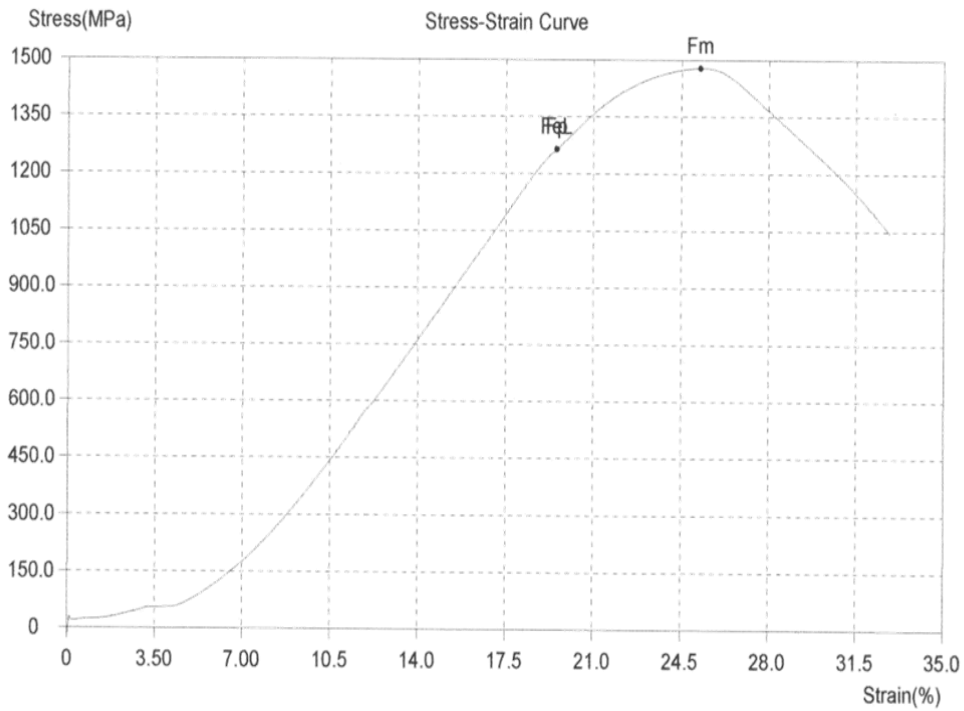
**ILPM CIA LTDA**  
**REGISTRO DE ENSAYO DE TRACCION**

Customer/Informe	ANDREA CHOLANGO / ILPM-2020-210		
Probeta No.	R380-W2		
TestDate	2020-06-10	Type	Circle
Size(mm)	12.51	So(mm <sup>2</sup> )	122.92
Lo(mm)	50	Lu(mm)	56.97
Fm(kN)	183.3	SUT(MPa)	1491
FeL(kN)	155.7	SY(MPa)	1267



**ILPM CIA LTDA**  
**REGISTRO DE ENSAYO DE TRACCION**

Customer/Informe	ANDREA CHOLANGO / ILPM-2020-210		
Probeta No.	R380-H1		
TestDate	2020-06-10	Type	Circle
Size(mm)	12.68	So(mm <sup>2</sup> )	126.28
Lo(mm)	50	Lu(mm)	58.07
Fm(kN)	186.8	SUT(MPa)	1479
FeL(kN)	159.6	SY(MPa)	1264



**ILPM CIA LTDA**  
**REGISTRO DE ENSAYO DE TRACCION**

Customer/Informe	ANDREA CHOLANGO / ILPM-2020-210		
Probeta No.	R380-01		
TestDate	2020-06-10	Type	Circle
Size(mm)	12.52	So(mm <sup>2</sup> )	123.11
Lo(mm)	50	Lu(mm)	57.89
Fm(kN)	185.9	SUT(MPa)	1510
FeL(kN)	160.6	SY(MPa)	1305

