



Universidad
Continental

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Mecánica

Tesis

**Mejora de la dureza del acero SAE 1045
mediante la aplicación del tratamiento
térmico criogénico**

Dumas Renato Neyra Peña

Huancayo, 2019

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Mecánico



Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Obra protegida bajo la licencia de [Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/peru/)

ASESOR

Ing. Ercilio Justo Garay Quintana

AGRADECIMIENTOS

A Dios, quien me brinda salud y vida para cumplir con esta etapa tan importante.

A mi madre Mariela Julia Peña Carbajal, quien me educó con amor, tratando siempre de mostrarme el camino correcto a seguir en la vida. Ella es el motivo por el cual debo seguir superándome, ha sido y es la persona que siempre me ha extendido su mano cuando he caído; por ser quien deposita su confianza en mí y que con su apoyo, esfuerzo, sacrificio y confianza hace posible que pueda cumplir este gran objetivo.

A mis abuelos, por el apoyo moral que me brindan, el cual me incentiva a seguir superándome; quienes como ejemplo de amor, responsabilidad y comprensión, me aconsejaron, guiaron y no permitieron que descuide mis objetivos.

Al Ingeniero Ercilio Justo Garay Quintana, quien fue mi asesor y supo brindarme el apoyo necesario para cumplir con los objetivos propuestos; de quien me siento inmensamente agradecido por sus instrucciones y orientación brindada durante el proceso de elaboración de tesis.

A mis profesores y a la Universidad Continental, que con su aporte y competencias nos otorgan una formación profesional para destacar en la sociedad.

A la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Mecánica, por los conocimientos adquiridos durante la etapa universitaria.

A los encargados del Laboratorio de Control de Calidad la Corporación Sudamericana de Aceros Especiales S.A.C., por el interés que mostraron hacia la presente investigación y a su desarrollo.

A todas las personas que depositan su confianza en mí sin ningún inconveniente.

Dumas Neyra Peña.

DEDICATORIA

A Dios por concederme sabiduría y perseverancia durante esta etapa.

A Mariela Julia Peña Carbajal, mi amada madre.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA	iii
ÍNDICE DE CONTENIDO	iv
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÓN.....	xiv
CAPITULO I.....	1
PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO.....	1
1.1 Planteamiento del Problema.....	1
1.2 Formulación del Problema.....	9
1.2.1 Problema general.....	9
1.2.2 Problemas Específicos.....	9
1.3 Objetivos	10
1.3.1 Objetivo General	10
1.3.2 Objetivos específicos	10
1.4 Justificación e Importancia	10
1.5 Hipótesis	13
1.5.1 Hipótesis general	13
1.5.2 Hipótesis específicas	13
1.6 Variables	13
1.6.1 Variable Independiente	13
1.6.2 Variable dependiente	13
1.7 Descripción de las variables	14
1.7.1 Definición Conceptual de la variable	14
1.7.2 Definición Operacional de la variable	14
1.8 Delimitación de la Investigación.....	14
1.9 Limitaciones de la Investigación	15
CAPITULO II.....	16

MARCO TEÓRICO	16
2.1 Antecedentes del Problema	16
2.1.1 Antecedentes Nacionales	16
2.1.2 Antecedentes Internacionales	18
2.2 Bases Teóricas.....	24
2.2.1 Ciencia de los materiales.	24
2.2.1.1 <i>Materiales de ingeniería.</i>	24
2.2.1.2 <i>Selección de materiales.</i>	24
2.2.2 El acero en la industria.....	24
2.2.3 El acero.	25
2.2.3.1 <i>Sistemas de designación.</i>	26
2.2.3.2 <i>Importancia del carbono.</i>	28
2.2.3.3 <i>Diagrama hierro – carbono.</i>	29
2.2.3.4 <i>Diagrama TTT.</i>	30
2.2.3.4.1 <i>Constituyentes del acero.</i>	32
2.2.3.5 <i>Aceros aleados.</i>	36
2.2.3.6 <i>Aceros resistentes a la corrosión.</i>	38
2.2.3.7 <i>Aceros estructurales.</i>	39
2.2.3.8 <i>Aceros para herramienta.</i>	39
2.2.4 Acero AISI - SAE 1045 (UNS G10450).	40
2.2.5 Normas ASTM.	41
2.2.6 Ensayos de materiales.....	42
2.2.6.1 <i>Ensayo de tracción.</i>	43
2.2.6.2 <i>Ensayo de compresión.</i>	44
2.2.6.3 <i>Ensayo de choque o de impacto.</i>	44
2.2.6.4 <i>Ensayos de dureza</i>	45
2.2.6.5 <i>Ensayo Jominy.</i>	49
2.2.7 Propiedades mecánicas.....	51
2.2.7.1 <i>Dureza</i>	51
2.2.7.2 <i>Resistencia a la tracción (S_u).</i>	52
2.2.7.3 <i>Tenacidad.</i>	52
2.2.7.4 <i>Maquinabilidad.</i>	52
2.2.7.5 <i>Ductilidad</i>	53
2.2.7.6 <i>Resistencia al desgaste.</i>	53

2.2.7.7 <i>Templabilidad</i>	53
2.2.8 Tratamientos térmicos.....	53
2.2.8.1 <i>Etapas del tratamiento térmico</i>	54
2.2.8.2 <i>Temple</i>	55
2.2.8.3 <i>Revenido</i>	56
2.2.8.4 <i>Recocido</i>	57
2.2.8.5 <i>Normalizado</i>	58
2.2.8.6 <i>Medios de enfriamiento</i>	59
2.2.8.7 <i>Tratamiento criogénico</i>	62
2.2.8.8 <i>Austenización</i>	65
2.2.8.9 <i>Transformación martensítica</i>	65
2.2.9 Metalografía.....	67
2.2.9.1 <i>Ensayo metalográfico</i>	68
2.2.9.2 <i>Equipos</i>	69
2.1 Definición de Términos Básicos.....	69
2.1.1 <i>Definiciones básicas</i>	69
2.1.2 <i>Lista de símbolos</i>	69
CAPITULO III.....	71
METODOLOGÍA.....	71
3.1 Métodos y alcance de la investigación.....	71
3.1.1 <i>Método de investigación</i>	71
3.1.2 <i>Nivel de investigación</i>	72
3.1.3 <i>Tipo de investigación</i>	72
3.2 <i>Diseño de la investigación</i>	73
3.2.1 <i>Diseño factorial 3x2</i>	73
3.3 <i>Población y muestra</i>	76
3.4 <i>Técnicas e Instrumentos de recolección de datos</i>	77
3.5 <i>Técnicas de procesamiento de datos</i>	79
CAPITULO IV.....	80
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	80
4.1 <i>Resultados del tratamiento y análisis de la información</i>	80
4.1.1 <i>Preparación de probetas</i>	80
4.1.2 <i>Temperaturas del proceso</i>	82
4.1.3 <i>Tiempos de permanencia del proceso</i>	83

4.1.4 Tratamiento térmico de las probetas.....	84
4.1.4.1 Temple convencional.....	84
4.1.4.2 Criogenización.....	86
4.1.4.3 Revenido.....	88
4.1.5 Análisis de dureza.....	89
4.1.6 Análisis metalográficos.....	93
4.1.6.1 Resultados del análisis metalográfico.....	99
4.2 Análisis estadísticos de los resultados.....	102
4.2.1 Análisis factorial.....	102
4.2.2 Análisis de varianza.....	105
4.2.3 Análisis de residuos.....	107
4.3 Prueba de Hipótesis.....	109
4.4 Discusión de Resultados.....	110
4.4.1 Interpretación de los resultados.....	110
4.4.2 Comparación de los resultados.....	111
4.4.3 Consecuencias teóricas.....	115
4.4.4 Aplicaciones prácticas.....	115
CAPITULO V.....	116
ASPECTOS ADMINISTRATIVOS.....	116
5.1 Presupuesto.....	116
5.1.1 Costos individuales.....	116
5.1.2 Costos totales.....	118
5.2 Cronograma.....	119
CONCLUSIONES.....	121
RECOMENDACIONES.....	123
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	124
ANEXOS.....	127

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición de algunos aceros según UNS.	26
Tabla 2. Aplicaciones de algunos aceros.	27
Tabla 3. Composición química del acero SAE 1045.	40
Tabla 4. Normas más representativas de los métodos de ensayos.	42
Tabla 5. Temperaturas recomendadas para el temple de aceros de 0,1% a 1,4% de C. .	56
Tabla 6. Temperaturas recomendadas para el recocido de aceros para herramienta.	58
Tabla 7. Temperaturas recomendadas para aceros al carbono.	58
Tabla 8. Representación matricial.	73
Tabla 9. Registro de datos de diseño 3x2 de niveles mixtos.	74
Tabla 10. Determinación de la población.	76
Tabla 11. Determinación de la muestra para el temple convencional.	77
Tabla 12. Determinación de la muestra del tratamiento térmico criogénico.	77
Tabla 13. Instrumento de análisis experimental, diseño factorial de niveles mixtos.	79
Tabla 14. Clasificación de probetas para temple convencional.	82
Tabla 15. Clasificación de probetas para temple con extensión criogénica.	82
Tabla 16. Temperaturas del proceso térmico extraídas del catálogo.	82
Tabla 17. Tiempos del proceso térmico.	83
Tabla 18. Valores de dureza de las probetas templadas en agua.	90
Tabla 19. Valores de dureza de las probetas templadas en agua + criogénico.	90
Tabla 20. Valores de dureza de las probetas templadas en aceite.	91
Tabla 21. Valores de dureza de las probetas templadas en aceite + criogénico.	91
Tabla 22. Valores de dureza de las probetas templadas en salmuera.	92
Tabla 23. Valores de dureza de las probetas templadas en salmuera + criogénico.	92
Tabla 24. Designación de las probetas para ensayo metalográfico.	93
Tabla 25. Resultados del análisis metalográfico.	99
Tabla 26. Diseño factorial 3x2.	103
Tabla 27. Análisis de varianza.	105
Tabla 28. Tabla F de Fisher.	109
Tabla 29. Costos del material base.	116
Tabla 30. Costos de mecanizado.	117
Tabla 31. Costos del tratamiento térmico convencional y criogénico.	117

Tabla 32. Costos del ensayo metalográfico.	118
Tabla 33. Costos totales de investigación.	118
Tabla 34. Cronograma de actividades	119
Tabla 35. Matriz de consistencia.....	128
Tabla 36. Operacionalización de variables.....	131

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Derrame del petróleo al mar debido a falla en la turbina del turbogenerador.	2
Figura 2. Falla de desgaste del turbogenerador en la Industria celulosa.....	3
Figura 3. Incendio en un horno de la industria petroquímica por fractura del piñón.....	4
Figura 4. Falla de sujeción en los pernos del reductor de la industria celulosa.	5
Figura 5. Accidente aéreo debido a la falta de reparaciones.....	6
Figura 6. Eje de acero SAE 1045 de un reductor con efectos de grieta.	8
Figura 7. Sistema de designación de los aceros.	27
Figura 8. Diagrama del sistema hierro - carbono.	30
Figura 9. Diagrama TTT del acero (0,5% C).	31
Figura 10. Diagrama TEC del acero.....	32
Figura 11. Red cristalina BCC de la fase ferrita del acero.	33
<i>Figura 12.</i> Red cristalina FCC de la fase austenita.	34
Figura 13. Red cristalina BTC de la fase martensita.	35
Figura 14. Diagrama TEC del acero SAE 1045.....	41
Figura 15. Diagrama esfuerzo - deformación, la zona elástica y plástica del acero.....	44
Figura 16. Prueba de impacto mediante los métodos Charpy e Izod.	45
Figura 17. Características generales del ensayo de dureza y fórmulas para el cálculo....	46
Figura 18. Conversiones de dureza.	48
Figura 19. Probeta Jominy normal.	50
Figura 20. Forma de obtener la curva Jominy de un acero.	50
Figura 21. Probeta Jominy tipo L.	51
Figura 22. Representación esquemática de las etapas del tratamiento térmico.	54
Figura 23. Esquema del temple y revenido de los aceros.	57
Figura 24. Transformación de martensita bajo cero.	62
Figura 25. Arreglo molecular de una estructura templada.	64
Figura 26. Arreglo molecular de una estructura tratada criogénicamente.....	64
Figura 27. Diagrama de causa y efecto.	78
Figura 28. Análisis estadístico de los resultados.....	79
Figura 29. Esquema referencial de probetas.	81
Figura 30. Probetas mecanizadas.....	81
Figura 31. Control de temperatura de los tratamientos térmicos.	83

Figura 32. Esquema del proceso de temple en agua y aceite.	84
Figura 33. Esquema del proceso de temple en salmuera.	85
Figura 34. Horno de temple.	85
Figura 35. Probetas tratadas por temple convencional en agua, aceite y salmuera.	86
Figura 36. Esquema del proceso criogénico en agua y aceite.	87
Figura 37. Esquema del proceso criogénico en salmuera.	87
Figura 38. Probetas tratadas criogénicamente en agua, aceite y salmuera.	88
Figura 39. Horno de revenido.	88
Figura 40. Durómetro PETRI F - 26 para ensayos de dureza.	90
Figura 41. Detalle referencial del ensayo de dureza.	92
Figura 42. Microestructura del acero, temple en agua a 500x (Superficie).	93
Figura 43. Microestructura del acero, temple en agua a 500x (Núcleo).	94
Figura 44. Microestructura del acero, temple en aceite a 500x (Superficie).	94
Figura 45. Microestructura del acero, temple en aceite a 500x (Núcleo).	95
Figura 46. Microestructura del acero, temple en salmuera a 500x (Superficie).	95
Figura 47. Microestructura del acero, temple en salmuera a 500x (Núcleo).	96
Figura 48. Microestructura del acero, temple criogénico en agua a 500x (Superficie).	96
Figura 49. Microestructura del acero, temple criogénico en agua a 500x (Núcleo).	97
Figura 50. Microestructura del acero, temple criogénico en aceite a 500x (Superficie). ...	97
Figura 51. Microestructura del acero, temple criogénico en aceite a 500x (Núcleo).	98
Figura 52. Microestructura del acero, temple criogénico con sales 500x (Superficie).	98
Figura 53. Microestructura del acero, temple criogénico con sales 500x (Núcleo).	99
Figura 54. Enfriamiento convencional en el diagrama TEC.	100
Figura 55. Enfriamiento criogénico en el diagrama TTT.	101
Figura 56. Temple convencional sobre el diagrama TTT.	101
Figura 57. Tratamiento criogénico en diagrama TTT.	102
Figura 58. Gráfica de efectos principales.	104
Figura 59. Gráfica de interacción.	105
Figura 60. Gráfico de Pareto para efectos estandarizados.	106
Figura 61. Gráfica de residuos según el orden de observación.	107
Figura 62. Gráfica de histograma de residuos.	108
Figura 63. Gráfica de probabilidad normal.	108

RESUMEN

El estudio titulado Mejora de la dureza del acero SAE 1045 mediante la aplicación del tratamiento térmico criogénico tuvo como objetivo mejorar la dureza del acero SAE 1045; es un estudio que buscó impulsar los procesos tradicionales de tratamiento térmico, por lo que comprende la aplicación de la criogenia; pretende destacar los cambios sobre las características mecánicas y microestructurales del acero al ser sometido a procesos de tratamiento térmico criogénico. Se empleó una metodología de tipo aplicado, el nivel del estudio es experimental y plantea un diseño experimental mediante el desarrollo de un diseño factorial 3x2; la población se constituye por probetas cilíndricas de acero SAE 1045; la validez de la investigación tiene como fundamento el análisis metalográfico, la cual es una técnica para evidenciar los cambios producidos en la microestructura del acero.

Se realizó tratamientos de temple convencional y temple con extensión criogénica al acero SAE 1045, especificando las temperaturas de temple y revenido, las cuales se realizan a 850 °C por 1 hora y a 200 °C por 2 horas respectivamente; se propone una variación de los medios de enfriamiento, agua, aceite y salmuera a una temperatura de 22 °C, 50 °C y 150 °C respectivamente; la extensión criogénica se realizó a -196 °C por un intervalo de 2 horas. La investigación concluye que la aplicación del tratamiento criogénico resulta ser altamente eficiente con relación a los procesos tradicionales de temple, ya que favorece la transformación de austenita retenida; por lo tanto, al haber menor contenido de esta en la microestructura, la dureza es mayor; llegando a un incremento de 54,83 HRC, 40,56 HRC y 51,17 HRC al tratar en agua, aceite y salmuera respectivamente, seguido de una extensión criogénica; mientras que un temple convencional proporciona durezas de 33 HRC y 29 HRC en agua y aceite respectivamente, de acuerdo al catálogo de aceros.

Palabras clave: Tratamiento criogénico, tratamientos térmicos, análisis de dureza, análisis metalográfico, austenita retenida, SAE 1045.

ABSTRACT

The study entitled Improving the hardness of steel SAE 1045 by applying the cryogenic heat treatment aimed to improve the hardness of steel SAE 1045; is a study that sought to promote the traditional processes of thermic treatment, so it includes the application of cryogenics; It aims to highlight changes in the mechanical and microstructural characteristics of steel when subjected to cryogenic thermal treatment processes. A methodology of applied type was used, the level of the study is experimental and proposes an experimental design through the development of a 3x2 factorial design; the population is constituted by steel cylindrical test tubes SAE 1045; The validity of the investigation is based on the metallographic analysis, which is a technique to show the changes produced in the microstructure of steel.

Conventional hardening and tempering treatments were carried out with cryogenic extension to SAE 1045 steel, specifying quenching and tempering temperatures, which are carried out at 850 ° C for 1 hour and at 200 ° C for 2 hours respectively; a variation of the cooling media, water, oil and brine is proposed at a temperature of 22 ° C, 50 ° C and 150 ° C respectively; the cryogenic extension was carried out at -196 ° C for an interval of 2 hours. The investigation concludes that the application of the cryogenic treatment turns out to be highly efficient in relation to the traditional processes of tempering, since it favors the transformation of retained austenite; therefore, to have smaller content of this in the microstructure, the hardness is greater; reaching an increase of 54.83 HRC, 40.56 HRC and 51.17 HRC when treating in water, oil and brine respectively, followed by a cryogenic extension; while a conventional hardening provides hardness of 33 HRC and 29 HRC in water and oil respectively, according to the steel catalog.

Keywords: Cryogenic treatment, thermic treatments, hardness analysis, metallographic analysis, retained austenite, SAE 1045.

INTRODUCCIÓN

Actualmente la tecnología de los tratamientos térmicos es imprescindible para el desarrollo de procesos industriales, ya que estos intervienen durante la producción de materiales destinados a la ingeniería y construcción.

La investigación parte de la formulación del problema: ¿Puede la aplicación del tratamiento térmico criogénico favorecer la mejora de la dureza del acero SAE 1045?

De este modo que se plantea el objetivo: Evidenciar la mejora de la dureza del acero SAE 1045 mediante la aplicación del tratamiento térmico criogénico.

Los aspectos que motivan el desarrollo de esta investigación son el desarrollo y avance tecnológico, la implementación de nuevos métodos y procesos, interés social y científico.

La investigación tiene como finalidad mejorar la dureza del acero SAE 1045 (0,42 - 0,50 % C, 0,4 % Ni, 0,1 % Mo, 0,4 % Si, 0,5 - 0,8 % Mn, 0,02 - 0,04 % S, 0,4 % Cr y 0,035 % P), mediante procesos de tratamiento térmico criogénico. Adicionalmente se pretende implementar la extensión criogénica a los procesos de temple convencional y evidenciar los efectos que genera sobre las propiedades mecánicas del material, específicamente la dureza.

Es un tipo de investigación tecnológica, el nivel del estudio es experimental, se desarrolla el diseño de investigación experimental mediante el diseño factorial 3x2, la población está constituida por probetas cilíndricas de acero SAE 1045. Para el análisis de las variables se plantea un diseño factorial 3x2 y para validar la hipótesis se realiza el análisis de varianza y el uso de estadísticos F.

Por último, para el desarrollo de los procesos de tratamiento térmico, se especifican las condiciones necesarias de tiempo y temperatura mediante el uso de catálogos; el material designado para esta investigación es un acero SAE 1045, corresponde a un acero al carbono para la fabricación de elementos de máquina (coronas, piñones, pernos, tuercas, tornillos, chavetas). Finalmente se analizan las características mecánicas del acero mediante ensayos de dureza y pruebas metalográficas.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

En este capítulo se define el planteamiento del estudio mediante la caracterización del problema, estableciendo los objetivos generales y específicos, hipótesis y variables pertinentes al desarrollo de la investigación, finalmente la justificación e importancia.

1.1 Planteamiento del Problema

El avance de la ciencia y la tecnología a nivel mundial han obligado a las industrias a tener la prioridad en el diseño de materiales para ingeniería; el acero es uno de los materiales más empleados y requeridos en el campo de construcción y diseño, debido a que posee diversas características y propiedades mecánicas. La competencia industrial exige una alta calidad en sus productos ya que la aplicación que le da la ingeniería a estos materiales está enfocado a la constante ejecución, sometiéndolos a diversas condiciones de trabajo; en consecuencia, se originan efectos como deformación, fractura o desgaste, asociadas a que el material falle, debido a que las cargas o esfuerzos que soportan son mayores a la resistencia mecánica del material; existen otras condiciones como el mal uso, los errores de montaje, errores de fabricación, errores de diseño, un mantenimiento inadecuado, la mala selección del material, tratamientos térmicos incorrectos o condiciones no previstas; esto se ha convertido en los problemas más notorios para el continuo avance de la ingeniería.

Un simple problema en la selección de los materiales de ingeniería se puede ver reflejado en grandes pérdidas materiales y de producción. La falla de diseño se evidencia en una serie de sucesos, en una investigación elaborada por el departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Concepción de Chile (1), sobre el análisis de fallas en los equipos industriales; se evidencia algunos incidentes causados por fallas en los materiales

específicamente los aceros y sus aplicaciones más importantes al ser sometidos a diversas condiciones.

La primera situación en la que una tubería para descarga de petróleo llega al punto de ruptura, provocando un daño ambiental de gran magnitud y generando altos costos. El análisis de falla mostró problemas de soldadura en la tubería, ocasionado por altos esfuerzos a causa de un desnivel en el fondo marino.

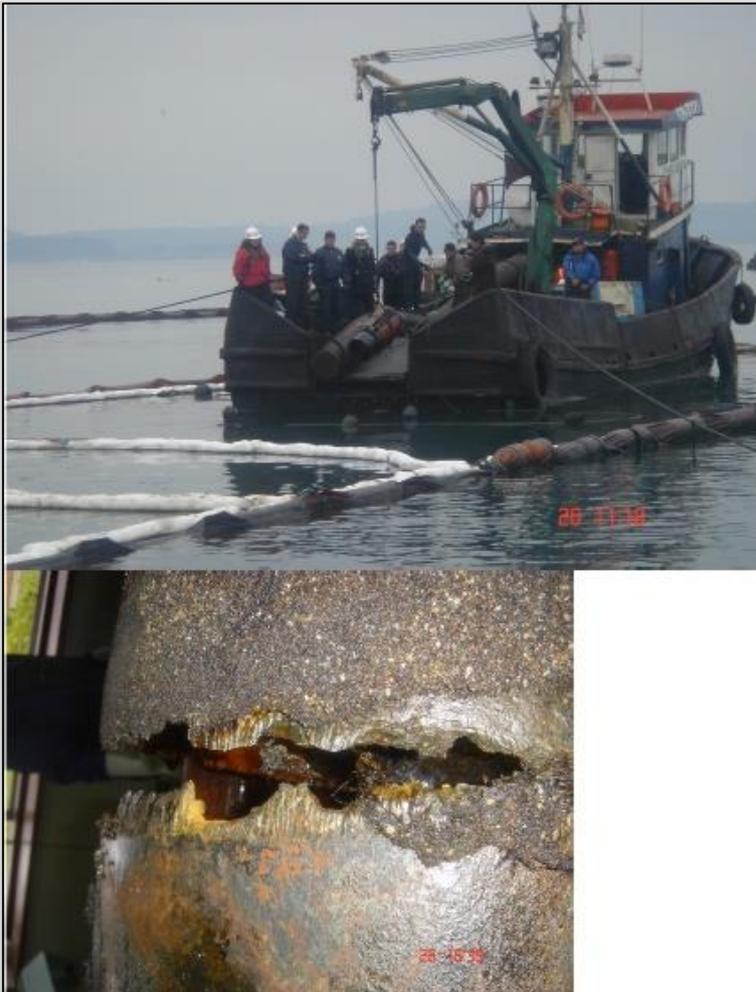


Figura 1. Derrame del petróleo al mar debido a falla en la turbina del turbogenerador.

Nota. Fuente: (1).

También se observa la presencia de una falla en la turbina del turbogenerador. Durante esta situación se llegaron a fracturar los álabes al momento de ponerlos en marcha; la investigación pudo señalar una falla en el material de sujeción. Los álabes se soltaron llegando a dañar la carcasa del turbogenerador.



Figura 2. Falla de desgaste del turbogenerador en la Industria celulosa.

Nota. Fuente: (1).

De igual manera sucede en una industria petroquímica; se ocasionó un incendio durante varias horas; las pérdidas se reflejan en equipos dañados y pérdidas por el paro de la producción. La investigación manifestó una deformación debido a fluencia lenta en los soportes de las tuberías, provocado por los problemas de maniobra y operación.



Figura 3. Incendio en un horno de la industria petroquímica por fractura del piñón.

Nota. Fuente: (1).

Se evidenció una falla en el reductor del turbogenerador, asociada a una de las líneas de producción de una celulosa lo que conllevó a la fractura de uno de los dientes correspondientes al piñón del reductor. La empresa solicitó llevar a cabo una investigación para determinar la posibilidad de funcionamiento del equipo con cargas menores. En consecuencia, los costos asociados resultaron muy altos.

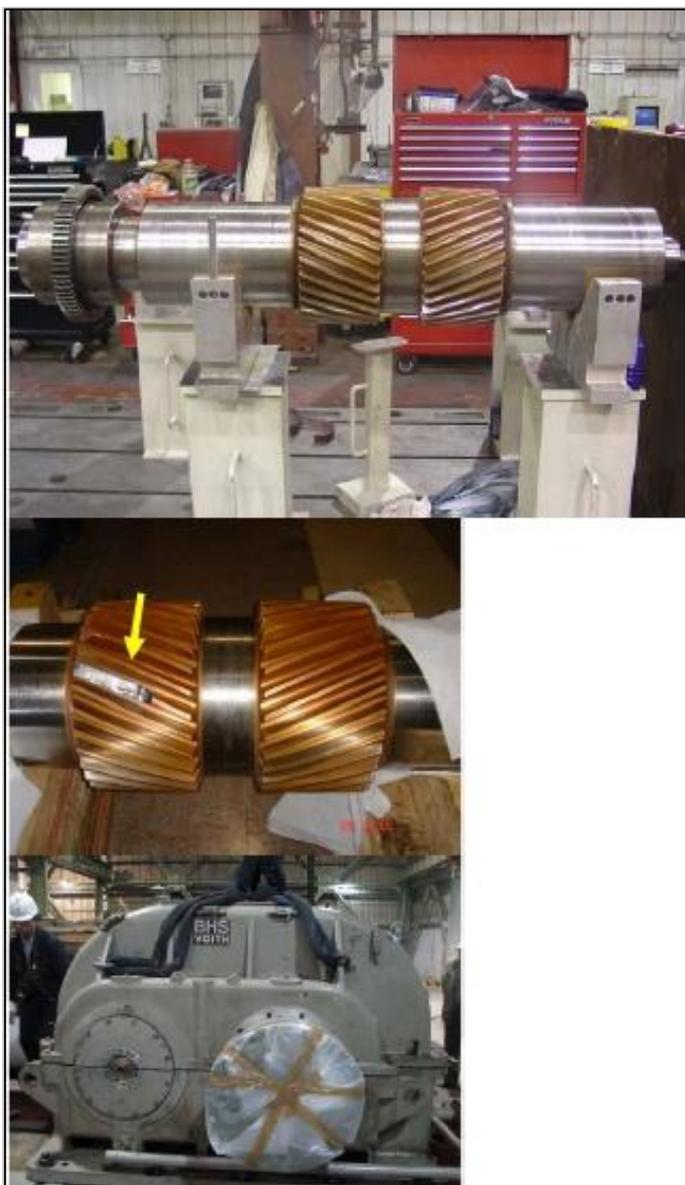


Figura 4. Falla de sujeción en los pernos del reductor de la industria celulosa.

Nota. Fuente: (1).

Asimismo, se puede evidenciar un incidente ocasionado en el momento de aterrizaje de un avión Boeing 707 a causa de una falla en los pernos de sujeción en uno de sus motores. Al realizar la investigación se pudo identificar una falla por fatiga. Al evidenciar estos fenómenos se puede concluir que, aunque la falla sea mínima, tanto las pérdidas humanas y materiales pueden llegar a ser incalculables.

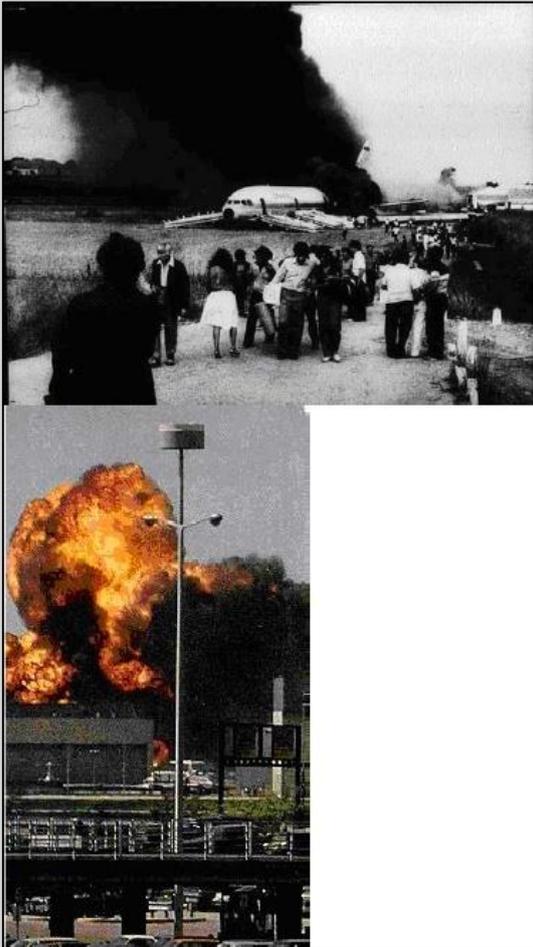


Figura 5. Accidente aéreo debido a la falta de reparaciones.

Nota. Fuente: (1).

Por otra parte en la investigación elaborada por Núñez Gonzales (2), sobre fallas en los tratamientos térmicos para aceros de herramienta señala que: “En la producción de cualquier herramienta (...) el fabricante tiene el problema de producir una herramienta que deberá ser bastante dura para resistir las condiciones de servicio y además dúctil para no romperse o fallar en uso (...)” (2 pág. 22).

Para lograr estas condiciones apropiadas nos menciona: “En el planteamiento de diseño debe considerarse el tipo de acero, método de tratamiento térmico y en algunos casos el equipo que se usará para el tratamiento térmico (...)” (2 pág. 24).

Asimismo, no debemos dejar de lado las especificaciones del proceso. Con lo que se llega a la conclusión, para lograr propiedades específicas en los materiales, se emplean los tratamientos térmicos.

De igual manera, en un estudio realizado sobre los tratamientos térmicos de los aceros, se menciona: "La manufactura de maquinaria, automóviles, aviones modernos y vehículos especiales, así como los productos de consumo, no sería posible sin la tecnología de los tratamientos térmicos de los metales" (3 pág. 23).

Los tratamientos térmicos nos ayudan al momento de seleccionar un material durante el proceso de diseño, ya que estos permiten mejorar sus características mecánicas, haciéndolos idóneos para diversas condiciones de trabajo; a pesar de contar con estos procesos, no debemos limitarnos a emplear solo los tratamientos térmicos tradicionales, debido a que constantemente surgen nuevas exigencias.

Sin embargo, al poner en práctica los procesos de tratamiento térmico se genera la presencia de austenita retenida en la microestructura del material, de modo que afecta su vida útil, ocasionando que los materiales presenten una estructura más blanda y no sean adecuados para condiciones exigentes.

Según Calmet (4), la presencia de austenita retenida en la microestructura al aplicar los tratamientos estándar si bien proporcionan al material una elevada dureza y apropiada tenacidad, perjudica sus características mecánicas.

Los tratamientos criogénicos resultan una gran innovación debido al potencial de mejorar considerablemente las características de los materiales y debido a que favorecen la reducción de la austenita retenida en la microestructura:

En la aplicación del tratamiento criogénico logramos un cambio interno en las piezas ya que ocurre una liberación de tensiones debido a los cambios de fase que sufre el metal en su proceso de transformación, logrando una gran reducción en la tendencia a fallas por fatiga, ya que se eliminan las líneas internas formadas por tensiones residuales que promueven y hacen más propensa esta falla reduciendo la vida útil del material, esta es otra de las razones de las mejoras de la aplicación del tratamiento criogénico (5 pág. 27).

No obstante, considero que en nuestro país es inadecuado que los tratamientos térmicos se realicen de manera artesanal, ya que existen pocas empresas que se dedican

a esta actividad y por definición son procesos controlados que para sus parámetros de calentamiento y enfriamiento requieren temperaturas y tiempos específicos. Estos procesos se caracterizan por sufrir cambios bruscos; sin embargo, estos se realizan de manera tradicional donde no hay control y por lo tanto perjudican al acero obligándolo a perder sus propiedades, de manera que se convierte en un factor negativo.

Cabe mencionar que este proceso no está limitado a un solo tipo de acero y puede ser empleado a todas sus variedades; sin embargo, en el mercado nacional existen aceros aleados con un alto valor económico ya que las materias primas como son los ferroaleantes para la fabricación de estos han incrementado sus precios y nuestro país no fabrica ferroaleantes; frente a este problema se ve conveniente mejorar las propiedades mecánicas, específicamente la dureza del acero SAE 1045 el cual es un acero de medio contenido de carbono capaz de alcanzar resistencias similares de aceros aleados, además de adquirir buenas características mecánicas.



Figura 6. Eje de acero SAE 1045 de un reductor con efectos de grieta.

Nota. Fuente: (6).

Como se muestra en la Figura 6, se logran evidenciar fenómenos de falla en un eje de acero SAE 1045 que es resultado de la propagación de grietas a causa de la fatiga que experimenta por la rotación; estas grietas avanzan en sentido antihorario debido al giro en sentido horario del eje. Esto revela que el material no trabaja de manera óptima en

condiciones de esfuerzo constante debido a sus propiedades, lo que conlleva a la necesidad de mejorar sus características mecánicas.

Finalmente el acero tratado criogénicamente podrá remplazar a diferentes tipos de aceros aleados, por ejemplo para la fabricación de pernos y piezas de alta resistencia.

1.2 Formulación del Problema

1.2.1 Problema general

Deficiencia de los aceros al ser sometidos a diversas condiciones de trabajo; con el objetivo de eliminar estas irregularidades son expuestos a procesos de tratamiento térmico, los cuales pretenden mejorar sus características mecánicas como resultado de modificar la microestructura; en investigaciones anteriores se ha demostrado que, los materiales al ser sometidos a estos procesos, adquieren características y propiedades útiles para rendir en distintas condiciones de trabajo; por el contrario se logró evidenciar que a nivel microestructural se origina la presencia de una solución sólida denominada austenita retenida, que conlleva a que el material presente una estructura blanda y dúctil, las cuales reducen su vida útil; obligándolo a perder sus características óptimas y provocando efectos como deformación, fractura o desgaste.

Con el avance de la ciencia y la tecnología surgen necesidades, de modo que se requiere la implementación de nuevos métodos que brinden mejores resultados.

La importancia de este proyecto recae en la necesidad de no contar con información conveniente a la mejora de las propiedades mecánicas del acero mediante tratamientos criogénicos, de manera que se quiere analizar el efecto que tienen dichos tratamientos en un acero SAE 1045, debido a que favorecen la transformación de austenita retenida en la microestructura.

¿Puede la aplicación del tratamiento térmico criogénico favorecer la mejora de la dureza del acero SAE 1045?

1.2.2 Problemas Específicos

- ¿Qué condiciones se requieren para aplicar un proceso de tratamiento térmico de temple convencional y temple con extensión criogénica?
- ¿Qué efectos importantes se pueden destacar sobre la dureza del acero SAE 1045 al ser sometido a procesos de tratamiento térmico convencional y criogénico?

- ¿Qué efectos importantes se pueden destacar sobre las características microestructurales del acero SAE 1045 al ser sometido a procesos de tratamiento térmico convencional y criogénico?
- ¿Cuál es el tratamiento óptimo que generará las mejores características de dureza en el acero SAE 1045 al manipular las condiciones del proceso térmico y medio de enfriamiento?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evidenciar la mejora de la dureza del acero SAE 1045 mediante la aplicación del tratamiento térmico criogénico.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar el tratamiento térmico de temple convencional y temple con extensión criogénica a las probetas de acero SAE 1045, seguido de un revenido teniendo en consideración tres medios de enfriamiento.
- Determinar la dureza de las probetas de acero SAE 1045 al someterlas a procesos de tratamiento térmico convencional y criogénico, mediante ensayos de dureza; tomando como referencia la norma ASTM E 18 - 15.
- Determinar las características y cambios microestructurales de las probetas de acero SAE 1045 al someterlas a procesos de tratamiento térmico convencional y criogénico, mediante pruebas metalográficas; tomando como referencia la norma ASTM E 3 - 95.
- Analizar la mejora de la dureza mediante el análisis estadístico de diseño factorial de dos factores (Proceso térmico y medio de enfriamiento).

1.4 Justificación e Importancia

A. En lo tecnológico

La aplicación de los tratamientos térmicos nos permite mejorar diversas características mecánicas en el acero, estos tratamientos térmicos tienen gran importancia al momento de realizar los procesos de fabricación en la industria moderna; dichos procesos pretenden endurecer o ablandar estructuras, eliminar las consecuencias de un mal mecanizado, aliviar tensiones internas o modificar total o parcialmente las características mecánicas del material.

El tratamiento criogénico es uno de los procesos en los que menos se ha profundizado ya que es una nueva implementación; existen investigaciones en las que se concluyó que, al someter aceros aleados a un temple, posteriormente a temperaturas

criogénicas y luego a un revenido final, se produce un incremento considerable en la resistencia al desgaste abrasivo, prolongando la vida útil del material. La presente investigación pretende evaluar si realmente existe un aumento considerable en la dureza del material, estableciendo un procedimiento apropiado que nos permita mejorar esta característica mecánica del material con relación a la aplicación del tratamiento térmico de temple convencional.

Para el desarrollo de la investigación no se emplearon otros tipos de acero de menor contenido de carbono como son el SAE 1020 y SAE 1040 que también son empleados para la fabricación de elementos de máquina; partiendo de que la dureza depende del contenido de carbono y estos aceros al poseer un bajo porcentaje no proporcionarían valores óptimos de dureza de modo que al evaluarlos no aportarían información relevante para el cumplimiento del objetivo de la investigación; además, al ser sometidos a procesos de tratamiento térmico no alcanzarían una fase completa de austenización por lo que en consecuencia no se conseguiría la fase martensítica que es lo que pretende el tratamiento térmico. Asimismo no se emplearon aceros de mayor contenido de carbono ni aceros de alta aleación, ya que lo que se pretende es llegar a las propiedades mecánicas que poseen tales aceros.

B. En lo social

Frente a la idea de optar por la utilización de nuevos métodos debido a que las exigencias van aumentando, se propone la utilización de los procesos criogénicos que reproduzcan las condiciones necesarias de temperatura. Este método beneficiará a todos los presentes en el área de materiales y diseño como profesionales, técnicos e investigadores; resulta de gran importancia realizar estos procesos de tratamiento térmico criogénico en los centros de investigación, actividad que dará un mayor enfoque para reforzar la teoría, al mismo tiempo conocer las ventajas y desventajas que inciden al realizarlo.

En la actualidad el estudio de los materiales es de gran importancia para la economía y el avance tecnológico, en especial los materiales metálicos por la necesidad de ser utilizados en distintas áreas de aplicación, además de que es posible mejorar sus propiedades y características mecánicas de manera sencilla.

C. En lo académico

Considero de gran importancia la implementación de los tratamientos criogénicos, de modo que los estudiantes puedan identificar los cambios que se producen en la microestructura de un material al ser expuesto a procesos de temperatura. Es un tema innovador que aporta una variante a la ejecución del proceso de tratamiento térmico de temple convencional; la investigación tiene el objetivo de brindar un aporte teórico a todos los estudiantes para que puedan llevarlos a la práctica y logren evidenciar los cambios que experimenta el acero, así reforzando las clases teóricas que reciben durante los diferentes niveles de estudio; además, pueda servir como respaldo para investigaciones futuras.

D. En lo científico

Es muy importante dar a conocer a todas las personas interesadas en la ciencia de los materiales, investigadores e ingenieros, todo lo relacionado a la selección y aplicación de materiales; por lo que el profesional debe identificar y comprender las propiedades asociadas a estos, asimismo, debe saber porque existen tales propiedades y como lograr modificarlas.

Se pretende brindar un conocimiento con respecto a la selección de los aceros; además, poder especificar las características mecánicas y requisitos que un material debe tener en cuenta para la fabricación de diversos productos, tomando en consideración las condiciones a las que serán expuestos.

También busca brindar la capacidad y el conocimiento necesario para evaluar las características mecánicas de los aceros mediante ensayos; asimismo proporcionar el conocimiento respecto a los procesos para modificar dichas características.

E. En lo económico

El método criogénico resulta ser muy interesante al ser una innovación tecnológica; asimismo, es factible realizarse por lo que los gastos no son muy elevados. La aplicación del proceso criogénico beneficiará de manera potencial los efectos que proporcionan los tratamientos térmicos, de modo que se puedan reproducir las condiciones necesarias para obtener dichos resultados.

Al tener la necesidad de contar con aceros aleados por la característica de poseer resistencias más altas, pero al tener un alto valor económico se puede optar por mejorar las propiedades mecánicas de algunos aceros de menor costo con el fin de tratarlos y conseguir las características de tales aceros.

Al ser una extensión del proceso térmico, solo se cubre este a un costo de S/. 5,90 correspondiente a 1 kg de acero, mientras que para un proceso de tratamiento térmico el cual incluye temple y revenido seguido de un enfriamiento en diversas sustancias el costo es de S/. 12,86 el kg de acero.

1.5 Hipótesis

1.5.1 Hipótesis general

H_1 : Si la aplicación del tratamiento térmico criogénico realizado de la manera adecuada mediante una correcta configuración del proceso térmico y una apropiada selección del medio de enfriamiento, se mejorará la dureza del acero SAE 1045.

H_0 : Si la aplicación del tratamiento térmico criogénico realizado de la manera adecuada mediante una correcta configuración del proceso térmico y una apropiada selección del medio de enfriamiento, no se mejorará la dureza del acero SAE 1045.

1.5.2 Hipótesis específicas

- Las condiciones de tiempo y temperatura del proceso térmico y elección del medio de enfriamiento generan un proceso adecuado de temple convencional y temple con extensión criogénica.
- El proceso de tratamiento térmico criogénico proporciona valores más altos de dureza que un proceso de tratamiento térmico convencional.
- El proceso de tratamiento térmico criogénico proporciona una transformación más completa y una microestructura más fina y uniforme que un proceso de tratamiento térmico convencional.
- La adecuada configuración del proceso térmico criogénico y elección del medio de enfriamiento proporciona mejores características de dureza en el acero SAE 1045 que los procesos de tratamiento térmico convencional.

1.6 Variables

1.6.1 Variable Independiente

Tratamiento Térmico Criogénico.

- Proceso térmico
- Medio de enfriamiento

1.6.2 Variable dependiente

- Dureza del acero SAE 1045.

1.7 Descripción de las variables

1.7.1 Definición Conceptual de la variable

- VI: Tratamiento Térmico Criogénico

El tratamiento criogénico no es otra aplicación diferente a los tratamientos térmicos estándar sino que es una extensión del proceso térmico por lo cual presenta la misma disposición que estos, solo añade una variación al medio de enfriamiento; este tratamiento se aplica en los aceros que después del temple en agua o en aceite, conservan todavía en su estructura una cierta cantidad de austenita residual sin transformar (6).

- VD: Dureza del acero SAE 1045

La dureza da una indicación general de la resistencia del material, de su resistencia al rayado y al desgaste. Por lo que, por ejemplo, el acero es más duro que el aluminio y el aluminio es más duro que el plomo (7).

El incremento en la dureza del acero es la característica que se obtiene como resultado de realizar un proceso de tratamiento térmico; dependerá de la efectividad del medio de enfriamiento que experimente y la transformación microestructural que estos le proporcionen.

1.7.2 Definición Operacional de la variable

- VI: Tratamiento Térmico Criogénico

Depende del proceso térmico y medio de enfriamiento que desarrolle; por lo que se definirán los parámetros de tiempo, temperatura y medio de enfriamiento. Se desarrollará un proceso de temple convencional con la diferencia que se aplicará una extensión criogénica al proceso y se emplea con el propósito de transformar la austenita que quedó como resultado del proceso convencional.

- VD: Dureza del acero SAE 1045

La optimización de la dureza del acero SAE 1045 depende del proceso de calentamiento y enfriamiento que experimente; las variaciones de dureza se medirán en la escala Rockwell C para parámetros de tiempo y temperatura constantes para todos los procesos, estos valores se evalúan sobre la sección transversal del material.

1.8 Delimitación de la Investigación

La presente investigación comprende lo siguiente:

- Especificaciones para el proceso térmico, elección del medio de enfriamiento de acuerdo con las características que se desean conseguir.

- Medida de la dureza de las probetas tratadas térmicamente y análisis de los valores obtenidos entre procesos.
- Análisis de las características microestructurales del acero SAE 1045 mediante pruebas metalográficas.

1.9 Limitaciones de la Investigación

A. Limitación conceptual

La presente investigación nos permitió identificar la influencia de los procesos de tratamiento térmico criogénico sobre las propiedades mecánicas del material, específicamente los efectos en la dureza del acero SAE 1045, así como las ventajas y desventajas que estos proporcionan; se recomienda que los equipos con los que se cuenta deben ser modernos y calibrados de manera frecuente. Además, se debería adquirir nuevos equipos para tener al alcance la medición de otras propiedades.

B. Limitación temporal

La presente investigación se realizó durante el periodo de septiembre del 2018 a diciembre del 2018.

C. Limitación espacial

La investigación se realizó en las instalaciones de la Corporación Sudamericana de Aceros Especiales S.A.C - CORPSAE, ubicada en Av. Oscar Benavides (ex-colonial) N°1244 anteriormente llamada Aceros del Perú S.A.C, específicamente en la planta de tratamiento térmico; de igual manera se realizaron pruebas en el Laboratorio de Control de Calidad, con el manejo de equipos para ensayos de dureza.

Los ensayos metalográficos se llevaron a cabo en los laboratorios de la Universidad Nacional de Ingeniería UNI, ubicada en Av. Tupac Amaru N°210, El Rímac; específicamente en el Laboratorio de Ensayo de Materiales.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

Durante este capítulo se define el marco teórico concerniente al problema de investigación, mediante la formulación de los antecedentes del problema, bases teóricas y definición de términos básicos correspondientes al desarrollo de la investigación.

2.1 Antecedentes del Problema

2.1.1 Antecedentes Nacionales

La investigación “Mejora de las propiedades mecánicas del acero SAE 1040 mediante procesos de tratamiento térmico”, en la Universidad Nacional de Ingeniería, en el año 2011, tuvo una metodología apropiada para el análisis de las propiedades mecánicas del acero mediante procesos de tratamiento térmico de temple y revenido (8). La investigación llegó a las siguientes conclusiones:

1. Al aplicar una temperatura de revenido entre 200 °C y 275 °C, se comprobó que la resistencia máxima a la tracción disminuye desde los 126,5 kg/mm² a 123,5 kg/mm², por otro lado, la dureza disminuye desde los 52,2 HRC a 47 HRC, pero la resistencia al impacto aumenta de 21 a 23 Joule, de esta manera se comprueba el aumento en la tenacidad.
2. Al emplear una temperatura de revenido entre 275 °C y 350 °C la resistencia máxima a la tracción varía entre 123,5 a 110 kg/mm², mientras que la dureza disminuye de 47 a 39,1 HRC, pero la resistencia al impacto incrementa de 23 a 33,3 Joule, mejorando la tenacidad del material.

3. Al emplear una temperatura de revenido entre 350 °C y 425 °C la resistencia máxima a la tracción varía entre 110 a 103 kg/mm², la dureza disminuye de 39,1 a 37,0 HRC, pero la resistencia al impacto aumenta de 33,3 a 46,2 Joule, mejorando su tenacidad.

El estudio titulado “Aplicación de la criogenia en los tratamientos térmicos de los aceros para trabajo en frío K100 (AISI D3)”, en la Pontificia Universidad Católica del Perú, en el año 2009, tuvo una metodología para la realización de ensayos y análisis con respecto a los tratamientos criogénicos dando a conocer que la aplicación de estos se traduce en un mejor rendimiento e incremento de la vida útil del material (4). El estudio llegó a las siguientes conclusiones:

1. En el proceso de temple convencional se encontraron los valores de austenita retenida más altos, en consecuencia, fue donde se obtuvieron los valores de dureza más bajos. Para las probetas que fueron tratadas con temple + criogenia a -193 °C, se obtuvieron los contenidos más bajos de austenita retenida, en consecuencia, se manifestaron los valores más altos de dureza.
2. Los resultados que se obtienen al realizar el ensayo de difracción por rayos X en el tratamiento de temple + criogenia a -193 °C, revelan una reducción en el contenido de austenita residual y se verifica un incremento de martensita. Por lo tanto, a medida que la temperatura de tratamiento térmico es menor, el contenido de austenita retenida también se reduce.
3. Para mejores características de la resistencia al desgaste abrasivo, se comprueban que los mejores resultados se consiguen al realizar un tratamiento térmico sin un revenido posterior.
4. La idea central de realizar los ensayos fue medir la presencia de austenita retenida; posteriormente al haber llevado a cabo los procesos de tratamiento térmico y criogénico, se concluye que existe una disminución de austenita retenida en la microestructura, no obstante, no desaparece en su totalidad.

La investigación titulada “Evaluación de las propiedades mecánicas del acero D3 sometido a tratamientos térmicos convencionales y un tratamiento criogénico adicional”, en la Universidad de Santa María, en el año 2014, desarrolló la metodología para llevar a cabo la evaluación y análisis de las propiedades mecánicas del acero mediante la realización de ensayos (9). El estudio llegó a las siguientes conclusiones:

1. El objetivo principal de realizar ensayos fue medir la variación en la dureza de las probetas tratadas, el tratamiento alcanzó la temperatura deseada de 940 °C; por lo tanto, se puede afirmar que luego de aplicar los tratamientos térmicos y criogénicos, se obtiene una gran variación en la dureza.
2. Durante el tratamiento térmico convencional se obtuvieron los tamaños de grano más altos, donde se comprobaron los valores más bajos de dureza; mientras que en el tratamiento térmico de temple + criogenia a -193 °C, se encontraron los granos de menor tamaño mostrando una estructura más fina, por lo tanto, se lograron valores más altos de dureza.
3. Mediante la aplicación de bajas temperaturas durante el tratamiento térmico criogénico, la dureza del acero aumenta. No obstante, la diferencia de emplear temperaturas a -80 °C con relación a la de -193 °C, la variación en los resultados es mínima; esto indica que, desde el punto de vista de la ingeniería, no es recomendable el uso de temperaturas inferiores a la de -80 °C; aun así, en lo teórico se puede afirmar que, a temperaturas más bajas, la dureza aumenta.

2.1.2 Antecedentes Internacionales

La investigación “Fallas en los tratamientos térmicos para aceros de herramienta”, en el Colegio Nacional de educación profesional técnica, en México el año 1990, tuvo una metodología para la prevención, así como posibles soluciones de las anomalías presentes en los aceros de herramienta desde su obtención, además, aporta información basada en desarrollos prácticos (2). El estudio llegó a las siguientes conclusiones:

1. La temperatura a la que se realiza el tratamiento térmico y el tiempo de permanencia son las variables de mayor importancia al momento de realizar estos procesos térmicos, ya que influyen en las características finales de los materiales tratados térmicamente.
2. Es necesario especificar las condiciones de tiempo y temperatura a las que se realizará el proceso de tratamiento térmico, de modo que si alguno de estos parámetros se excede o es menor a lo requerido, perjudicará las propiedades mecánicas del material en lugar de mejorarlas.
3. El tratamiento térmico que se realice a un acero dependerá de sus condiciones iniciales y de las propiedades mecánicas que se desean conseguir. Las características

que obtenga la herramienta se establecen de acuerdo con el uso y condiciones de trabajo a las que será aplicado el material.

El estudio titulado “Tratamientos térmicos de los aceros”, en la Universidad Autónoma de Nuevo León, en México, el año 1996, se desarrolló bajo la metodología basada en los procesos de tratamientos térmicos, especificaciones y procedimientos a seguir durante la realización de estos (3). El estudio tiene las siguientes características:

1. Brindar una base teórica sobre los procesos de tratamiento térmico que puedan aplicarse al acero, sus principios fundamentales, variables que se toman en consideración durante el proceso, influencia sobre las características del acero, propiedades físicas, propiedades químicas y mecánicas que se modifican.
2. Reunir toda la información referente a los procesos de tratamiento térmico del acero de modo que pueda ser empleado como manual de información o apoyo hacia todas las personas que se desempeñan en esta área como ingenieros, técnicos, investigadores y estudiantes.

En la investigación titulada “Secuencia de procesamiento de aceros de maquinaria”, en la Universidad Nacional Autónoma de Nuevo León, en México en el año 1996, se usó la metodología para una correcta secuencia de procesamiento para los aceros de maquinaria, las condiciones óptimas en las que se debe encontrar el material para ser tratado térmicamente (10). El estudio llegó a las siguientes conclusiones:

1. Se demostró que las variaciones que existe entre los aceros para maquinaria, aceros herramienta y aceros inoxidable al ser sometidos a procesos de tratamiento térmico se debe al uso de diferentes marcas comerciales, en los que se puede identificar que la composición química, varía de uno a otro, incluso estando dentro de la norma.
2. En caso de que no se realice un maquinado al material, no responderá de manera adecuada y no obtendrá una alta dureza, la razón de esto, es que el acero viene decarburado en la superficie. Por lo tanto, se recomienda que al obtener un acero, se debe eliminar el material superficial.
3. Si se toma en consideración, la selección del material, un buen maquinado, un adecuado diseño de la pieza, un control adecuado del tratamiento térmico y la selección de un medio de enfriamiento apropiado, todas estas características son importantes para obtener una pieza que pueda cumplir satisfactoriamente con las condiciones finales de trabajo.

En la investigación titulado “Estudio del efecto de tratamientos térmicos de criogenia sobre el comportamiento tribológico y la tenacidad a la fractura del acero AISI 420”, en la Universidad Nacional del Sur, en Argentina en el año 2015. El estudio aporta una metodología para comprender los efectos que provocan los distintos tratamientos criogénicos mediante la aplicación de diferentes técnicas y ensayos (11). La investigación llegó a las siguientes conclusiones:

1. Los cambios estructurales producidos por el tratamiento térmico criogénico modifican las propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 420. Los cambios en estas características mecánicas están relacionados con la temperatura criogénica, velocidad de enfriamiento y el tiempo de permanencia en el enfriamiento criogénico.
2. Con la aplicación del tratamiento térmico criogénico, la distribución de los carburos se ve reflejada en una formación más homogénea y uniforme que con los tratamientos térmicos convencionales; además, el contenido de austenita retenida no resulta ser significativo.
3. La aplicación del tratamiento criogénico al acero AISI 420 de bajo contenido de carbono demuestra ser un procedimiento eficaz para incrementar de forma paralela tanto la dureza, resistencia al desgaste y tenacidad, sin necesidad de modificar la resistencia a la corrosión, además, permite mejorar de manera evidente la resistencia al desgaste, ya que permite la redistribución espacial de los carburos y lograr la forma más fina de estos.

En el estudio titulado “Influencia del tiempo de revenido en la resistencia al desgaste abrasivo de un acero AISI 1020 templado desde temperaturas Inter críticas seguido de un tratamiento criogénico”, en la Universidad Distrital Francisco José Caldas, en Colombia en el año 2016, utilizó una metodología que nos ayuda a comprender el efecto que tienen los tratamientos criogénicos en las propiedades mecánicas del acero (5). El estudio llegó a las siguientes conclusiones:

1. Como se planteaba, la velocidad de enfriamiento de las probetas en aceite no permite la formación de martensita, la única estructura que se alcanza es ferrita más perlita, dos constituyentes blandos, por lo tanto, la dureza que se consigue es mucho menor que las probetas templadas en agua. Asimismo, se establece un pequeño incremento en la dureza al realizar el tratamiento criogénico, que según investigaciones se debe a la compactación estructural que produce el tratamiento criogénico y un cambio de fase.

2. Se comprobó un pequeño incremento en la resistencia al desgaste de las probetas con temple a 780 °C, en agua, criogenia y revenidas en distintos intervalos de tiempo; existe la posibilidad de que la resistencia al desgaste abrasivo esté relacionada con la dureza del material, no obstante, el incremento no resulta significativo, en consecuencia, no se puede ratificar esta hipótesis.

En la investigación titulada “Influencia de los tratamientos térmicos a temperaturas Inter críticas UIT y tratamientos criogénicos y un posterior revenido de 15, 30 y 45 minutos a la resistencia a la fatiga de un acero AISI/SAE 4140”, en la Universidad Distrital Francisco José Caldas, en Colombia en el año 2017, usó una metodología para identificar las propiedades mecánicas que puede adquirir un material y su capacidad de responder a distintos entornos luego de ser expuestos a tratamientos criogénicos mediante la ejecución de ensayos (12). El estudio llegó a las siguientes conclusiones:

1. Se concluyó que realizar los tratamientos criogénicos con un tiempo prolongado beneficia al temple durante la mejora de la resistencia y dureza; asimismo, si se emplea un tiempo de revenido no tan alto el rendimiento podría resultar óptimo para diversas condiciones mecánicas.
2. Al realizar la microscopía electrónica de barrido se pudo identificar dos fases en la microestructura del material, estas fueron la ferrita y martensita; un factor importante al realizar los tratamientos criogénicos es la aparición de posibles carburos en la microestructura y la aparición de martensita fina cuando se incrementa el tiempo del proceso criogénico.
3. Se llegó a la conclusión de que, al realizar los procesos de tratamiento térmico, la dureza disminuye a medida que incrementa el tiempo de revenido, también se pudo verificar que las probetas que fueron tratadas criogénicamente presentan un incremento en la dureza y una mayor resistencia a la fatiga.

En el estudio “Tratamientos criogénicos y la propuesta de su ensayo como práctica de laboratorio de metalurgia y metalografía”, en la Universidad de San Carlos de Guatemala, en el año 2010, utilizó una metodología concierne y completa referente a los procesos de tratamiento criogénico, especificaciones y procedimientos para su ejecución (13). El estudio llegó a las siguientes conclusiones:

1. Se lograron determinar las ventajas y desventajas que contribuye con relación al tratamiento térmico convencional, mediante los cambios microestructurales que experimenta el material.
2. Se lograron incrementar los conocimientos sobre su aplicación y los beneficios que ofrece al mejorar las propiedades mecánicas de dureza y resistencia al desgaste, incrementando el rendimiento de los materiales incluso en condiciones no favorables.
3. Al emplear los tratamientos criogénicos se abre la oportunidad de crecimiento en la parte industrial, logrando mejorar el rendimiento y desempeño de los equipos; además incrementando la vida útil del material.

En la investigación titulada “Estudio del tratamiento térmico sub-cero mediante la aplicación de dióxido de carbono sólido en los aceros AISI 1045 y AISI 4140, y su incidencia en las propiedades mecánicas”, en la Universidad Técnica de Ambato, en Ecuador el año 2015 usó una metodología concerniente al análisis del acero, su composición y la evaluación de sus propiedades mecánicas; asimismo, la determinación de las temperaturas óptimas para llevar a cabo estos procesos de manera adecuada (14). El estudio llegó a las siguientes conclusiones:

1. La temperatura que se alcanza durante el proceso de tratamiento sub-cero es de $-81,1$ °C, aunque la temperatura de sublimación que presenta el CO_2 en estado sólido es de $-78,6$ °C, debido a la presión atmosférica presente en la posición geográfica de Ambato, lugar donde se realizó la investigación.
2. El tratamiento térmico de temple en agua a temperatura ambiente provocó fisuras en las probetas del acero AISI 4140, razón por la que se incrementó la temperatura del agua hasta los 40 °C, la cual influyó adecuadamente sobre el acero haciéndolo más duro y así logrando evitar fenómenos de fisura durante el tratamiento.
3. La resistencia a la tracción en las probetas sometidas a temple y revenido es mayor que la resistencia de las probetas que solo fueron tratadas con temple, esto debido a que llevar a cabo un revenido a 200 °C durante una hora, provocará durante el alivio de tensiones mayor ductilidad en las probetas, logrando alcanzar una mayor resistencia.
4. A mayor tiempo de permanencia en el medio de enfriamiento sub-cero, mayor es el contenido de martensita presente en la microestructura del acero, en consecuencia, se tornan más frágiles.

5. El comportamiento de los aceros empleados en la investigación, tanto el AISI 4140 y el AISI 1045 son casi opuestos, ya que en los tratamientos donde se obtuvo mayor dureza también se logró mayor resistencia a la tracción y al impacto, asimismo, mayor elongación y reducción del área, pero en una proporción mínima con relación a los resultados obtenidos por el acero AISI 1045, los cuales obtuvieron un comportamiento normal, de modo que los tratamientos que tuvieron mayor resistencia a la tracción consiguieron una baja elongación y reducción del área.
6. La adición de otros fluidos como el alcohol o la acetona que ayudan a alcanzar temperaturas más bajas provocan que el CO₂ se evapore rápidamente, por lo cual la temperatura con la que se cuenta no se mantiene constante durante el proceso, por ende, se requiere mayor cantidad de CO₂ sólido.

En el estudio titulado “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”, en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, en Colombia en el año 2017. La metodología estuvo orientada a la realización de ensayos mecánicos y pruebas metalográficas del acero (15). El estudio llegó a las siguientes conclusiones:

1. Tomando como referencia el diagrama esfuerzo - deformación, se llega a la conclusión de que la curva de tratamiento térmico de temple, criogenia y revenido con un tiempo de 30 minutos es la que presenta mayor variación con relación a las probetas de control.
2. Las probetas sometidas a temple, criogenia y revenido por un tiempo de 30 minutos manifestaron poco incremento en su límite de fluencia, pero un gran aumento en el esfuerzo último a la tensión con relación a las demás; con excepción de estas probetas, las demás sometidas a otros tratamientos térmicos llegan a fracturarse antes de llegar a la zona plástica.
3. Al comparar las probetas sometidas a temple, criogenia y revenido a una temperatura de 400 °C con probetas sometidas a temple y revenido a 450 °C y 550 °C, con un tiempo de 10 y 15 minutos, se observó que estas obtuvieron una mayor tenacidad y un bajo esfuerzo máximo, esto indica que las probetas sometidas a temple, criogenia y revenido son más dúctiles y poseen una mayor resistencia a la fractura, asimismo, la tenacidad del acero AISI SAE 1045 se encuentra dentro del rango establecido por los catálogos.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Ciencia de los materiales.

Es una rama correspondiente a ingeniería que tiene como fundamento conocimientos de ciencia básica y de práctica ingenieril, se centra en las propiedades más útiles de los materiales; “El mayor objetivo de la ciencia de los materiales es alentar a los científicos e ingenieros para tomar elecciones informadas respecto del diseño, selección y uso de materiales para aplicaciones específicas” (16 pág. 4).

2.2.1.1 Materiales de ingeniería.

Con el desarrollo de las tecnologías, se tiene la necesidad de contar con nuevos materiales o que estos puedan ser modificados, por lo que es necesario el estudio de los materiales, ya que el propósito es identificar su comportamiento frente a condiciones externas, de modo que permita a los diseñadores una selección efectiva de estos para determinadas aplicaciones.

2.2.1.2 Selección de materiales.

Existe variedad de materiales para diversas aplicaciones, estos presentan características que resultan ser muy útiles para condiciones específicas; “Una de las tareas más importantes de un diseñador es especificar el material con el cual se fabricará un componente individual de un producto. En la decisión se debe considerar una cantidad gigantesca de factores (...)” (17 pág. 77). Asimismo, durante el proceso de selección se debe comenzar con especificar las características y requisitos con los que un material debe contar, tomando en cuenta las condiciones a las que será expuesto.

“Cuando se selecciona un material para una aplicación específica, se deben efectuar las pruebas suficientes y adecuadas para asegurar que el material se conservará idóneo para la aplicación correspondiente durante la vida razonable del producto” (16 pág. 4). De una manera más específica, a las condiciones a las que será sometido, por lo que el ingeniero deberá:

- Comprender las propiedades asociadas a los materiales.
- Ser capaz de evaluarlas mediante ensayos y técnicas.
- Tener definidos los procesos para modificar características.
- Evaluar los costos correspondientes a la selección.

2.2.2 El acero en la industria.

El acero es muy empleado para aplicaciones industriales, una de las más importantes en la fabricación de los elementos de máquina, ya que cuenta con gran

variedad de propiedades mecánicas, como la resistencia al desgaste, rigidez, dureza y facilidad de fabricación; además, con respecto a la aplicación del acero se menciona:

Los aceros que se emplean en la industria son aleaciones y no metales puros como el oro, la plata, el estaño, etc. De sus numerosos componentes, el hierro es el elemento que entra en mayor proporción, y el carbono el que ejerce influencia más decisiva en sus propiedades, características y tratamientos. El contenido en carbono de los aceros varía desde 0,035% a 1,7%, llegando en algunos casos excepcionales a 2,2% (6 pág. 1).

2.2.3 El acero.

Es una aleación de hierro y carbono, se usa de manera muy frecuente en el sector de construcción y diseño en ingeniería debido a que presenta gran variedad de características y propiedades mecánicas.

El término acero indica una aleación de hierro, carbono, manganeso y uno o más elementos importantes. El carbón tiene un gran efecto sobre la resistencia, dureza y ductilidad de cualquier aleación de acero. Los demás elementos efectúan la capacidad de templabilidad, tenacidad, resistencia a la corrosión, maquinabilidad y conservación de resistencia a altas temperaturas. Los elementos de aleación principales contenidos en los diversos aceros son el azufre, fósforo, silicio, níquel, cromo, molibdeno y vanadio (17 pág. 46).

Asimismo, todos los aceros pueden ser considerados como aleaciones de hierro - carbono, sabiendo que además del contenido de carbono presentan elementos de aleación. Por lo tanto, las fundiciones también son aleaciones de hierro - carbono, con la diferencia que el contenido de carbono excede el 2,2%.

El hierro es el metal más utilizado por el hombre en los últimos tres mil años de su existencia. Esta supremacía se debe a la abundancia relativa de este elemento químico en la corteza terrestre, a la posibilidad del hierro de formar aleaciones, sobre todo con el carbono, de gran utilidad (acero y fundiciones) y a la posibilidad de modificar las propiedades de estas aleaciones mediante tratamientos térmicos (18 pág. 13).

2.2.3.1 Sistemas de designación.

La Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) fue la primera en reconocer la necesidad y adoptar un sistema para la numeración de los aceros. Más tarde, el Instituto Estadounidense del Hierro y del Acero AISI adoptó un sistema similar. En 1975 la SAE publicó el sistema de numeración unificado para metales y aleaciones (UNS); el sistema también contiene números interrelacionados para otras especificaciones de materiales. El UNS usa un prefijo con letras para designar el material, por ejemplo, G para los aceros al carbono y aleados, A para las aleaciones de aluminio, C para las aleaciones a base de cobre y S para los aceros inoxidable o resistentes a la corrosión (19).

La SAE presenta un sistema de designación para los aceros, en el establece un número de cuatro dígitos. Los dos primeros dígitos indican los principales elementos de aleación, mientras que los dos últimos números indican el contenido de carbono en porcentaje. En la Tabla 1 se puede ver la clasificación de algunos aceros según UNS en base a sus elementos de aleación.

Tabla 1.

Composición de algunos aceros según UNS.

G10	Acero al carbono simple	G46	Acero al níquel - molibdeno
G11	Acero al carbono de corte libre con mayor cantidad de azufre o fósforo	G48	Acero al níquel - molibdeno
G13	Acero al manganeso	G50	Acero al cromo
G23	Acero al níquel	G51	Acero al cromo
G25	Acero al níquel	G52	Acero al cromo
G31	Acero al níquel - cromo	G61	Acero al cromo - vanadio
G33	Acero al níquel - cromo	G86	Acero al cromo - níquel - molibdeno
G40	Acero al molibdeno	G87	Acero al cromo - níquel - molibdeno
G41	Acero al cromo - molibdeno	G92	Acero al manganeso - silicio
G43	Acero al níquel - cromo - molibdeno	G94	Acero al níquel - cromo - molibdeno

Nota. Fuente: (19).

El AISI usa un sistema de designación con cuatro dígitos para el acero al carbón y aleado, (Figura 7). Los dos primeros dígitos señalan el grupo específico de aleaciones que identifica a los principales elementos aleantes, los dos últimos dígitos indican la cantidad de carbono en el acero (17).

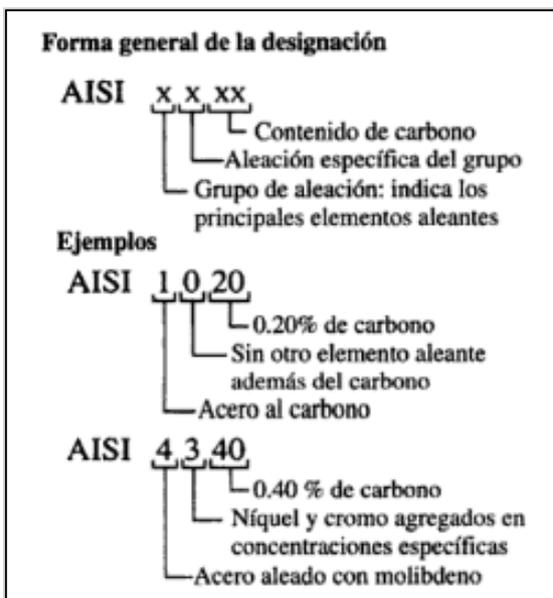


Figura 7. Sistema de designación de los aceros.

Nota. Fuente: (17).

En la Tabla 2 se indican las designaciones UNS y AISI para distintos aceros. Se puede verificar que para la mayoría de los aceros al carbono y aleados, la designación AISI se transforma en los primeros dígitos del número UNS.

Tabla 2.

Aplicaciones de algunos aceros.

Número UNS	Número AISI	Aplicaciones
G10150	1015	Piezas moldeadas en lámina, partes maquinadas
G10300	1030	Piezas de uso general, en forma de barra, palancas, eslabones
G10400	1040	Ejes, engranajes
G10800	1080	Resortes; piezas para equipo agrícola sometidas a abrasión (dientes de rastrillo, discos, dientes de cortacéspedes)
G11120	1112	Piezas de máquinas con tornillo
G12144	12L14	Piezas que requieren buena capacidad de maquinado
G41400	4140	Engranajes, ejes, piezas forjadas
G43400	4340	Engranajes, ejes, piezas que requieren endurecimiento interno
G46400	4640	Engranajes, ejes, levas
G51500	5150	Ejes para trabajo pesado, resortes, engranes
G51601	51B60	Ejes, resortes, engranes con mejor templabilidad
G52986	E52100	Pistas de rodamientos, bolas, rodillos (acero para rodamientos)
G61500	6150	Engranajes, piezas forjadas, ejes, resortes
G86500	8650	Engranajes, ejes
G92600	9260	Resortes

Nota. Fuente: (17).

El segundo par de números se refiere al contenido aproximado de carbono. Así, G10400 es un acero al carbono simple con un contenido de carbono de 0,40%. El quinto número después del prefijo se emplea en situaciones especiales. Por ejemplo, la designación AISI 52100 representa una aleación de cromo con aproximadamente 100 puntos de carbono (19).

Sin embargo, existen algunas excepciones como se menciona con el AISI 12L14, se le añade la letra L entre el segundo y tercer dígito, lo que indica que contiene plomo como elemento de aleación y este a su vez se transforma en UNS G12144. (El plomo mejora la maquinabilidad del acero)

De la misma manera, el sistema de designación de la ASTM para las fundiciones de hierro también es empleado con frecuencia; resumidamente se basa en la resistencia a la tracción de los aceros. Por ejemplo, para una fundición de hierro 30, se establece una resistencia a la tracción mínima de 30 kpsi.

2.2.3.2 Importancia del carbono.

Aunque la mayor parte de las aleaciones de acero contienen menos de 1% de carbono, éste se incluye en la designación debido a sus efectos sobre las propiedades del acero. Como se ve en la Figura 7, los dos últimos dígitos indican el contenido de carbono, en centésimos de porcentaje. Por ejemplo, cuando los dos últimos dígitos son 20, la aleación contiene aproximadamente 0,20% de carbono. Se admite algo de variación (17).

Los aceros al carbono si bien pueden alcanzar altas resistencias, también hay la posibilidad de que pierdan sus propiedades de ductilidad y tenacidad; además, presentan una baja resistencia a la corrosión y no muy buena templabilidad. Sin embargo, al incrementar el contenido de carbono en los aceros, de manera paralela se consigue aumentar la resistencia y dureza del material, a medida que la ductilidad disminuye.

➤ Aceros de bajo carbono.

Es aquel que tiene menos de 30 puntos de carbono (0,30%). Estos aceros tienen relativamente baja resistencia, pero buena capacidad para darles forma. En aplicaciones de elementos de máquina cuando no requieren alta resistencia, se emplean aceros de bajo contenido de carbono (17).

Si el desgaste es un problema esencial, se pueden carburizar los aceros de bajo contenido de carbono para aumentar contenido de carbono en la superficie externa y mejorar la combinación de sus propiedades (17).

➤ **Aceros de medio carbono.**

Los aceros al medio carbono, o aceros medios, contienen 30 a 50 puntos de carbono (0,30% a 0,50%). La mayoría de los elementos de máquinas que tienen necesidad de una resistencia de moderada a alta con requisitos de ductilidad bastante buena y dureza moderada, provienen de este grupo (17).

Se suelen emplear estos aceros donde se requieren propiedades mecánicas más elevadas, normalmente se les realiza un tratamiento térmico de endurecimiento.

➤ **Aceros de alto carbono.**

Los aceros de alto carbón tienen de 50 a 95 puntos de carbono (0,50% a 0,95%). El alto contenido de carbono proporciona mejores propiedades de desgaste, adecuadas para aplicaciones donde requieran filos cortantes duraderos, y para aplicaciones donde las superficies estén sometidas a una abrasión constante (17).

Se emplean en condiciones donde es necesario incrementar la resistencia al desgaste y alcanzar elevadas durezas que no se pueden lograr con aceros de menor contenido de carbono.

2.2.3.3 Diagrama hierro – carbono.

Resulta muy conveniente mientras se establecen parámetros de temperatura, por lo que nos brinda una indicación de las características que se alcanzará en los aceros. “El diagrama hierro - carbono es la representación del campo de estabilidad de las distintas fases en función de la temperatura y del porcentaje en carbono. Se obtiene principalmente mediante curvas de enfriamiento y mediante los ensayos metalográficos” (18 pág. 15).

Al igual que otros diagramas, el sistema Hierro - Carbono se podría extender mediante el incremento en el contenido de carbono hasta alcanzar el 100%. Sin embargo, el contenido máximo que se admite en el acero es de 6,67%, ya que al sobrepasar este límite se produce una solución dura y frágil denominada cementita. De esta manera, se tiene como resultado un diagrama de Hierro - Carburo de Hierro, el cual se emplea con el propósito de analizar el comportamiento del acero y finaliza con 6,67% en contenido de carbono, así como se observa en la Figura 8.

El porcentaje de carbono en el hierro aumenta hacia el lado derecho del diagrama y termina en 6,67% de carbono. El diagrama finaliza ahí porque 6,67% de carbono en peso es el contenido de carbono que hay en el

compuesto carburo de hierro Fe_3C y no se obtendría ninguna otra información útil si se incluyera más carbono (3 pág. 26).

Aunque se denomine diagrama de hierro - carburo de hierro, los constituyentes del sistema son el hierro y el carbono, por lo tanto los porcentajes correspondientes al eje X nos indican el contenido de carbono, mientras que en el eje de las ordenadas de la izquierda se indica la evolución del hierro puro y de cementita en el eje de la derecha.

En el diagrama hierro - carbono se pueden considerar los detalles de gran interés tecnológico. En primer lugar, la parte correspondiente al diagrama total hierro - carburo de hierro o cementita (6,67% C), dibujado en trazos continuos y, en segundo lugar, la parte correspondiente al diagrama hierro - grafito, dibujado discontinuamente. Es decir, el carbono aparece como cementita o como grafito según el contenido en carbono del sistema y la velocidad de enfriamiento (18 pág. 15).

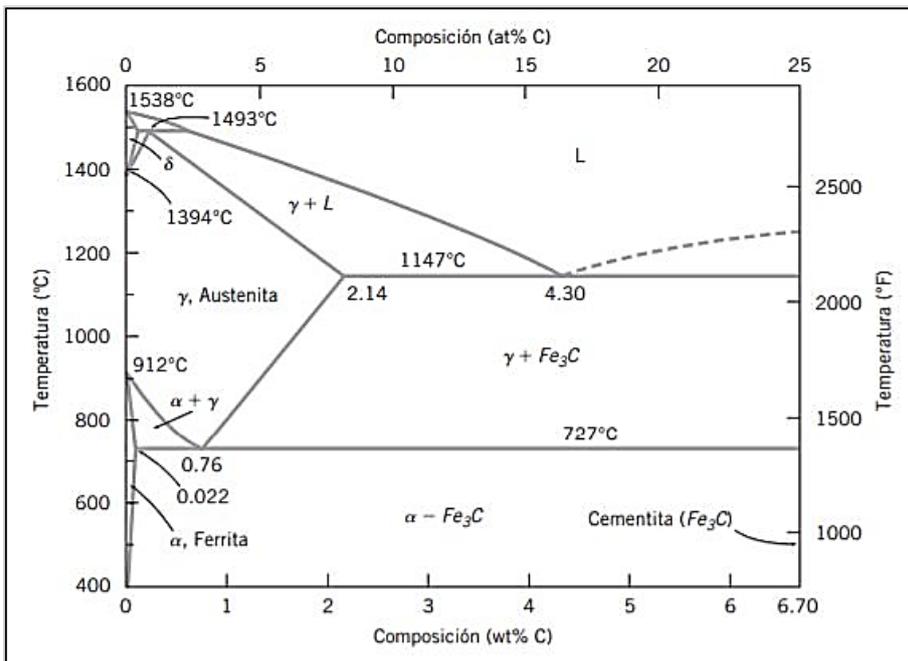


Figura 8. Diagrama del sistema hierro - carbono.

Nota. Fuente: (16).

2.2.3.4 Diagrama TTT.

Conocido como diagrama de curvas de tiempo - temperatura - transformación, mediante el cual identificamos el comportamiento del acero al ser sometido a condiciones de tiempo y temperatura, alcanzando una transformación conocida como fase en las que se presentan la ferrita, perlita, austenita, martensita, cementita (3).

El diagrama TTT indica la evolución de la fase de austenita, revela el porcentaje que se alcanza a transformar y el constituyente que se obtiene debido a la influencia del tiempo y temperatura. “Los diagramas TTT o diagramas de transformación isotérmica, se usan para investigar los cambios estructurales en la descomposición de la austenita en función del tiempo (...)” (8 pág. 11).

A partir de una serie de curvas de relación isotérmicas determinadas a cierto número de temperaturas se puede obtener importante información. Estos tipos de diagramas cinéticos son del máximo interés tecnológico, pues representan las posibilidades de los distintos tipos de acero de experimentar tratamientos térmicos de ablandamiento y endurecimiento (18 pág. 29).

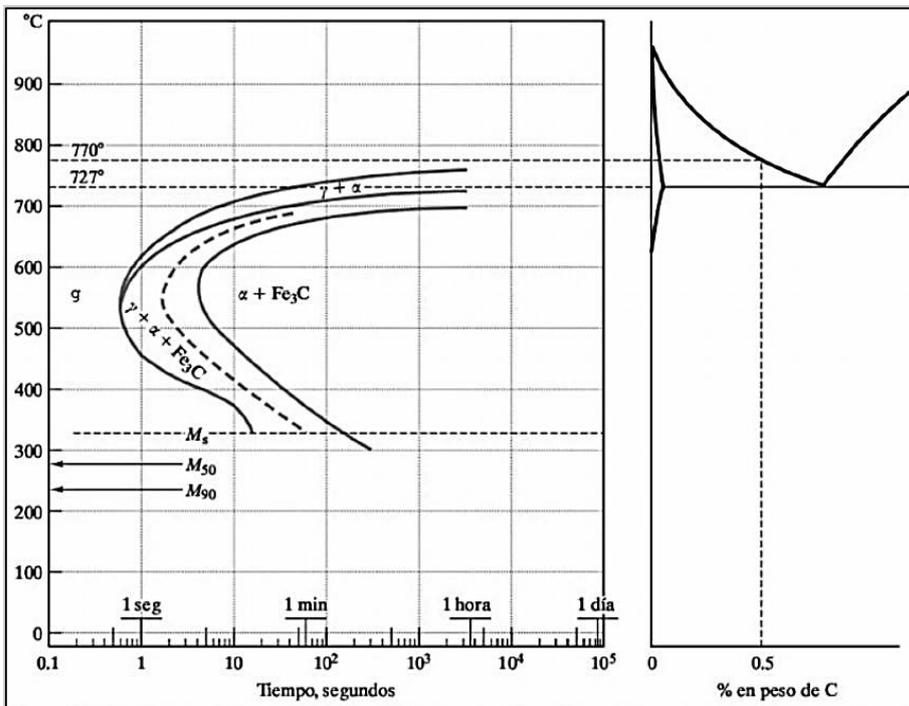


Figura 9. Diagrama TTT del acero (0,5% C).

Nota. Fuente: (16).

La forma característica que presentan las curvas en forma de C se debe a que las condiciones que intervienen durante la transformación se debilitan al alcanzar altas temperaturas, razón por la que el ritmo de transformación se reduce.

➤ Diagrama TEC.

Asimismo, existe el diagrama de transformación por enfriamiento continuo (TEC); nos muestra el proceso de evolución de la fase de austenita a medida que desciende la temperatura a través de distintas velocidades de enfriamiento (Figura 10). “Los diagramas

de enfriamiento continuo nos determinan las estructuras producidas en un acero a diferentes velocidades de enfriamiento, estos diagramas también son denominados TEC” (8 pág. 12).

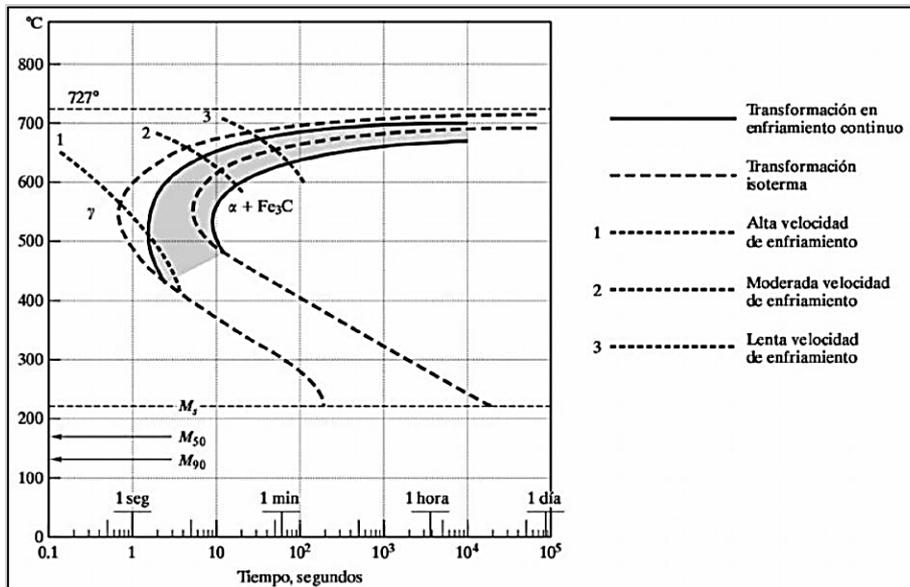


Figura 10. Diagrama TEC del acero.

Nota. Fuente: (16).

Los diagramas son similares pero cuentan con ciertas diferencias, ambos diagramas cuentan con diferentes curvas. En la zona inferior del diagrama se muestran unas líneas horizontales, éstas representan la transformación martensítica, la primera corresponde a la temperatura M_s que indica el inicio de la transformación y las siguientes corresponden a las temperaturas a las que se va incrementando los porcentajes de martensita. En el lado izquierdo del diagrama se tiene tres curvas, las cuales indican la velocidad de enfriamiento del sistema y corresponden a un enfriamiento rápido, moderado y lento respectivamente.

2.2.3.4.1 Constituyentes del acero.

- *Ferrita.*

La ferrita es el hierro alfa (α). Es de decir, hierro casi puro que puede contener en disolución pequeñas cantidades de carbono, silicio, fósforo y otras impurezas. En los aceros aleados la ferrita suele contener níquel, manganeso, cobre, silicio y aluminio (18).

Cuando se analiza en el microscopio se logra distinguir como granos monofásicos con límites de grano menos rectos que los que presenta la austenita. Esto se debe a que

la ferrita se genera a través de una transformación en estado sólido, mientras que la austenita se produce a medida que la temperatura asciende.

“Es la fase más blanda del acero, muy dúctil y maleable, magnética y de pequeña fuerza coercitiva” (18 pág. 18).

Se le denomina hierro alfa (α) debido a que cristaliza en el sistema cúbico y además es de material ferromagnético. Es una solución sólida intersticial de carbono en una red cúbica centrada en el cuerpo (BCC) de hierro como se observa en la Figura 11 (4).

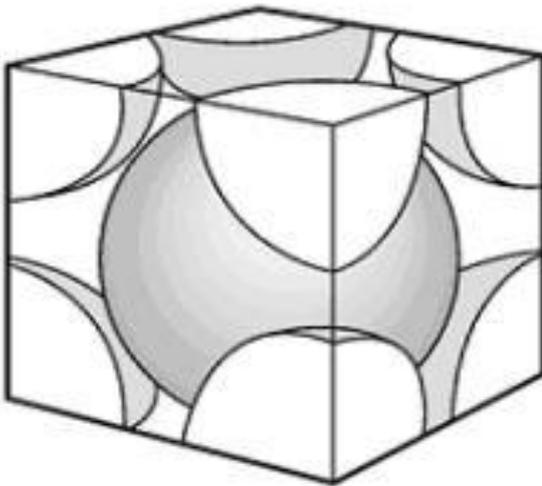


Figura 11. Red cristalina BCC de la fase ferrita del acero.

Nota. Fuente: (20).

- *Austenita.*

Es una estructura blanda, muy dúctil y tenaz; a su vez presenta buenas cualidades de resistencia al desgaste siendo la más densa de los constituyentes. Estas características se deben a que en su microestructura aparecen cristales similares a los de la ferrita, con la diferencia que los contornos son más rectilíneos y presenta ángulos más evidentes.

Posee una dureza aproximada de 300 HB, de acuerdo con su contenido de carbono. “Es una solución sólida de carbono en hierro gamma. Puede contener desde 0 a 1,7% de carbono y es, por lo tanto, un constituyente de composición variable” (18 pág. 105).

En algunos casos se presenta a temperatura ambiente junto con la martensita como resultado de un enfriamiento rápido y por lo general, en aceros de alto contenido de carbono y alta aleación. Además, resulta estable a elevadas temperaturas, pero a medida que esta desciende es posible retenerla siempre que cumpla con las condiciones ya mencionadas.

Los átomos de hierro en la fase austenita asumen las posiciones en una red cristalina cúbica centrada en las caras, como se observa en la Figura 12, los átomos de hierro se acomodan ocupando las esquinas y el centro de cada cara en una estructura cúbica. En este caso, los átomos de carbono caben en el centro de cada una de las aristas de los cubos. La austenita tiene una capacidad para aceptar mayor cantidad de carbono que la ferrita (4).

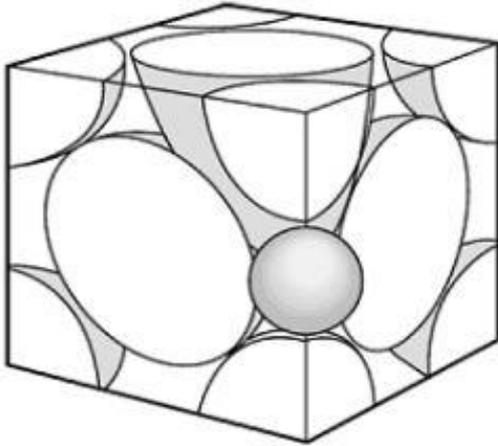


Figura 12. Red cristalina FCC de la fase austenita.

Nota. Fuente (20).

- *Martensita.*

Es una disolución sólida sobresaturada de carbono en un hierro alfa (α) distorsionado o tetragonal. Su contenido en carbono suele variar hasta 1% o más. Las propiedades físicas varían con el porcentaje de carbono. Después de los carburos y cementita es el constituyente más duro (18).

“El constituyente propio del temple es la martensita, constituyente metaestable cuya estructura cristalina es tetragonal centrada en el cuerpo” (18 pág. 49). Se obtiene mediante un enfriamiento brusco.

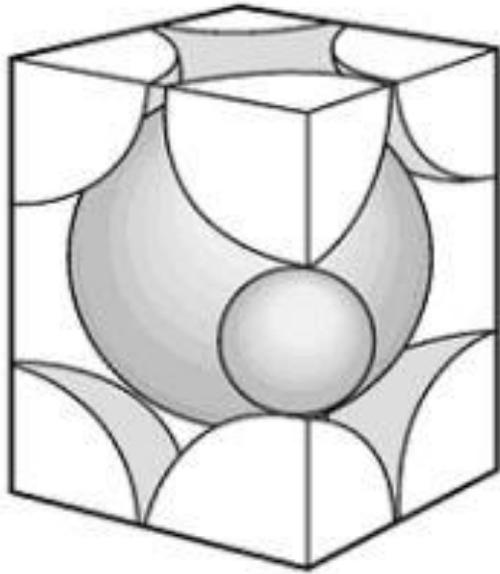


Figura 13. Red cristalina BTC de la fase martensita.

Nota. Fuente: (16).

A medida que la austenita se somete a un enfriamiento rápido (temperaturas cercanas a la temperatura ambiente), ocurre una transformación sin difusión alcanzando una fase llamada martensita; esta presenta una serie de características, celdas tetragonales de cuerpo centrado, una estructura más dura y fuerte pero difícil de maquinarse, y además posee baja ductilidad. “La martensita tiene alta dureza (entre 50 y 68 HRC) que aumenta debido al contenido de carbono en el acero” (4 pág. 8).

- *Cementita.*

La fase cementita es carburo de hierro, Fe_3C , contiene 6,67% de carbono y 93,33% de hierro. Es el constituyente más duro y frágil de los aceros al carbono, su dureza es superior a 68 HRC y cristaliza formando un paralelepípedo ortorrómbico de gran tamaño (6).

Se diferencia de la ferrita, desde el punto de vista metalográfico, tratándola con picrato sódico en caliente. Este reactivo oscurece al cementita, mientras que deja inalterable a la ferrita (18).

- *Perlita.*

Es un constituyente eutectoide formado por capas alternadas de hierro alfa (α) y carburo de hierro Fe_3C , o lo que es lo mismo, de ferrita y cementita. Es de composición química constante y definida y contiene aproximadamente seis partes de hierro y una de carburo que corresponde a 13,5% de Fe_3C , 86,5% de Fe, 0,9 % de C y 99,1% de Fe (6).

La ferrita y cementita que la componen aparecen formando láminas paralelas y alternadas que tienen reflejos nacarados. Según la velocidad de enfriamiento, esas laminillas aparecen más o menos separadas, y cuando el enfriamiento ha sido bastante rápido, las láminas se acercan mucho, de forma que en el microscopio, aun con grandes aumentos, no se pueden distinguir (6).

Puede contener perlita fina, que presenta capas delgadas de cementita y ferrita (α) y la perlita gruesa, que es más dúctil que ésta pero de menor dureza.

- *Carburos.*

Se presentan mayormente en los aceros de alto contenido de carbono; siendo el cromo, tungsteno, molibdeno y vanadio los elementos principales que los forman. “Son cuerpos muy duros que se forman al combinarse, elementos especiales con algunas cantidades de carbono” (6 pág. 115).

Una de las propiedades más importantes de los aceros con carburos es la capacidad que poseen de conservar su dureza cuando son tratados a temperaturas relativamente elevadas, mientras que los aceros de carbono templados de estructura martensítica se ablandan mucho más rápidamente (6).

2.2.3.5 Aceros aleados.

Se denominan aceros aleados a todos aquellos que además del contenido de carbono, poseen elementos de aleación; éstos se añaden al acero con el propósito de mejorar sus propiedades. Se trata de aceros de baja aleación, si el contenido de estos elementos es inferior al 5% y en el caso que sobrepasen el 5% en contenido, corresponden a aceros de alta aleación.

Aunque un acero al carbono simple es una aleación de hierro y carbono con cantidades pequeñas de manganeso, silicio, azufre y fósforo; el término acero aleado se aplica cuando uno o más elementos, además del carbono, se introducen en cantidades suficientes para modificar sustancialmente sus propiedades. Los aceros aleados no sólo poseen más propiedades físicas deseables, sino que también permiten una mayor latitud en el proceso del tratamiento térmico (19 pág. 47).

Durante el proceso de obtención, se fabrican con más cuidado que los aceros al carbono. Además, se definen como: “Soluciones sólidas de Hierro - Carbono con elementos adicionales añadidos para cambiar sus propiedades” (16 pág. 125). Entre los elementos de aleación, se distingue:

- **Cromo.**

La adición de cromo provoca la formación de varios carburos de cromo que son muy duros; sin embargo, el acero resultante es más dúctil que uno de la misma dureza producido por medio de un simple incremento del contenido de carbono. El cromo también refina la estructura del grano de tal manera que los dos efectos combinados causan un incremento de la tenacidad y de la dureza (19).

- **Níquel.**

El níquel es soluble en ferrita y no forma carburos u óxidos, lo cual incrementa la resistencia sin disminuir la ductilidad. El endurecimiento superficial de los aceros al níquel da como resultado un núcleo mejor que el que se puede obtener con aceros al carbono simples. El cromo se usa frecuentemente en combinación con el níquel para obtener la tenacidad y ductilidad que proporciona el níquel y la resistencia al desgaste y dureza que aporta el cromo (19).

- **Manganeso.**

Se añade a todo acero como agente desoxidante y desulfurizante, pero si el contenido de azufre es bajo y el contenido de manganeso es mayor que 1%, el acero se clasifica como una aleación de manganeso (19).

- **Silicio.**

El silicio se agrega a todos los aceros como agente desoxidante. Cuando se añade a aceros de muy bajo contenido de carbono, produce un material frágil. El uso principal del silicio es con otros elementos de aleación, como el manganeso, el cromo y el vanadio, para estabilizar a los carburos (19).

- **Molibdeno.**

Aunque el molibdeno se emplea de manera individual en algunos aceros, por lo general se utiliza en combinación con otros elementos de aleación, como el níquel, cromo o ambos. Este metal forma carburos y también se disuelve en ferrita hasta cierto punto, de manera que agrega dureza y tenacidad. Si se exceptúa al carbono, tiene el mayor efecto

de endurecimiento, y como también contribuye a obtener un tamaño de grano fino, provoca la retención en gran parte de la tenacidad (19).

- **Vanadio.**

El vanadio tiene una tendencia muy fuerte a formar carburos, por lo cual sólo se utiliza en cantidades pequeñas. Es un fuerte agente desoxidante y promueve un tamaño de grano fino. Como una cierta cantidad de vanadio se disuelve en la ferrita, también hace más tenaz al acero. Es muy difícil suavizar el acero al vanadio mediante el revenido, por lo que se usa ampliamente en aceros para herramientas (19).

- **Tungsteno.**

Se emplea mucho en aceros de herramienta debido a que retendrá su dureza aun estando al rojo vivo. El tungsteno produce una estructura fina y densa, agrega tenacidad y dureza. Su efecto es similar al del molibdeno, excepto que debe agregarse en cantidades mayores (19).

2.2.3.6 Aceros resistentes a la corrosión.

Se llaman aceros inoxidable o resistentes a la corrosión aquellos que poseen en su composición química un mínimo de 12% de cromo. Los aceros inoxidable indican una alta resistencia a condiciones corrosivas, para contar con esa característica se requieren añadir elementos de aleación.

- **Aceros inoxidable ferríticos.**

Los aceros al cromo ferríticos presentan un contenido de cromo que varía de 12% a 27%. Su resistencia a la corrosión es una función del contenido de cromo, de manera que las aleaciones que contienen menos de 12% aun presentan cierta resistencia a la corrosión, aunque se oxidan. Si el contenido de cromo excede 18%, es muy difícil soldarlos; y en los niveles muy altos de cromo la dureza se hace tan grande que se debe poner atención especial a las condiciones de servicio. Como el cromo es costoso, el diseñador debe elegir el contenido menor que sea consistente con las condiciones corrosivas (19).

Por lo general, estos aceros no pueden ser sometidos a procesos de tratamiento térmico, sin embargo se pueden trabajar en frío con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas.

- **Aceros inoxidable austeníticos.**

Los aceros inoxidable al cromo - níquel retienen la estructura austenítica a temperatura ambiente, por lo que no son susceptibles al tratamiento térmico. La resistencia

de estos aceros se mejora mucho mediante el trabajo en frío. No son magnéticos a menos que se trabajen en frío. Todos los aceros al cromo - níquel se sueldan y muestran mayores propiedades de resistencia a la corrosión que los aceros al cromo simples. Cuando se agrega más cromo para lograr una mayor resistencia a la corrosión, también debe agregarse níquel si desea mantener las propiedades austeníticas (19).

La mayoría de estos aceros no pueden ser sometidos a procesos de tratamiento térmico.

➤ **Aceros inoxidables martensíticos.**

Estos aceros pueden ser sometidos a procesos de tratamiento térmico y alcanzan altas resistencias a medida que son tratados a bajas temperaturas; además, tienen la característica de ser más fuertes y tener mayor dureza que los aceros inoxidables ferríticos, pero a la vez son menos resistentes a condiciones de corrosión.

2.2.3.7 Aceros estructurales.

En su mayoría asumen la designación ASTM. Un grado de los aceros estructurales que se usan con frecuencia es el ASTM A36, cuenta con un límite de fluencia mínimo de 36 kpsi (248 MPa), muy dúctil debido a las condiciones de esfuerzo a las que es sometido.

Son empleados por las industrias dedicadas a la construcción debido a las altas resistencias que presentan, se puede adquirir a través de láminas, barras y perfiles.

2.2.3.8 Aceros para herramienta.

En los aceros de herramienta se adicionan elementos de aleación con el objetivo de incrementar la dureza para condiciones de mecanizado. Se emplean para situaciones en las que se requiere contar con una mayor resistencia y una elevada dureza.

El término acero para herramienta se refiere a un grupo de aceros que se usan para fabricar herramienta de corte, punzones, matrices, hojas cortantes, cinceles. Mientras que la mayor parte de los usos de los aceros para herramienta se relacionan con el campo de la ingeniería de manufactura, también pertenecen al diseño de máquinas (17 pág. 54).

De igual manera, algunos aceros para herramienta cuentan con una elevada resistencia al impacto, característica que resulta muy favorable para los elementos de máquinas, ya que soportan altas condiciones de esfuerzo.

2.2.4 Acero AISI - SAE 1045 (UNS G10450).

Según el catálogo (Anexo 2) de la Corporación Sudamericana de Aceros Especiales S.A.C - CORPSAE anteriormente llamada Aceros del Perú S.A.C, una de las empresas proveedoras de aceros de ThyssenKrupp Aceros y Servicios S.A; el acero SAE 1045 tiene las siguientes características.

Descripción: Acero al carbono para maquinaria. Proporciona un intervalo adecuado de resistencia mecánica y tenacidad a bajo costo con relación a los aceros de baja aleación. Es utilizado cuando se requiere resistencia y dureza en condición de suministro. No recomendable para cementado o cianurado.

Equivalencias

- AISI: 1045
- DIN: CK - 45
- W N°: 1.1191
- SAE: 1045
- UNI: C - 45

Propiedades químicas

Tabla 3.

Composición química del acero SAE 1045.

% C	% Ni	% Mo	% Si	% Mn	% S	% Cr	% P
0,42 – 0,50	≤ 0,4	≤ 0,1	0,4	0,5 - 0,8	0,02 - 0,04	0,4	0,035

Nota. Fuente: (21).

Propiedades físicas

- Densidad (ρ) 7,87 g/cm³

Propiedades mecánicas

- Resistencia a la tracción 640 MPa

Estado de suministro: Sin tratamiento térmico

Dureza de suministro: 207 HB Máx. - 17 HRC

Colores distintivos: Azul - Amarillo - Verde

Usos y aplicaciones: Generalmente se utiliza en elementos de máquina que requieren resistencia, dureza y tenacidad. (Ejemplo: coronas, piñones, pernos, tuercas, tornillos, chavetas, árboles de transmisión).

Tratamientos térmicos:

- Templar a 820 - 860 °C, comúnmente en agua.
- Revenido se da a 550 - 660 °C.
- Recocido a 650 - 700 °C, enfriamiento lento en el horno.
- Normalizado a 840 - 870 °C.

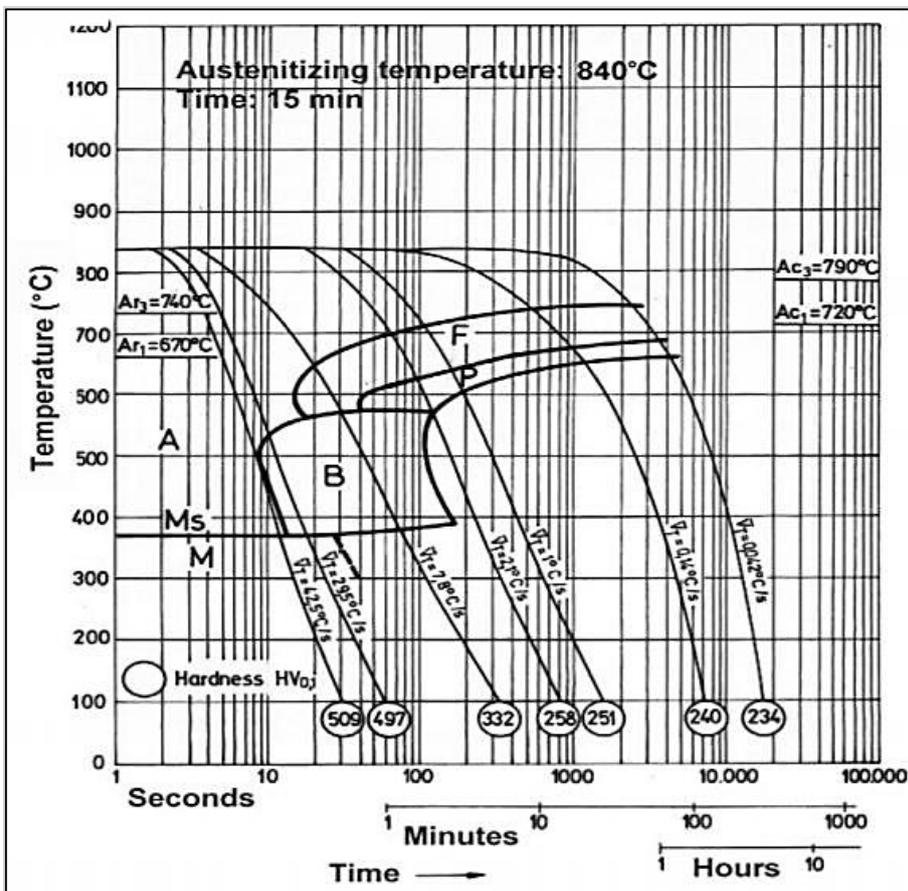


Figura 14. Diagrama TEC del acero SAE 1045.

Nota. Fuente: (21).

2.2.5 Normas ASTM.

La ASTM International, antes conocida como la American Society for Testing and Materials (ASTM), ha publicado más de 12 000 normas para las pruebas de materiales. Aunque el cumplimiento de estas es voluntario, nos proporcionan una descripción detallada de los procedimientos para las pruebas que aseguran que los resultados de diferentes laboratorios sean directamente comparables (16).

El manejo de normas es importante ya que permiten que ciertas actividades puedan ser realizadas mediante especificaciones, como la ejecución de los ensayos, fabricación y selección de algún material, ya que se encuentran normalizados y por lo tanto no existen inconsistencias:

Definen la terminología y resumen de los métodos de ensayo incluyendo su significado. La mayoría incluye una descripción detallada de aparatos de ensayo, también proporcionan las instrucciones para preparar especímenes de prueba, la calibración del equipo y el acondicionamiento del ambiente. Asimismo, se proporcionan los procedimientos experimentales detallados y las instrucciones para realizar los cálculos (16 pág. 68).

Tabla 4.

Normas más representativas de los métodos de ensayos.

Tipo de ensayo	Norma ASTM
Tracción, superficies de concreto	C1355
Tracción, materiales metálicos	E8M
Tracción, compuestos de matriz metálica	D3552
Compresión, metales	E209
Compresión, concreto	C116
Dureza Brinell	E10
Dureza Rockwell	E18
Análisis metalográfico	E3

Nota. Fuente: (16).

2.2.6 Ensayos de materiales.

La medición de las propiedades de los materiales es un factor fundamental para comprobar si este es apto para determinadas condiciones. Sin embargo, cuando se realizan las mediciones de las propiedades de los materiales por diferentes usuarios, equipos o ambientes, surgen disconformidades a través de las técnicas y resultados. Con el propósito de reducir estos contratiempos se establecen normas, de modo que se puedan realizar los ensayos, lograr resultados y reportarlos sin inconveniente.

2.2.6.1 Ensayo de tracción.

Es un ensayo destructivo, consiste en someter a una probeta con dimensiones normalizadas correspondientes al ensayo, a condiciones de estiramiento o tensión de manera progresiva, hasta llegar al punto de ruptura.

Con los datos obtenidos durante este ensayo, se pueden calcular valores para trazar la curva esfuerzo - deformación. Tal diagrama nos brinda información sobre las características mecánicas de un material como el módulo de Young, límite de fluencia, resistencia mecánica y deformación.

El ensayo de tensión es el método más común para determinar las características mecánicas de un material; la probeta se fabrica de acuerdo con las normas ASTM.

a) Esfuerzo.

Surge cuando actúan fuerzas externas sobre un cuerpo, “El esfuerzo es una propiedad de estado en un punto específico dentro de un cuerpo, la cual es una función de la carga, la geometría, la temperatura y el proceso de manufactura” (19 pág. 16).

Si el esfuerzo ingresa hacia la superficie de un cuerpo corresponde a un esfuerzo compresivo, generalmente indica un esfuerzo negativo, en caso contrario que el esfuerzo salga de la superficie del cuerpo, corresponde a un esfuerzo de tensión.

b) Deformación.

Corresponde al cambio de longitud a partir de una longitud inicial, debido a esfuerzos que se generan en el interior de un cuerpo por la acción de fuerzas externas.

- **Zona plástica.**

Es la zona del diagrama esfuerzo - deformación en la que se muestra que si un material trabaja en estas condiciones ya no regresará a sus dimensiones originales, por lo tanto, permanecerá deformado.

- **Límite elástico.**

Aquella zona del diagrama esfuerzo - deformación donde una vez retirada la carga, el material recobra sus dimensiones originales. Es el punto a partir del cual, el material sufrirá una deformación permanentemente plástica.

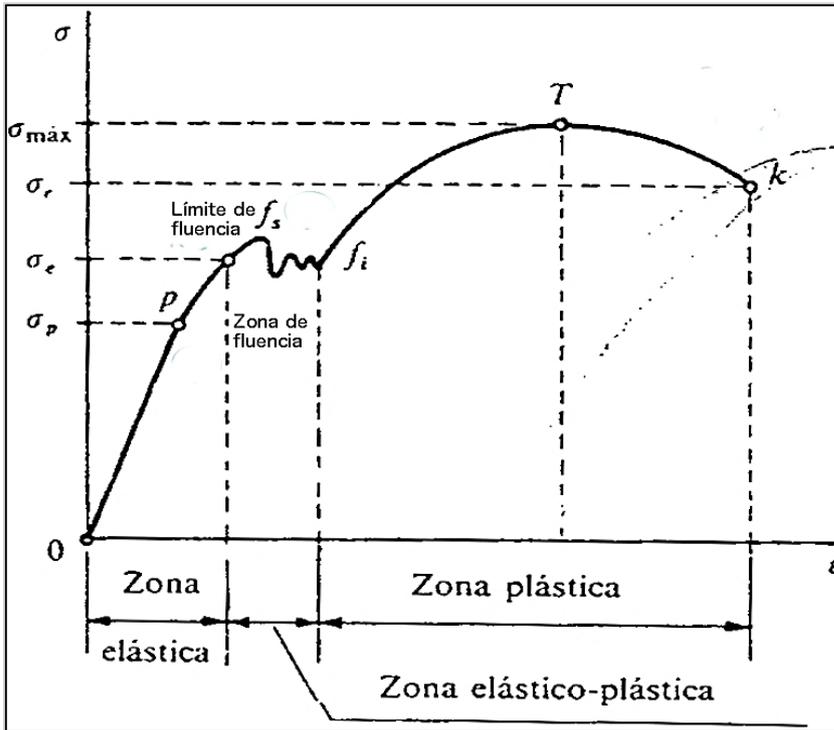


Figura 15. Diagrama esfuerzo - deformación, la zona elástica y plástica del acero.

Nota. Descargado de: <https://es.wikipedia.org/wiki/Fluencia#/media/File:Fluencia.jpg>

2.2.6.2 Ensayo de compresión.

Durante este ensayo se emplea el mismo equipo de tracción, pero en vez de someter la probeta a condiciones de tensión, la carga es aplicada en sentido contrario. Usualmente los ensayos de compresión no se llevan a cabo debido a que varios materiales presentan características similares durante este ensayo; sin embargo, se realizan cuando el material será sometido a grandes condiciones de compresión.

2.2.6.3 Ensayo de choque o de impacto.

Son populares dos métodos de determinación de energía de impacto para los metales y los plásticos: El Izod y el Charpy, y los proveedores del material suelen informar en sus publicaciones los valores obtenidos con esos métodos. La Figura 16 muestra esquemas de las dimensiones de las muestras estándar y de la manera de cargarlas (17).

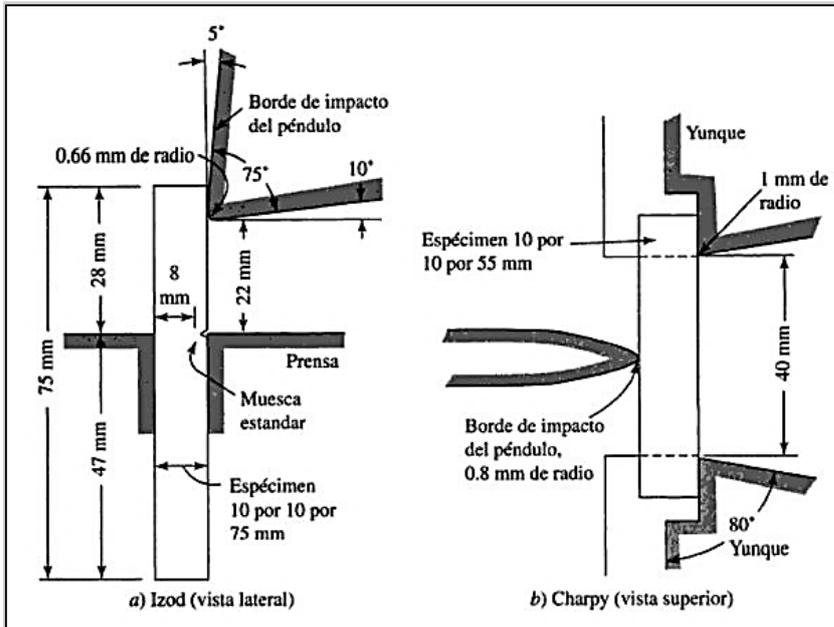


Figura 16. Prueba de impacto mediante los métodos Charpy e Izod.

Nota. Fuente: (17).

Los ensayos de impacto nos proporcionan datos sobre la tenacidad de los materiales en condiciones dinámicas, mostrando el comportamiento del material bajo esfuerzos constantes; en el texto de Shigley menciona:

(...) Estas pruebas son útiles para comparar varios materiales y determinar la fragilidad a baja temperatura. En ambas pruebas la pieza se golpea con un péndulo que se suelta desde una altura fija, y la energía absorbida por la pieza, llamada valor de impacto, puede calcularse a partir de la altura de giro después de la fractura (...) (19 pág. 38).

2.2.6.4 Ensayos de dureza

Es un método muy sencillo y comúnmente usado; consiste en penetrar sobre la superficie del material un indentador, el cual genera una huella que posteriormente es analizada. Este ensayo es el más simple y de menor costo de todos los ensayos mecánicos; no requiere de la preparación de probetas normalizadas, además, tiene una duración muy corta y los durómetros para realizar estos ensayos no son muy costosos.

Se realizan con el propósito de determinar la resistencia que posee un material a la deformación, mediante la penetración de uno más duro. Nos otorga una indicación de la resistencia que ofrece el acero a la deformación plástica. Esta característica depende del contenido de carbono, carburos existentes y microestructura que presenta al ser sometido a los tratamientos térmicos.

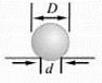
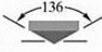
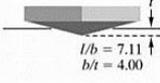
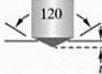
Ensayo	Penetrador	Forma de la indentación		Carga	Expresión del índice de dureza
		Vista lateral	Vista superior		
Brinell	Bola de 10 mm de acero o de carburo de wolframio			P	$HBW = \frac{2P}{\pi D \left[D - \sqrt{D^2 - d^2} \right]}$
Vickers	Pirámide de diamante			P	$HV = 1.72P/d_1^2$
Microdureza Knoop	Pirámide de diamante			P	$HK = 14.2P/l^2$
Rockwell	A } Cono de diamante C } D }			60 kg 150 kg 100 kg	$R_A =$ $R_C =$ $R_D =$
	B } Bola de acero de 1/16 de pulgada de diámetro F } G }			100 kg 60 kg 150 kg	$R_B =$ $R_F =$ $R_G =$
	E } Bola de acero de 1/8 de pulgada de diámetro H }			100 kg 60 kg	$R_E =$ $R_H =$

Figura 17. Características generales del ensayo de dureza y fórmulas para el cálculo.

Nota. Fuente: (7).

Los diferentes ensayos de dureza se detallan a continuación:

- **Ensayo Brinell.**

Introducido por J. A. Brinell en 1900, este ensayo involucra la compresión de una bola de acero de carburo de tungsteno, de un diámetro de 10 mm (0,4 pulg), contra una superficie, con una carga de 500 kg, 1 500 kg o 3 000 kg (Figura 17). El número de dureza Brinell (HB) se define como la relación de la carga P al área de superficie curvada de la indentación o impresión. Mientras más duro sea el material que se va a ensayar, menos será la impresión, por lo que en general se recomienda una carga de 1 500 o de 3 000 kg a fin de obtener impresiones lo suficientemente grandes para lograr una medición precisa (7).

El indentador que tiene un módulo elástico finito, también sufre una deformación elástica bajo la carga aplicada. Como resultado, las mediciones de dureza pudieran no ser tan precisas como se espera. Un método para minimizar este efecto es el uso de bolas de carburo de tungsteno que, debido a su elevado módulo de elasticidad, se distorsionan menos que las bolas de acero. Las bolas de carburo se recomiendan por lo general para números de dureza Brinell superiores a 500 (7).

La dureza Brinell es recomendable cuando el material no presenta características homogéneas, ya que tiene la posibilidad de emplear un indentador con dimensiones mayores; es la escala más utilizada debido a que cubre un gran rango de durezas.

- **Ensayo Rockwell.**

La aplicación del ensayo Rockwell es muy amplio y dispone de diferentes escalas de acuerdo con el intervalo de dureza a medir, es el método por excelencia para medir la resistencia en la superficie de un material.

Desarrollado por S. P. Rockwell en 1922, este ensayo mide la profundidad de penetración, en vez del diámetro de la indentación. El indentador se oprime sobre la superficie, primero con una carga menor y después con una carga mayor. La diferencia en las profundidades de penetración es una medida de la dureza del material (7).

Cuando se realiza trabajos en materiales duros, correspondientes a aleaciones de acero sometidas a tratamiento térmico, el ensayo se realiza en la escala de Rockwell C. Se emplea una carga de 150 kg-f sobre un indentador de diamante con forma cónica - esférica.

Para la escala de Rockwell B se trabaja con metales blandos y el ensayo se realiza con una carga de 100 kg-f sobre un indentador de acero endurecido con forma de bola de 1/16 pulg. de diámetro.

- **Ensayo Vickers.**

En ensayo de dureza Vickers, desarrollado en 1922 y antes conocido como ensayo de dureza de la pirámide, utiliza un indentador de diamante en forma de pirámide (Figura 17) y una carga que va desde 1 kg hasta 20 kg. El número de dureza Vickers se indica mediante (HV). Las impresiones obtenidas son típicamente inferiores a 0,5 mm (0,020 pulg) en diagonal. El ensayo Vickers da esencialmente el mismo número de dureza, independientemente de la carga, y es adecuado para el ensayo de materiales con una amplia gama de dureza, incluyendo los aceros tratados térmicamente (7).

Para el ensayo Vickers se emplea un indentador de diamante con base cuadrada. Permite cubrir todas las necesidades con solo cambiar la carga de aplicación, puede ser aplicado para materiales duros y blandos.

- **Ensayo Knoop.**

Desarrollado por F. Knoop en 1939 utiliza un indentador de diamante en forma de una pirámide alargada (Figura 17) con cargas aplicadas que van generalmente de 25 gramos a 5 kilogramos. El número de dureza Knoop queda indicado por (HK). Debido a las bajas cargas que se aplican, se trata de un ensayo de micro dureza. Por tanto, es adecuado para especímenes muy pequeños o muy delgados, y para materiales frágiles, como carburos, cerámicas y vidrios (7).

Este ensayo también es utilizado para medir la dureza de los granos y componentes individuales en una aleación de metal. El tamaño de la indentación se encuentra se encuentra generalmente en el rango de 0,01 mm a 0,10 mm (0,0004 pulg a 0,004 pulg); en consecuencia, la preparación de la superficie es muy importante, debido a que el número de dureza depende de la carga aplicada, los resultados del ensayo Knoop siempre deben citar cual fue la carga utilizada (7).

- **Ensayo Mohs.**

Desarrollado en 1822 por F. Mohs, este ensayo se basa en la capacidad de un material a rayar a otro. La dureza Mohs se basa en una escala del 1 al 10, siendo 1 la medida del talco y 10 la del diamante (la sustancia más dura conocida). Un material con un número de dureza Mohs más elevado siempre rayará a otro con un número más bajo. Los metales blandos tienen una dureza Mohs de 2 a 3, los aceros endurecidos de aproximadamente 6. Aunque la escala de Mohs es cualitativa, y es utilizada principalmente por la mineralogía, se relaciona con la dureza Knoop (7).

En resumen es una escala cualitativa que sirve para medir la resistencia de la superficie de un material mediante la penetración de otro objeto más duro.

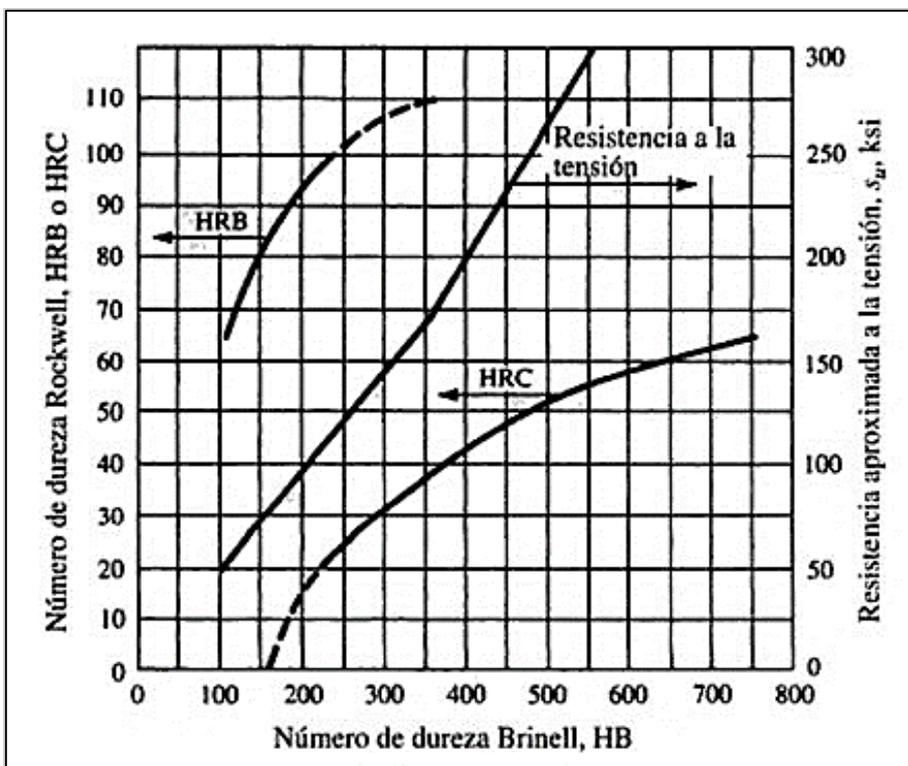


Figura 18. Conversiones de dureza.

Nota. Fuente: (17).

Para realizar estos ensayos se emplean algunos equipos:

– **Durómetro.**

Con este equipo se lleva a cabo un ensayo empírico, consiste en oprimir un indentador sobre la superficie de un material y luego se procede con la aplicación de una carga constante. El grado de penetración se mide pasado un segundo.

– **Escleroscopio**

Es un instrumento que usa un indentador con punta de diamante, el cual está dentro de un tubo de vidrio y se deja caer sobre una muestra desde cierta altura. El grado de impresión que ofrece es muy pequeño; por lo general, se emplea para superficies recubiertas. Es recomendable para medir la dureza de materiales con mayores dimensiones que no cabrían en el espacio proporcionado por los durómetros. Los valores de dureza se relacionan con el rebote del indentador, cuando más alto el rebote, la dureza será mayor (7).

2.2.6.5 Ensayo Jominy.

El ensayo de templabilidad Jominy es una prueba muy sencilla, debidamente normalizada que permite una comparación de la templabilidad de los aceros; es muy útil ya que reduce las dificultades que surgen durante la selección de materiales.

Además, el valor de este ensayo aumenta, al haberse comprobado que muchas de las propiedades mecánicas ordinarias del acero tales como la resistencia a la tracción, límite elástico, estricción y alargamiento, son función de la dureza del acero y ésta a su vez, es función de la microestructura. Con los datos que se obtienen, se llega a conocer las velocidades de enfriamiento que son necesarias para conseguir una dureza, una microestructura y un conjunto de características determinadas (6).

El ensayo, que es muy empleado para aceros de menos de 0,60% de carbono, consiste en temprar una probeta cilíndrica de 25 mm de diámetro y 100 mm de longitud aproximadamente (Figura 19). La temperatura del agua será de 20 °C a 25 °C (6).

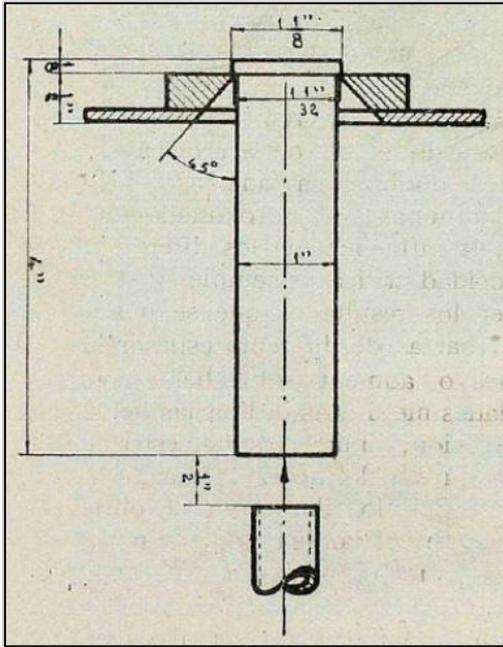


Figura 19. Probeta Jominy normal.

Nota. Fuente: (6).

Durante la adquisición del material se debe contar con dimensiones mayores a las del diseño de las probetas, en este caso aproximadamente de 28 mm de espesor, con el objetivo que después del mecanizado quede eliminada cualquier capa superficial descarburada existente.

La dureza se mide en la línea central de la superficie plana, con intervalos de 1/16 de pulgada, sujetando la probeta en un bloque en forma de V, con los valores obtenidos durante el ensayo de dureza se traza la curva Jominy correspondiente.

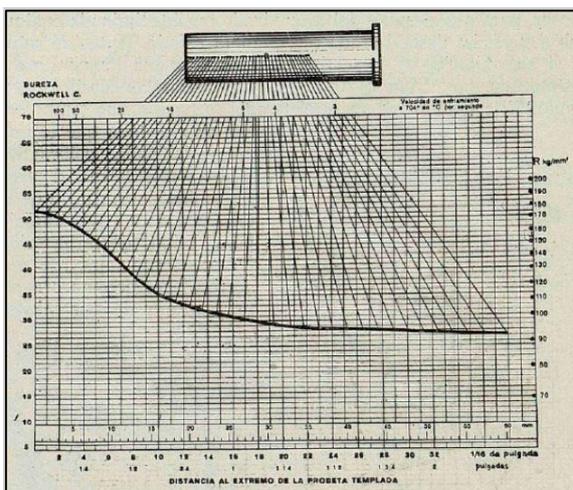


Figura 20. Forma de obtener la curva Jominy de un acero.

Nota. Fuente: (6).

Para los aceros de baja templabilidad, se usa la probeta tipo L (Figura 21), la cual es en parte hueca y tiene solamente dos pulgadas de longitud. Empleando la probeta normal para ensayar aceros de poco poder templante, los resultados son menos precisos que los que se obtienen empleando la probeta L, porque en esta, la disminución de la dureza es menos brusca que en aquella y las curvas que se obtienen dan un margen de medida más amplio (6).

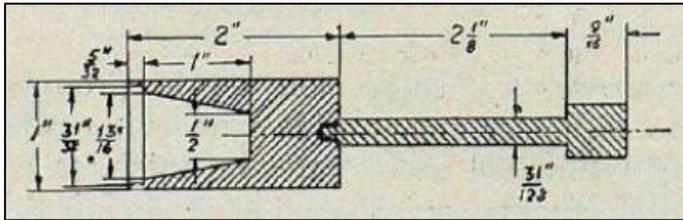


Figura 21. Probeta Jominy tipo L.

Nota. Fuente: (6).

2.2.7 Propiedades mecánicas.

Las propiedades mecánicas describen el comportamiento de un material al ser sometido a fuerzas externas, son las características que presenta para soportar distintas condiciones específicas de trabajo.

2.2.7.1 Dureza.

La dureza es la propiedad mecánica más resaltante debido a la alta necesidad de contar con materiales que puedan soportar grandes esfuerzos y puedan soportar altas condiciones de trabajo sin los inconvenientes como las deformaciones; es la resistencia que presenta un material a la penetración por un objeto duro, esta característica está relacionada con el desgaste:

Da una indicación general de la resistencia del material, de su resistencia al rayado y al desgaste. De una manera más específica, la dureza por lo general se define como la resistencia a la indentación o impresión permanente. Por lo que, por ejemplo, el acero es más duro que el aluminio y el aluminio es más duro que el plomo, dado que la resistencia a la indentación depende de la forma del indentador y de la carga aplicada (7 pág. 68).

Para aplicaciones industriales se efectúan los ensayos cuantitativos. Son los ensayos de penetración ya señalados y el valor que se obtiene puede ser empleado como una referencia al momento de seleccionar un material.

2.2.7.2 Resistencia a la tracción (S_u).

Es una característica muy importante para tener en cuenta, ya que es útil cuando se requiere el uso de materiales que puedan soportar grandes condiciones de esfuerzo, de modo que no sufran efectos de deformaciones.

Se considera que el punto máximo de la curva esfuerzo - deformación unitaria es la resistencia a la tensión (S_u), a veces se le llama resistencia última o simplemente resistencia a la tensión. En ese punto de la prueba se mide el máximo esfuerzo aparente en una barra de prueba del material (Figura 15).

En resumen, es la propiedad de los materiales para oponerse a la deformación plástica, regresando a sus condiciones originales.

2.2.7.3 Tenacidad.

La tenacidad puede calcularse mediante el ensayo de tracción, es la característica que tienen ciertos materiales para evitar fisuras o grietas, dependen del tipo de aleación y contenido de carbono; además se define:

La tenacidad es la capacidad de un material para absorber la energía que se le aplica sin fractura. Las piezas sometidas a cargas aplicadas repentinamente, a choques o a impacto, necesitan tener un alto nivel de tenacidad. Para medir la cantidad de energía necesaria para romper determinado espécimen hecho con el material que interesa, se emplean varios métodos. Al valor de absorción de energía en esas pruebas se le llama con frecuencia energía de impacto o resistencia al impacto (17 pág. 38).

2.2.7.4 Maquinabilidad.

Es una característica muy útil en los aceros, ya que en ciertos usos industriales se requiere contar con una superficie sin oxidación, “La maquinabilidad se relaciona con la facilidad con que se puede maquinar un material para conseguir un buen acabado superficial con una duración razonable de la herramienta” (17 pág. 38).

Permite al material ser mecanizado de manera más fácil; las altas durezas y la presencia de carburos dificultan el proceso de maquinado.

2.2.7.5 Ductilidad

Es la propiedad que presentan los metales para soportar distintas deformaciones sin llegar a la ruptura ni ser deformados plásticamente; permite a ciertos metales deformarse en hilos.

La ductilidad es la característica de los materiales para deformarse antes de su ruptura. La fragilidad es lo opuesto a la ductilidad.

2.2.7.6 Resistencia al desgaste

Se define como la resistencia que posee un material a deteriorarse al ser sometido a diversas condiciones de fricción con otro objeto, la aleación de carburos mejora la resistencia al desgaste.

Con el objetivo de reducir las condiciones de desgaste, los aceros son provistos de elementos de aleación con tal de que pueden evitar tales efectos, los cuales son la principal causa de la vida útil de los materiales.

2.2.7.7 Templabilidad

La templabilidad nos proporciona el grado de profundidad a la que un acero consigue endurecerse mediante procesos de tratamiento térmico. Además, se menciona que a mayor contenido de aleación, la templabilidad es mayor. “Es necesaria cuando se requieren propiedades homogéneas a lo largo de la sección transversal de la herramienta” (4 pág. 5).

2.2.8 Tratamientos térmicos.

Se define a los tratamientos térmicos como una combinación de procesos de tiempo - temperatura que se emplean con el objetivo de modificar la microestructura interna del material y mejorar sus propiedades mecánicas.

Son los procesos en los que se controla el tiempo y la temperatura; además se liberan esfuerzos residuales y/o se modifican las propiedades del material como la dureza, resistencia, ductilidad y tenacidad (19).

Los tratamientos térmicos tienen por objeto mejorar las propiedades y características de los aceros; consisten en calentar y mantener las piezas o herramientas de acero a temperaturas adecuadas durante un intervalo de tiempo y enfriarlas luego en condiciones convenientes. De esta forma, se modifica la microestructura de los aceros (...) (6 pág. 61).

El tiempo y la temperatura son los factores más importantes durante el proceso térmico y deben ser definidos previamente, conforme a la composición del material, dimensiones y características que se desean obtener (6).

2.2.8.1 Etapas del tratamiento térmico

Existen tres etapas al momento de llevar a cabo los tratamientos térmicos, de modo que el proceso se realice de manera adecuada. Entre las cuales están el calentamiento, permanencia y enfriamiento.

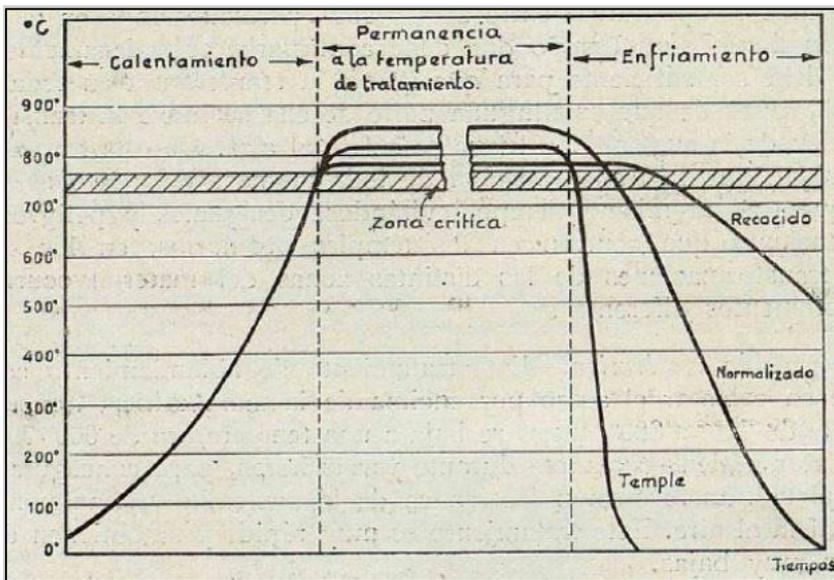


Figura 22. Representación esquemática de las etapas del tratamiento térmico.

Nota. Fuente: (6).

a) Calentamiento.

Corresponde a la primera etapa del proceso de tratamiento térmico, por lo general no se le suele dar la debida importancia, sin embargo, siempre tiene la importancia necesaria para ser tomada en consideración. Durante esta etapa, el calentamiento debe ser lo más uniforme posible y debe alcanzar hasta lo más profundo del material tratado.

La etapa de calentamiento debe realizarse lentamente de modo que se consiga una diferencia mínima entre el interior del material y la periferia, ya que de no llevarse a cabo de esta manera se pueden generar grietas y deformaciones.

b) Permanencia.

La duración de la etapa de calentamiento dependerá del proceso de tratamiento térmico que se esté realizando. Para el recocido usualmente son tiempos más prolongados, mientras que para el normalizado conviene emplear permanencias más cortas.

c) Enfriamiento.

Para iniciar la etapa de enfriamiento todo el material ya debe haber alcanzado la austenización. El enfriamiento debe realizarse lentamente con el objetivo de conseguir que el acero quede blando, mientras más lenta esta etapa, el material quedará más blando.

Existen distintos procesos de tratamientos térmicos que se aplican a los aceros dependiendo de las características finales que se quieren obtener en el material.

2.2.8.2 Temple.

Es el tratamiento térmico convencional, se caracteriza por sus enfriamientos rápidos y continuos en un medio adecuado como agua, aceite, aire; se emplea con tal velocidad que reproduzca un aumento considerable en la dureza (22).

Es un tratamiento térmico al que se somete al acero para aumentar su dureza, resistencia y tenacidad. Para ello, se calienta el acero a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica (entre 900 y 950 °C), a esta temperatura se produce que la ferrita se convierta en austenita, luego la velocidad de enfriamiento deberá ser suficientemente rápida para llegar a la máxima dureza (22).

El proceso de temple se realiza a los aceros que requieren soportar altas condiciones de esfuerzo; "Tiene como objeto endurecer y aumentar la resistencia de los aceros. Para ello, se calienta el acero a una temperatura a la crítica y se enfría luego más o menos rápidamente (...)" (6 pág. 64).

Para el proceso de temple es necesario tener en cuenta el medio en el que se sumergirá el material, de modo que no sufra fenómenos como grietas y deformaciones; considerando el medio de temple conveniente para las características deseadas:

(...) Los medios más usados para el temple son el agua, el aire y el aceite. El templado con aceite resulta muy lento, pero evita las grietas de templado causadas por la rápida dilatación del elemento tratado. El templado en agua se usa para aceros al carbono y para aceros al medio carbono de baja aleación (19 pág. 45).

El tratamiento térmico de temple no es un proceso final; con el objetivo de reducir la tenacidad, eliminar las tensiones internas que se producen y alcanzar las propiedades mecánicas deseadas, después del temple se realiza un revenido al acero.

Tabla 5.

Temperaturas recomendadas para el temple de aceros de 0,1% a 1,4% de C.

Composición % de C	Temperatura °C
0,10	925°
0,20	900°
0,30	870°
0,40	840°
0,50	830°
0,60	810°
0,70	780°
0,80	770°
0,90	770°
1,00	760°
1,20	760°
1,40	760°

Nota. Fuente: (6).

2.2.8.3 Revenido.

Después de realizar un temple a los aceros usualmente presentan una estructura dura y frágil para las condiciones a las que será sometido. Estos efectos se corrigen mediante el revenido, que consiste en llevar al acero a una temperatura inferior a la crítica, enfriándolo comúnmente en aire y en otros casos en agua o aceite dependiendo de la composición. El revenido no intenta eliminar los efectos producidos por el temple sino modificarlos, reduciendo la dureza y aumentando la tenacidad, al mismo tiempo que elimina las tensiones internas que se generan durante el temple (6).

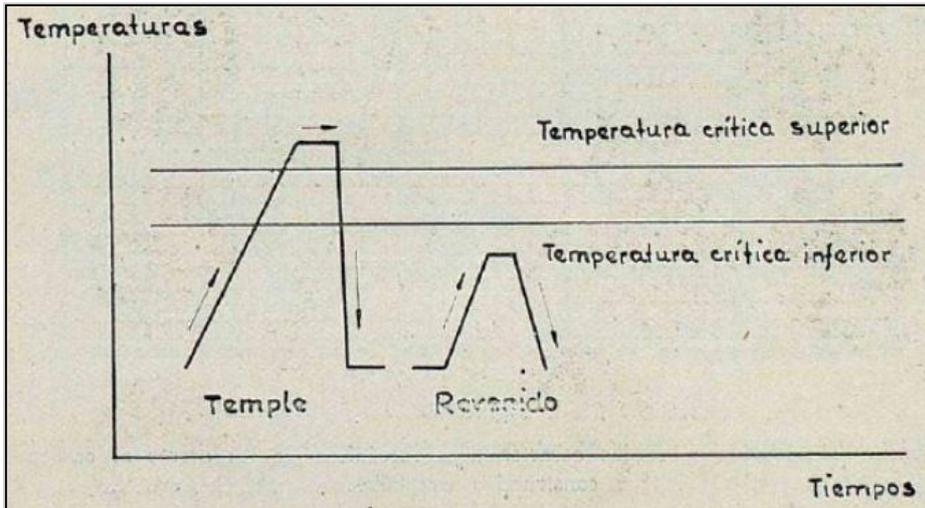


Figura 23. Esquema del temple y revenido de los aceros.

Nota. Fuente: (6).

Las tensiones que surgen durante el temple pueden ser eliminados mediante este proceso de revenido; la temperatura a la que se realiza depende de la composición del acero y de la dureza que se desea obtener.

Es un tratamiento que se da a las piezas de acero que han sido previamente templadas. Con este tratamiento, que consiste en un calentamiento a temperatura inferior a la crítica, se disminuye la dureza y resistencia de los aceros templados, se eliminan las tensiones creadas en el temple y se mejora la tenacidad, quedando además, el acero con la dureza o resistencia deseada (6 pág. 64).

2.2.8.4 Recocido.

Al someter al acero a condiciones de trabajo en frío o en caliente, surgen esfuerzos residuales; la función principal del tratamiento térmico de recocido es brindar una estructura blanda, eliminar los esfuerzos residuales, mejorar las características eléctricas y proporcionar un grano fino o aumentarlo de tamaño, además de mejorar las características de maquinado.

Este tratamiento térmico tiene como finalidad ablandar el acero, regenerar la estructura de aceros sobrecalentados o simplemente eliminar las tensiones internas que siguen a un trabajo en frío. Este proceso consiste en un calentamiento hasta la temperatura de austenización (800 - 925 °C) seguido de un enfriamiento lento a una velocidad controlada. Con este tratamiento se logra aumentar la elasticidad, mientras que disminuye la dureza (22).

Tabla 6.

Temperaturas recomendadas para el recocido de aceros para herramienta.

Composición % de C	Temperatura °C
0,60	800°
0,70	775°
0,80	760°
0,90	760°
1,00	760°
1,10	760°
1,20	760°

Nota. Fuente: (6).

2.2.8.5 Normalizado.

Se realiza a una temperatura ligeramente por encima de la crítica, luego se somete al acero a un enfriamiento lento en aire, con el objetivo de proporcionar una estructura homogénea en estado de suministro y eliminar los efectos de un tratamiento defectuoso realizado anteriormente; además, brinda un tamaño de grano uniforme. Por lo general, es un tratamiento que precede al temple y revenido; tiene una similitud con el recocido:

El normalizado se produce en forma parecida al recocido, pero a mayor temperatura, pasando del intervalo de transformación donde se forma la austenita, a unos 870 °C. El resultado es una estructura interna uniforme y una resistencia mayor a la que produce el recocido. En general, mejoran la maquinabilidad y tenacidad respecto al estado recocido (17 pág. 51).

Tabla 7.

Temperaturas recomendadas para aceros al carbono.

Composición % de C	Temperatura °C
0,10	935°
0,20	910°
0,30	880°
0,40	860°
0,50	840°

Nota. Fuente: (6).

2.2.8.6 Medios de enfriamiento.

Existen medios tradicionales de enfriamiento como son el agua, el aceite, las sales minerales y el aire. La efectividad del medio de enfriamiento se puede comprobar con el análisis de la microestructura del material tratado.

En general los medios de enfriamiento para el temple son líquidos (agua, aceite, sal, polímeros u otros fluidos), aunque en algunas aleaciones, el temple puede lograrse en aire o con gases, siendo los elementos de aleación del acero lo que permiten tal operación (22).

Los medios de enfriamiento presentan características en el proceso térmico y que se deberían tomar en consideración para alcanzar mejores resultados:

a) Primera etapa.

Cuando se sumerge el acero en el líquido, ya que la temperatura que presenta en ese momento es muy elevada, se llega a formar una capa de vapor la cual rodea el acero y por lo tanto el enfriamiento se realiza mediante conducción y radiación a través de esta capa. En esta etapa el enfriamiento es relativamente lento.

b) Segunda etapa.

Cuando la capa de vapor va desapareciendo debido a que la temperatura en la superficie del acero desciende. La capa de vapor se va apartando de la superficie del acero y es remplazada por líquido. Durante esta etapa el enfriamiento es relativamente más rápido.

c) Tercera etapa.

Se da cuando la temperatura de la superficie del acero es menor a la temperatura de ebullición del medio de enfriamiento, por lo general es por debajo de los 300 °C. Por lo tanto, al no haber presencia de vapor, el líquido es el que realiza el enfriamiento mediante conducción y convección, sabiendo que la diferencia de temperaturas del líquido y la superficie del acero es mínima. Durante esta etapa el enfriamiento es más lento que las anteriores y se denomina enfriamiento por líquido.

Para alcanzar mejores resultados durante el proceso de enfriamiento, los medios de temple requieren la capacidad de trabajar a altas condiciones de temperatura y las que se debería tener en cuenta; "(...) las propiedades que más influyen en el poder templante de los líquidos son: Su temperatura de ebullición, su conductividad térmica, su viscosidad, su calor específico y su calor de vaporización" (6 pág. 164).

La viscosidad es un factor importante durante la segunda y tercera etapa ya que influye en la velocidad de enfriamiento; además, no se debe dejar de lado la agitación del medio templante (6).

Para obtener en el temple de aceros los mejores resultados, conviene utilizar el medio de enfriamiento menos enérgico que sea capaz de comunicar al acero una velocidad de enfriamiento superior a la crítica. De esta forma, se consigue una estructura totalmente martensítica, la máxima dureza compatible con su composición y se evitan en lo posible las grietas y deformaciones (6).

En los enfriamientos rápidos siempre existe el peligro de que se creen tensiones, debido al desigual enfriamiento de las piezas ya que la periferia se enfría rápidamente, mientras en el corazón el acero está todavía a elevada temperatura. En los enfriamientos lentos, la temperatura es más uniforme en toda la masa de las piezas, y son menos frecuentes las grietas y deformaciones (6).

En la antigüedad se empleaba el enfriamiento rápido en agua durante el proceso de temple; por lo que solo se utilizaban los aceros al carbono y existía el inconveniente de que aparecían grietas y deformaciones, de modo que se optaba por emplear el aceite u otros medios de enfriamiento, sin embargo no se alcanzaba la dureza requerida.

Con la gran variedad de aceros surgen dudas con respecto al medio de enfriamiento conveniente a emplear, por lo que hay que tener como referencia los catálogos de los fabricantes; no obstante existen excepciones, suponiendo que a un acero le corresponde un temple en agua, pero por otro lado también presenta dimensiones pequeñas, entonces conviene templarla en aceite ya que podrá alcanzar la dureza deseada y ya no existe el riesgo de presentar grietas en su estructura. Entre los medios de enfriamiento más destacados para el proceso de temple se cuenta con:

- **Agua.**

Para este medio de enfriamiento se tiene que evitar que el agua se caliente durante el proceso de temple.

Conviene que la temperatura del agua oscile entre 15 °C - 20 °C, pues si la temperatura es superior a los 30 °C, se prolonga exageradamente la primera etapa del enfriamiento, lo que es un gran inconveniente, porque con ello disminuye la velocidad de enfriamiento en la zona 700 °C - 750 °C y se favorece, sobre todo en los aceros de poco poder templante la formación de estructuras dúctiles y blandas (6).

- **Aceite.**

Por lo general se manipulan aceites animales, vegetales y minerales como medio de enfriamiento.

También se empleaban los aceites de pescado y ballena, pero solo en circunstancias excepcionales de escasez. Los aceites animales y vegetales con el uso continuo a temperaturas de 50 °C - 125 °C se descomponen, espesan y se vuelven gomosos dando temple bastantes irregulares. Además, resultan caros y de olor desagradable (6).

- **Plomo.**

Desde hace bastantes años se emplea este metal fundido para el temple. Las aplicaciones más generales son el temple de herramienta de aceros especiales y el temple de muelles. En esos casos se introduce el acero caliente en plomo fundido y allí se enfriará hasta la temperatura que tenga el baño, que oscila entre 350 °C - 600 °C (6).

El plomo posee una gran conductibilidad, por lo cual el calentamiento del baño se hace rápidamente y también enfría con relativa rapidez las piezas que se templean (6).

Su elevado peso específico es un inconveniente, pues las piezas flotan y hay que preparar dispositivos especiales para que se introduzcan en el baño. Como el plomo se oxida fácilmente, hay que evitar que la superficie del baño esté en contacto con la atmósfera, cubriéndolo con pequeños trozos de carbón vegetal (6).

- **Mercurio.**

Para el temple de piezas muy delicadas, como instrumentos de cirugía o para piezas de gran dureza, se empleaba algunas veces el mercurio, pero su elevado peso específico y precio limitan sus aplicaciones, por lo que en la actualidad casi no se emplea (6).

- **Sales fundidas.**

En estos últimos tiempos se van utilizando cada día más y van desplazando a los baños de plomo. Son mezclas de sales que funden a baja temperatura y sirven como medio de enfriamiento en el temple de gran variedad de piezas, como engranajes, calibres y muelles (6).

En este medio de enfriamiento se usan temperaturas de 150 °C - 600 °C y reemplazan el uso del aceite y plomo. Sin embargo para la etapa de enfriamiento del acero desde las temperaturas de austenización solamente se utilizan sales con bajas temperaturas de fusión.

2.2.8.7 Tratamiento criogénico

La tecnología del proceso criogénico ya se está llevando a cabo en las industrias que requieren de una alta disposición en sus procesos para la fabricación de productos:

Desde los primeros momentos de su utilización, hacia el año 1942, existió cierta desorientación sobre su utilidad, ya que mientras algunos metalurgistas lo consideraban como un gran éxito, señalando que al tratar de esa forma ciertos aceros, se conseguía aumentar la vida útil de las herramientas en un 100%, otros investigadores afirmaban que, empleándolo no se mejoraba sensiblemente su rendimiento (6 pág. 269).

El tratamiento criogénico no es otra aplicación diferente a los tratamientos térmicos estándar sino que es una extensión del proceso térmico por lo cual presenta la misma disposición que estos solo añade una variación al medio de enfriamiento, "Este tratamiento se aplica en los aceros que después del temple en agua o en aceite, conservan todavía en su estructura una cierta cantidad de austenita residual sin transformar" (6 pág. 269).

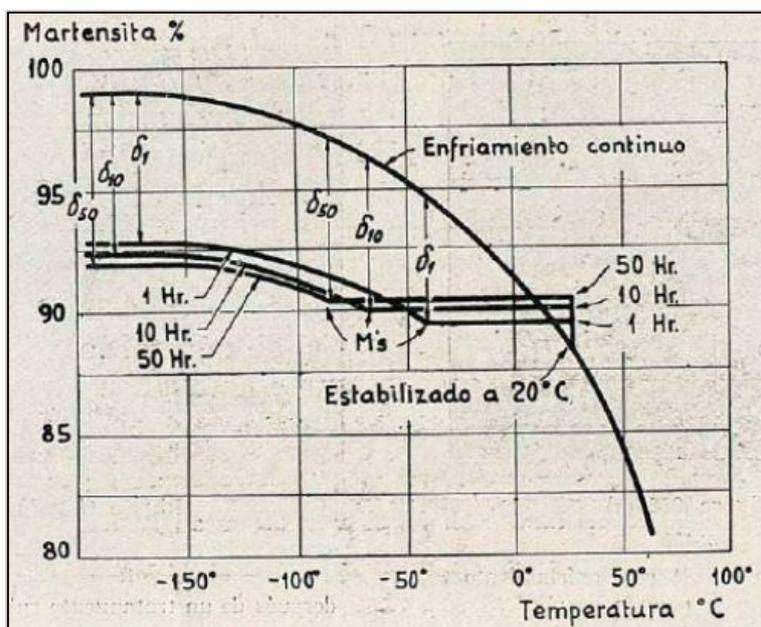


Figura 24. Transformación de martensita bajo cero.

Nota. Fuente: (6).

Al realizar un tratamiento térmico de temple convencional la transformación de la austenita no es completa, de modo que el medio de enfriamiento se halla por lo general a una temperatura ambiente. Por lo tanto, si el enfriamiento se extendiera alcanzando a una temperatura muy baja, entonces favorecería la transformación de la austenita resultando más completa. Por esta razón se implementa el proceso criogénico con el objetivo de potenciar estas características:

Los tratamientos criogénicos se realizan a temperaturas bajo cero, estos tratamientos continúan el proceso de templado. Su objetivo es transformar la mayor cantidad de austenita retenida en martensita. No son sustitutos de otros tratamientos térmicos, sino una extensión del ciclo térmico que involucra todo el material y no solo la superficie (4 pág. 26).

Se debe tener en cuenta que, al realizar este proceso el material sufrirá algunos cambios en sus dimensiones, así también como el incremento de su dureza a causa de las transformaciones de fase; sin embargo, existe el riesgo de sufrir agrietamiento.

En la tesis realizada por Lira Calmet nos menciona que se tiene dos criterios para realizar el proceso y estos dependen de la temperatura que se consigue:

- Proceso Sub-cero: Con el uso de hielo seco y alcohol, se pueden lograr temperaturas de $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ (4).
- Proceso criogénico: Con uso de nitrógeno líquido, el material que es sometido alcanza temperaturas de $-193\text{ }^{\circ}\text{C}$ (4).

Los tratamientos térmicos criogénicos son una tecnología conocida desde hace ya algún tiempo. El objetivo principal de su uso es el de mejorar la resistencia al desgaste de los aceros y así poder prolongar su vida útil. Sin embargo, la aplicación de la criogenia es muy limitada.

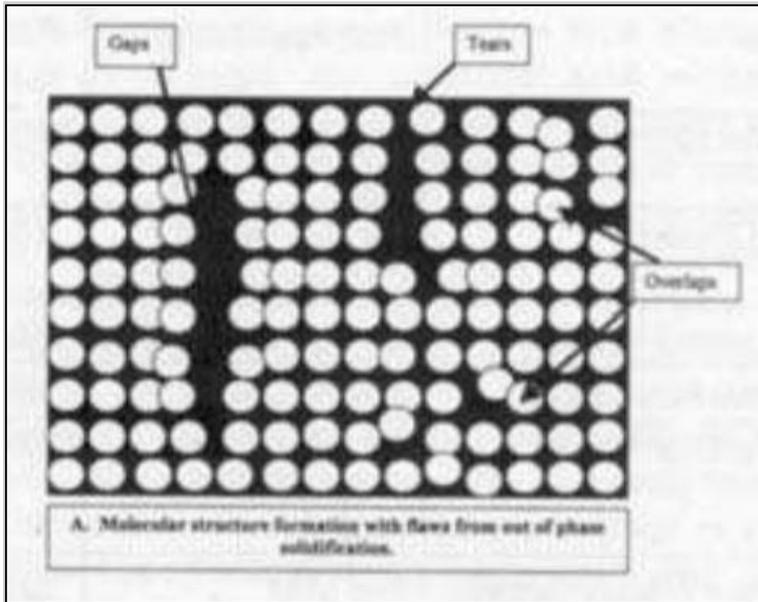


Figura 25. Arreglo molecular de una estructura templada.

Nota. Fuente: (23).

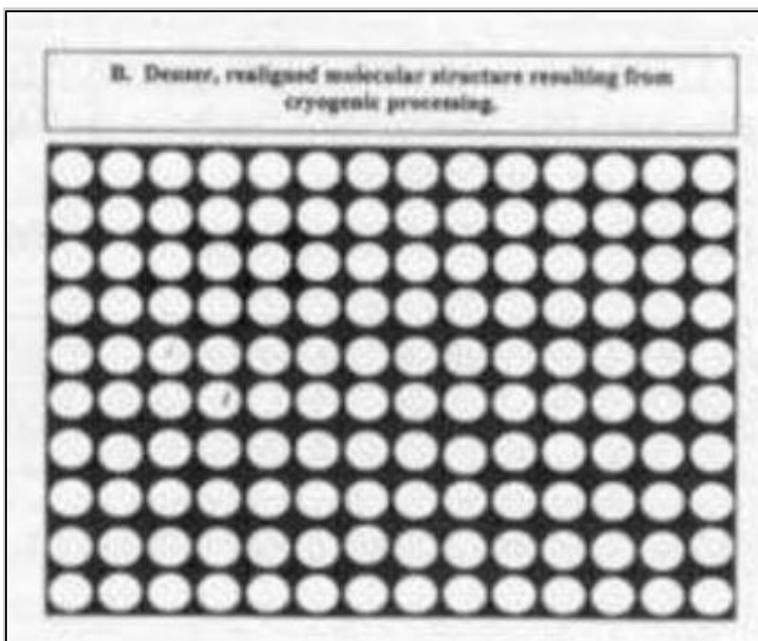


Figura 26. Arreglo molecular de una estructura tratada criogénicamente.

Nota. Fuente: (23).

Para el proceso criogénico se suelen emplear variedad de medios de enfriamiento: Nitrógeno líquido y hielo seco con alcohol, CO₂ (sub-cero). “Uno de los procedimientos más utilizados para obtener bajas temperaturas consiste en emplear una mezcla de anhídrido carbónico sólido y acetona. Por este medio se llegan a alcanzar temperaturas de -75 °C bajo cero” (6 pág. 274).

El proceso criogénico tiene gran impacto en la aplicación para piezas cementadas, debido a que con frecuencia aparecen altos contenidos de austenita retenida luego de haber realizado el temple.

Dada la particularidad de este proceso, en el que el revenido final no se debería realizar a una temperatura por encima de los 200 °C ya que la dureza disminuiría considerablemente; el tratamiento criogénico es de gran importancia, puesto que es el único medio que favorece la transformación de la austenita retenida razón por la que no se llega a alcanzar la máxima dureza. Los revenidos que se dan a temperaturas de 450 a 600 °C para transformar la austenita retenida no pueden ser empleados durante este proceso por las circunstancias antes mencionadas.

2.2.8.8 Austenización.

Austenizar un acero consiste en transformar su estructura en austenita. Para austenizar completamente un acero hay que calentar a una temperatura a la que solo sea estable la estructura austenítica, y mantener el acero a esta temperatura el tiempo suficiente para que se produzca la transformación (24). Por lo general, la temperatura de austenización de los aceros hipo eutectoides, suele estar en un rango de 30 a 80 °C sobre la temperatura crítica, lo cual se debe tener presente:

Debe elegirse una temperatura de austenización adecuada para el acero. Si la temperatura de calentamiento no está muy poco por encima del punto crítico superior, la difusión es más lenta y el tiempo de permanencia en el horno debe ser largo. Sin embargo, si la temperatura es demasiado alta, el tamaño de grano de la austenita puede crecer, lo que es desfavorable para las propiedades mecánicas del acero (24 pág. 284).

Al haber alcanzado la fase austenítica, esta se transformará en otras fases a medida que desciende la temperatura y dependiendo de la velocidad de enfriamiento ya que retenerla a temperatura ambiente resulta imposible incluso empleando altas velocidades de enfriamiento. "Cuando la austenita en el enfriamiento llega a una cierta temperatura que depende de la composición del acero y que generalmente se encuentra en la zona de 350 a 500 °C se inicia la transformación en martensita" (6 pág. 138).

2.2.8.9 Transformación martensítica.

Cuando ya se ha alcanzado la zona austenítica y posteriormente dejamos al acero enfriarse de manera lenta, la austenita se irá transformando a causa de la reducción de temperatura, obteniendo los constituyentes que correspondan al diagrama hierro - carbono.

En el caso que se aplique un enfriamiento rápido, no se conseguirán las transformaciones del diagrama, ya que corresponden al tipo térmico y por lo tanto involucran difusión.

Con altas velocidades de enfriamiento no puede ocurrir ninguna transformación térmica, y por tanto la austenita (que es, en principio, absolutamente inestable a temperatura ambiente y por tanto precisa transformarse en otra cosa) recurrirá a una transformación de tipo atómico. De hecho, la austenita, se transforma en otra fase, inexistente en el diagrama de equilibrio hierro - carbono, denominada martensita (24 pág. 285).

Mediante una inspección al diagrama TTT, se logra evidenciar que no proporciona información útil por debajo de los 250 °C. La martensita se obtiene a partir de la austenita templada; su inestabilidad aumenta a medida que la temperatura disminuye (25).

Al ser una transformación de tipo atómica, el porcentaje de martensita no se incrementa debido a la permanencia a una determinada temperatura sino que para lograr la transformación se deberá ir reduciendo la temperatura progresivamente. “El cambio de austenita a martensita se produce en la última fase del enfriamiento, y la transformación se ve acompañada de un cambio de volumen que puede agrietar el metal si el enfriamiento es demasiado rápido” (4 pág. 21).

Para que comience la formación de martensita, se precisa enfriar el acero con estructura austenítica por debajo de una determinada temperatura, denominada M_S . Al seguir enfriando el acero por debajo de ese valor, irá aumentando la cantidad de austenita transformada en martensita, hasta que, al llegar a la temperatura denominada M_f , se habrá completado la transformación (24 pág. 286)

Por lo tanto, estas temperaturas corresponden a la temperatura a la que se da inicio a la transformación martensítica (M_S), temperatura a la que se da fin a la transformación martensítica (M_f). “Cuando el temple se hace a la temperatura correcta, en general se obtiene estructuras de martensita muy fina (...)” (6 pág. 107).

Si la temperatura de enfriamiento se encuentra por encima de la temperatura M_f dará como resultado una transformación incompleta dejando cierto contenido de austenita sin transformar conocida como austenita residual. Por lo general, la temperatura M_f se

encuentra por debajo de la temperatura ambiente y que la mayor parte de los aceros presenten cierto contenido de austenita residual (24).

Los valores correspondientes a estas temperaturas dependen de la composición química de los aceros. Mientras mayor sea el contenido de carbono, estas temperaturas serán menores.

- **Austenita retenida.**

Al aplicar un temple a los aceros en los que se emplea como medio de enfriamiento agua y aceite, la transformación de fase por lo general no resulta ser completa dejando como consecuencia la presencia de austenita sin transformar que es denominada austenita retenida; esta solución posee una estructura blanda que afecta la vida útil de los aceros (24).

Generalmente la presencia de austenita retenida en la microestructura reduce la dureza obtenida en el temple, en algunos casos resulta ser imperceptible, pero en otros, si se encuentra en elevados porcentajes, pudiendo reducir en 10 puntos la dureza Rockwell C (24).

2.2.9 Metalografía

La metalografía es una disciplina que se encarga de analizar y determinar la constitución de los metales, haciendo uso de técnicas de amplificación para una mejor observación. Asimismo, efectúa los procesos de preparación muestras y su respectiva evaluación a nivel microestructural.

La metalografía engloba el estudio de la composición microestructural de los metales, el tamaño de grano, la orientación y disposición de estos. Además, comprende dos subdivisiones:

a) Análisis macroscópico.

Se puede realizar a simple vista, sin necesidad de contar con equipos de amplificación y se debe llevar a cabo una previa preparación de las muestras con el objetivo de determinar ciertas características o defectos que presenta.

b) Análisis microscópico.

Para tener una idea más clara sobre el análisis microscópico se debe tener en cuenta dos conceptos.

- Granos: Los metales poseen una estructura policristalina estos se presentan como pequeños cristales y se conocen como granos. Cada tipo de grano presenta distintas particularidades como el tamaño, la distribución y orientación.
- Microscopio: Proporciona una observación ampliada, mediante la utilización de la iluminación a nuestro favor.

2.2.9.1 Ensayo metalográfico

Para la adecuada observación de una muestra se cuenta con una serie de procedimientos. Se describen los pasos para el análisis en el microscopio.

a) Selección de la muestra.

Consiste en extraer una pequeña muestra del material a analizar, tomando en consideración el tamaño y que tanto representa del total; asimismo se emplea durante los ensayos de dureza.

Es importante tener en cuenta la zona de análisis de una muestra, ya que por lo general no son homogéneas (26).

b) Montaje de la muestra.

Se refiere a proporcionar una superficie que pueda sostener a la muestra, de manera que facilite la manipulación del material. Cabe recordar que es importante limpiar la muestra antes de llevar a cabo el montaje.

c) Preparación de la superficie.

Las muestras sujetas a una observación microscópica deben contar con una superficie plana y pulida; esto se logra con el uso de herramientas de corte (torneado y fresado), procesos de rectificado con el objetivo de eliminar las imperfecciones en la muestra y además proporcionarle un mejor acabado; evitando siempre el calentamiento de esta (26). Los métodos que se emplean usualmente para la preparación de la superficie son:

- Maquinado.
- Rectificado y abrasión.
- Pulido.

d) Ataque químico.

Al finalizar la etapa de pulido de la muestra, la superficie de la muestra se pone en contacto con algún reactivo, se trata de un proceso controlado de corrosión.

Las muestras pulidas para observación microscópica deben ser sometidas a algún procedimiento que haga visible la estructura cristalina y que algunas veces, permitirá reconocer impurezas y determinar el tipo de constituyentes de la estructura (26 pág. 82).

Se sumerge el material en una solución química, los cuales dependen de la composición del material, la temperatura y efecto deseado (26).

2.2.9.2 Equipos

Para realizar el análisis e identificación de la microestructura del material se emplean dos equipos que nos faciliten el proceso. Tales equipos permiten un análisis amplificado de la muestra y le proporcionan un mejor acabado a la superficie de estudio.

- Microscopio metalográfico.
- Pulidora.

2.1 Definición de Términos Básicos

2.1.1 Definiciones básicas

ASTM	Asociación Americana de Ensayo de Materiales
UNS	Sistema Unificado para Metales y Aleaciones
SAE	Sistema Unificado para Metales y Aleaciones
AISI	Instituto Americano del Hierro y el Acero
TTT	Tiempo - Temperatura - Transformación
TEC	Transformación de enfriamiento continuo
SAE 1045	Society Automotive Engineers, acero con 0,45 % C

2.1.2 Lista de símbolos

HRC	Dureza Rockwell C
HB	Dureza Brinell
HV	Dureza Vickers
HK	Dureza Knoop
Fe-C	Sistema binario hierro - carbono
BCC	Red cristalina cúbica centrada en el cuerpo
FCC	Red cristalina cúbica centrada en la cara

BCC	Red cristalina tetragonal centrada en el cuerpo
Fe_3C	Carburo de hierro - cementita
M_s	Temperatura inicial para transformación martensítica
M_f	Temperatura final para transformación martensítica
S_u	Resistencia a la tracción kg/mm^2
σ	Esfuerzo kg/mm^2
T	Temperatura °C, K, °F
ρ	Densidad g/cm^3

CAPITULO III

METODOLOGÍA

En el presente capítulo se establece la Metodología correspondiente al tema de estudio, definiendo el método y alcance de la investigación, diseño de la investigación, población y muestra, técnicas e instrumentos de recolección de datos y técnicas para el análisis de los resultados; los mismos que proporcionan la estructura que garantiza el correcto desarrollo de la investigación. El desarrollo Metodológico se basó en el texto “Metodología de la Investigación Tecnológica” (27).

3.1 Métodos y alcance de la investigación

3.1.1 Método de investigación.

Esta investigación presenta una base teórica, la cual sustenta el desarrollo de los procesos de tratamiento térmico realizado a diversas probetas de acero. El presente estudio cuenta con un enfoque cuantitativo y cualitativo.

Cuantitativo, ya que se procedió con la medición de la dureza del acero al ser tratado térmicamente y ser sometido a diversos medios de enfriamiento; por lo tanto, corresponde a datos cuantitativos y susceptibles a análisis.

A. Método experimental.

Se contó con bases previas al tema de estudio, además la investigación partió con la idea de que estos procesos de tratamiento térmico se emplean con el fin de mejorar las características y propiedades del material.

La observación experimental, se realiza cuando existe una hipótesis que afirma cierta causa para experimentar y se registran dos características de la actividad: la acción y reacción. La acción consiste en la manipulación de

las variables independientes y la reacción es el efecto que produce en la variable dependiente (27).

Para la manipulación de la variable independiente se tuvo el control de todos los parámetros del proceso térmico y elección del medio de enfriamiento para conseguir optimizar la variable dependiente.

Se establecieron condiciones controladas para la ejecución de los procedimientos y ensayos, correspondientes a la manipulación de la variable independiente, así como el efecto que provoca sobre la variable dependiente.

La manipulación de los procedimientos y ensayos se llevaron a cabo en las instalaciones de la Corporación Sudamericana de Aceros Especiales S.A.C. por el Laboratorio de Control de Calidad y por el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad Nacional de Ingeniería.

3.1.2 Nivel de investigación.

“La Investigación Experimental tiene como propósito manipular las variables que tienen relación causal para transformarlo. Su finalidad es crear conocimientos nuevos para mejorar el objeto de investigación” (27).

El nivel de investigación es experimental, de modo que tiene como objetivo manipular las variables que causan un efecto sobre los resultados. Por lo tanto, esta investigación tiene como propósito adquirir nuevos conocimientos que nos ayuden a mejorar el objeto de investigación, además, que faciliten abordar nuevos temas de investigación y posibles aplicaciones.

“La Investigación Experimental busca optimizar las variables para maximizar los resultados” (27). La investigación es experimental, ya que trata de manipular los factores de la variable independiente buscando optimizarlos con el objetivo de maximizar la dureza del acero.

3.1.3 Tipo de investigación.

“La investigación aplicada se caracteriza porque busca la aplicación o utilización de los conocimientos adquiridos, a la vez que se adquieren otros, después de implementar y sistematizar la práctica basada en investigación. El uso del conocimiento y los resultados de la investigación da como resultado una forma rigurosa, organizada y sistemática de conocer la realidad” (28).

La investigación es de tipo Aplicado, y puede definirse como una Investigación Aplicada Experimental, ya que tiene pocos conocimientos prácticos y su propósito es optimizar el objeto de investigación; además, que busca resolver un problema práctico para satisfacer el propósito de los tratamientos térmicos.

Para optimizar el objeto de estudio, la investigación tiene el control de dos variables correspondientes al tratamiento térmico criogénico, las cuales corresponden al proceso térmico, que incluye las especificaciones de tiempo, temperatura y tipo de tratamiento; por otra parte el medio de enfriamiento que corresponde a las variaciones de los medios de temple.

3.2 Diseño de la investigación

“El diseño experimental utilizamos cuando podemos controlar todas las variables del objeto de investigación” (27). El diseño que se utilizó en esta investigación es la factorial experimental debido a que contamos con la presencia de niveles en nuestras variables; además, podemos controlar todas las variables correspondientes al Proceso Criogénico.

Los diseños factoriales manipulan dos o más variables independientes e incluyen dos o más niveles de presencia en cada una de las variables independientes. La construcción básica de un diseño factorial consiste en que todos los niveles de cada variable independiente son tomados en combinación con todos los niveles de las otras variables independientes (27).

3.2.1 Diseño factorial 3x2.

Este diseño de investigación manipula dos factores y presentan tres y dos niveles respectivamente; luego se registran los datos en una tabla de combinaciones (27).

Tabla 8.

Representación matricial.

B ₁	A ₁ B ₁	A ₂ B ₁
B ₂	A ₁ B ₂	A ₂ B ₂
B ₃	A ₁ B ₃	A ₂ B ₃
	A ₁	A ₂

Tabla 9.

Registro de datos de diseño 3x2 de niveles mixtos.

Procesos de tratamiento térmico			HRC			
Dimensiones		Combinación de tratamientos	Repeticiones			Promedio
A	B		I	II	III	
A ₁	B ₁	A ₁ B ₁				
	B ₂	A ₁ B ₂				
	B ₃	A ₁ B ₃				
A ₂	B ₁	A ₂ B ₁				
	B ₂	A ₂ B ₂				
	B ₃	A ₂ B ₃				

- A: Proceso térmico.
 - A₁: Temple convencional (Sin criogénico).
 - A₂: Temple con extensión criogénica (Con criogénico).
- B: Medio de enfriamiento.
 - B₁: Agua.
 - B₂: Aceite.
 - B₃: Salmuera.

El procedimiento fue el siguiente:

- Se fabricaron 18 probetas para el ensayo de dureza Rockwell, el ensayo estuvo regido de acuerdo con la norma ASTM E 18 - 15 (Anexo 3); se procedió a temprar y revenir a 850 °C y 200 °C respectivamente, parámetros obtenidos del catálogo (Anexo 2); los medios de enfriamiento fueron tres: agua, aceite y salmuera; posterior a eso se empleó un revenido.
- Posterior al proceso de tratamiento térmico de temple convencional, se procedió con el tratamiento criogénico, el cual comprendía: temple en agua + criogénico, temple en aceite + criogénico y temple en salmuera + criogénico; finalmente se realizó un revenido.

A continuación, se describen los procesos de tratamientos térmicos realizados a las probetas de acero SAE 1045, tanto del proceso de temple convencional como del proceso criogénico. El proceso se definió en dos partes.

A. Tratamiento térmico convencional.

El tratamiento térmico de temple y revenido se realizó de la siguiente manera:

- Se trató el acero a una temperatura de temple de 850 °C por una hora.
- Después, se trasladaron las probetas de acero a sus respectivos medios de enfriamiento; agua, aceite y salmuera, sus temperaturas fueron 22 °C, 50 °C y 150 °C respectivamente, con una permanencia de una hora.
- Inmediatamente se realizó un revenido a una temperatura de 200 °C por un intervalo de dos horas. Luego se dejó enfriar a temperatura ambiente.

B. Tratamiento térmico criogénico.

- Se realizó la misma secuencia del proceso de temple, alcanzando una temperatura de 850 °C; se emplearon los mismos medios de enfriamiento; agua, aceite y salmuera.
- Después de sumergir las probetas de acero en sus respectivos medios de enfriamiento, se mantuvo las probetas de acero por un intervalo de dos horas en nitrógeno líquido a una temperatura de -196 °C.
- Se procedió con el revenido a una temperatura de 200 °C por un tiempo de dos horas. Luego un enfriamiento lento a temperatura ambiente.

Para determinar la dureza de las probetas, el ensayo se realizó en un durómetro de la marca PETRI modelo PETRI F - 26, en la escala Rockwell C (HRC), se emplea esta escala en el caso de materiales duros que corresponden a aleaciones de acero tratados térmicamente y la norma de referencia fue la ASTM E 18 - 15.

Posterior a los procesos de tratamiento térmico de temple convencional y criogénico, se realizaron las pruebas metalográficas con el objetivo de analizar las características y cambios microestructurales del material.

El ensayo se realizó en un microscopio estereoscópico de la marca CARL ZEISS y en un microscopio metalográfico de la misma marca; también se emplearon equipos de desbaste y pulido, abrasivos para desbaste y abrasivos para pulido de la marca STRUERS y una cámara fotográfica con dispositivo macro.

El ensayo metalográfico estuvo regido por la norma ASTM E 3 - 95 (Anexo 4) para la preparación de muestras metalográficas; ASTM E - 407 (Anexo 5) para el micro ataque de metales.

3.3 Población y muestra

A. Población

Al no ser un estudio social, no se podría establecer una cantidad definida; por lo tanto, la población sobre la cual trató la presente investigación estuvo constituida por probetas cilíndricas de acero SAE 1045; las cuales fueron sometidas a una serie de pruebas y ensayos en las instalaciones de la Corporación Sudamericana de Aceros Especiales S.A.C, con el objetivo de medir el incremento en su dureza.

Tabla 10.

Determinación de la población.

Temple convencional	Temple con extensión criogénica
Temple en agua	Temple en agua + criogénico
Temple en aceite	Temple en aceite + criogénico
Temple en salmuera	Temple en salmuera + criogénico

B. Muestra

El número de ensayos varía de acuerdo con la propiedad mecánica que se desea evaluar. Considerando que las normas no indican un número específico de muestras, se determinó la cantidad de 18 probetas cilíndricas de 40 mm de diámetro por 40 mm de longitud para los ensayos de dureza y metalográficos. Se realizaron seis tratamientos térmicos cada uno con tres réplicas.

Para efectuar este ensayo no se requiere una probeta de forma ni dimensiones determinadas, sino un trozo de la muestra, al que solo le exige un espesor suficiente, según la carga que se le aplique y dos caras opuestas, aproximadamente planas y paralelas; una para apoyarse y otra para recibir el esfuerzo (26).

Se tomarán tres probetas para cada caso como se muestra en la Tabla 10 y conforme a una consulta realizada al Ing. Metalurgista Américo García T. (Asesor Técnico Comercial de Planta - CORPSAE), quien supo manifestar el número de muestras para cada caso basándose en el muestreo por NTP - ISO 2859-1, que indica que para un muestreo representativo de un lote el número mínimo de muestras es dos.

Tabla 11.

Determinación de la muestra para el temple convencional.

Ensayo	Temple convencional		
	Temple en agua	Temple en aceite	T. en salmuera
Dureza	3	3	3
Metalografía	1	1	1

El proceso criogénico es una extensión del proceso de temple, por lo que consta de la misma secuencia proporcionándole una pequeña variación.

Tabla 12.

Determinación de la muestra del tratamiento térmico criogénico.

Ensayo	Temple con extensión criogénica		
	Temple en agua + criogénico	Temple en aceite + criogénico	T. en salmuera + criogénico
Dureza	3	3	3
Metalografía	1	1	1

Se analizaron 18 probetas mediante ensayos de dureza con la finalidad de evidenciar el incremento en su dureza y una probeta de cada caso mediante análisis metalográfico con el propósito de evidenciar cambios microestructurales luego de ser sometido a procesos de tratamiento térmico de temple.

El análisis metalográfico de las probetas solo se realizó con el propósito de dar validez a la investigación, por lo que se tomó una probeta correspondiente a cada caso.

3.4 Técnicas e Instrumentos de recolección de datos

Para manifestar una adecuada recolección y organización de datos se llevaron a cabo las siguientes técnicas y uso de instrumentos:

- Recolección de información mediante el uso de catálogos del material a emplear para la respectiva selección de los parámetros del proceso térmico. (Técnica documental)
- Recolección de evidencias para la realización de los ensayos de dureza y pruebas metalográficas mediante el uso de la Norma ASTM E 18 - 15 y ASTM E 3 - 95. (Técnica documental)
- Recolección de información mediante investigaciones previas con el propósito de seguir una adecuada secuencia de los procedimientos. (Técnica empírica)
- Observación y experimentación en las instalaciones CORPSAE S.A.C. mediante la ejecución de procesos de tratamiento térmico. (Técnica empírica)
- Observación y análisis mediante el uso de un durómetro para los ensayos de dureza, realizados en el Laboratorio de Control de Calidad de la Corporación Sudamericana de Aceros Especiales S.A.C - CORPSAE. (Técnica empírica)
- Observación y análisis mediante un microscopio electrónico para las pruebas metalográficas realizadas en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad Nacional de Ingeniería. (Técnica empírica)
- Recolección de información pertinente a los procesos de tratamiento térmico, ensayos de dureza y pruebas metalográficas mediante guías de laboratorio, con el objetivo de seguir una secuencia adecuada de procedimientos y toma de datos. (Técnica empírica)

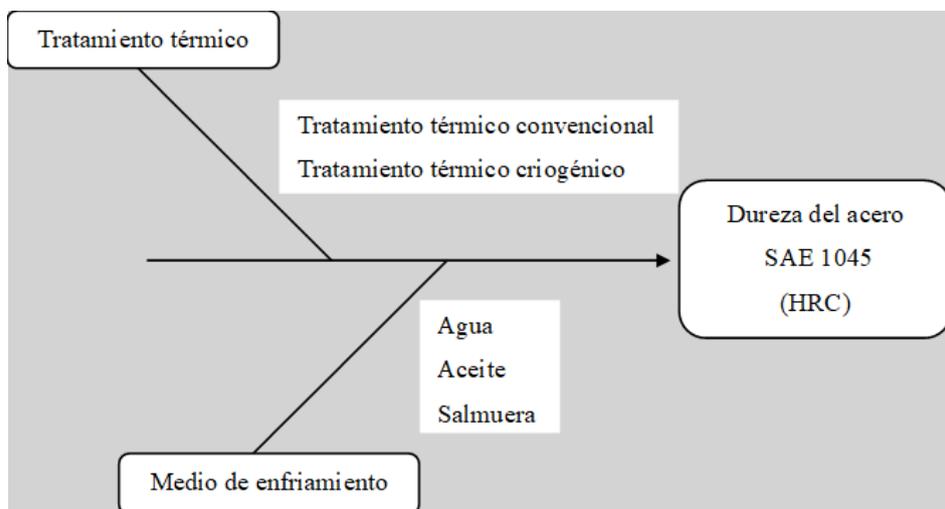


Figura 27. Diagrama de causa y efecto.

Tabla 13.

Instrumento de análisis experimental, diseño factorial de niveles mixtos.

Dimensiones		Combinación de tratamientos	Repetición			Promedio
A	B		I	II	III	
A ₁	B ₁	A ₁ B ₁				
	B ₂	A ₁ B ₂				
	B ₃	A ₁ B ₃				
A ₂	B ₁	A ₂ B ₁				
	B ₂	A ₂ B ₂				
	B ₃	A ₂ B ₃				

3.5 Técnicas de procesamiento de datos

Para un correcto procesamiento y análisis de la información se empleó la Estadística Inferencial, realizando los siguientes procedimientos en el software de Minitab 18:

- Análisis y diseño factorial aleatorizado.
- Análisis de varianza.
- Análisis de residuos.
- Prueba F de Fisher para validar la hipótesis.

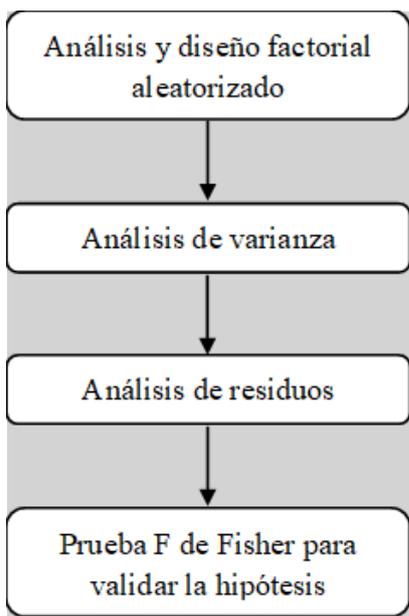


Figura 28. Análisis estadístico de los resultados.

Nota. Fuente: (27).

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se establece el desarrollo de la Metodología, mediante la obtención de los resultados y análisis de estos, prueba de hipótesis y finalmente la discusión de los resultados para contrastar los objetivos correspondientes al desarrollo de la investigación.

4.1 Resultados del tratamiento y análisis de la información

Como objetivo principal de la investigación fue determinar la efectividad que existe al realizar el tratamiento térmico criogénico con relación al proceso de temple convencional; mediante el análisis de dureza y metalográfico del acero SAE 1045.

4.1.1 Preparación de probetas.

El material fue adquirido en la Corporación Sudamericana de Aceros Especiales S.A.C - CORPSAE, cuenta con sus especificaciones (Anexo 2) en la que se menciona la composición, características y procedimientos del tratamiento térmico del acero SAE 1045.

Al adquirir el material se tuvo en consideración que presentara tolerancias mayores a la requeridas, ya que durante el proceso de maquinado se suele eliminar la oxidación de sus superficies. Se obtuvieron barras con dimensiones de 45 mm, de modo que el material oxidado que presentan en su estado de suministro sea eliminado.

Se mecanizaron 18 probetas para el ensayo de dureza Rockwell, dicho ensayo se realizó de acuerdo con la norma ASTM E 18 - 15 (Anexo 3) y seis de estas probetas se evaluaron mediante pruebas metalográficas basándose en la norma ASTM E 3 - 95 (Anexo 4). Las dimensiones de las probetas cilíndricas corresponden a 40 mm de diámetro por 40 mm de longitud.

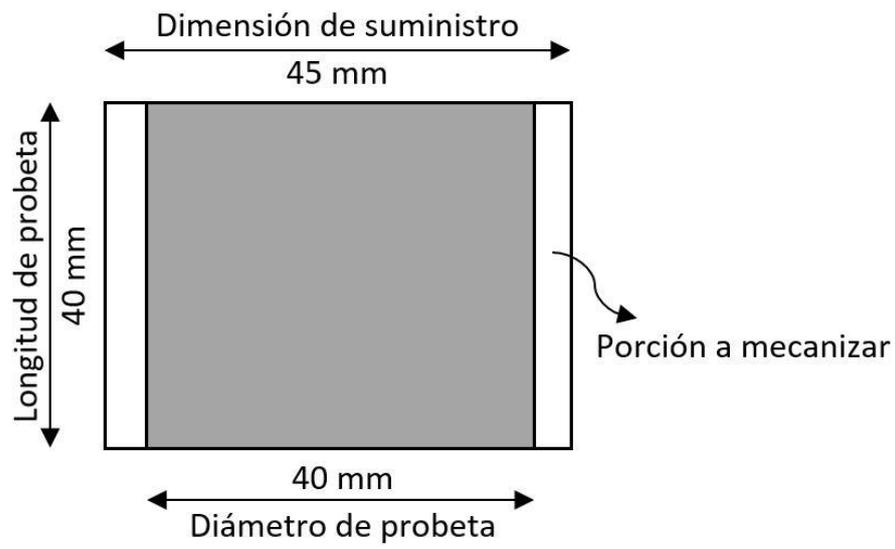


Figura 29. Esquema referencial de probetas.



Figura 30. Probetas mecanizadas.

A. Clasificación de las probetas

Tabla 14.

Clasificación de probetas para temple convencional.

Temple convencional		
Temple en agua	Temple en aceite	Temple en salmuera
3 probetas	3 probetas	3 probetas

Tabla 15

Clasificación de probetas para temple con extensión criogénica.

Temple con extensión criogénica		
Temple en agua + criogénico	Temple en aceite + criogénico	Temple en salmuera + criogénico
3 probetas	3 probetas	3 probetas

Para la clasificación presentada, se tomaron tres probetas de cada caso para la ejecución de los ensayos de dureza y una probeta de cada caso para la prueba metalográfica.

4.1.2 Temperaturas del proceso.

Las temperaturas del proceso se seleccionan acorde con el catálogo del fabricante (Anexo 2), correspondiente a la Corporación Sudamericana de Aceros Especiales S.A.C; tanto la temperatura de temple y revenido.

Tabla 16.

Temperaturas del proceso térmico extraídas del catálogo.

Proceso	Temperatura
Temple	850 °C
Revenido	200 °C



Figura 31. Control de temperatura de los tratamientos térmicos.

4.1.3 Tiempos de permanencia del proceso.

Los tiempos de permanencia del proceso de temple y revenido son establecidos con el mismo parámetro, tanto para los procesos de temple convencional como para los criogénicos, con la idea de que todos los casos sean expuestos a las mismas condiciones.

Tabla 17.

Tiempos del proceso térmico.

Proceso	Tiempo
Temple	1 h
Revenido	2 h
Criogénico	2 h

4.1.4 Tratamiento térmico de las probetas.

A continuación se describen los distintos procesos de tratamiento térmico de temple realizados a las probetas de acero SAE 1045 después de haber sido previamente mecanizadas con sus respectivas dimensiones.

4.1.4.1 Temple convencional.

Se procedió a templar las probetas a una temperatura de 850 °C por el tiempo de una hora; los medios de enfriamiento empleados fueron: agua, aceite y salmuera es decir agua con sales minerales; sus temperaturas fueron 22 °C, 50 °C y 150 °C respectivamente; luego se realizó un revenido.

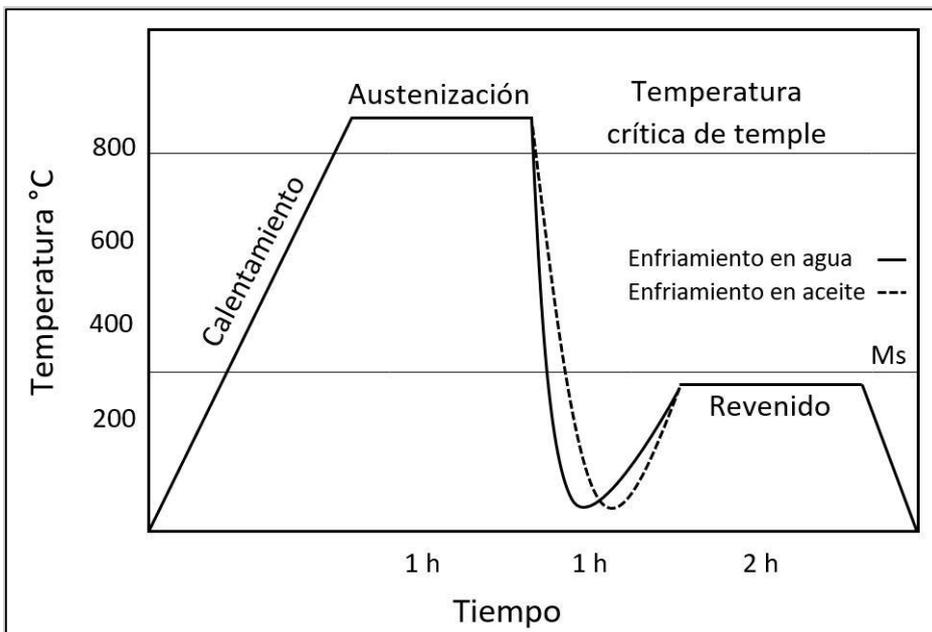


Figura 32. Esquema del proceso de temple en agua y aceite.

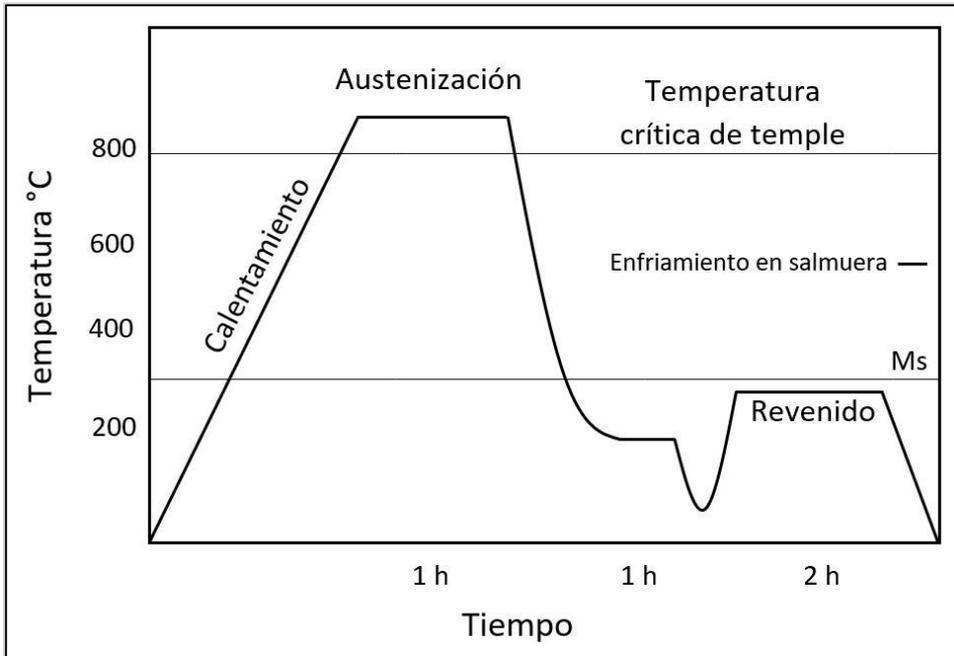


Figura 33. Esquema del proceso de temple en salmuera.



Figura 34. Horno de temple.



Figura 35. Probetas tratadas por temple convencional en agua, aceite y salmuera.

4.1.4.2 Criogenización.

Seguido a los procesos de temple convencional, se continuó con el tratamiento criogénico (extensión criogénica) y comprendía: temple en agua + criogénico, temple en aceite + criogénico y temple en salmuera + criogénico. Luego se realizó un revenido.

Se realizó el mismo procedimiento del temple, alcanzando una temperatura de 850 °C y los medios de enfriamiento (agua, aceite y salmuera); después de sumergir las probetas de acero en sus respectivos medios de enfriamiento, se mantuvieron por un intervalo de dos horas en nitrógeno líquido de -196 °C.

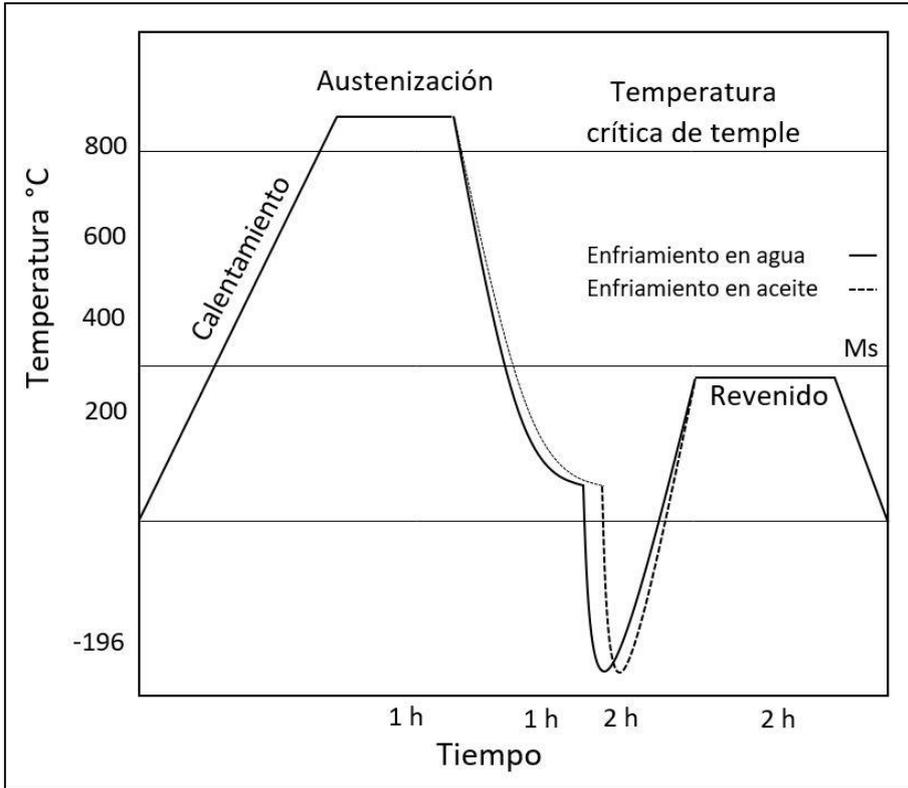


Figura 36. Esquema del proceso criogénico en agua y aceite.

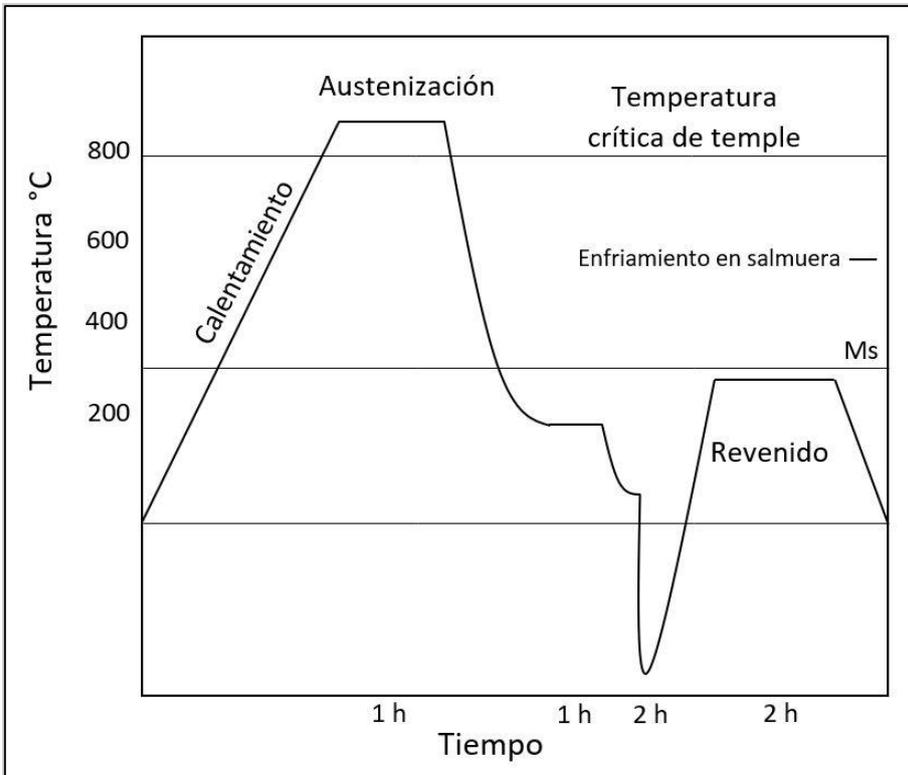


Figura 37. Esquema del proceso criogénico en salmuera.



Figura 38. Probetas tratadas criogénicamente en agua, aceite y salmuera.

4.1.4.3 Revenido.

Posteriormente a los procesos de temple convencional y al tratamiento criogénico se realizó un revenido a una temperatura de 200 °C por un intervalo de dos horas. Finalmente se dejó enfriar a temperatura ambiente.



Figura 39. Horno de revenido.

La martensita obtenida en el temple tiene elevada dureza, pero lamentablemente, las tensiones alrededor de los átomos de C atrapados en la red cristalina del hierro producen fragilidad; es necesario reducir la fragilidad; para ello se somete el acero a un calentamiento posterior al temple, denominado revenido (6).

Dada la particularidad de este proceso, en el que el revenido final no se debería realizar a una temperatura por encima de los 200 °C, como consecuencia la dureza disminuiría considerablemente.

Asimismo, cuando se trabaja con temperaturas menores en el proceso de revenido, el material obtiene mayor tenacidad que lo que refleja mayor resistencia a la fractura (15).

De este modo la resistencia al impacto aumenta lo que refleja un aumento de la tenacidad, por lo que el material no presentaría un alto grado de fragilidad (8).

Otro aspecto para evitar que el acero se torne muy frágil al realizar estos procesos térmicos es que no se expuso las probetas a un largo periodo de permanencia en el medio criogénico, ya que el acero por una parte alcanzaría mayores durezas pero revelaría una característica muy frágil (14).

Por otra parte el tratamiento criogénico no es un proceso superficial, ya que tendrá un grado de penetración al cual se conoce como templabilidad y esta depende del tipo de acero que se emplea; por lo que a mayor cantidad de aleantes tendrá mayor templabilidad, como se puede observar en la Tabla 18 a la Tabla 23 de evaluación de durezas, se logra evidenciar que estos valores son mayores a los extremos y van disminuyendo hacia la parte interna de las probetas.

4.1.5 Análisis de dureza.

La prueba de dureza se realizó en un durómetro de la marca Petri modelo PETRI F - 26, perteneciente al Laboratorio de Control de Calidad de la Corporación Sudamericana de Aceros Especiales S.A.C - CORPSAE, en la escala Rockwell C (HRC) y la norma de referencia fue la ASTM E 18 - 15.

Generalmente no se cuenta con una estructura homogénea por parte del acero, por lo que se tomó en consideración medir tres puntos distintos a lo largo de la sección (Figura 41) para así obtener un valor general.



Figura 40. Durómetro PETRI F - 26 para ensayos de dureza.

A. Evaluación del acero templado en agua

Tabla 18.

Valores de dureza de las probetas templadas en agua.

Probeta	HRC			Promedio
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	
1	34	43	55	44
2	26	28	42	32
3	23	35	46	34,67

B. Evaluación del acero templado en agua + criogénico

Tabla 19.

Valores de dureza de las probetas templadas en agua + criogénico.

Probeta	HRC			Promedio
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	
1	54	54,5	56	54,83
2	55	56	56	55,67
3	53	54	55	54

C. Evaluación del acero templado en aceite

Tabla 20.

Valores de dureza de las probetas templadas en aceite.

Probeta	HRC			Promedio
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	
1	32	35	45	36,33
2	31	33	40	34,67
3	35	35	43	37,67

D. Evaluación del acero templado en aceite + criogénico

Tabla 21.

Valores de dureza de las probetas templadas en aceite + criogénico.

Probeta	HRC			Promedio
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	
1	40	35	47	40,67
2	39	41	49	43
3	32	38	44	38

E. Evaluación del acero templado en salmuera

Tabla 22.

Valores de dureza de las probetas templadas en salmuera.

Probeta	HRC			Promedio
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	
1	39	41	51	43,67
2	31	44	48	41
3	24	30	45	33

F. Evaluación del acero templado en salmuera + criogénico

Tabla 23.

Valores de dureza de las probetas templadas en salmuera + criogénico.

Probeta	HRC			Promedio
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	
1	53	52	54.5	53,17
2	44	47	55	48,67
3	50	52	53	51,67



Figura 41. Detalle referencial del ensayo de dureza.

4.1.6 Análisis metalográficos

Posterior al tratamiento térmico de temple convencional y criogénico, se realizaron las pruebas metalográficas con el objetivo de interpretar las características y cambios microestructurales del acero.

Los análisis metalográficos se realizaron en el núcleo y en la superficie de la sección transversal de las probetas.

Tabla 24.

Designación de las probetas para ensayo metalográfico.

Designación	Descripción
Probeta 1	Probeta con temple convencional en agua.
Probeta 2	Probeta con temple convencional en aceite.
Probeta 3	Probeta con temple convencional en salmuera.
Probeta 4	Probeta con temple en agua con extensión criogénica.
Probeta 5	Probeta con temple en aceite con extensión criogénica.
Probeta 6	Probeta con temple en salmuera con extensión criogénica.

- **Probeta 1**



Figura 42. Microestructura del acero, temple en agua a 500x (Superficie).

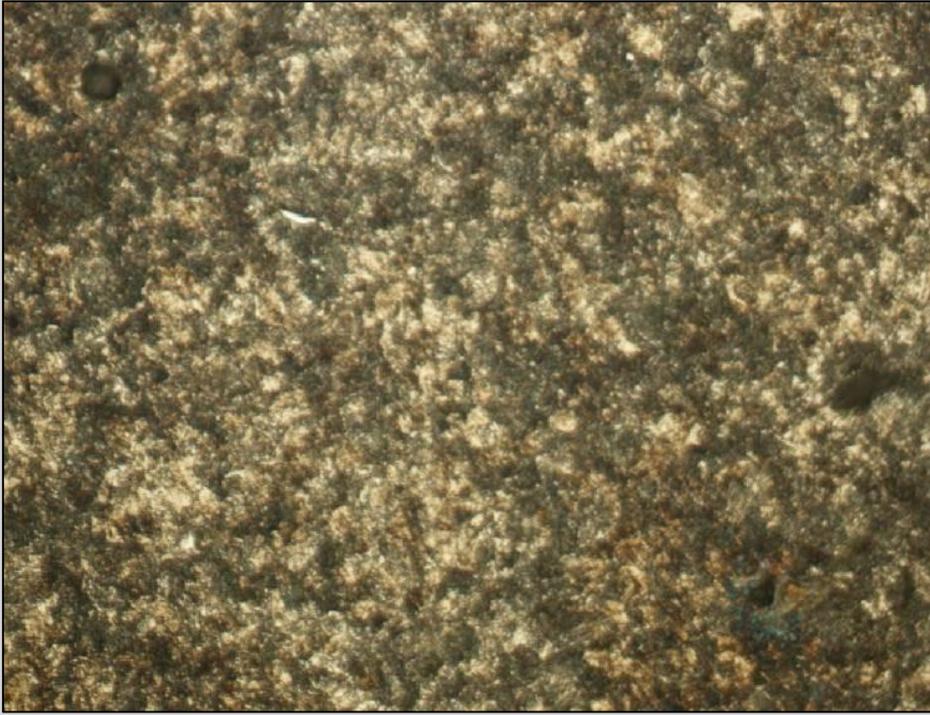


Figura 43. Microestructura del acero, temple en agua a 500x (Núcleo).

- **Probeta 2**

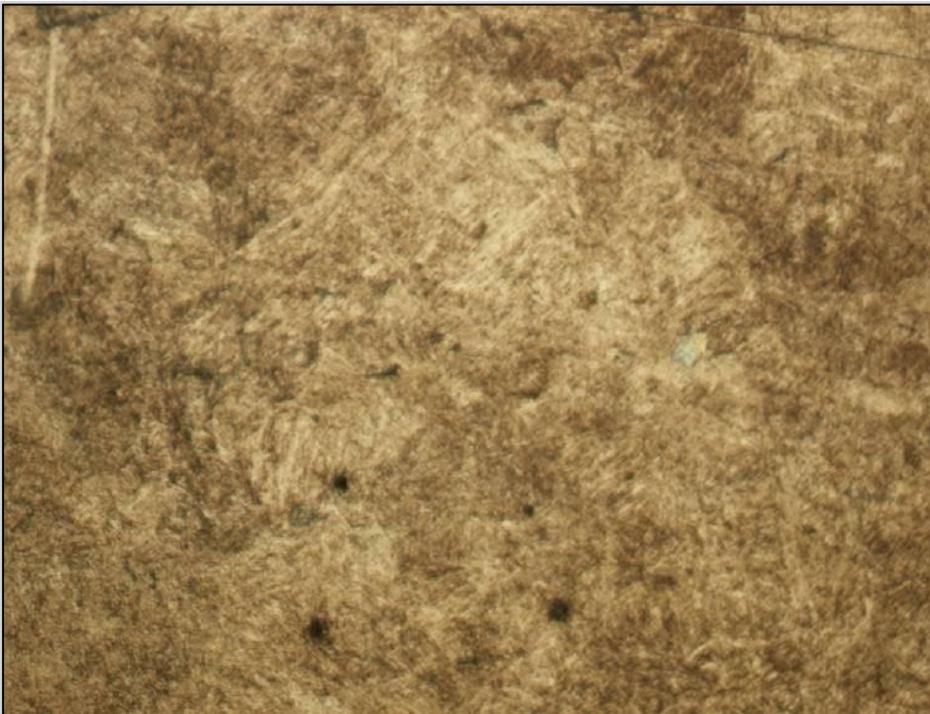


Figura 44. Microestructura del acero, temple en aceite a 500x (Superficie).



Figura 45. Microestructura del acero, temple en aceite a 500x (Núcleo).

- **Probeta 3**

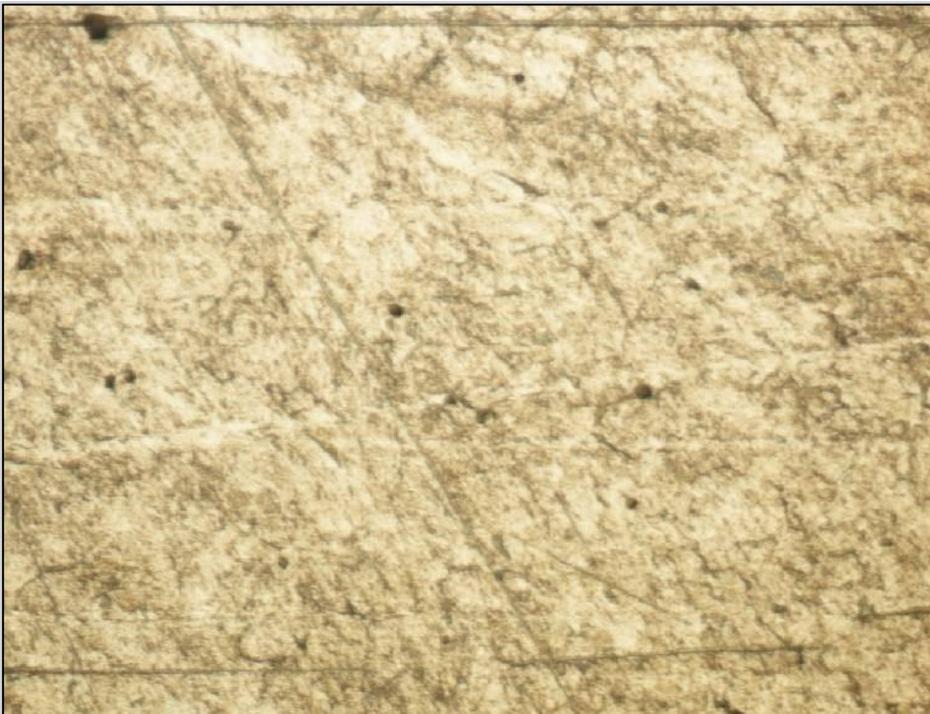


Figura 46. Microestructura del acero, temple en salmuera a 500x (Superficie).



Figura 47. Microestructura del acero, temple en salmuera a 500x (Núcleo).

- **Probeta 4**



Figura 48. Microestructura del acero, temple criogénico en agua a 500x (Superficie).

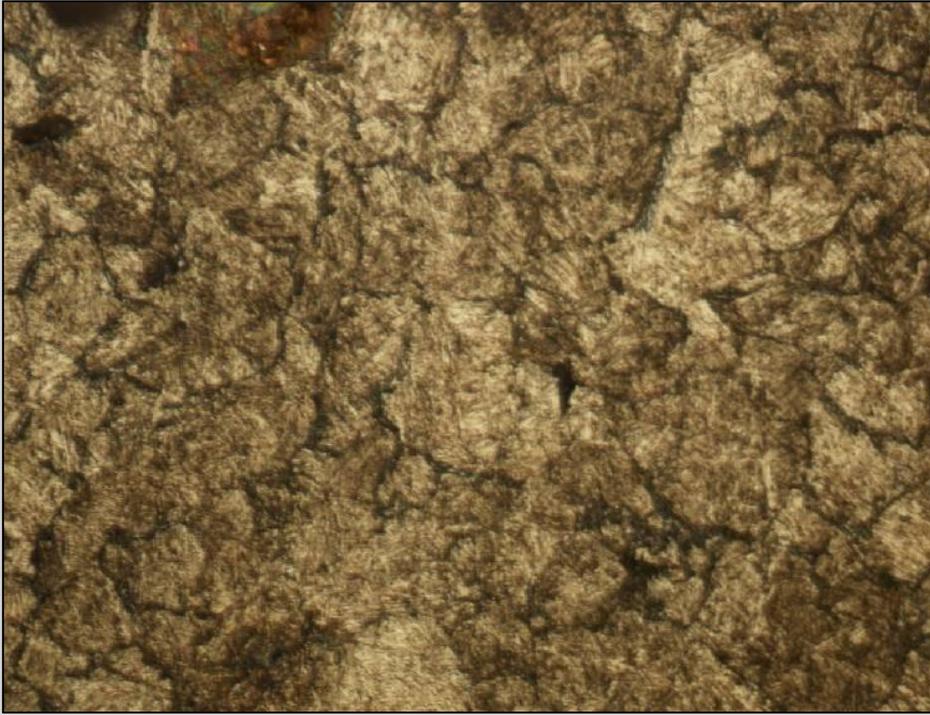


Figura 49. Microestructura del acero, temple criogénico en agua a 500x (Núcleo).

- **Probeta 5**



Figura 50. Microestructura del acero, temple criogénico en aceite a 500x (Superficie).



Figura 51. Microestructura del acero, temple criogénico en aceite a 500x (Núcleo).

- **Probeta 6**



Figura 52. Microestructura del acero, temple criogénico con sales 500x (Superficie).



Figura 53. Microestructura del acero, temple criogénico con sales 500x (Núcleo).

4.1.6.1 Resultados del análisis metalográfico.

Se describen los cambios y características microestructurales que experimentó el acero al ser sometido a los diferentes procesos de temple convencional y criogénicos, obteniéndose los siguientes resultados.

Tabla 25.

Resultados del análisis metalográfico.

Muestra	Zona	Estado microestructural
Probeta 1	Superficie	<ul style="list-style-type: none"> • Matriz martensítica masiva fina dentro de granos cristalinos austeníticos.
	Núcleo	<ul style="list-style-type: none"> • Matriz perlítica masiva en transformación martensítica.
Probeta 2	Superficie	<ul style="list-style-type: none"> • Matriz martensítica masiva y martensítica acicular.
	Núcleo	<ul style="list-style-type: none"> • Matriz martensítica masiva dentro de granos cristalinos austeníticos.
Probeta 3	Superficie	<ul style="list-style-type: none"> • Matriz martensítica masiva fina dentro de granos cristalinos austeníticos.

	Núcleo	<ul style="list-style-type: none"> • Matriz perlítica masiva en transformación austenítica.
	Superficie	<ul style="list-style-type: none"> • Matriz martensítica masiva fina.
Probeta 4	Núcleo	<ul style="list-style-type: none"> • Matriz martensítica acicular basto dentro de granos cristalinos finos austeníticos.
Probeta 5	Superficie	<ul style="list-style-type: none"> • Matriz martensítica masiva fina dentro de granos cristalinos austeníticos.
	Núcleo	<ul style="list-style-type: none"> • Matriz perlítica masiva fina.
Probeta 6	Superficie	<ul style="list-style-type: none"> • Matriz martensítica masiva fina.
	Núcleo	<ul style="list-style-type: none"> • Matriz martensítica masiva basto.

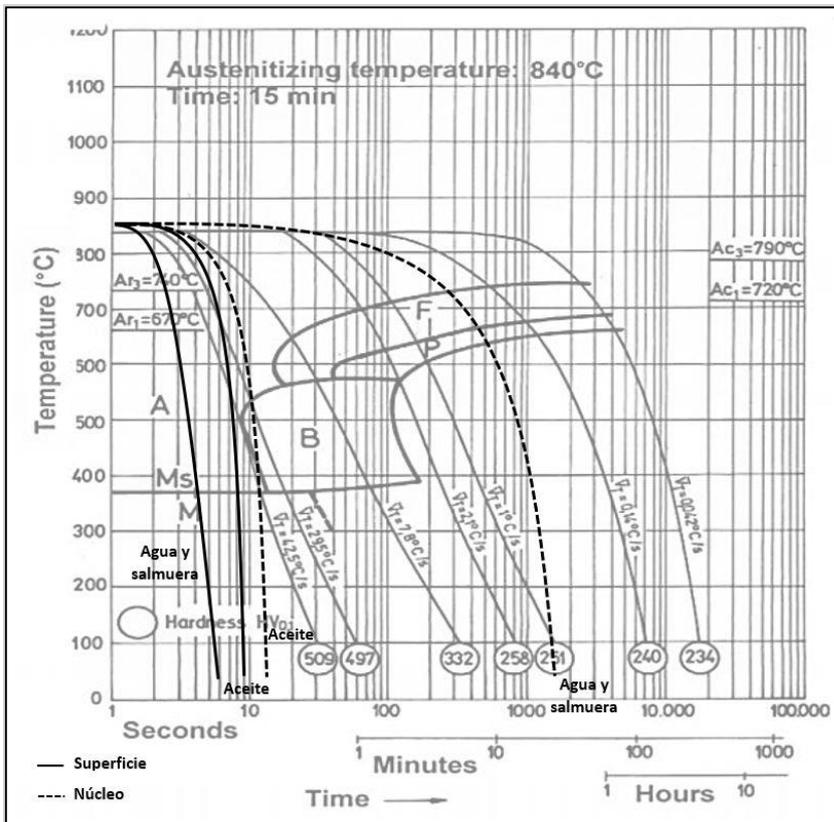


Figura 54. Enfriamiento convencional en el diagrama TEC.

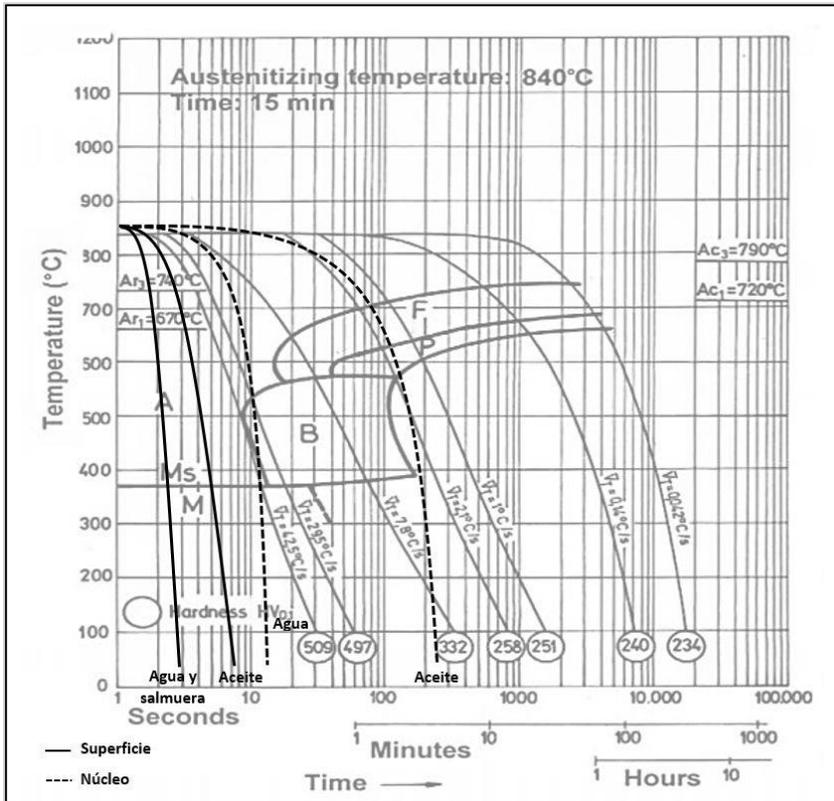


Figura 55. Enfriamiento criogénico en el diagrama TTT.

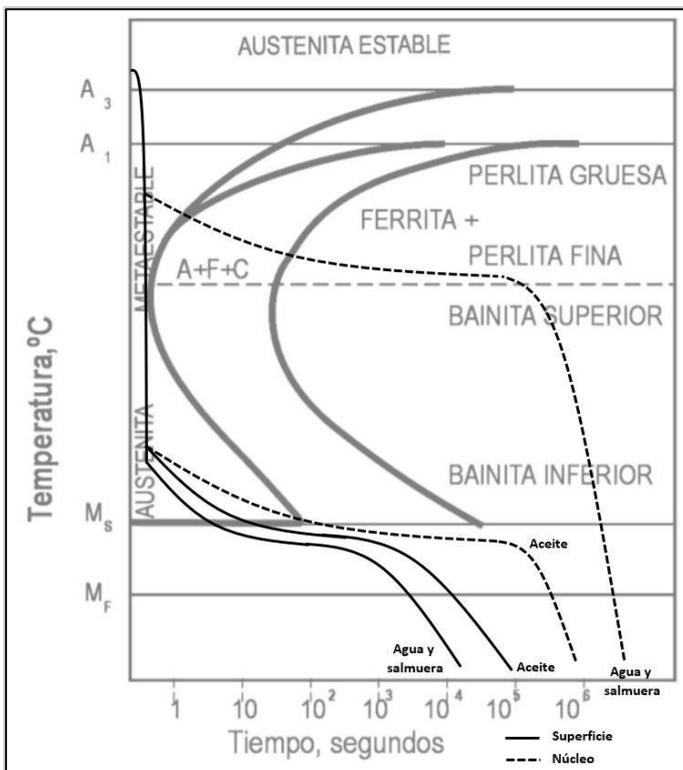


Figura 56. Temple convencional sobre el diagrama TTT.

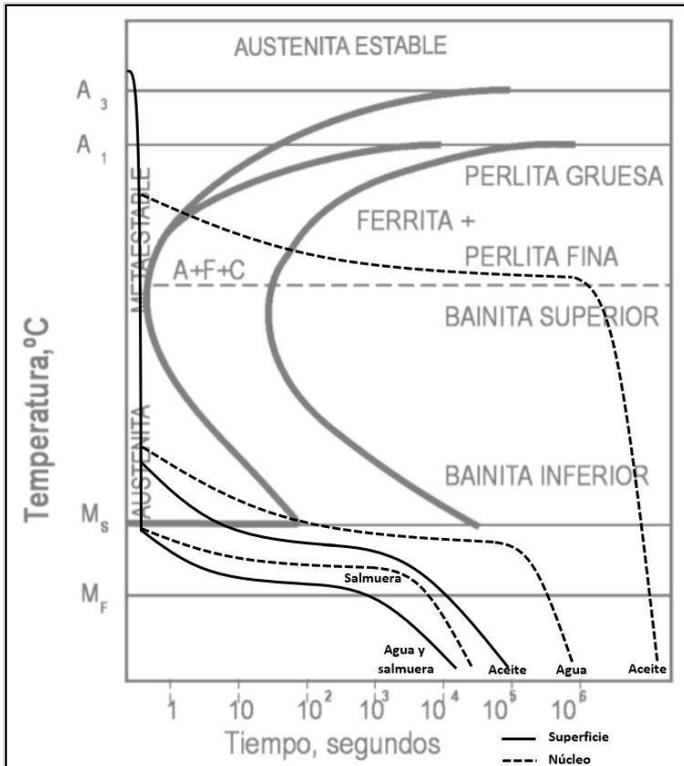


Figura 57. Tratamiento criogénico en diagrama TTT.

4.2 Análisis estadísticos de los resultados

4.2.1 Análisis factorial

Previamente se elaboró un modelo factorial 3x2, para recopilar la información se realizaron tres repeticiones para los seis tratamientos planteados de acuerdo con el texto “Metodología de Investigación Tecnológica” (27). Los factores se establecieron de la siguiente manera:

- A: Proceso térmico.
 - A₁: Temple convencional (Sin criogénico).
 - A₂: Temple con extensión criogénica (Con criogénico).
- B: Medio de enfriamiento
 - B₁: Agua.
 - B₂: Aceite.
 - B₃: Salmuera

Tabla 26.

Diseño factorial 3x2.

Proceso de Tratamiento Térmico			HRC			
Dimensiones		Combinación de tratamientos	Repetición			Promedio
A	B		I	II	III	
A ₁	B ₁	A ₁ B ₁	44	32	34,67	36,89
	B ₂	A ₁ B ₂	36,33	34,67	37,67	36,22
	B ₃	A ₁ B ₃	43,67	41	33	39,22
A ₂	B ₁	A ₂ B ₁	54,83	55,67	54	54,83
	B ₂	A ₂ B ₂	40,67	43	38	40,56
	B ₃	A ₂ B ₃	53,17	48,67	51,67	51,17

El objetivo es incrementar la dureza del acero SAE 1045, por lo que debemos obtener los valores más altos; por lo tanto, la variable de respuesta para esta prueba es la dureza medida en HRC. Se cuenta con dos factores para realizar el experimento, el factor proceso térmico tiene dos niveles y el factor medio de enfriamiento tres niveles, por lo que se realizó un diseño factorial de dos factores simples.

En la Figura 58 de efectos principales, se observa como varía la respuesta a medida que se alteran las variables, en este caso para el incremento de dureza; también nos sirve para comparar la magnitud de influencia que proporcionan los efectos en los diferentes factores.

Se puede distinguir que al emplear el nivel de temple con extensión criogénica la dureza es mayor; por lo que se puede comprobar que a medida que se emplea un enfriamiento a temperaturas más bajas, se alcanzarán mayores durezas. Por otro lado, en el nivel de medio de enfriamiento si se utiliza agua nos proporciona mayores durezas.

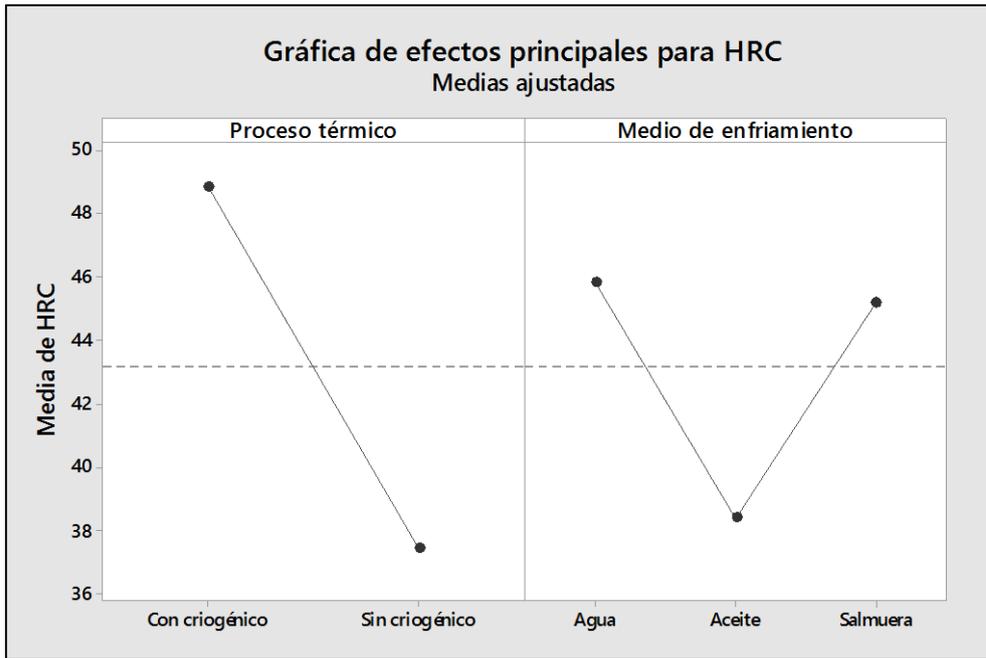


Figura 58. Gráfica de efectos principales.

En la Figura 59 de interacción de factores se produce un cambio de la respuesta desde el nivel inferior hasta llegar al nivel más alto. Por lo tanto, el efecto de un factor no es necesariamente dependiente de otro; sirve para distinguir la magnitud de los efectos durante la comparación entre factores.

A diferencia del gráfico de efectos principales (Figura 58), se puede evidenciar la independencia entre factores, destacando que al emplear el nivel de temple con extensión criogénica en combinación de cualquier medio de enfriamiento se obtiene los valores más altos, además la combinación que proporciona los valores más altos de dureza es al emplear un temple con extensión criogénica con un medio de enfriamiento como es el agua.

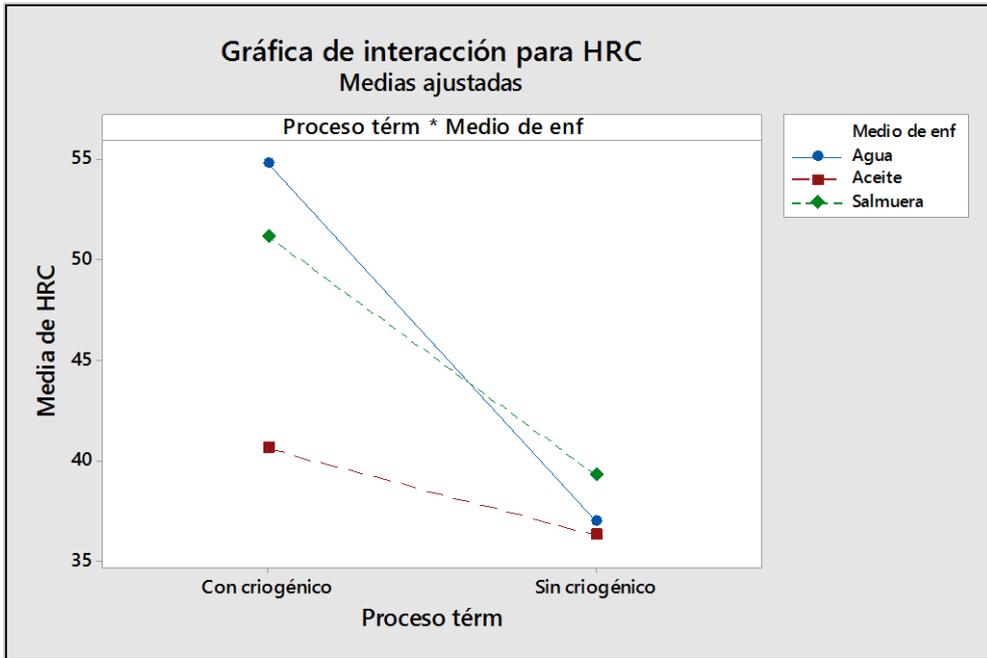


Figura 59. Gráfica de interacción.

4.2.2 Análisis de varianza

En la Tabla 27 se muestra el análisis de varianza para dos factores con tres repeticiones; mediante este análisis se pudo evaluar la toma de decisiones del diseño factorial y posteriormente para validar la hipótesis planteada durante la investigación.

Tabla 27.

Análisis de varianza.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	930,4	186,08	13,14	0,00016
Lineal	3	790,8	263,61	18,61	0,00008
Tratamiento térmico	1	585,6	585,62	41,34	0,00003
Medio de enfriamiento	2	205,2	102,60	7,24	0,0086
Interacción de términos	2	139,6	69,79	4,93	0,027
Error	12	170,0	14,17		
Total	17	1100,4			

El modelo del análisis de varianza presenta un total de 17 grados de libertad, un grado de libertad para los efectos del proceso térmico y dos grados de libertad para los efectos del medio de enfriamiento; el error presenta 12 grados de libertad y el valor para el error es de 0,01.

De la Tabla 27 se pueden destacar los valores correspondientes a P para el proceso térmico y el medio de enfriamiento, siendo 0,00003 y 0,0086 respectivamente. Estos valores son menores a 0,01, lo cual indica que tanto el proceso térmico y el medio de enfriamiento resultan ser significativos. El valor P correspondiente a las interacciones es de 0,027, siendo mayor que el nivel de significancia de 0,01, por lo tanto, indica que las interacciones no son significativas.

En la Figura 60 se muestra el diagrama de Pareto de efectos estandarizados, esta evalúa la magnitud y el grado de importancia de los factores sobre el efecto. En el diagrama se muestra una línea de referencia, la cual indica que cualquier efecto que sobrepase este límite es sumamente importante.

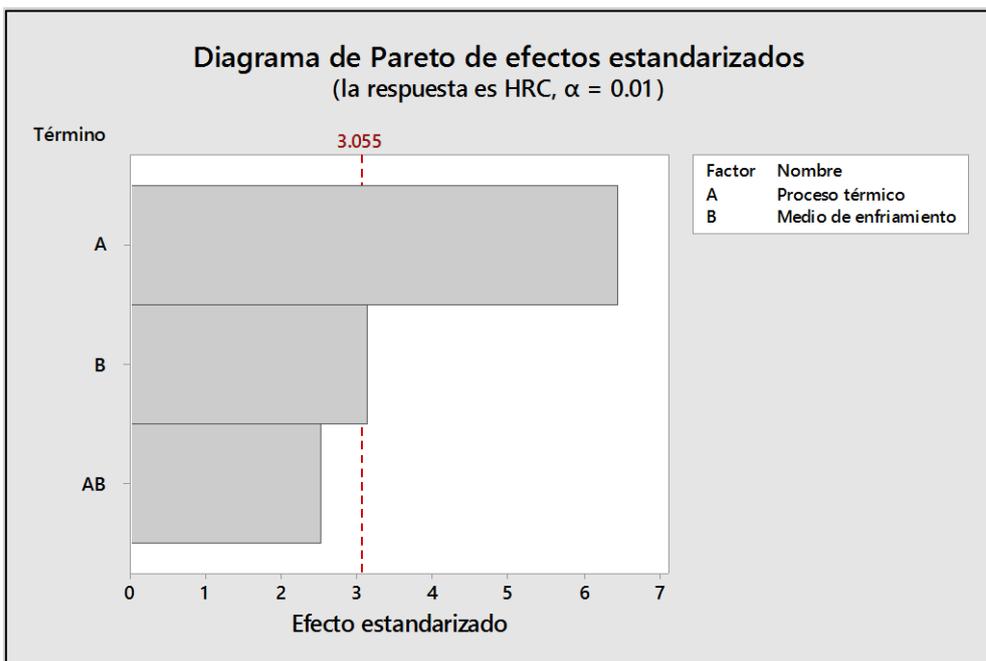


Figura 60. Gráfico de Pareto para efectos estandarizados.

4.2.3 Análisis de residuos

El análisis de residuos sirve para determinar si los datos resultan ser asimétricos o si existen valores atípicos; la gráfica de residuos según el orden indica que valores deben caer aleatoriamente alrededor de la línea central sin seguir un patrón, la gráfica de probabilidad normal indica que los residuos deben permanecer cerca al modelo de una línea recta.

En la Figura 61 se muestran los residuos según el orden en que fueron recolectados; sirve para determinar los errores no aleatorios, específicamente los efectos relacionados con el tiempo; además se verifica que el orden de observación no sigue un patrón definido, por lo que se puede afirmar que los residuos no se relacionan unos con otros.

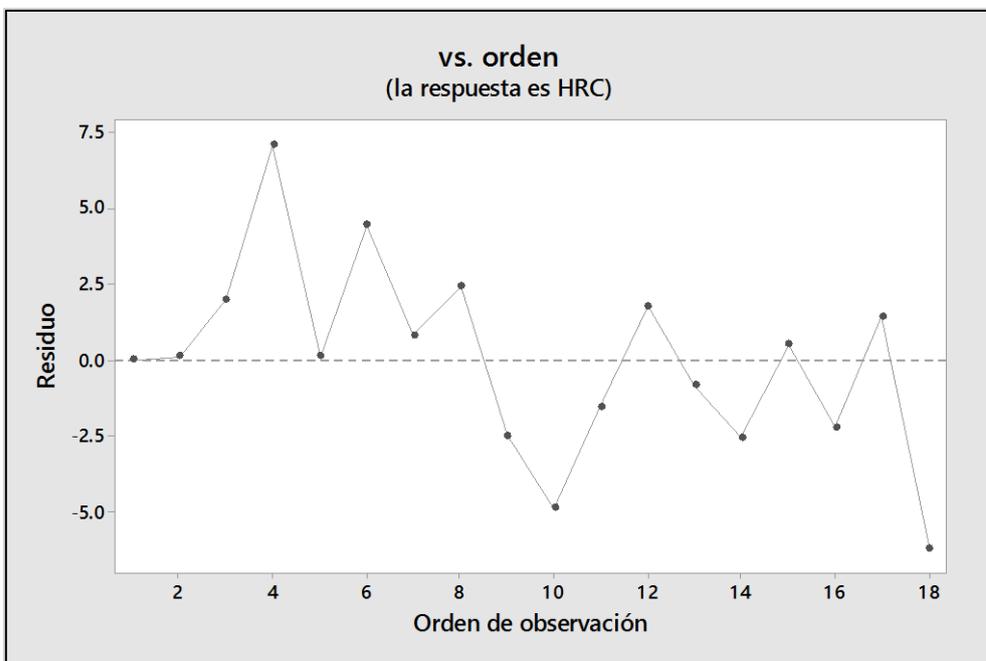


Figura 61. Gráfica de residuos según el orden de observación.

En la Figura 62 se muestra el histograma de residuos, el cual sirve como un análisis exploratorio para distinguir las características de distribución de los valores; en el caso que se cuente con algunas barras alejadas de las demás, estas pueden indicar valores atípicos. Sin embargo, nos basta con esta prueba para afirmar que tiene un comportamiento normal.

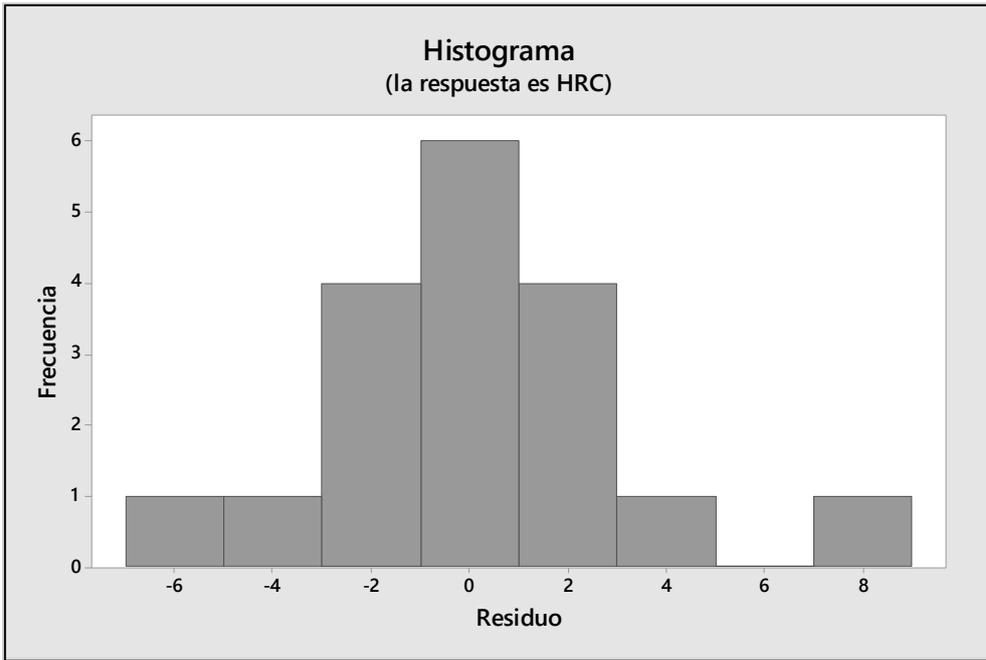


Figura 62. Gráfica de histograma de residuos.

En la Figura 63 se observa la gráfica de probabilidad normal, establece que si los residuos están normalmente distribuidos deberán formar una línea recta. En el caso que los puntos se extiendan fuera de la línea recta, el supuesto de normalidad podría resultar ser inválido. Sin embargo, se puede apreciar que no hay una desviación significativa de normalidad ya que todos los puntos siguen el modelo.

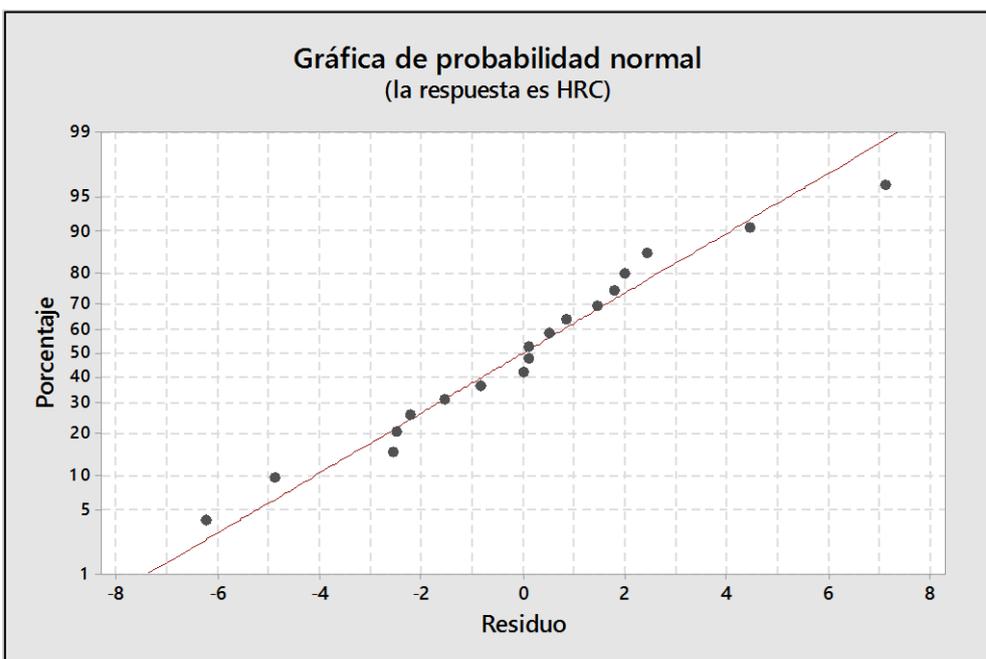


Figura 63. Gráfica de probabilidad normal.

4.3 Prueba de Hipótesis

Para poder validar la hipótesis se utilizó el análisis de varianza, el cual se emplea con el propósito de verificar si dos grupos difieren entre sí a través de sus medias y varianzas (29). Para un análisis de varianza factorial se cuenta con una hipótesis nula por cada factor y por cada interacción entre factores. La hipótesis nula concerniente a un factor nos indica que las medias de los grupos definidos por los niveles de cada factor son iguales. Con respecto a la hipótesis referente a una interacción indica que el efecto es nulo. Para contrastar estas hipótesis nos apoyamos del análisis de estadísticos F.

Asimismo, para cada efecto se cuenta con una hipótesis y para cada hipótesis se realiza un estadístico F que nos permite validar la significancia de cada factor, por lo que el nivel crítico correspondiente a cada estadístico F nos permite tomar una decisión acerca de mantener o rechazar la hipótesis.

Se consideró un valor significativo para el error de 1% ya que es el nivel que corresponde al campo de control de calidad.

Factores:

A: Proceso térmico

B: Medio de enfriamiento

Tabla 28.

Tabla F de Fisher.

Factores	F_0	$F_{(GL,12,0.01)}$	Hipótesis:
			$F_0 > F_{Tablas}$ (Verdadero) $F_0 < F_{Tablas}$ (Falso) $H_0 =$ Nula $H_i =$ Alternativa
A	41,34	9,33	$H_0 =$ Falso $H_i =$ Verdadero
B	7,24	6,93	$H_0 =$ Falso $H_i =$ Verdadero
AB	4,93	6,93	$H_0 =$ Verdadero $H_i =$ Falso

Se llega a apreciar que la hipótesis alterna resulta ser verdadera en los factores A y B, mientras que en la interacción entre factores AB no sucede esto; por lo tanto, existe significancia en estos, pudiéndose deducir que los factores principales como A y B cumplen una función muy importante en la mejora de la dureza del acero SAE 1045; sabiendo que la interacción entre factores no tiene tal significancia y pudiendo evidenciar que el factor A tiene el valor F más alto, nos indica que no es precisamente dependiente del factor B para optimizar la variable dureza, ya que si configuramos el factor A con cualquier nivel presente en el factor B, seguiremos obteniendo la misma respuesta (no hay diferencia en la combinación de los factores). Por lo que estamos en la condición de afirmar que si definimos los parámetros y condiciones con la aplicación del diseño factorial, entonces mejora la dureza del acero SAE 1045, pudiendo validar la hipótesis de investigación.

4.4 Discusión de Resultados

4.4.1 Interpretación de los resultados.

A. Análisis factorial.

En la Figura 58 del gráfico de efectos principales, se observa como varía la respuesta a medida que se alteran las variables, en este caso para el incremento de dureza; podría decirse que el factor A (Proceso térmico) tiene la mayor influencia y presenta una tendencia ascendente, seguida del factor B (Medio de enfriamiento) que tiene una tendencia ascendente leve.

En la Figura 59 de interacción de factores se produce un cambio de la respuesta desde el nivel inferior hasta llegar al nivel más alto. Por lo tanto, el efecto de un factor es dependiente de otro factor; sirve para comparar la magnitud de los efectos durante la comparación entre factores.

A diferencia del gráfico de efectos principales (Figura 58), se puede evidenciar la independencia entre factores, destacando que al emplear el nivel de temple con extensión criogénica en combinación de cualquier medio de enfriamiento, se obtiene los valores más altos, además la combinación que proporciona los valores más altos de dureza es al emplear un temple con extensión criogénica con un medio de enfriamiento como es el agua.

B. Análisis de la varianza.

En la Tabla 27 se muestra que el valor F_0 para A es 41,34 el cual es el más alto seguido del factor B que tiene como F_0 un valor de 7,24; además se pueden destacar los valores correspondientes a P para el proceso térmico y el medio de enfriamiento, siendo 0,00003 y 0,0086 respectivamente. Estos valores son menores a 0,01, lo cual indica que

tanto el tratamiento térmico y el medio de enfriamiento resultan ser significativos. El valor P correspondiente a las interacciones es de 0,027, siendo mayor que el nivel de significancia de 0,01, por lo tanto, indica que las interacciones no son significativas.

En la Figura 60 se muestra el diagrama de Pareto de efectos estandarizados, esta evalúa la magnitud y el grado de importancia de los factores sobre el efecto. En el diagrama se toma una línea de referencia, la cual indica que cualquier efecto que sobrepase este límite es sumamente importante. Se puede distinguir que los factores son importantes de manera independiente, ya que se todos se encuentran al lado derecho de la línea referencial excepto la interacción entre estos.

C. Análisis de los residuos.

En la Figura 61 se muestran los residuos según el orden de recolección; se emplea para determinar los errores no aleatorios, específicamente los efectos relacionados con el tiempo; además se verifica que no hay una dispersión muy amplia ya que los datos se encuentran entre 7,5 y -7,5, la cual pueda reflejar inconvenientes en los resultados.

En la Figura 62 se muestra el histograma de residuos, se pueden distinguir las características de distribución de los resultados; además, podemos determinar que los experimentos fueron realizados sin valores atípicos.

En la Figura 63 se observa la gráfica de probabilidad normal, establece que si los residuos están normalmente distribuidos deberán formar una línea recta. Sin embargo, se puede apreciar que no presenta una desviación significativa de normalidad ni errores durante el diseño experimental ya que todos los puntos siguen el modelo.

4.4.2 Comparación de los resultados.

En relación a la investigación: "Mejora de las propiedades mecánicas del acero SAE 1040 mediante procesos de tratamiento térmico" (8), la cual realizó un revenido entre 200 °C y 275 °C obteniéndose una dureza final de 47 HRC, siendo esto un incremento considerable con respecto a la dureza de suministro, pero presentado un alto contenido de austenita residual lo que se traduce en un material muy frágil lo que va en contra de las características óptimas; mientras que la presente investigación llega a evidenciar un aumento considerable de la dureza con respecto a la de suministro sin llegar a ser muy frágil; esto se debe a que al emplear el tratamiento térmico criogénico se llega a alcanzar una transformación más completa, reduciendo la presencia de la austenita retenida la cual es sinónimo de fragilidad.

En comparación a la investigación: “Aplicación de la criogenia en los tratamientos térmicos de los aceros para trabajo en frío K100 (AISI D3)” (4), se puede evidenciar que las probetas sometidas a tratamiento criogénico nos proporciona una microestructura en una fase martensítica fina, pudiéndose notar que este tratamiento proporciona características con menor contenido de austenita, ya que al emplear el tratamiento criogénico la fase austenítica ha conseguido una transformación mucho más completa y donde se lograron obtener los valores más altos de dureza, a diferencia de las probetas tratadas mediante un temple convencional que poseen una transformación incompleta de la austenita, demostrando una mayor presencia de esta y las cuales obtuvieron los valores de dureza más bajos.

A diferencia de este estudio se desarrolla el análisis metalográfico de las probetas sometidas a tratamientos térmicos de temple y criogenia; por lo tanto, al ser un análisis más específico con relación a otros, proporciona características puntuales de una muestra. Finalmente, dicha investigación concluye que si la temperatura del proceso térmico es menor, entonces la presencia de austenita retenida se reduce; por otra parte, la presente investigación llega a la conclusión que mientras la temperatura de los medios de temple sea menor, esto se traducirá en una transformación más completa.

Al igual que en la investigación: “Evaluación de las propiedades mecánicas del acero D3 sometido a tratamientos térmicos convencionales y un tratamiento criogénico adicional” (9), se tuvo como objetivo principal evidenciar los incrementos de dureza en las probetas al ser sometidas a tratamientos de temple y criogénicos; con la diferencia que adicionalmente se realizó el análisis metalográficos, con el propósito de dar validez a los resultados obtenidos; de este modo se lograron evidenciar los tamaños de grano correspondiente al tratamiento térmico de temple convencional, el cual presenta los tamaños de grano más altos y del tratamiento criogénico, el cual refleja una microestructura más fina y uniforme debido a que el tamaño de grano es menor dando a conocer los valores de dureza más altos.

A diferencia de la investigación: “Fallas en los tratamientos térmicos para aceros de herramienta” (2), no se considera la temperatura y el tiempo del proceso térmico como los factores principales para la ejecución de los tratamientos térmicos presentes, ya que todos los casos son realizados a las mismas condiciones de tiempo y temperatura, solo difieren de sus medios de enfriamiento y de la extensión criogénica; de modo que estos factores son los que influyen finalmente en las características del material tratado.

Con relación al estudio: “Tratamientos térmicos de los aceros” (3), también se proporciona una base teórica concerniente a los tratamientos térmicos, en especial al proceso criogénico; dando a conocer los factores que intervienen, procedimiento y propiedades que logra modificar cuando se requieren características específicas.

Respecto a la investigación: “Secuencia de procesamiento de aceros de maquinaria” (10), se logró tomar en consideración que las probetas de acero sean adquiridas de un solo proveedor debido a que las características y composición varían entre proveedores; además, se realizó un maquinado superficial al material en estado de suministro siguiendo la secuencia de procesamiento.

Al igual que la investigación: “Estudio del efecto de tratamientos térmicos de criogenia sobre el comportamiento tribológico y la tenacidad a la fractura del acero AISI 420” (11), se logran evidenciar los efectos producidos por los tratamientos térmicos sobre la dureza del acero, con la diferencia que se tomó en consideración dos grupos de estudio; pudiendo destacar el potencial aplicativo que conlleva el proceso criogénico al mejorar de manera significativa la dureza del acero SAE 1045 en relación al temple convencional. Los efectos generados en la microestructura del material muestran relación con la dureza que se llega a alcanzar al realizar el tratamiento térmico.

Asimismo como en la investigación, se llega a concluir que al aplicar el tratamiento térmico criogénico, obtenemos una microestructura uniforme y homogénea que al emplear un tratamiento térmico de temple convencional.

A diferencia del estudio: “Influencia del tiempo de revenido en la resistencia al desgaste abrasivo de un acero AISI 1020 templado desde temperaturas Inter críticas seguido de un tratamiento criogénico” (5), se pudo efectuar el temple en tres medios de enfriamiento, lo que permitió resaltar los efectos que proporciona cada uno sobre las características microestructurales del material, logrando evidenciar que mientras la velocidad de enfriamiento sea más rápida se alcanzará una transformación de fase más completa, lo que logra determinar por qué el temple en salmuera y en aceite proporcionan durezas más bajas que el temple en agua; asimismo, al aplicar una extensión criogénica se consigue un incremento de la dureza debido a la compactación de la microestructura. Finalmente, la presente investigación logra evidenciar en que difieren las características que proporciona cada medio de temple.

En comparación al estudio: “Influencia de los tratamientos térmicos a temperaturas Inter críticas UIT y tratamientos criogénicos y un posterior revenido de 15, 30 y 45 minutos

a la resistencia a la fatiga de un acero AISI/SAE 4140" (12), solo se evaluó la exposición a la extensión criogénica para un intervalo de tiempo, mientras que en la mencionada investigación se somete el material a distintos intervalos de tiempo a una extensión criogénica, lo que revela la magnitud que posee el tiempo de exposición a dicha extensión durante el tratamiento térmico, a medida que se extiende más el proceso este brinda mejores características durante la transformación de fases. Asimismo, llega a determinar la magnitud que representa el revenido durante el proceso térmico, demostrando mediante intervalos de tiempo que al extender el proceso de revenido la dureza se reduce.

Así como en la investigación, se pudo determinar las características microestructurales que proporciona el tratamiento criogénico, dando mayor énfasis a la aparición de la martensita con una característica fina, lo que nos da validez de la efectividad de emplear una extensión criogénica.

De la misma manera que la investigación: "Tratamientos criogénicos y la propuesta de su ensayo como práctica de laboratorio de metalurgia y metalografía" (13), se logró evidenciar las ventajas y desventajas que genera realizar una extensión criogénica a los procesos térmicos de temple, a través del incremento de la dureza y mejora a nivel microestructural del material, proporcionando una microestructura más uniforme y compacta a diferencia de emplear un temple convencional; de este modo, logra mejorar el rendimiento y desempeño del material tratado.

En comparación a la investigación: "Estudio del tratamiento térmico sub-cero mediante la aplicación de dióxido de carbono sólido en los aceros AISI 1045 y AISI 4140, y su incidencia en las propiedades mecánicas" (14), la cual emplea como medio de enfriamiento el agua a una temperatura de 40 °C con el propósito de que al no ser una temperatura tan baja, el enfriamiento no es tan brusco y no correrá el riesgo de que existan fenómenos de fisura; mientras que en esta investigación se emplea el agua a una temperatura de 22 °C, que al ser una temperatura menor puede existir el riesgo de sufrir estos efectos, sin embargo logra dar una transformación más completa.

Asimismo, aquella investigación emplea fluidos alternativos como el alcohol, acetona y CO₂, pero con el factor en contra que se evaporan con facilidad por lo que se requieren mayores cantidades de estos; mientras que en la presente investigación resulta favorable el uso del nitrógeno líquido ya que mantiene constante su temperatura a medida que se realiza el proceso de enfriamiento.

En comparación al estudio: “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” (15), además de evaluar el incremento en la dureza también se consiguió evidenciar que las probetas tratadas con temple sin extensión criogénica revelan una microestructura poco uniforme, lo cual indica la posibilidad de llegar a la fractura y sufrir deformaciones.

Finalmente, no se encontraron desarrollos similares con otros estudios realizados; sin embargo, en los antecedentes planteados se distingue que no llevan a cabo el diseño propuesto mediante la evaluación de factores implicados en el estudio, ni mucho menos la magnitud que estos representan.

4.4.3 Consecuencias teóricas.

En la presente investigación se pudo establecer que un tratamiento térmico proporciona las mejores características de dureza cuando se realiza la combinación de un proceso térmico de temple con una extensión criogénica y empleando el agua como medio de enfriamiento; no obstante, resulta óptimo emplear la salmuera como medio de enfriamiento, ya que además de brindar una dureza alta, proporciona una microestructura uniforme y más compacta.

4.4.4 Aplicaciones prácticas.

Durante la configuración de los procesos de tratamiento térmico que resulten óptimos y que proporcionen las mejores características mecánicas; mediante la utilización del diseño factorial se pueden determinar los factores cuyos grados de influencia sean los más determinantes y tengan mayor relevancia, con el propósito de llegar a una combinación de niveles en la que se obtenga el mejor desempeño del proceso.

CAPITULO V

ASPECTOS ADMINISTRATIVOS

En este capítulo se define el presupuesto correspondiente al desarrollo de la investigación; se especifican los costos de adquisición del material, procesos de mecanizado y ejecución de ensayos; también se presenta la programación mediante un cronograma en el que detalla el desarrollo, la obtención de datos y sus respectivos análisis.

5.1 Presupuesto

5.1.1 Costos individuales.

A. Material.

Se adquirieron dos barras de aceros SAE 1045 con dimensiones mayores a las requeridas, de modo que el material oxidado presente en su estado de suministro sea eliminado; el precio concierne a 1 kg.

Tabla 29.

Costos del material base.

Descripción	Cantidad	Precio S/. I/IGV	Total
Acero SAE 1045 (45 x 150) mm	3,879 kg	S/. 5,96	S/. 23,12
Acero SAE 1045 (50 x 700) mm	11,176 kg	S/. 7,48	S/. 83,60
Total			S/. 106,72

B. Mecanizado de probetas.

Al adquirir los materiales las barras de acero presentan una capa decarburada, la cual debe ser eliminada mediante el proceso de mecanizado para proporcionarle una estructura fina y las dimensiones propuestas para que pueda ser trabajado.

Tabla 30.

Costos de mecanizado.

Descripción	Cantidad	Total I/IGV
Mecanizado de probetas	18 probetas	S/. 220,00

C. Tratamientos térmicos y criogénicos

Los tratamientos térmicos de temple convencional y criogénico se realizaron en las instalaciones de CORPSAE, por parte de los encargados del Laboratorio de Control de Calidad; el precio corresponde a 1 kg de acero.

Tabla 31.

Costos del tratamiento térmico convencional y criogénico.

Descripción	Cantidad	Precio S. I/IGV	Total
Tratamientos térmicos	7,70 kg	S/. 12,86	S/. 99,02
Tratamiento criogénico	7,70 kg	S/. 5,90	S/. 45,43
Total			S/. 144,45

D. Ensayo de dureza

Los ensayos de dureza fueron proporcionados por CORPSAE, mediante un certificado al haber realizado los tratamientos térmicos de las probetas. Por lo tanto, no se generaron costos por parte de estos ensayos.

E. Ensayos metalográficos.

Los ensayos metalográficos fueron realizados por el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad Nacional de Ingeniería; los costos corresponden a cada probeta a analizar.

Tabla 32.

Costos del ensayo metalográfico.

Descripción	Cantidad	Precio S/. I/IGV	Total
Ensayo metalográfico	6	S/. 194,70	S/. 1 168,20

5.1.2 Costos totales

Tabla 33.

Costos totales de investigación.

Ítem	Descripción	Total
1	Material	S/. 106,72
2	Mecanizado de probetas	S/. 220,00
3	Tratamientos térmicos y criogénicos	S/. 144,45
4	Ensayos de dureza	-
5	Ensayos metalográficos	S/. 1 168,20
	Total	S/. 1 639,37

5.2 Cronograma

Se estima que el proyecto tendrá una duración de 14 semanas, la dificultad y retrasos se verán reflejados en la realización de los ensayos de dureza y metalográficos; además en la elaboración las probetas y sus tratamientos térmicos por parte de la empresa CORPSAE y laboratorios de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Tabla 34.

Cronograma de actividades

N°	Actividad	Duración	Comienzo	Fin	Resultados
1	Elección del tema de investigación	8 días	12/09/2018	19/09/2018	Presentar la propuesta de un tema de investigación de interés tecnológico y que represente un aporte a la ingeniería.
2	Propuesta del plan de investigación	7 días	20/09/2018	26/09/2018	Presentar una propuesta del plan de tesis respecto a la idea planteada, mejorarla y finalmente validarla.
3	Elaboración del capítulo I	9 días	27/09/2018	05/10/2018	Presentar un avance del problema de investigación, formulación de objetivos y justificación.
4	Corrección del capítulo I	4 días	06/10/2018	09/10/2018	Corregir y mejorar el desarrollo del capítulo con respecto a las inconformidades encontradas.
5	Elaboración del capítulo II	10 días	10/10/2018	19/10/2018	Recolectar diversas fuentes de información referentes al tema; mediante el manejo de libros y tesis. Establecer los antecedentes de la investigación y desarrollar el marco teórico.
6	Corrección del capítulo II	4 días	20/10/2018	23/10/2018	Corregir y mejorar el desarrollo del capítulo con respecto a las inconformidades encontradas.

7	Elaboración del capítulo III	10 días	24/10/2018	02/11/2018	Elaborar la metodología y plantear un diseño para el desarrollo de la investigación.
8	Corrección del capítulo III	3 días	03/11/2018	05/11/2018	Corregir y mejorar el desarrollo del capítulo con respecto a las inconformidades encontradas.
9	Elaboración del capítulo IV	16 días	06/10/2018	21/11/2018	Adquisición del material de estudio (Acero SAE 1045) Mecanizado de probetas de acero SAE 1045 Solicitud y desarrollo de tratamientos por CORPSAE Desarrollo de tratamientos criogénicos por CORPSAE Desarrollo de ensayos de dureza por CORPSAE Solicitud y desarrollo de ensayos metalográficos UNI
		7 días	22/11/2018	28/11/2018	Analizar los resultados obtenidos y realizar una discusión con respecto a los objetivos y antecedentes.
10	Corrección del capítulo IV	9 días	29/11/2018	07/12/2018	Corregir y mejorar el desarrollo del capítulo con respecto a las inconformidades encontradas.
11	Elaboración del capítulo V	6 días	08/12/2018	13/12/2018	Elaborar el presupuesto y cronograma concerniente al desarrollo de investigación.
12	Elaboración de páginas preliminares	5 días	14/12/2018	18/12/2018	Elaborar las páginas preliminares de la investigación; resumen, introducción, conclusiones, recomendación.
13	Revisión y originalidad de tesis	9 días	19/12/2018	27/12/2018	Revisión de originalidad y conformidad con el trabajo de investigación por el asesor con uso del "Turnitin".

CONCLUSIONES

1. Se evidencia la mejora de la dureza del acero SAE 1045 mediante la aplicación del tratamiento térmico criogénico, llegando a la conclusión de que el proceso criogénico resulta ser altamente eficiente con relación a los procesos tradicionales de temple, ya que favorece la transformación de austenita retenida; por lo tanto, al haber menor contenido de esta en la microestructura, la dureza es mayor; llegando a un incremento de 54,83 HRC, 40,56 HRC y 51,17 HRC al tratar en agua, aceite y salmuera respectivamente, seguido de una extensión criogénica; mientras que un temple convencional proporciona durezas de 33 HRC y 29 HRC en agua y aceite respectivamente, de acuerdo al catálogo de aceros.
2. Se realizaron los tratamientos térmicos de temple convencional y temple con extensión criogénica a las probetas de acero SAE 1045; especificando las condiciones correspondientes al proceso térmico de acuerdo al contenido de carbono de 0,45%, el cual fue el factor principal para tomar en cuenta las condiciones del proceso; se determinó la temperatura de temple, la cual se realizó a 850 °C por 1 hora seguido de un revenido a 200 °C por 2 horas; asimismo, se realizaron cambios en el proceso térmico, proponiendo una variación de los medios de enfriamiento con el objetivo de evidenciar el que proporcione las mejores características, estos fueron agua, aceite y salmuera a una temperatura de 22 °C, 50 °C y 150 °C respectivamente; la extensión criogénica se realizó a la temperatura de -196 °C por un intervalo de 2 horas, finalmente se dejó enfriar a temperatura ambiente. (Ver página 80 - 89)
3. Para determinar la dureza de las probetas de acero SAE 1045 al ser sometidas a diversos procesos de tratamiento térmico, se realizaron ensayos mecánicos de dureza específicamente en la escala Rockwell C, tomando como referencia la norma ASTM E 18 - 15; se logró evidenciar que el temple en agua seguido de una extensión criogénica la dureza se incrementa en un 32,72% alcanzando un valor máximo de 54,83 HRC, un temple en aceite seguido de una extensión criogénica la dureza se incrementa en un 10,7% alcanzando un valor máximo de 40,56 HRC, mientras que al realizar un temple en salmuera seguido de una extensión criogénica la dureza se incrementa en un 23,35% alcanzando un valor máximo de 51,17 HRC con relación a emplear un tratamiento térmico de temple convencional que alcanza unos valores máximos de 36,89 HRC, 36,22 HRC y 39,22 HRC respectivamente; por lo tanto, si se pretende

alcanzar la máxima dureza en el acero se debe configurar un tratamiento térmico de temple con extensión criogénica; siendo el agua el medio de enfriamiento que proporciona los valores más altos de dureza. (Ver página 89 - 92)

4. Para determinar las características y cambios microestructurales de las probetas de acero SAE 1045 al ser sometidas a procesos de tratamiento térmico, se realizaron ensayos metalográficos, tomando como referencia la norma ASTM E 3 - 95, la cual permitió realizar los procedimientos de manera eficaz sin que existan inconsistencias; se consiguió evidenciar que las probetas tratadas sin extensión criogénica presentan estados microestructurales heterogéneos lo cual refleja riesgo de agrietamiento del material, mientras que las probetas con tratamiento criogénico presentan estados microestructurales uniformes y compactos, siendo la más óptima la que corresponde a la probeta tratada en salmuera; asimismo, se logra evidenciar que el tratamiento criogénico proporciona una transformación más completa que refleja una estructura de menor contenido de austenita residual en relación a los procesos convencionales, que se traduce en una microestructura menos blanda. (Ver página 93 - 102)
5. Se analizó la mejora de la dureza del acero SAE 1045 mediante el análisis estadístico planteando un diseño factorial (Proceso térmico y medio de enfriamiento) de niveles mixtos con el propósito de determinar la magnitud de los factores cuyos grados de influencia sean los más determinantes y tengan mayor relevancia, de modo de poder obtener una combinación de niveles en la que se consiga el mejor desempeño del proceso; pudiendo deducir que los factores principales como A y B cumplen una función muy importante en la mejora de la dureza del acero SAE 1045, se revela que el factor A tiene el valor F más alto lo cual indica que no es precisamente dependiente del factor B para optimizar la variable dureza, ya que si configuramos el factor A con cualquier nivel presente en el factor B, seguiremos obteniendo la misma respuesta; además, se comprobó la configuración que proporciona las mejores características de dureza es el caso A_2B_1 , donde se realiza el temple en agua y con una extensión criogénica, logrando una dureza máxima de 54,83 HRC que destaca así los valores más altos por parte del tratamiento criogénico; finalmente se comprobó la validez de hipótesis mediante estadísticos F, que si definimos los parámetros y condiciones del proceso térmico y medio de enfriamiento, se mejora la dureza del acero SAE 1045. (Ver página 102 - 110)

RECOMENDACIONES

1. Dada la particularidad del proceso de tratamiento térmico criogénico, se recomienda que el revenido final no se debería realizar a una temperatura por encima de los 200 °C ya que la dureza disminuiría considerablemente; además, sería conveniente emplear otros medios alternativos para la extensión de enfriamiento con el propósito de evidenciar las diferencias que estos proporcionan.
2. Se recomienda realizar el tratamiento térmico criogénico a los diferentes tipos de acero de menor valor económico para investigaciones complementarias, de modo que se pueda conseguir las características mecánicas de aceros de mayor aleación los cuales presentan un mayor costo.
3. Se recomienda emplear aceros de alto contenido de carbono, de modo que se pueda evidenciar de manera notoria los incrementos en la dureza, ya que al tener mayores porcentajes el acero alcanzará durezas más elevadas para una mejor comparación.
4. Se recomienda emplear otros medios de temple como el plomo y polímero con el propósito de evidenciar las características y cambios microestructurales que estos generan sobre el material.
5. La magnitud de los factores requiere de un análisis más amplio para poder llevar a la práctica el diseño de nuevas técnicas y métodos de tratamientos térmicos, que proporcionen el mejor desempeño del proceso; por lo que se recomienda el análisis de otras propiedades mecánicas, mediante ensayos de impacto, ensayos de fatiga, ensayos de tensión y ensayos de desgaste.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Barrientos Ríos, G. y Razeto Migliaro, M.** *Análisis de fallas en equipos industriales*. Concepción : s.n., 2014.
2. **Núñez Gonzales, G.** *Fallas en los tratamientos térmicos para aceros de herramienta*. Colegio Nacional de Educación Profesional Técnica. Huixquillucan : s.n., 1990.
3. **Perez Patiño, J. A.** *Tratamientos térmicos de los aceros*. Universidad Autónoma de Nuevo León. San Nicolás de los Garza : s.n., 1996. (Tesis de maestría).
4. **Lira Calmet, G.** *Aplicación de la criogénia en el tratamiento térmico de aceros para trabajo en frío: K100 (AISI D3)*. Facultad de ciencias e ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima : s.n., 2009. (Tesis de licenciatura).
5. **Guerrero Enciso, C. C. y Salazar Castellanos, J. F.** *Influencia del tiempo de revenido en la resistencia al desgaste abrasivo de un acero AISI 1020 templado desde temperaturas intercríticas seguidas de un tratamiento criogenico*. Univerdidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá : s.n., 2016. (Tesis de licenciatura).
6. **1045, Análisis de falla de ejes SAE**. SCRIBD: Análisis de falla de ejes SAE 1045. [En línea] 12 de Junio de 2012. [Citado el: 19 de Enero de 2019.] <https://es.scribd.com/document/96780486/Analisis-de-Falla-de-Ejes-SAE-1045>.
7. **Apraiz Barreiro, J.** *Tratamientos térmicos de los aceros*. Décima. Madrid : Dossat SA, 1985. pág. 738. 9788423705689.
8. **Kalpakjian, S. y Schmid, S. R.** *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Cuarta. Naucalpan de Juárez : Pearson, 2002. pág. 1176. 970-26-0137-1.
9. **Landauro Abanto, A.** *Mejora de las propiedades mecánicas del acero SAE 1040 mediante procesos de tratamiento térmico*. Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Ingeniería. Lima : s.n., 2011.
10. **Agurto Rivera, D. y Portilla Fuentes, R. R.** *Evaluación de las propiedades mecánicas del acero D3 sometido a tratamientos térmicos convencionales y un tratamiento térmico adicional*. Universidad Católica de Santa María. Arequipa : s.n., 2014. (Tesis de licenciatura).

11. **Calvo Altamirano, R.** *Secuencia de procesamiento de aceros de maquinaria*. Universidad Autónoma de Nuevo León. San Nicolas de los Garza : s.n., 1996. (Tesis de maestría).
12. **Prieto, G.** *Estudio del efecto de tratamientos térmicos de criogénia sobre el comportamiento tribológico y la tenacidad a la fractura del acero AISI 420*. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca : s.n., 2015. (Tesis doctoral).
13. **Peralta Mahecha, L. D. y Moreno Gonzales, J. M.** *Influencia de los tratamientos térmicos a temperaturas intercríticas IHT y tratamientos 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. Bogotá : s.n., 2017. (Tesis de licenciatura).
14. **Gómez Corzo, L. R.** *Tratamientos criogénicos y la propuesta de su ensayo como práctica de laboratorio de metalurgia y metalografía*. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala : s.n., 2010. (Tesis de licenciatura).
15. **Malán Castro, W. V.** *Estudio del tratamiento térmico sub-cero mediante la aplicación de dióxido de carbono sólido en los aceros AISI 1045 y AISI 4140, y su incidencia en las propiedades mecánicas*. Universidad Técnica de Ambato. Ambato : s.n., 2015. (Tesis de licenciatura).
16. **Alfonso Guzmán, N.** *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. Bogotá : s.n., 2017. (Tesis de licenciatura).
17. **Newell, J.** *Ciencia de materiales (Aplicaciones en ingeniería)*. Primera. Mexico D.F. : Alfaomega, 2011. pág. 368. 978-607-707-114-3.
18. **Mott, Robert L.** *Diseño de elementos de máquinas*. Cuarta. Naucalpan de Juárez : Pearson, 2006. pág. 944. 970-26-0812-0.
19. **Molera Solá, P.** *Tratamientos térmicos de los metales*. Barcelona : Marcombo, 1991. 978-84-267-0826-7.
20. **Budynas, Richard G. y Keith Nisbett, J.** *Diseño en ingeniería mecánica de shigley*. Octava. Mexico D.F. : McGraw-Hill Interamericana, 2008. pág. 1092. 978-970-10-6404-7.
21. **Glória, Flávio.** Caracterização microestrutural e identificação das causas de trincas do aço astm...: Ebah. *Ebah Web site*. [En línea] 2013. [Citado el: 12 de Enero de 2019.]

<https://www.ebah.com.br/content/ABAAABOpQAF/caracterizacao-microestrutural-identificacao-das-causas-trincas-aco-astm-a217-wc9-lingoteiras-utilizadas-na-fundicao-zinco?part=2>.

22. **Ruiz, S.** SCRIBD: Catálogo SAE 1045. [En línea] 17 de Septiembre de 2015. [Citado el: 19 de Enero de 2019.] <https://es.scribd.com/document/281481947/SAE-1045>.

23. **Lajtin, Y. M.** *Metalografía y tratamiento térmico de los metales*. Tercera. Moscú : MIR, 1973. pág. 439. 2910009902282.

24. **Irías, A. y Stackpole, C.** *Aumento en la resistencia al desgaste de aceros para herramienta a través de la aplicación de tratamiento criogénico*.

25. **Güemes Gordo, A. y Martín Piris, N.** *Ciencia de materiales para ingenieros*. Madrid : Pearson, 2012. pág. 504. 978-84-8322-719-0.

26. **Shackelford, James F.** *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*. Sexta. Madrid : Pearson, 2005. pág. 872. 978-84-205-4451-9.

27. **Bernau, R. L.** *Elementos de metalografía y de acero al carbono*. Santiago : Andrés Bello, 1958.

28. **Espinoza Montes, C.** *Metodología de investigación tecnológica*. Primera. Huancayo : Imagen Gráfica SAC, 2010. 9786120002223.

29. *La investigación aplicada: Una forma de conocer la realidades con evidencia científica*. **Vargas Cordero, Z. R.** 1, San Pedro de Montes de Oca : s.n., 2009, Educación, Vol. 33. 0379-7082.

30. **Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. y Baptista Lucio, P.** *Metodología de la investigación*. Mexico D.F. : McGraw-Hill, 2015. 978-607-15-0291-9.

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia y operacionalización de variables

Tabla 35.

Matriz de consistencia.

I. PROBLEMA	II. OBJETIVO	III. HIPÓTESIS	IV. METODOLOGÍA
<p>PROBLEMA GENERAL ¿Puede la aplicación del tratamiento térmico criogénico favorecer la mejora de la dureza del acero SAE 1045?</p>	<p>OBJETIVO GENERAL Evidenciar la mejora de la dureza del acero SAE 1045 mediante la aplicación del tratamiento térmico criogénico.</p>	<p>HIPÓTESIS GENERAL H₁: Si la aplicación del tratamiento térmico criogénico realizado de la manera adecuada mediante una correcta configuración del proceso térmico y una apropiada selección del medio de enfriamiento, se mejorará la dureza del acero SAE 1045. H₀: Si la aplicación del tratamiento térmico criogénico realizado de la manera adecuada mediante una correcta configuración del proceso térmico y una apropiada selección del medio de enfriamiento, no se mejorará la dureza del acero SAE 1045.</p>	<p>MÉTODO DE INVESTIGACIÓN El presente estudio cuenta con un método experimental; además, presenta un enfoque cuantitativo y cualitativo. NIVEL INVESTIGACIÓN El nivel de investigación es experimental. TIPO DE INVESTIGACIÓN La investigación es de tipo aplicado. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN Diseño factorial experimental 3x2 de niveles mixtos con tres repeticiones. POBLACIÓN Y MUESTRA A. Población La población estuvo constituida por probetas cilíndricas de acero SAE 1045.</p>

<p>PROBLEMAS ESPECÍFICOS</p> <p>A. ¿Qué condiciones se requieren para aplicar un proceso de tratamiento térmico de temple convencional y temple con extensión criogénica?</p> <p>B. ¿Qué efectos importantes se pueden destacar sobre la dureza del acero SAE 1045 al ser sometido a procesos de tratamiento térmico convencional y criogénico?</p> <p>C. ¿Qué efectos importantes se pueden destacar sobre las características microestructurales del acero SAE 1045 al ser sometido a procesos de tratamiento térmico convencional y criogénico?</p> <p>D. ¿Cuál es el tratamiento óptimo que generará las mejores características de dureza en el acero SAE 1045</p>	<p>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</p> <p>A. Realizar el tratamiento térmico de temple convencional y temple con extensión criogénica a las probetas de acero SAE 1045, seguido de un revenido teniendo en consideración tres medios de enfriamiento.</p> <p>B. Determinar la dureza de las probetas de acero SAE 1045 al someterlas a procesos de tratamiento térmico convencional y criogénico, mediante ensayos de dureza; tomando como referencia la norma ASTM E 18 - 15.</p> <p>C. Determinar las características y cambios microestructurales de las probetas de acero SAE 1045 al someterlas a procesos de tratamiento térmico convencional y criogénico, mediante pruebas</p>	<p>HIPÓTESIS ESPECÍFICA</p> <p>A. Las condiciones de tiempo y temperatura del proceso térmico y elección del medio de enfriamiento generan un proceso adecuado de temple convencional y temple con extensión criogénica.</p> <p>B. El proceso de tratamiento térmico criogénico proporciona valores más altos de dureza que un proceso de tratamiento térmico convencional.</p> <p>C. El proceso de tratamiento térmico criogénico proporciona una transformación más completa y una microestructura más fina y uniforme que un proceso de tratamiento térmico convencional.</p> <p>D. La adecuada configuración del proceso térmico</p>	<p>B. Muestra</p> <p>Se determinó la cantidad de 18 probetas cilíndricas de 40 mm de diámetro por 40 mm de longitud para los ensayos de dureza y metalográficos. Se realizaron seis tratamientos cada uno con tres réplicas.</p> <p>TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN</p> <p>Se llevaron a cabo las siguientes técnicas y uso de instrumentos:</p> <p>Observación</p> <ul style="list-style-type: none"> • Instalaciones de CORPSAE • Durómetro • Microscopio • Guías de laboratorio <p>Documental</p> <ul style="list-style-type: none"> • Catálogos • ASTM E 18 - 15 • ASTM E 3 - 95 • Instalaciones de CORPSAE <p>TÉCNICA DE PROCESAMIENTO</p> <p>Estadística inferencial</p> <ul style="list-style-type: none"> • Análisis de varianza • Prueba F de Fisher
--	---	---	--

<p>al manipular las condiciones del proceso térmico y medio de enfriamiento?</p>	<p>metalográficas; tomando como referencia la norma ASTM E 3 - 95.</p> <p>D. Analizar la mejora de la dureza mediante el análisis estadístico de diseño factorial de dos factores (Proceso térmico y medio de enfriamiento).</p>	<p>criogénico y elección del medio de enfriamiento proporciona mejores características de dureza en el acero SAE 1045 que los procesos de tratamiento térmico convencional.</p>	
--	--	---	--

Tabla 36.

Operacionalización de variables.

VARIABLE INDEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIÓN	INDICADOR
<p>Tratamiento térmico criogénico</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Proceso térmico ➤ Medio de enfriamiento 	<p>Extensión del proceso de tratamiento térmico y añade una variación al medio de enfriamiento; se realiza a temperaturas bajo cero y tiene como propósito reducir el contenido de austenita retenida en la microestructura de los aceros, al mismo tiempo que modifica sus propiedades mecánicas.</p>	<p>Temple convencional</p> <ul style="list-style-type: none"> • Temple en agua • Temple en aceite • Temple en salmuera <p>Temple con extensión criogénica</p> <ul style="list-style-type: none"> • Temple en agua + criogénico • Temple en aceite + criogénico • Temple en sales + criogénico 	<p>Transformaciones microestructurales variando los medios de enfriamiento correspondientes al proceso de tratamiento térmico.</p>
VARIABLE DEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONTEXTUAL	DIMENSIÓN	INDICADOR
<p>Dureza del acero SAE 1045</p>	<p>La dureza da una indicación general de la resistencia del material, de su resistencia al rayado y al desgaste (7). Depende de la efectividad del medio de enfriamiento que experimente y la transformación microestructural que estos le proporcionen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Dureza Rockwell C 	<p>Incremento de la dureza Rockwell C del acero SAE 1045 correspondiente a cada proceso de tratamiento térmico.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Durómetro

Anexo 2. Extracto del manual de Aceros del Perú S.A.C

“Aceros especiales”

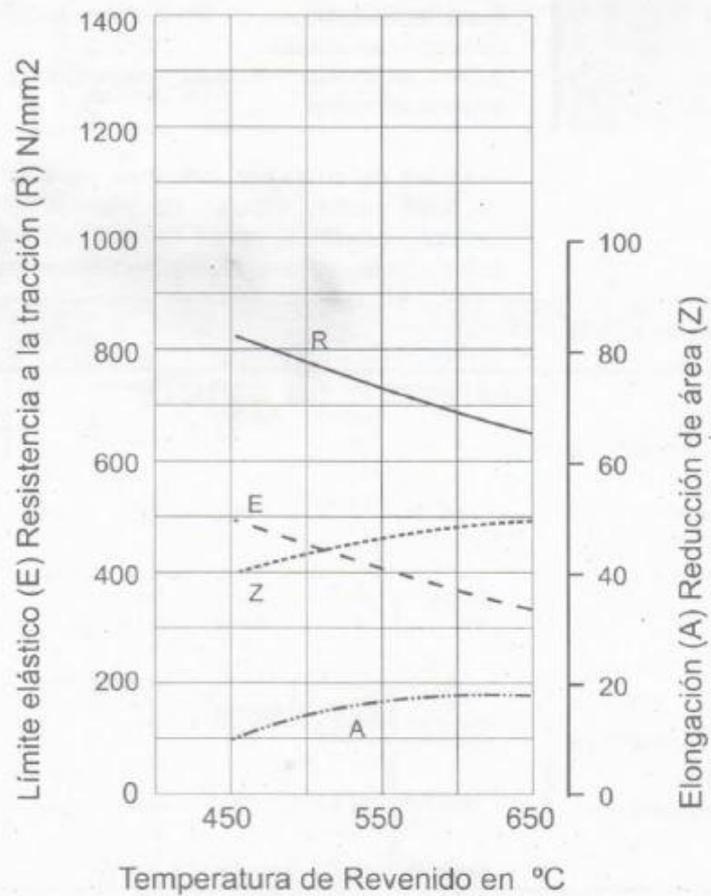
CK 45 (2 C 45)						
DIN	CK 45					
W N°	1.1191					
AISI	1045					
Composición química	%C	%Ni	%Mn	%Cr		
	0.42-0.50	≤0.4	0.5-0.8	≤0.4		
	%Mo	%Si	%S	%P		
	≤0.1	0.4	0.02-0.04	≤0.035		
Estado de Suministro	Sin Tratamiento Térmico					
Dureza de suministro	207 HB Máx.					
Colores distintivos	Azul - Amarillo - Verde.					
Propiedades	Superior a los aceros de fabricación nacional debido a su control de calidad. Acero utilizable: tratado, recocido o templado superficialmente.					
Aplicaciones	Coronas de arranque, catalinas, ejes transmisores de baja carga, árboles de transmisión, pernos, tuercas, ganchos, pines de sujeción, pasadores, cuñas, chavetas, arandelas, portamatrices, pernos.					
Propiedades Mecánicas						
Alcanzable cuando se normaliza a 850-875°C (probetas longitudinales)	Ø mm	U.T.S Kg/mm ²	Y.S. 0.2 Kg/mm ²	Elongación %	KCU J/cm ²	KV J
	d≤16	66-76	≥37.5	≥17	≥40	
	16<d≤40	64-75	≥34.5	≥17	≥40	
	40<d≤100	62-74	≥32.5	≥16	≥35	
	100<d≤160	60-73	≥30.5	≥16	≥30	
	160<d≤250	58-72	≥29.5	≥15	≥30	
Alcanzable en barras Templadas y revenidas	Ø mm	U.T.S Kg/mm ²	Y.S. 0.2 Kg/mm ²	Elongación %	KCU J/cm ²	KV J
	d≤16	70-85	≥49	≥14		≥25
	16<d≤40	65-80	≥43	≥16		≥25
	40<d≤100	63-78	≥37	≥17		≥25

Tratamiento Térmico

Temperatura de temple	Medio de enfriamiento	Temperatura de revenido	Temperatura de Recocido
820-860°C	agua	550-660°C	650 - 700 °C

Soldable con procedimiento
(cualquier consulta comunicarse con el
Departamento Técnico de EXSA-OERLIKON)

Curva de revenido



Fuente: Manual de aceros especiales "Aceros del Perú S.A.C." (Pág. 52 - 53)

Anexo 3. Extracto de la Norma ASTM E 18 - 15

Standards Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials



Designation: E18 - 15

An American National Standard

Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials^{1,2}

This standard is issued under the fixed designation E18; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the U.S. Department of Defense.

1. Scope^{*}

1.1 These test methods cover the determination of the Rockwell hardness and the Rockwell superficial hardness of metallic materials by the Rockwell indentation hardness principle. This standard provides the requirements for Rockwell hardness machines and the procedures for performing Rockwell hardness tests.

1.2 This standard includes additional requirements in annexes:

Verification of Rockwell Hardness Testing Machines	Annex A1
Rockwell Hardness Standardizing Machines	Annex A2
Standardization of Rockwell Indenters	Annex A3
Standardization of Rockwell Hardness Test Blocks	Annex A4
Guidelines for Determining the Minimum Thickness of a Test Piece	Annex A5
Hardness Value Corrections When Testing on Convex Cylindrical Surfaces	Annex A6

1.3 This standard includes nonmandatory information in appendixes which relates to the Rockwell hardness test.

List of ASTM Standards Giving Hardness Values Corresponding to Tensile Strength	Appendix X1
Examples of Procedures for Determining Rockwell Hardness Uncertainty	Appendix X2

1.4 *Units*—At the time the Rockwell hardness test was developed, the force levels were specified in units of kilograms-force (kgf) and the indenter ball diameters were specified in units of inches (in.). This standard specifies the units of force and length in the International System of Units (SI); that is, force in Newtons (N) and length in millimeters (mm). However, because of the historical precedent and continued common usage, force values in kgf units and ball diameters in inch units are provided for information and much of the discussion in this standard refers to these units.

1.5 The test principles, testing procedures, and verification procedures are essentially identical for both the Rockwell and

Rockwell superficial hardness tests. The significant differences between the two tests are that the test forces are smaller for the Rockwell superficial test than for the Rockwell test. The same type and size indenters may be used for either test, depending on the scale being employed. Accordingly, throughout this standard, the term Rockwell will imply both Rockwell and Rockwell superficial unless stated otherwise.

1.6 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:³

- A370 Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products
- A623 Specification for Tin Mill Products, General Requirements
- A623M Specification for Tin Mill Products, General Requirements [Metric]
- B19 Specification for Cartridge Brass Sheet, Strip, Plate, Bar, and Disks
- B36/B36M Specification for Brass Plate, Sheet, Strip, and Rolled Bar
- B96/B96M Specification for Copper-Silicon Alloy Plate, Sheet, Strip, and Rolled Bar for General Purposes and Pressure Vessels
- B103/B103M Specification for Phosphor Bronze Plate, Sheet, Strip, and Rolled Bar
- B121/B121M Specification for Leaded Brass Plate, Sheet, Strip, and Rolled Bar
- B122/B122M Specification for Copper-Nickel-Tin Alloy, Copper-Nickel-Zinc Alloy (Nickel Silver), and Copper-Nickel Alloy Plate, Sheet, Strip, and Rolled Bar
- B130 Specification for Commercial Bronze Strip for Bullet Jackets
- B134/B134M Specification for Brass Wire

¹ These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee E28 on Mechanical Testing and are the direct responsibility of Subcommittee E28.06 on Indentation Hardness Testing.

Current edition approved Feb. 1, 2015. Published March 2015. Originally approved in 1932. Last previous edition approved in 2014 as E18 - 14a. DOI: 10.1520/E0018-15.

² In this test method, the term Rockwell refers to an internationally recognized type of indentation hardness test as defined in Section 3, and not to the hardness testing equipment of a particular manufacturer.

³ For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

***A Summary of Changes section appears at the end of this standard**

Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States

- B152/B152M Specification for Copper Sheet, Strip, Plate, and Rolled Bar
- B370 Specification for Copper Sheet and Strip for Building Construction
- E29 Practice for Using Significant Digits in Test Data to Determine Conformance with Specifications
- E92 Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials (Withdrawn 2010)⁴
- E140 Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness
- E384 Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials
- E691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method
- 2.2 *American Bearings Manufacturer Association Standard:*
 ABMA 10-1989 Metal Balls⁵
- 2.3 *ISO Standards:*
 ISO 6508-1 Metallic Materials—Rockwell Hardness Test—Part 1: Test Method (scales A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)⁶
- ISO/IEC 17011 Conformity Assessment—General Requirements for Accreditation Bodies Accrediting Conformity Assessment Bodies⁶
- ISO/IEC 17025 General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories⁶
- 2.4 *Society of Automotive Engineers (SAE) Standard:*
 SAE J417 Hardness Tests and Hardness Number Conversions⁷

3. Terminology and Equations

3.1 Definitions:

3.1.1 *calibration*—determination of the values of the significant parameters by comparison with values indicated by a reference instrument or by a set of reference standards.

3.1.2 *verification*—checking or testing to assure conformance with the specification.

3.1.3 *standardization*—to bring in conformance to a known standard through verification or calibration.

3.1.4 *Rockwell hardness test*—an indentation hardness test using a verified machine to force a diamond spheroidal indenter or tungsten carbide (or steel) ball indenter, under specified conditions, into the surface of the material under test, and to measure the difference in depth of the indentation as the force on the indenter is increased from a specified preliminary test force to a specified total test force and then returned to the preliminary test force.

3.1.5 *Rockwell superficial hardness test*—same as the Rockwell hardness test except that smaller preliminary and total test forces are used with a shorter depth scale.

3.1.6 *Rockwell hardness number*—a number derived from the net increase in the depth of indentation as the force on an indenter is increased from a specified preliminary test force to a specified total test force and then returned to the preliminary test force.

3.1.7 *Rockwell hardness machine*—a machine capable of performing a Rockwell hardness test and/or a Rockwell superficial hardness test and displaying the resulting Rockwell hardness number.

3.1.7.1 *Rockwell hardness testing machine*—a Rockwell hardness machine used for general testing purposes.

3.1.7.2 *Rockwell hardness standardizing machine*—a Rockwell hardness machine used for the standardization of Rockwell hardness indenters, and for the standardization of Rockwell hardness test blocks. The standardizing machine differs from a regular Rockwell hardness testing machine by having tighter tolerances on certain parameters.

3.2 Equations:

3.2.1 The average \bar{H} of a set of n hardness measurements H_1, H_2, \dots, H_n is calculated as:

$$\bar{H} = \frac{H_1 + H_2 + \dots + H_n}{n} \quad (1)$$

3.2.2 The error E in the performance of a Rockwell hardness machine at each hardness level, relative to a standardized scale, is determined as:

$$E = \bar{H} - H_{STD} \quad (2)$$

where:

\bar{H} = average of n hardness measurements H_1, H_2, \dots, H_n made on a standardized test block as part of a performance verification, and

H_{STD} = certified average hardness value of the standardized test block.

3.2.3 The *repeatability* R in the performance of a Rockwell hardness machine at each hardness level, under the particular verification conditions, is estimated by the range of n hardness measurements made on a standardized test block as part of a performance verification, defined as:

$$R = H_{max} - H_{min} \quad (3)$$

where:

H_{max} = highest hardness value, and

H_{min} = lowest hardness value.

4. Significance and Use

4.1 The Rockwell hardness test is an empirical indentation hardness test that can provide useful information about metallic materials. This information may correlate to tensile strength, wear resistance, ductility, and other physical characteristics of metallic materials, and may be useful in quality control and selection of materials.

⁴ The last approved version of this historical standard is referenced on www.astm.org.

⁵ Available from American Bearing Manufacturers Association (ABMA), 2025 M Street, NW, Suite 800, Washington, DC 20036.

⁶ Available from American National Standards Institute (ANSI), 25 W. 43rd St., 4th Floor, New York, NY 10036, <http://www.ansi.org>.

⁷ Available from Society of Automotive Engineers (SAE), 400 Commonwealth Dr., Warrendale, PA 15096-0001, <http://www.sae.org>.

4.2 Rockwell hardness tests are considered satisfactory for acceptance testing of commercial shipments, and have been used extensively in industry for this purpose.

4.3 Rockwell hardness testing at a specific location on a part may not represent the physical characteristics of the whole part or end product.

4.4 Adherence to this standard test method provides traceability to national Rockwell hardness standards except as stated otherwise.

5. Principles of Test and Apparatus

5.1 *Rockwell Hardness Test Principle*—The general principle of the Rockwell indentation hardness test is illustrated in Fig. 1. The test is divided into three steps of force application and removal.

Step 1—The indenter is brought into contact with the test specimen, and the preliminary test force F_0 is applied. After holding the preliminary test force for a specified dwell time, the baseline depth of indentation is measured.

Step 2—The force on the indenter is increased at a controlled rate by the additional test force F_1 to achieve the total test force F . The total test force is held for a specified dwell time.

Step 3—The additional test force is removed, returning to the preliminary test force. After holding the preliminary test force for a specified dwell time, the final depth of indentation is measured. The Rockwell hardness value is derived from the difference h in the final and baseline indentation depths while under the preliminary test force. The preliminary test force is removed and the indenter is removed from the test specimen.

5.1.1 There are two general classifications of the Rockwell test: the Rockwell hardness test and the Rockwell superficial hardness test. The significant difference between the two test classifications is in the test forces that are used. For the Rockwell hardness test, the preliminary test force is 10 kgf (98 N) and the total test forces are 60 kgf (589 N), 100 kgf (981 N), and 150 kgf (1471 N). For the Rockwell superficial hardness test, the preliminary test force is 3 kgf (29 N) and the total test forces are 15 kgf (147 N), 30 kgf (294 N), and 45 kgf (441 N).

5.1.2 Indenters for the Rockwell hardness test include a diamond spheroconical indenter and tungsten carbide ball indenters of specified diameters.

5.1.2.1 Steel indenter balls may be used only for testing thin sheet tin mill products specified in Specifications A623 and A623M using the HR15T and HR30T scales with a diamond spot anvil. Testing of this product may give significantly differing results using a tungsten carbide ball as compared to historical test data using a steel ball.

NOTE 1—Previous editions of this standard have stated that the steel ball was the standard type of Rockwell indenter ball. The tungsten carbide ball is considered the standard type of Rockwell indenter ball. The use of tungsten carbide balls provide an improvement to the Rockwell hardness test because of the tendency of steel balls to flatten with use, which results in an erroneously elevated hardness value. The user is cautioned that Rockwell hardness tests comparing the use of steel and tungsten carbide balls have been shown to give different results. For example, depending on the material tested and its hardness level, Rockwell B scale tests using a tungsten carbide ball indenter have given results approximately one Rockwell point lower than when a steel ball indenter is used.

5.1.3 The Rockwell hardness scales are defined by the combinations of indenter and test forces that may be used. The standard Rockwell hardness scales and typical applications of the scales are given in Tables 1 and 2. Rockwell hardness values shall be determined and reported in accordance with one of these standard scales.

5.2 *Calculation of the Rockwell Hardness Number*—During a Rockwell test, the force on the indenter is increased from a preliminary test force to a total test force, and then returned to the preliminary test force. The difference in the two indentation depth measurements, while under the preliminary test force, is measured as h (see Fig. 1).

5.2.1 The unit measurement for h is mm. From the value of h , the Rockwell hardness number is derived. The Rockwell hardness number is calculated as:

5.2.1.1 For scales using a diamond spheroconical indenter (see Tables 1 and 2):

$$\text{Rockwell Hardness} = 100 - \frac{h}{0.002} \tag{4}$$

$$\text{Rockwell Superficial Hardness} = 100 - \frac{h}{0.001} \tag{5}$$

where h is in mm.

5.2.1.2 For scales using a ball indenter (see Tables 1 and 2):

$$\text{Rockwell Hardness} = 130 - \frac{h}{0.002} \tag{6}$$

$$\text{Rockwell Superficial Hardness} = 100 - \frac{h}{0.001} \tag{7}$$

where h is in mm.

5.2.2 The Rockwell hardness number is an arbitrary number, which, by method of calculation, results in a higher number for harder material.

5.2.3 Rockwell hardness values shall not be designated by a number alone because it is necessary to indicate which indenter and forces have been employed in making the test (see Tables 1 and 2). Rockwell hardness numbers shall be quoted with a scale symbol representing the indenter and forces used. The hardness number is followed by the symbol HR and the scale designation. When a ball indenter is used, the scale designation

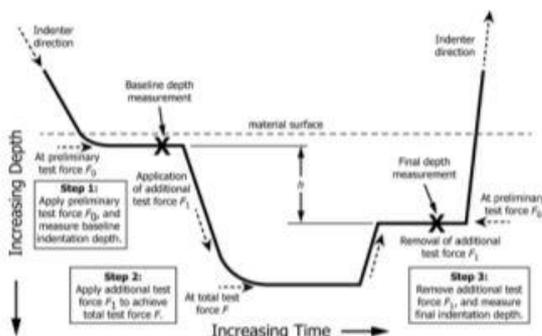


FIG. 1 Rockwell Hardness Test Method (Schematic Diagram)

TABLE 1 Rockwell Hardness Scales

Scale Symbol	Indenter	Total Test Force, kgf	Dial Figures	Typical Applications of Scales
B	1/16-in. (1.588-mm) ball	100	red	Copper alloys, soft steels, aluminum alloys, malleable iron, etc. Steel, hard cast irons, pearlitic malleable iron, titanium, deep case hardened steel, and other materials harder than B100. Cemented carbides, thin steel, and shallow case-hardened steel. Thin steel and medium case hardened steel, and pearlitic malleable iron. Cast iron, aluminum and magnesium alloys, bearing metals. Annealed copper alloys, thin soft sheet metals. Malleable irons, copper-nickel-zinc and cupro-nickel alloys. Upper limit G92 to avoid possible flattening of ball. Aluminum, zinc, lead. Bearing metals and other very soft or thin materials. Use smallest ball and heaviest load that does not give anvil effect.
C	diamond	150	black	
A	diamond	60	black	
D	diamond	100	black	
E	1/8-in. (3.175-mm) ball	100	red	
F	1/16-in. (1.588-mm) ball	60	red	
G	1/16-in. (1.588-mm) ball	150	red	
H	1/8-in. (3.175-mm) ball	60	red	
K	1/8-in. (3.175-mm) ball	150	red	
L	1/4-in. (6.350-mm) ball	60	red	
M	1/4-in. (6.350-mm) ball	100	red	
P	1/4-in. (6.350-mm) ball	150	red	
R	1/2-in. (12.70-mm) ball	60	red	
S	1/2-in. (12.70-mm) ball	100	red	
V	1/2-in. (12.70-mm) ball	150	red	

TABLE 2 Rockwell Superficial Hardness Scales

Total Test Force, kgf (N)	Scale Symbols				
	N Scale, Diamond Indenter	T Scale, 1/16-in. (1.588-mm) Ball	W Scale, 1/16-in. (3.175-mm) Ball	X Scale, 1/16-in. (6.350-mm) Ball	Y Scale, 1/16-in. (12.70-mm) Ball
15 (147)	15N	15T	15W	15X	15Y
30 (294)	30N	30T	30W	30X	30Y
45 (441)	45N	45T	45W	45X	45Y

is followed by the letter "W" to indicate the use of a tungsten carbide ball or the letter "S" to indicate the use of a steel ball (see 5.1.2.1).

5.2.3.1 Examples:

64 HRC = Rockwell hardness number of 64 on Rockwell C scale

81 HR30N = Rockwell superficial hardness number of 81 on the Rockwell 30N scale

72 HRBW = Rockwell hardness number of 72 on the Rockwell B scale using a tungsten carbide ball indenter

5.2.4 A reported Rockwell hardness number or the average value of Rockwell hardness measurements shall be rounded in accordance with Practice E29 with a resolution no greater than the resolution of the hardness value display of the testing machine. Typically, the resolution of a Rockwell hardness number should not be greater than 0.1 Rockwell units.

NOTE 2—When the Rockwell hardness test is used for the acceptance testing of commercial products and materials, the user should take into account the potential measurement differences between hardness testing machines allowed by this standard (see Section 10, Precision and Bias). Because of the allowable ranges in the tolerances for the repeatability and error of a testing machine, as specified in the verification requirements of Annex A1, one testing machine may have a test result that is one or more hardness points different than another testing machine, yet both machines can be within verification tolerances (see Table A1.3). Commonly for acceptance testing, Rockwell hardness values are rounded to whole numbers following Practice E29. Users are encouraged to address rounding practices with regards to acceptance testing within their quality management system, and make any special requirements known during contract review.

5.3 Rockwell Testing Machine—The Rockwell testing machine shall make Rockwell hardness determinations by applying the test forces and measuring the depth of indentation in accordance with the Rockwell hardness test principle.

5.3.1 See the Equipment Manufacturer's Instruction Manual for a description of the machine's characteristics, limitations, and respective operating procedures.

5.3.2 The Rockwell testing machine shall automatically convert the depth measurements to a Rockwell hardness number and indicate the hardness number and Rockwell scale by an electronic device or by a mechanical indicator.

5.4 Indenters—The standard Rockwell indenters are either diamond spheroconical indenters or tungsten carbide balls of 1.588 mm (1/16 in.), 3.175 mm (1/8 in.), 6.350 mm (1/4 in.), or 12.70 mm (1/2 in.) in diameter. Indenters shall meet the requirements defined in Annex A3. Steel ball indenters may be used in certain circumstances (see 5.1.2.1).

5.4.1 Dust, dirt, or other foreign materials shall not be allowed to accumulate on the indenter, as this will affect the test results.

NOTE 3—Indenters certified to revision E18-07 or later meet the requirements of this standard.

5.5 Specimen Support—A specimen support or "anvil" shall be used that is suitable for supporting the specimen to be tested. The seating and supporting surfaces of all anvils shall be clean and smooth and shall be free from pits, deep scratches, and foreign material. Damage to the anvil may occur from testing too thin material or accidental contact of the anvil by the indenter. If the anvil is damaged from any cause, it shall be repaired or replaced. Anvils showing the least visibly perceptible damage may give inaccurate results, particularly on thin material.

5.5.1 Common specimen support anvils should have a minimum hardness of 58 HRC. Some specialty support anvils require a lower material hardness.



Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens¹

This standard is issued under the fixed designation E 3; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 The primary objective of metallographic examinations is to reveal the constituents and structure of metals and their alloys by means of the light microscope. In special cases, the objective of the examination may require the development of less detail than in other cases but, under nearly all conditions, the proper selection and preparation of the specimen is of major importance. Because of the diversity in available equipment and the wide variety of problems encountered, the following text presents for the guidance of the metallographer only those practices which experience has shown are generally satisfactory; it cannot and does not describe the variations in technique required to solve individual problems.

NOTE 1—For a more extensive description of various metallographic techniques, refer to Samuels, L. E., *Metallographic Polishing by Mechanical Methods*, American Society for Metals (ASM) Metals Park, OH, 3rd Ed., 1982; Petzow, G., *Metallographic Etching*, ASM, 1978; and VanderVoort, G., *Metallography: Principles and Practice*, McGraw Hill, NY, 1984.

1.2 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- E 7 Terminology Relating to Metallography²
- E 45 Practice for Determining the Inclusion Content of Steel²
- E 340 Test Method for Macroetching Metals and Alloys²
- E 407 Test Methods for Microetching Metals and Alloys²
- E 1077 Test Method for Estimating the Depth of Decarburization of Steel Specimens²
- E 1268 Practice for Assessing the Degree of Banding or Orientation of Microstructures²
- E 1558 Guide to Electrolytic Polishing of Metallographic Specimens²

¹ This practice is under the jurisdiction of ASTM Committee E-4 on Metallography and is the direct responsibility of Subcommittee E04.01 on Sampling, Specimen Preparation, and Photography.

Current edition approved Jan. 15, 1995. Published March 1995. Originally published as E 3 - 21 T. Last previous edition E 3 - 80 (1986).

² *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 03.01.

3. Significance and Use

3.1 Microstructures have a strong influence on the properties and successful application of metals and alloys. Determination and control of microstructure requires the use of metallographic examination.

3.2 Many specifications contain a requirement regarding microstructure; hence, a major use for metallographic examination is inspection to ensure that the requirement is met. Other major uses for metallographic examination are in failure analysis, and in research and development.

3.3 Proper choice of specimen location and orientation will minimize the number of specimens required and simplify their interpretation. It is easy to take too few specimens for study, but it is seldom that too many are studied.

4. Selection of Metallographic Specimens

4.1 The selection of test specimens for metallographic examination is extremely important because, if their interpretation is to be of value, the specimens must be representative of the material that is being studied. The intent or purpose of the metallographic examination will usually dictate the location of the specimens to be studied. With respect to purpose of study, metallographic examination may be divided into three classifications:

4.1.1 *General Studies or Routine Work*—Specimens from locations that are most likely to reveal the maximum variations within the material under study should be chosen. For example, specimens should be taken from a casting in the zones wherein maximum segregation might be expected to occur as well as specimens from sections where segregation should be at a minimum. In the examination of strip or wire, test specimens should be taken from each end of the coils.

4.1.2 *Study of Failures*—Test specimens should be taken as closely as possible to the fracture or to the initiation of the failure. Before taking the metallographic specimens, study of the fracture surface should be complete, or, at the very least, the fracture surface should be documented. Specimens should be taken in many cases from a sound area for a comparison of structures and properties.

4.1.3 *Research Studies*—The nature of the study will dictate specimen location, orientation, etc. Sampling will usually be more extensive than in routine examinations.

4.2 Having established the location of the metallographic samples to be studied, the type of section to be examined must

be decided. For a casting, a section cut perpendicular to the surface will show the variations in structure from the outside to the interior of the casting. In hot-worked or cold-worked metals, both transverse and longitudinal sections should be studied. Special investigations may at times require specimens with surfaces prepared parallel to the original surface of the product. In the case of wire and small rounds, a longitudinal section through the center of the specimen proves advantageous when studied in conjunction with the transverse section.

4.3 Cross sections or transverse sections taken perpendicular to the main axis of the material are more suitable for revealing the following information:

4.3.1 Variations in structure from center to surface,

4.3.2 Distribution of nonmetallic impurities across the section,

4.3.3 Decarburization at the surface of a ferrous material (see Test Method E 1077),

4.3.4 Depth of surface imperfections,

4.3.5 Depth of corrosion,

4.3.6 Thickness of protective coatings, and

4.3.7 Structure of protective coating.

4.4 Longitudinal sections taken parallel to the main axis of the material are more suitable for revealing the following information:

4.4.1 Inclusion content of steel (see Practice E 45),

4.4.2 Degree of plastic deformation, as shown by grain distortion,

4.4.3 Presence or absence of banding in the structure (see Practice E 1268), and

4.4.4 The quality attained with any heat treatment.

4.5 The locations of surfaces examined should always be given in reporting results and in any illustrative micrographs. A suitable method of indicating surface locations is shown in Fig. 1.

5. Size of Metallographic Specimens

5.1 The specimens to be polished for metallographic examination are generally not more than about 12 to 25 mm (0.5 to 1.0 in.) square, or approximately 12 to 25 mm in diameter if the material is round. The height of the specimen should be no greater than necessary for convenient handling during polishing.

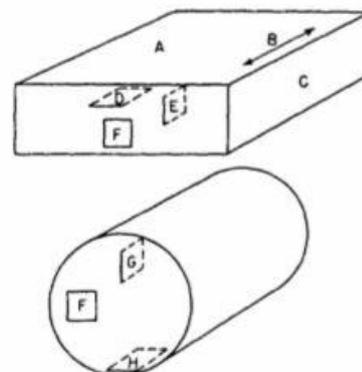
5.2 It is not always possible to secure specimens having the dimensions given in 5.1, when the material to be examined is smaller than the ideal dimensions. For example, in the polishing of wire, strip, and other small articles, it is necessary to mount the specimens because of their size and shape.

5.2.1 Larger samples may be mounted or not, as the available equipment dictates. However, the larger the specimen, the more difficult it is to prepare, especially by manual methods.

5.2.2 Specimens that are too small to be handled readily during polishing should be mounted to ensure a surface satisfactory for microscopical study. There are, based on technique used, three fundamental methods of mounting specimens (see Sections 7-9).

6. Cutting of Metallographic Specimens

6.1 In cutting the metallographic specimen from the main



Symbol in Diagram	Suggested Designation
A	Rolled surface
B	Direction of rolling
C	Rolled edge
D	Longitudinal (or lengthwise) section parallel to rolled surface
E	Longitudinal section perpendicular to rolled surface
F	Transverse section
G	Radial longitudinal section
H	Tangential longitudinal section

FIG. 1 Method of Designating Location of Area Shown in Photomicrograph.

body of the material, care must be exercised to minimize altering the structure of the metal. Three common types of sectioning are as follows:

6.1.1 Sawing, whether by hand or machine with lubrication, is easy and fast, and relatively cool. It can be used on all materials with hardnesses below approximately 35 HRC. It does produce a rough surface containing extensive plastic flow that must be removed in subsequent preparation.

6.1.2 An abrasive cut-off wheel will produce a smooth surface often ready for fine grinding. This method of sectioning is normally faster than sawing. The choice of cut-off wheel, lubricant, cooling conditions, and the grade and hardness of metal being cut will influence the quality of the cut. A poor choice of cutting conditions can easily overheat the specimen, producing an alteration of the microstructure. As a general rule, soft materials are cut with a hard bond wheel and hard materials with a soft bond wheel. Aluminum oxide abrasive wheels are preferred for ferrous metals and silicon carbide wheels are preferred for nonferrous alloys. Abrasive cut-off wheels are essential for sectioning metals with hardnesses above about 35 HRC. Extremely hard metallic materials and ceramics may be more effectively cut using diamond-impregnated cutting wheels. Manufacturer's instructions should be followed as to the choice of wheel and speeds.

6.1.3 Flame cutting completely alters the structure of the metal at the flame cut edge. If flame cutting is necessary to remove the specimen, it should be cut sufficiently large so that it can be recut to the proper size by some other method that will not substantially alter the structure. Exercise care to ensure that

the region of interest is not altered by the heat of the cutting flame.

6.2 Other methods of sectioning are permitted provided they do not alter the microstructure at the plane of polishing. All cutting operations produce some depth of damage, which will have to be removed in subsequent preparation steps.

7. Cleanliness

7.1 Cleanliness (see Appendix X1.) during specimen preparation is essential. All greases and oils on the specimen should be removed by some suitable organic solvent. Failure to clean thoroughly can prevent cold mounting castable resins from adhering to the specimen surface. Ultrasonic cleaning is particularly effective in removing the last traces of residues on a specimen surface.

7.2 Any coating metal that will interfere with the subsequent etching of the base metal should be removed before polishing, if possible. If etching is required, when studying the underlying steel in a galvanized specimen, the zinc coating should be removed before mounting to prevent galvanic effects. The coating can be removed by digestion in cold nitric acid (HNO_3 , sp gr 1.42), in dilute sulfuric acid (H_2SO_4) or in dilute hydrochloric acid (HCl). The HNO_3 method requires care to prevent overheating, since large samples will generate considerable heat. By placing the cleaning container in cold water during the stripping of the zinc, attack on the underlying steel will be minimized.

7.3 Oxidized or corroded surfaces may be cleaned as described in Appendix X1.

8. Mounting of Specimens

8.1 There are many instances where it will be advantageous to mount the specimens prior to grinding and polishing. Mounting of the specimen is usually performed on small, flimsy, or oddly shaped specimens, fractures, or in instances where the specimen edges are to be examined.

8.2 Specimens may be either mechanically mounted, mounted in plastic, or a combination of the two can be used to provide optimum results.

8.3 Mechanical Mounting:

8.3.1 Strip and sheet specimens are frequently mounted by binding or clamping several specimens into a pack held together by two end pieces and two bolts. Clamp mounting generally affords a means of rapid mounting with very good edge retention.

8.3.2 The specimens should be tightly bound together to prevent absorption and subsequent exudation of polishing materials or etchants.

8.3.3 The use of filler sheets of a softer material alternated with the specimen may be used in order to minimize the seepage of polishing materials and etchants. Use of filler material is especially advantageous if the specimens have a high degree of surface irregularities.

8.3.4 Filler material *must* be chosen so as not to react electrolytically with the specimen during etching. Thin pieces of plastic, lead, or copper are typical materials that are used. Copper is especially good for steel specimens since the usual etchants for steels will not attack the copper.

8.3.5 Alternatively, the specimens may be coated with a

layer of phenolic or epoxy resin before being placed in the clamp in order to minimize the absorption of polishing materials or etchants.

8.3.6 The clamp material should be similar in composition to the specimen to avoid galvanic effects that would inhibit etching. The specimen will not etch if the clamp material is more readily attacked by the etchant.

8.3.7 The clamp should preferably be of similar hardness as the specimens to minimize the rounding of the edges of the specimens during grinding and polishing.

8.3.8 Exercise care in clamping the specimen. Excessive clamping pressure may damage soft specimens; however, good sealing is required to prevent absorption of polishing materials or etchants.

8.4 Plastic Mounting:

8.4.1 Specimens may be embedded in plastic to protect them from damage and to provide a uniform format for both manual and automatic preparation. This is the most common method for mounting metallographic specimens. Mounting plastics may be divided into two classes—compression mounting and castable.

8.4.2 When mounting specimens in plastic, exercise care in order to avoid rounding of specimen edges during the grinding operation. There are several methods available that prevent rounding. The specimens may be surrounded by hard shot, small rivets, rings, etc., of approximately the same hardness or, when using casting resin, a slurry of resin and alumina may be poured around the specimen to prevent rounding. The specimens may also be plated before mounting (see Section 9).

8.4.3 *Compression Mounting*—Thermosetting plastics require the use of a mounting press providing heat (up to approximately 160°C) and pressure (up to approximately 30 MPa). *The finished mounts can be ejected hot but the best results are obtained when the finished mount is cooled under pressure.* There are three types of thermosetting compression mounting plastics used predominantly in the metallographic laboratory. Regardless of the resin used to compression mount specimens, the best results are obtained when (1) the specimens are clean and dry, and (2) the cured mount is cooled under full pressure to below 30°C before ejection from the press.

8.4.3.1 Wood-filled bakelite resins cure in 5 to 10 min, are relatively inexpensive, can be obtained in several colors, and are opaque. These resins have a tendency to pull away from the specimen leaving a crevice, which will trap liquids that later can smear, stain, and obscure a portion of the specimen.

8.4.3.2 Diallyl phthalate resins are less likely to shrink and are more resistant to attack by etchants. They are more expensive than the phenolic resins with about the same hardness.

8.4.3.3 Filled dry epoxy resins provide minimal shrinkage. Commercial resins intended for metallography are usually filled with hard material, minimizing edge rounding during preparation. These resins are the most expensive of the three types of thermosetting plastics. Cost can be reduced by first adding a layer of filled epoxy resin and filling up the remainder of the press cavity with phenolic resin.

8.4.3.4 Resins are used in a similar fashion. Because of the

Anexo 5. Extracto de la Norma ASTM E 407 - 07
Standar Practice for Microetching Metals and Alloys



Designation: E407 – 07 (Reapproved 2015)^{e1}

Standard Practice for Microetching Metals and Alloys¹

This standard is issued under the fixed designation E407; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the U.S. Department of Defense.

^{e1} NOTE—Originally approved date was editorially corrected to 1970 in footnote 1 in January 2016.

1. Scope

1.1 This practice covers chemical solutions and procedures to be used in etching metals and alloys for microscopic examination. Safety precautions and miscellaneous information are also included.

1.2 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.* For specific cautionary statements, see 6.1 and Table 2.

2. Referenced Documents

- 2.1 *ASTM Standards:*²
D1193 Specification for Reagent Water
E7 Terminology Relating to Metallography
E2014 Guide on Metallographic Laboratory Safety

3. Terminology

3.1 Definitions:

3.1.1 For definition of terms used in this standard, see Terminology E7.

3.2 Definitions of Terms Specific to This Standard:

3.2.1 *tint etch*—an immersion etchant that produces color contrast, often selective to a particular constituent in the microstructure, due to a thin oxide, sulfide, molybdate, chromate or elemental selenium film on the polished surface that reveals the structure due to variations in light interference effects as a function of the film thickness (also called a "stain etch").

3.2.2 *vapor-deposition interference layer method*—a technique for producing enhanced contrast between microstructural constituents, usually in color, by thin films formed by vacuum deposition of a dielectric compound (such as ZnTe, ZnSe, TiO₂, ZnS or ZnO) with a known index of refraction, generally due to light interference effects (also known as the "Pepperhoff method").

4. Summary of Practice

4.1 Table 1 is an alphabetical listing of the metals (including rare earths) and their alloys for which etching information is available. For each metal and alloy, one or more etchant numbers and their corresponding use is indicated. Alloys are listed as a group or series when one or more etchants are common to the group or series. Specific alloys are listed only when necessary. When more than one etchant number is given for a particular use, they are usually given in order of preference. The numbers of electrolytic etchants are *italicized* to differentiate them from nonelectrolytic etchants.

4.2 Table 2 is a numerical listing of all the etchants referenced in Table 1 and includes the composition and general procedure to be followed for each etchant.

4.3 To use the tables, look up the metal or alloy of interest in Table 1 and note the etchant numbers corresponding to the results desired. The etchant composition and procedure is then located in Table 2 corresponding to the etchant number.

4.4 If the common name of an etchant is known (Marble's, Vilella's, etc.), and it is desired to know the composition, Table 3 contains an alphabetical listing of etchant names, each coded with a number corresponding to the etchant composition given in Table 2.

5. Significance and Use

5.1 This practice lists recommended methods and solutions for the etching of specimens for metallographic examination. Solutions are listed to highlight phases present in most major alloy systems.

6. Safety Precautions

6.1 Before using or mixing any chemicals, all product labels and pertinent Material Safety Data Sheets (MSDS) should be

¹ This practice is under the jurisdiction of ASTM Committee E04 on Metallography and is the direct responsibility of Subcommittee E04.01 on Specimen Preparation.

Current edition approved June 1, 2015. Published September 2015. Originally approved in 1970. Last previous edition approved in 2007 as E407-07^{e1}. DOI: 10.1520/E0407-07R15E01.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

read and understood concerning all of the hazards and safety precautions to be observed. Users should be aware of the type of hazards involved in the use of all chemicals used, including those hazards that are immediate, long-term, visible, invisible, and with or without odors. See Guide E2014 on Metallographic Laboratory Safety for additional information on: Chemical Safety, Electrolytic Polishing/Etching and Laboratory Ventilation/Fume Hoods.

6.1.1 Consult the product labels and MSDSs for recommendations concerning proper protective clothing.

6.1.2 All chemicals are potentially dangerous. All persons using any etchants should be thoroughly familiar with all of the chemicals involved and the proper procedure for handling, mixing, and disposing of each chemical, as well as any combinations of those chemicals. This includes being familiar with the federal, state, and local regulations governing the handling, storage, and disposal of these chemical etchants.

6.2 Some basic suggestions for the handling and disposing of etchants and their ingredients are as follows:

6.2.1 When pouring, mixing, or etching, always use the proper protective equipment, (glasses, gloves, apron, etc.) and it is strongly recommended to always work under a certified and tested fume hood. This is imperative with etchants that give off noxious odors or toxic vapors that may accumulate or become explosive. In particular, note that solutions containing perchloric acid must be used in an exclusive hood equipped with a wash down feature to avoid accumulation of explosive perchlorates. See Guide E2014 on Metallographic Laboratory Safety for additional information on safety precautions for electrolytes containing perchloric acid.

6.2.2 No single type of glove will protect against all possible hazards. Therefore, a glove must be carefully selected and used to ensure that it will provide the needed protection for the specific etchant being used. In some instances it may be necessary to wear more than one pair of gloves to provide proper protection. Information describing the appropriate glove may be obtained by consulting the MSDS for the chemical being used. If that does not provide enough detailed information, contact the chemical manufacturer directly. Additionally, one can contact the glove manufacturer or, if available, consult the manufacturer's glove chart. If the chemical is not listed or if chemical mixtures are being used, contact the glove manufacturer for a recommendation.

6.2.3 Use proper devices (glass or plastic) for weighing, mixing, containing, and storage of solutions. A number of etchants generate fumes or vapors and should only be stored in properly vented containers. Storage of fuming etchants in sealed or non-vented containers may create an explosion hazard.

6.2.4 When mixing etchants, always add reagents to the solvent unless specific instructions indicate otherwise.

6.2.5 When etching, always avoid direct physical contact with the etchant and specimen; use devices such as tongs to hold the specimen (and tufts of cotton, if used).

6.2.6 Methanol is a cumulative poison hazard. Where ethanol or methanol, or both are listed as alternates, ethanol is the preferred solvent. Methanol should be used in a properly designed chemical fume hood.

6.2.7 When working with HF always be sure to wear the appropriate gloves, eye protection and apron. Buying HF at the lowest useable concentration will significantly reduce risk. Additionally, it is recommended that a calcium gluconate cream or other appropriate HF neutralizing agent be available for use if direct skin contact of the etchant occurs.

6.2.8 The EPA states that human studies have clearly established that inhaled chromium (VI) is a human carcinogen, resulting in an increased risk of lung cancer. Animal studies have shown chromium (VI) to cause lung tumors via inhalation exposure. Therefore, when working with Cr(VI) compounds such as $K_2Cr_2O_7$ and CrO_3 always use a certified and tested fume hood. Additional information can be obtained at the EPA website³.

6.2.9 For safety in transportation, picric acid is distributed by the manufacturer wet with greater than 30% water. Care must be taken to keep it moist because dry picric acid is shock sensitive and highly explosive especially when it is combined with metals such as copper, lead, zinc, and iron. It will also react with alkaline materials including plaster and concrete to form explosive compounds. It should be purchased in small quantities suitable for use in six to twelve months and checked periodically for lack of hydration. Distilled water may be added to maintain hydration. It must only be stored in plastic or glass bottles with nonmetallic lids. If dried particles are noted on or near the lid, submerge the bottle in water to re-hydrate them before opening. It is recommended that any bottle of picric acid that appears dry or is of unknown vintage not be opened and that proper emergency personnel be notified.

6.2.10 Wipe up or flush any and all spills, no matter how minute in nature.

6.2.11 Properly dispose of all solutions that are not identified by composition and concentration.

6.2.12 Store, handle and dispose of chemicals according to the manufacturer's recommendations. Observe printed cautions on reagent bottles.

6.2.13 Information pertaining to the toxicity, hazards, and working precautions of the chemicals, solvents, acids, bases, etc. being used (such as material safety data sheets, MSDS) should be available for rapid consultation. A selection of useful books on this subject is given in Refs. (1-11)⁴.

6.2.14 Facilities which routinely use chemical etchants should have an employee safety training program to insure the employees have the knowledge to properly handle chemical etchants.

6.2.15 When working with etchants always know where the nearest safety shower, eye-wash station, and emergency telephone are located.

7. Miscellaneous Information

7.1 If you know the trade name of an alloy and need to know the composition to facilitate the use of Table 1, refer to a compilation such as Ref (12).

7.2 Reagent grade chemicals shall be used for all etchants. Unless otherwise indicated, it is intended that all reagents

³ <http://www.epa.gov/ttn/atw/hlthe/6chromium.html>

⁴ The boldface numbers in parentheses refer to the list of references at the end of this standard.

conform to specifications of the Committee on Analytical Reagents of the American Chemical Society where such specifications are available. Other grades, such as United States Pharmacopeia (USP), may be used, provided it is first ascertained that the reagent is of sufficiently high purity to permit its use without detrimental effect.

7.2.1 Unless otherwise indicated, references to water shall be understood to mean reagent water as defined by Type IV of specification D1193. Experience has shown that the quality of tap water varies significantly and can adversely affect some etchants.

7.3 Methanol is usually available only as absolute methanol. When using this alcohol it is imperative that approximately 5 volume % of water is added whenever an etchant composition calls for 95 % methanol. Some of these etchants will not work at all if water is not present.

7.4 For conversion of small liquid measurements, there are approximately 20 drops/mL.

7.5 Etching should be carried out on a freshly polished specimen.

7.6 Gentle agitation of the specimen or solution during immersion etching will result in a more uniform etch.

7.7 The etching times given are only suggested starting ranges and not absolute limits.

7.8 In electrolytic etching, d-c current is implied unless indicated otherwise.

7.9 A good economical source of d-c current for small scale electrolytic etching is the standard 6-V lantern battery.

7.10 In electrolytic etching, the specimen is the anode unless indicated otherwise.

7.11 Do not overlook the possibility of multiple etching with more than one solution in order to fully develop the structure of the specimen.

7.12 Microscope objectives can be ruined by exposure to hydrofluoric acid fumes from etchant residue inadvertently left on the specimen. This problem is very common when the specimen or mounting media contain porosity and when the mounting material (such as Bakelite) does not bond tightly to the specimen resulting in seepage along the edges of the specimen. In all cases, extreme care should be taken to remove all traces of the etchant by thorough washing and complete drying of the specimen before placing it on the microscope stage.

7.13 Tint etchants (13, 14-16) are always used by immersion, never by swabbing, as this would inhibit film formation. An extremely high quality polish is required as tint etchants will reveal remaining polishing damage even if it is not visible with bright field illumination. After polishing, the surface must be carefully cleaned. Use a polyethylene beaker to contain the etchant if it contains fluorine ions (for example, etchants containing ammonium bifluoride, NH_4FHF). The specimen is placed in the solution using tongs, polished face up. Gently agitate the solution while observing the polished surface. After coloration begins, allow the solution to settle and remain motionless. Remove the specimen from the etchant when the surface is colored violet, rinse and dry. A light pre-etch with a general-purpose chemical etchant may lead to sharper delineation of the structure after tint etching.

7.14 Specimens should be carefully cleaned before use of a vapor-deposition interference film ("Pepperhoff") method (13, 14-17). A light pre-etch, or a slight amount of polishing relief, may lead to sharper delineation of the constituents after vapor deposition. The deposition is conducted inside a vacuum evaporator of the type used to prepare replicas for electron microscopy. One or several small lumps of a suitable dielectric compound with the desired index of refraction is heated under a vacuum until it evaporates. A vacuum level of 1.3 to 0.013 Pa (10^{-3} to 10^{-5} mm Hg) is adequate and the polished surface should be about 10–15 cm beneath the device that holds the dielectric compound. Slowly evaporate the lumps and observe the surface of the specimen. It may be helpful to place the specimen on a small piece of white paper. As the film thickness increases, the surface (and the paper) will become colored with the color sequence changing in the order yellow, green, red, purple, violet, blue, silvery blue. Stop the evaporation when the color is purple to violet, although in some cases, thinner films with green or red colors have produced good results.

7.15 Metals Handbook (18) provides additional advice on etching solutions and techniques for various alloys.

8. Precision and Bias

8.1 It is not possible to specify the precision or bias of this practice since quantitative measurements are not made.

9. Keywords

9.1 etch; etchant; interference method; metallography; metals; microetch; microscope; microstructure; Pepperhoff method; tint etch



E407 – 07 (2015)^{e1}

TABLE 1 Etchants for Metals

NOTE 1—It is strongly recommended to always mix and use etchants under a certified and tested fume hood.

NOTE 2—Electrolytic etchants are *italicized*.

Metal	Etchants	Uses
<i>Aluminum Base:</i>		
Pure Al	1a, 2, 3 4, 5 1b	general structure grain structure under polarized light grain boundaries and slip lines
1000 series	1a, 3, 2 4, 5 6, 7	general structure grain structure under polarized light phase identifications
2000 series	3, 2, 1a 8a, 6, 7	general structure phase identifications
3000 series	3, 1a 4, 5 8a, 6, 7	general structure grain structure under polarized light phase identifications
4000 series	3, 1a	general structure
5000 series	3, 1a, 2, 6, 8a 4, 5	general structure grain structure under polarized light
6000 series	3, 1a, 2, 6, 8a, 222 4, 5 1a, 2, 7, 6, 8a	general structure grain structure under polarized light phase identifications
7000 series	3, 1a, 2 4, 5 3b, 6	general structure grain structure under polarized light phase identifications
<i>Beryllium Base:</i>		
Pure Be Be alloys	9, 10 11	general structure via polarized light general structure
<i>Chromium Base:</i>	12, 13c	general structure
<i>Cobalt Base:</i>		
Pure Co Hard-facing and tool metals High-temperature alloys	14, 15, 16, 17 18, 19, 20 20, 18, 16, 21, 22b, 24, 25 19	general structure general structure general structure phase identification
<i>Columbium Base (see niobium base)</i>		
<i>Copper Base:</i>		
Pure Cu	26, 27, 28, 29, 30, 31d, 32, 33, 34b, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 8b, 210, 215 43, 28	general structure chemical polish and etch
Cu-Al (aluminum bronze)	44, 31d, 34b, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 45, 215	general structure
Cu-Be	46, 41, 45	general structure
Cu-Cr	41	general structure
Cu-Mn	41	general structure
Cu-Ni	34, 47, 48, 40, 49, 50	general structure
Cu-Si	41	general structure
Cu-Sn (tin bronze)	51, 52	general structure
Admiralty metal Gilding metal Cartridge brass Free-cutting brass Nickel silver	8b 31d, 32, 33, 41, 42, 49	general structure
Cu alloys	26, 27, 28, 29, 30, 44, 41, 31d, 32, 33, 34b, 35, 36, 37, 38, 39, 210, 215 53, 43, 28, 49 42, 49, 210 54	general structure chemical polish and etch darkens beta in alpha-beta brass etching of cold worked brass
<i>Dysprosium Base:</i>	55, 56	general structure

Fuente: Norma ASTM E 407 - 07 Standar Practice for Microetching Metals and Alloys.
(Pág. 1 - 4)

Anexo 6. Informe del ensayo de dureza por CORPSAE.

http://192.168.1.173:3000/Miembros/Logistico/Tratamiento/Forma...



INFORME
PED2018005265

ENSAYO DE DUREZA - LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD

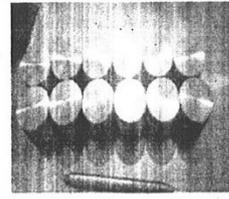
Solicitado por: NEYRA PEÑA DUMAS
Dirección: JR MANCHEGO MUÑOZ 445
Fecha de Emisión: 26 de Noviembre de 2018

Condiciones de la Pieza Tratada Térmicamente

Tipo de Acero: SAE 1045
Tratamiento Térmico: Temple 840-900°
Condiciones de Ensayo

Descripción:
12 PIEZAS

Ensayo de Dureza



Equipo: PETRI
Modelo: PETRI F-26
Tipo de Ensayo: DUREZA ROCKWELL C.
Norma de Referencia: ASTM E18-15
Fecha de Ejecución: 13 de Noviembre de 2018
Temperatura de Trabajo: Condiciones Normales

MUESTREO NTP - ISO 2859-1
Cantidad Piezas: 12
Muestreo: 12

Resultados de Ensayo de Dureza

Muestra	Mediciones (HRC)																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
PROBETA CON SUBCERO AL AGUA	56	54	54.5	55	56	56														
PROBETA SIN SUBCERO AL ACEITE	32	35	45	31	33	40														
PROBETA AL AGUA Y SAL	39	41	51	31	44	48														
PROBETA CON SUBCERO AL ACEITE	40	35	47	39	41	49														
PROBETA CON SUBCERO AL AGUA Y SAL	53	52	54.5	44	47	55														
PROBETA SIN SUBCERO AL AGUA	34	43	55	26	28	42														

Obs.Muestra:

Observación:

Se expide el presente documento para los fines que crea conveniente

Atentamente
Area de Trabajo: Laboratorio de Control de Calidad

Corporacion Sudamericana de Aceros
Especialties S.A.C.
[Signature]
Jefe de Área de Tratamiento Térmico



INFORME
PED2018004246

ENSAYO DE DUREZA - LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD

Solicitado por: NEYRA PEÑA DUMAS
Dirección: JR MANCHEGO MUÑOZ 445
Fecha de Emisión: 30 de Octubre de 2018

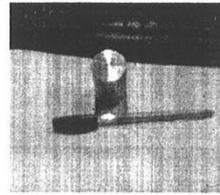
Condiciones de la Pieza Tratada Térmicamente

Tipo de Acero: C 45
Tratamiento Térmico: Temple 840-900°
Condiciones de Ensayo

Equipo: PETRI
Modelo: PETRI F-26
Tipo de Ensayo: DUREZA ROCKWELL C.
Norma de Referencia: ASTM E18-15
Fecha de Ejecución: 25 de Octubre de 2018
Temperatura de Trabajo: Condiciones Normales

Ensayo de Dureza

Descripción:
06 PIEZAS



MUESTREO NTP - ISO 2859-1
Cantidad Piezas: 6
Muestreo: 6

Resultados de Ensayo de Dureza

Muestra	Mediciones (HRC)																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
ACEITE CON SUBCERO	32	38	44																	
ACEITE SIN SUBCERO	35	35	43																	
SALMUERA CON SUBCERO	50	52	53																	
SALMUERA SIN SUBCERO	24	30	45																	
AGUA CON SUBCERO	55	54	53																	
AGUA SIN SUBCERO	23	35	46																	

Obs.Muestra:

Observación:

Se expide el presente documento para los fines que crea conveniente

Atentamente
Area de Trabajo: Laboratorio de Control de Calidad

Corporacion Sudamericana de Aceros
Especiales S.A.C.
[Firma]
Ing. Teófilo Ortiz Salvebra
Jefe de Planta de Tratamientos Térmicos

Anexo 7. Distribución F de Fisher para $\alpha = 0.01$

Distribución F 0.01

En las columnas se encuentran los valores F que corresponden al área 0.05 a la derecha
 En las columnas se encuentran los grados de libertad del numerador
 En los renglones se encuentran los grados de libertad del denominador.



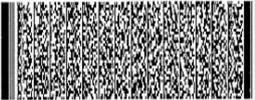
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	15	20	24	30	40	60	120
1	4052	4999	5403	5625	5764	5859	5928	5981	6022	6056	6083	6106	6157	6209	6235	6261	6287	6313	6339
2	98.50	99.00	99.17	99.25	99.30	99.33	99.36	99.37	99.39	99.40	99.41	99.42	99.43	99.45	99.46	99.47	99.47	99.48	99.49
3	34.12	30.82	29.46	28.71	28.24	27.91	27.67	27.49	27.35	27.23	27.13	27.05	26.87	26.69	26.60	26.50	26.41	26.32	26.22
4	21.20	18.00	16.69	15.98	15.52	15.21	14.98	14.80	14.66	14.55	14.45	14.37	14.20	14.02	13.93	13.84	13.75	13.65	13.56
5	16.26	13.27	12.06	11.39	10.97	10.67	10.46	10.29	10.16	10.05	9.96	9.89	9.72	9.55	9.47	9.38	9.29	9.20	9.11
6	13.75	10.92	9.78	9.15	8.75	8.47	8.26	8.10	7.98	7.87	7.79	7.72	7.56	7.40	7.31	7.23	7.14	7.06	6.97
7	12.25	9.55	8.45	7.85	7.46	7.19	6.99	6.84	6.72	6.62	6.54	6.47	6.31	6.16	6.07	5.99	5.91	5.82	5.74
8	11.26	8.65	7.59	7.01	6.63	6.37	6.18	6.03	5.91	5.81	5.73	5.67	5.52	5.36	5.28	5.20	5.12	5.03	4.95
9	10.56	8.02	6.99	6.42	6.06	5.80	5.61	5.47	5.35	5.26	5.18	5.11	4.96	4.81	4.73	4.65	4.57	4.48	4.40
10	10.04	7.56	6.55	5.99	5.64	5.39	5.20	5.06	4.94	4.85	4.77	4.71	4.56	4.41	4.33	4.25	4.17	4.08	4.00
11	9.65	7.21	6.22	5.67	5.32	5.07	4.89	4.74	4.63	4.54	4.46	4.40	4.25	4.10	4.02	3.94	3.86	3.78	3.69
12	9.33	6.93	5.95	5.41	5.06	4.82	4.64	4.50	4.39	4.30	4.22	4.16	4.01	3.86	3.78	3.70	3.62	3.54	3.45
13	9.07	6.70	5.74	5.21	4.86	4.62	4.44	4.30	4.19	4.10	4.02	3.96	3.82	3.66	3.59	3.51	3.43	3.34	3.25
14	8.86	6.51	5.56	5.04	4.69	4.46	4.28	4.14	4.03	3.94	3.86	3.80	3.66	3.51	3.43	3.35	3.27	3.18	3.09
15	8.68	6.36	5.42	4.89	4.56	4.32	4.14	4.00	3.89	3.80	3.73	3.67	3.52	3.37	3.29	3.21	3.13	3.05	2.96
16	8.53	6.23	5.29	4.77	4.44	4.20	4.03	3.89	3.78	3.69	3.62	3.55	3.41	3.26	3.18	3.10	3.02	2.93	2.84
17	8.40	6.11	5.18	4.67	4.34	4.10	3.93	3.79	3.68	3.59	3.52	3.46	3.31	3.16	3.08	3.00	2.92	2.83	2.75
18	8.29	6.01	5.09	4.58	4.25	4.01	3.84	3.71	3.60	3.51	3.43	3.37	3.23	3.08	3.00	2.92	2.84	2.75	2.66
19	8.18	5.93	5.01	4.50	4.17	3.94	3.77	3.63	3.52	3.43	3.36	3.30	3.15	3.00	2.92	2.84	2.76	2.67	2.58
20	8.10	5.85	4.94	4.43	4.10	3.87	3.70	3.56	3.46	3.37	3.29	3.23	3.09	2.94	2.86	2.78	2.69	2.61	2.52
21	8.02	5.78	4.87	4.37	4.04	3.81	3.64	3.51	3.40	3.31	3.24	3.17	3.03	2.88	2.80	2.72	2.64	2.55	2.46
22	7.95	5.72	4.82	4.31	3.99	3.76	3.59	3.45	3.35	3.26	3.18	3.12	2.98	2.83	2.75	2.67	2.58	2.50	2.40
23	7.88	5.66	4.76	4.26	3.94	3.71	3.54	3.41	3.30	3.21	3.14	3.07	2.93	2.78	2.70	2.62	2.54	2.45	2.35
24	7.82	5.61	4.72	4.22	3.90	3.67	3.50	3.36	3.26	3.17	3.09	3.03	2.89	2.74	2.66	2.58	2.49	2.40	2.31
25	7.77	5.57	4.68	4.18	3.85	3.63	3.46	3.32	3.22	3.13	3.06	2.99	2.85	2.70	2.62	2.54	2.45	2.36	2.27
26	7.72	5.53	4.64	4.14	3.82	3.59	3.42	3.29	3.18	3.09	3.02	2.96	2.81	2.66	2.58	2.50	2.42	2.33	2.23
27	7.68	5.49	4.60	4.11	3.78	3.56	3.39	3.26	3.15	3.06	2.99	2.93	2.78	2.63	2.55	2.47	2.38	2.29	2.20
28	7.64	5.45	4.57	4.07	3.75	3.53	3.36	3.23	3.12	3.03	2.96	2.90	2.75	2.60	2.52	2.44	2.35	2.26	2.17
29	7.60	5.42	4.54	4.04	3.73	3.50	3.33	3.20	3.09	3.00	2.93	2.87	2.73	2.57	2.49	2.41	2.33	2.23	2.14
30	7.56	5.39	4.51	4.02	3.70	3.47	3.30	3.17	3.07	2.98	2.91	2.84	2.70	2.55	2.47	2.39	2.30	2.21	2.11
40	7.31	5.18	4.31	3.83	3.51	3.29	3.12	2.99	2.89	2.80	2.73	2.66	2.52	2.37	2.29	2.20	2.11	2.02	1.92
60	7.08	4.98	4.13	3.65	3.34	3.12	2.95	2.82	2.72	2.63	2.56	2.50	2.35	2.20	2.12	2.03	1.94	1.84	1.73
120	6.85	4.79	3.95	3.48	3.17	2.96	2.79	2.66	2.56	2.47	2.40	2.34	2.19	2.03	1.95	1.86	1.76	1.66	1.53

Para calcular el valor F en excel, se utiliza la función de la distribución F inversa

=distr.f.inv(0.01; gl num; gl den)

© Ing. Jesús Alberto Mellado Bosque

Anexo 8.

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA UNI Oficina Central de Economía y Finanzas UNIDAD DE TESORERÍA DOMICILIO FISCAL: Av. Túpac Amaru N° 210 - Rimac - Lima - Lima TELF: 482-5072			R.U.C.: 20169004359 FACTURA ELECTRÓNICA N° F004 - 00024439												
	RAZON SOCIAL : DISTRIBUCION TRANSPORTE Y ALMACENAJE SALVATIERRA SOCIEDAD ANONIMA CERRADA - DISTRALSA S.A.C. R.U.C. : 20392591177 DIRECCIÓN : MZA. I LOTE. 14 Z.I. LOS HUERTOS DE HUACHIPA LIMA - LIMA - LURIGANCHO DEPENDENCIA : FIM LABORATORIO DE PROCESOS Y ENSAYOS MECANICOS Y METROLOGICOS. PROYECTO : SS. LABORATORIO DE PROCESOS MANUFACTURADOS, ENSAYOS MECANICOS Y METROLOGI			FECHA EMISIÓN : 2018-11-23 TIPO MONEDA : SOLES COND. PAGO : CONTADO FECHA VENC. : MEDIO PAGO : Efectivo												
ITEM	CANT.	PARTIDA	DESCRIPCIÓN	UNIDA MEDIDA	PRECIO UNITARIO	VALOR UNITARIO	VALOR DE VENTA									
1	1.00	13392302	ANALISIS LABORATORIO - FACULTAD	UNI	1.168.20	990.00	990.00									
OP. GRAVADAS		OP. INAFECTAS		OP. EXONERADAS		ANTICIPOS		I.G.V. 18%		TOTAL A PAGAR						
990.00		0.00		0.00		0.00		178.20		1,168.20						
SON: UN MIL CIENTO SESENTA Y OCHO CON 20/100 SOLES Incorporado al Régimen de Agentes de Retención de IGV (R.S.135-2002) a partir del 01/11/2002 NOTA: EN CASO SI NO PAGA LA DECTRACION EN 7 DIAS, SE PROCEDE A LA ANULACION																
		<table border="1"> <tr> <th>Cuenta de Detracción</th> <th>Porcentaje de Detracción (10.00%)</th> </tr> <tr> <td>Banco de la Nación</td> <td>0000513431</td> <td>140.20</td> </tr> </table>		Cuenta de Detracción	Porcentaje de Detracción (10.00%)	Banco de la Nación	0000513431	140.20			Representación impresa de la Factura Electrónica Podrá ser consultado en http://www.ocef.uni.edu.pe/webComprobantes Autorizado mediante Resolución de Intendencia N° 0320050000852/SUNAT					
Cuenta de Detracción	Porcentaje de Detracción (10.00%)															
Banco de la Nación	0000513431	140.20														
<table border="1"> <tr> <th colspan="2">INFORMACION ADICIONAL</th> </tr> <tr> <td colspan="2">ANALISIS METALOGRAFICO</td> </tr> </table>				INFORMACION ADICIONAL		ANALISIS METALOGRAFICO										
INFORMACION ADICIONAL																
ANALISIS METALOGRAFICO																
ELABORADO POR: Iflores																

Aceros : (01)719-8986 Minas : (01)719-8990 / 982562758
Tratamiento : (01)719-8986 / 938588750 Plásticos : 936113584
Zona Norte y Centro : (01)719-8991 Códigos : (01)719-8985
Zona Sur : (054)810000 Distribución : (054)719-8987 / 986319733
Central Telefónica : (01) 719-8989

RUC N° 20603426780
BOLETA DE VENTA
ELECTRÓNICA
B002-0000011

Oficina Principal: Av. Oscar R. Benavides N°1244 - Cercado de Lima - Lima
Sucursal Arequipa: Jr. Lambayeque N° 105 - Mariano Melgar - Arequipa
Planta de Tratamiento Térmico: Av. Oscar R. Benavides N°1244 - Cercado de Lima - Lima
Planta de Centro Mecanizado: Av. Oscar R. Benavides N°1244 - Cercado de Lima - Lima

SEÑOR(ES) : NEYRA PEÑA DUMAS		COD. CLIENTE : 72807861		TIC : 3.3370	
DIRECCIÓN : -					
R.U.C : 72807861					
VENDEDOR : Milagros Navidad	EMITIDO POR : 2018004163	ORDEN DE COMPRA : -	FECHA DE EMISIÓN : 24/10/2018	TIPO DE MONEDA : USD	TIPO DE ENTREGA : Recoge
NÚMERO PEDIDO : 2018004163		GUIA REMISIÓN :		CONDICIÓN DE PAGO : CONTADO	

ITEM	CÓDIGO DE ARTICULO	DESCRIPCIÓN	UND	PIEZAS	KGS	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	VALOR UNITARIO	TOTAL
1	146404500A	C45 RED 45.0 mm x 0.150 mts	KGM	2	3.879	3.879	1.77	1.50	5.82

SON. SEIS CON 87/100 DOLARES AMERICANOS

Observación :	OP.GRATUITA : \$ 0.00 OP.EXONERADA : \$ 0.00 OP.INAFECTA : \$ 0.00 OP.GRAVADA : \$ 5.82 TOT.DSCTO : \$ 0.00 CARGOS : \$ 0.00 I.G.V : \$ 1.05 I.S.C : \$ 0.00 OTROS TRIB. : \$ 0.00 TOTAL ANTICIPOS : \$ 0 IMPORTE TOTAL : \$ 6.87
---------------	---

Condición de Servicio : Representación impresa de la Boleta Electrónica, consulte en <https://sfe.biz.links.com.pe>

Autorizado a ser emisor electrónico mediante R.I. SUNAT N°0340050004781

Nota importante

Depósito a Cuenta Corriente BCP / Dólares: 191-2504550-1-94 /
Soles: 191-2478630-0-65. Las cancelaciones pueden ser efectuadas directamente en caja o emitiendo un cheque a nombre de
CORPORACIÓN SUDAMERICANA DE ACEROS ESPECIALES S.A.



IETLJ/VQYNxvTKMsQafGqFddPIU=

CORPORACIÓN SUDAMERICANA DE ACEROS ESPECIALES S.A.C.
"CORPSAC"

24 OCT 2018

CANCELADO

CORPORACIÓN SUDAMERICANA DE ACEROS ESPECIALES S.A.C.
"CORPSAC"

24 OCT 2018

ENTREGADO



Aceros : (01) 719-8988 Minas : (01) 719-8990 / 982562758
 Tratamiento : (01) 719-8986 / 936588750 Plásticos : 936113564
 Zona Norte y Centro : (01) 719-8991 Créditos : (01) 719-8985
 Zona Sur : (054) 810000 Distribución : (054) 719-8987 / 998319733
 Central Telefónica : (01) 719-8989

RUC N° 20603426780
BOLETA DE VENTA
ELECTRÓNICA
B002-0000043

Oficina Principal: Av. Oscar R. Benavides N°1244 - Cercado de Lima - Lima
 Sucursal Arequipa: Jr. Lambayeque N° 105 - Mariano Melgar - Arequipa
 Planta de Tratamiento Térmico: Av. Oscar R. Benavides N°1244 - Cercado de Lima - Lima
 Planta de Centro Mecanizado: Av. Oscar R. Benavides N°1244 - Cercado de Lima - Lima

SEÑOR(ES) : NEYRA PEÑA DUMAS	COD. CLIENTE : 72807861	T/C : 3.3780
DIRECCIÓN : -		
R.U.C : 72807861		
VENDEDOR : Milagros Navidad	EMITIDO POR : RTEJADA	ORDEN DE COMPRA : -
		FECHA DE EMISIÓN : 22/11/2018
		TIPO DE MONEDA : PEN
		TIPO DE ENTREGA : Recoge
NÚMERO PEDIDO : 2018005265	GUIA REMISIÓN :	CONDICIÓN DE PAGO : CONTADO

ITEM	CÓDIGO DE ARTICULO	DESCRIPCIÓN	UND	PIEZAS	KGS	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	VALOR UNITARIO	TOTAL
1	TT020020	Temple 840-900° Más de 3-70 Kg.	KGM	12	4.700	4.700	12.86	10.90	51.22
2	TT110010	Tratamiento Criogenico	KGM	12	4.700	4.700	5.90	5.00	23.50

SON: OCHENTA Y OCHO CON 17/100 SOLES

Observación :	OP.GRATUITA : S/ 0.00
	OP.EXONERADA : S/ 0.00
	OP.INAFECTA : S/ 0.00
	OP.GRAVADA : S/ 74.72
	TOT.DSCTO : S/ 0.00
	CARGOS : S/ 0.00
	I.G.V : S/ 13.45
	I.S.C : S/ 0.00
	OTROS TRIB. : S/ 0.00
	TOTAL ANTICIPOS : S/ 0
	IMPORTE TOTAL : S/ 88.17

Condición de Servicio : *Representación impresa de la Boleta Electrónica, consulte en <https://sfe.bizlinks.com.pe>*
 Autorizado a ser emisor electrónico mediante R.I. SUNAT N°0340050004781

Nota Importante :
 Depósito a Cuenta Corriente BCP / Dólares: 191-2504550-1-94 / Soles: 191-2478630-0-65. Las cancelaciones pueden ser efectuadas directamente en caja o emitiendo un cheque a nombre de "CORPORACION SUDAMERICANA DE ACEROS ESPECIALES S.A."

Y6oHYJfL3acTyVPx701/UHCLDf8=



ENTREGADO
 29 NOV 2018

CANCELADO
 22 NOV 2018

CORPORACION SUDAMERICANA DE ACEROS ESPECIALES S.A.C.



CORPSAE

Aceros : (01)719-8988 Minas : (01)719-8990 / 982582758
 Tratamiento : (01)719-8986 / 936588750 Plásticos : 936113264
 Zona Norte y Centro : (01)719-8991 Créditos : (01)719-8985
 Zona Sur : (054)610000 Distribución : (054)719-8987 / 998319733

Central Telefónica : (01) 719-8989

RUC N° 20603426780
BOLETA DE VENTA
ELECTRÓNICA
B002-00000029

Oficina Principal: Av. Oscar R. Benavides N°1244 - Cercado de Lima - Lima
 Sucursal Arequipa: Jr. Lambayeque N° 105 - Mariano Melgar - Arequipa
 Planta de Tratamiento Térmico: Av. Oscar R. Benavides N°1244 - Cercado de Lima - Lima
 Planta de Centro Mecanizado: Av. Oscar R. Benavides N°1244 - Cercado de Lima - Lima

SEÑOR(ES) : NEYRA PEÑA DUMAS		COD. CLIENTE : 72807861		TIC : 3.3720	
DIRECCIÓN : -					
R.U.C : 72807861					
VENDEDOR : Milagros Navidad	EMITIDO POR : 2018005129	ORDEN DE COMPRA : -	FECHA DE EMISIÓN : 12/11/2018	TIPO DE MONEDA : USD	TIPO DE ENTREGA : Recoge
NÚMERO PEDIDO : 2018005129		GUIA REMISIÓN :		CONDICIÓN DE PAGO : CONTADO	

ITEM	CÓDIGO DE ARTÍCULO	DESCRIPCIÓN	UND	PIEZAS	KGS	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	VALOR UNITARIO	TOTAL
1	130405000A	SAE 1045 CALIBRADO RED. 50.00 mm x 0.700 mts	KGM	1	11.176	11.176	2.22	1.88	23.25

SON: VEINTISIETE CON 44/100 DOLARES AMERICANOS

Observación :	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>OP. GRATUITA</td><td style="text-align: right;">\$</td><td style="text-align: right;">0.00</td></tr> <tr><td>OP. EXONERADA</td><td style="text-align: right;">\$</td><td style="text-align: right;">0.00</td></tr> <tr><td>OP. INAFECTA</td><td style="text-align: right;">\$</td><td style="text-align: right;">0.00</td></tr> <tr><td>OP. GRAVADA</td><td style="text-align: right;">\$</td><td style="text-align: right;">23.25</td></tr> <tr><td>TOT. DSCTO</td><td style="text-align: right;">\$</td><td style="text-align: right;">0.00</td></tr> <tr><td>CARGOS</td><td style="text-align: right;">\$</td><td style="text-align: right;">0.00</td></tr> <tr><td>I.G.V</td><td style="text-align: right;">\$</td><td style="text-align: right;">4.19</td></tr> <tr><td>I.S.C</td><td style="text-align: right;">\$</td><td style="text-align: right;">0.00</td></tr> <tr><td>OTROS TRIB.</td><td style="text-align: right;">\$</td><td style="text-align: right;">0.00</td></tr> <tr><td>TOTAL ANTICIPOS</td><td style="text-align: right;">\$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>IMPORTE TOTAL</td><td style="text-align: right;">\$</td><td style="text-align: right;">27.44</td></tr> </table>	OP. GRATUITA	\$	0.00	OP. EXONERADA	\$	0.00	OP. INAFECTA	\$	0.00	OP. GRAVADA	\$	23.25	TOT. DSCTO	\$	0.00	CARGOS	\$	0.00	I.G.V	\$	4.19	I.S.C	\$	0.00	OTROS TRIB.	\$	0.00	TOTAL ANTICIPOS	\$	0	IMPORTE TOTAL	\$	27.44
OP. GRATUITA	\$	0.00																																
OP. EXONERADA	\$	0.00																																
OP. INAFECTA	\$	0.00																																
OP. GRAVADA	\$	23.25																																
TOT. DSCTO	\$	0.00																																
CARGOS	\$	0.00																																
I.G.V	\$	4.19																																
I.S.C	\$	0.00																																
OTROS TRIB.	\$	0.00																																
TOTAL ANTICIPOS	\$	0																																
IMPORTE TOTAL	\$	27.44																																

Condición de Servicio: Representación impresa de la Boleta Electrónica, consulte en <https://sfe.bizlinks.com.pe>

Autorizado a ser emisor electrónico mediante R.I. SUNAT N°0340050004781



Nota Importante :
 Depósito a Cuenta Corriente BCP / Dólares: 191-2504550-1-94 /
 Soles: 191-2478830-0-85. Las cancelaciones pueden ser efectuadas
 directamente en caja o emitiendo un cheque a nombre de
 CORPORACIÓN SUDAMERICANA DE ACEROS ESPECIALES S.A.

V1K8hidK+nCgKmsjxZ3q/nkvNY=

CORPORACIÓN SUDAMERICANA DE ACEROS ESPECIALES S.A.C.
"CORPSAE"

12 NOV 2018

ENTREGADO

CORPORACIÓN SUDAMERICANA DE ACEROS ESPECIALES S.A.C.
"CORPSAE"

12 NOV 2018

CANCELADO



Sucursal: Lima
 E-mail: info@corpasa.com.pe
 Zona Norte y Centro: 011-7863100
 Zona Sur: 054-884100
 Correo Electrónico: info@corpasa.com.pe

RUC N° 20603426780
BOLETA
ELECTRÓNICA
B002 - 00000019

SEÑOR(ES): NEYRA PEÑA DUMAS COD. CLIENTE: 72807861 T/C: 3.3520
 DIRECCIÓN: JR MANCHEGO MUÑOZ 445-JUNÍN
 RUC: 72807861

VENDEDOR : Mangros Navidad	EMITIDO POR :	ORDEN DE COMPRA : -	FECHA DE EMISIÓN: 30/10/2018	TIPO MONEDA: PEN - Sol	TIPO DE ENTREGA : Recoge
NÚMERO PEDIDO : 201800246	GUIA REMISIÓN:		CONDICIÓN DE PAGO : CONTADO		

ITEM	CÓDIGO DE ARTÍCULO	DESCRIPCIÓN	UND	PIEZAS	KGS	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	VALOR UNITARIO	TOTAL
1	TT020010	Temple 840-900* Hasta 3 Kg	KGM	6	1.000	1.00	23.48	27.71	23.48
2	TT110010	Tratamiento Criogenico	KGM	6	3.000	3.00	5.00	5.90	15.00

RON: CUARENTA Y CINCO CON 41/100 SOLES

CANCELADO	<table style="width: 100%;"> <tr><td>OP. GRATUITA</td><td>PEN</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>OP. EXONERADA</td><td>PEN</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>OP. INAFECTA</td><td>PEN</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>OP. GRAVADA</td><td>PEN</td><td>38.48</td></tr> <tr><td>TOTAL DSCTO</td><td>PEN</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>CARGOS</td><td>PEN</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>I.G.V</td><td>PEN</td><td>6.93</td></tr> <tr><td>I.S.C.</td><td>PEN</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>OTROS TRIB.</td><td>PEN</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>TOTAL ANTICIPOS</td><td>PEN</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>IMPORTE TOTAL</td><td>PEN</td><td>45.41</td></tr> </table>	OP. GRATUITA	PEN	0.00	OP. EXONERADA	PEN	0.00	OP. INAFECTA	PEN	0.00	OP. GRAVADA	PEN	38.48	TOTAL DSCTO	PEN	0.00	CARGOS	PEN	0.00	I.G.V	PEN	6.93	I.S.C.	PEN	0.00	OTROS TRIB.	PEN	0.00	TOTAL ANTICIPOS	PEN	0.00	IMPORTE TOTAL	PEN	45.41
OP. GRATUITA	PEN	0.00																																
OP. EXONERADA	PEN	0.00																																
OP. INAFECTA	PEN	0.00																																
OP. GRAVADA	PEN	38.48																																
TOTAL DSCTO	PEN	0.00																																
CARGOS	PEN	0.00																																
I.G.V	PEN	6.93																																
I.S.C.	PEN	0.00																																
OTROS TRIB.	PEN	0.00																																
TOTAL ANTICIPOS	PEN	0.00																																
IMPORTE TOTAL	PEN	45.41																																

No es negociante
 Cuenta Corriente en Dólares
 Banco de Crédito: 191-2504550-1-94
 Cuenta CCI: 00219100250455019454
 Cuenta Corriente en Soles
 Banco de Crédito: 191-2478630-0-65
 Cuenta CCI: 00219100247863006557

Representación Impresa de la Factura Electrónica, consulte en
<https://sfe.bizlinks.com.pe>
 Autorizado a ser emisor mediante R.I. SUNAT N° 0320050000669

Las cancelaciones pueden ser efectuadas directamente en caja o
 en la sucursal cheque a nombre de "CORPORACION SUDAMERICANA DE

CORPORACION SUDAMERICANA
 DE ACEROS ESPECIALES S.A.C.
 "CORPSAE"
30 OCT 2018
CANCELADO

CORPORACION SUDAMERICANA
 DE ACEROS ESPECIALES S.A.C.
 "CORPSAE"
30 OCT 2018
ENTREGADO

J.V.C. INDUSTRIAS

De : Jose A. Vicharra Condor
COMPRA Y VENTA DE MAQUINAS INDUSTRIALES Y OTROS
 Celular 9940-16861 Nextel 401*6861
 Email: jvcindustrias@hotmail.com

R.U.C. 1099620680

NOTA DE PEDIDO

Nº 004190

SERVICIO DE TORNO PARALELO - REVOLVER - CEPILLO - PANTOGRAFO
 FRESADORA UNIVERSAL - TALADRO RADIAL - SOLDADURA EN GENERAL

PRINCIPAL: Av. Argentina 449 Stand 3-4 Cercado de Lima
 SUCURSAL: Av. Guillermo Dansey 701 Tda 7
 SUCURSAL: Av. La Mar 395 - ATE



961783564

Señor... Dumas Nayra R.U.C.

Dirección..... Fecha 12-11-2018

* Todo trabajo se realizará con 50% adelantado y 50% contraentrega

CANT	DESCRIPCIÓN	P. UNIT.	TOTAL
12	Plazas $\phi 40 \times 40 \text{ mm}$		S/160,=

Tiempo de entrega	Total	S/160,=
	A cuenta	S/50,=
J.V.C. INDUSTRIAS	Saldo	S/110,=
CLIENTE		

* Los precios no incluyen el IGV

