



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

COMPARACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS EN LOS ACEROS MÁS UTILIZADOS EN EL ECUADOR

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

FRANKLIN STEVEN LARA CHICHANDE

frankin.lara@epn.edu.ec

ALEX NICOLÁS QUINGA OÑA

alex.quinga@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. MARIO GERMÁN GRANJA RAMÍREZ, MSc.

mario.granja@epn.edu.ec

CODIRECTOR: ING. MARIO ALBERTO CESÉN, MSc.

mario.cesen@epn.edu.ec

QUITO, ABRIL 2022

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **Franklin Steven Lara Chichande y Alex Nicolás Quinga Oña**, bajo mi supervisión.



Firmado electrónicamente por:
**MARIO GERMAN
GRANJA RAMIREZ**

ING. MARIO GERMÁN GRANJA RAMÍREZ, MSc.
DIRECTOR DE PROYECTO



Firmado electrónicamente por:
**MARIO ALBERTO
CESÉN ARTEAGA**

ING. MARIO ALBERTO CESÉN, MSc.
CODIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, **Franklin Steven Lara Chichande y Alex Nicolás Quinga Oña**, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Franklin Steven Lara Chichande

Alex Nicolás Quinga Oña

DEDICATORIA

Franklin Lara

A mi madre Sonia, por todo el apoyo brindado ya que, gracias a su sacrificio y enseñanzas de vida, me permitieron culminar mis estudios y alcanzar una meta más en mi vida, sin olvidar el respeto y humildad hacia el prójimo.

Alex Quinga

Dedico este trabajo a mi madre Gloria y a mis hermanas Elizabeth, Catherine, Karina y Grace ya que, sin su apoyo incondicional, paciencia, comprensión y amor no me hubiese sido posible llegar a cumplir esta meta.

AGRADECIMIENTO

Al ingeniero Mario Granja por su guía en la realización de este trabajo de titulación.

Al ingeniero Mario Cesén por su colaboración en la realización del presente trabajo.

Al Ingeniero Santiago Camacho catedrático encargado del Laboratorio de Conformado Mecánico, por su ayuda incondicional en la realización de la parte práctica de este trabajo.

A la ingeniera Patricia Proaño por su ayuda en la realización del ensayo de dureza.

Al ingeniero Jonathan Castro por la realización de los ensayos de Tracción y Charpy.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN.....	i
DECLARACIÓN	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general	3
Objetivos específicos	3
Alcance	4
1 MARCO TEÓRICO.....	5
1.1 Generalidades del acero y su clasificación	5
1.1.1 Diagrama Hierro Carbono.....	6
1.1.2 Microestructura del acero	8
1.1.2.1 Transformación perlítica.....	9
1.1.2.2 Transformación bainítica.....	10
1.1.2.3 Transformación martensítica	11
1.1.3 Propiedades mecánicas de los aceros.....	12
1.1.3.1 Dureza	12
1.1.3.2 Resistencia	12
1.1.3.3 Ductilidad y Fragilidad.....	15
1.1.3.4 Tenacidad	15
1.1.3.5 Influencia de la microestructura en las propiedades mecánicas	16
1.1.4 Aceros ASTM A36 y ASTM A572 grado 50	17
1.1.4.1 Clasificación del acero	17
1.1.4.1 Propiedades mecánicas y composición química del acero ASTM A36....	18

1.1.4.2	Propiedades mecánicas y composición química del acero ASTM A572 grado 50.....	19
1.2	Generalidades de los tratamientos térmicos de revenido, recocido y temple	20
1.2.1	Generalidades de los tratamientos térmicos	20
1.2.1.1	Difusión atómica en soluciones sólidas	21
1.2.1.2	Nucleación y crecimiento del tamaño de grano	22
1.2.1.3	Diagramas de Transformación tiempo y temperatura (TTT)	23
1.2.1.4	Diagramas de Transformación de enfriamiento Continuo (CCT)	24
1.2.2	Tratamiento térmico de recocido.....	25
1.2.3	Tratamiento térmico de temple	28
1.2.3.1	Mecanismos de remoción del calor	30
1.2.3.2	Templabilidad del acero	32
1.2.3.3	Problemas que pueden presentarse durante el temple	33
1.2.4	Tratamiento térmico de revenido	33
1.2.4.1	Fragilidad por revenido	35
1.2.5	Descarburación del acero a altas temperaturas.....	36
1.3	Estudios previos	37
2	METODOLOGÍA.....	42
2.1	Realización de los tratamientos térmicos de recocido, temple y revenido	42
2.1.1	Extracción de las probetas a partir del material base.....	42
2.1.2	Preparación de las probetas para su ingreso a la mufla	45
2.1.3	Precalentamiento de la mufla	46
2.1.3.1	Equipos.....	46
2.1.4	Elevación de la temperatura hasta la austenización	47
2.1.5	Enfriamiento de las probetas	48
2.1.6	Introducción las probetas nuevamente en la mufla	51
2.1.7	Identificación de las probetas	51
2.2	Caracterización de las propiedades mecánicas de los aceros tratados térmicamente	52

2.2.1	Ensayo de tracción bajo la norma ASTM E8-18.....	52
2.2.1.1	Máquina universal de ensayos	53
2.2.1.2	Procedimiento	53
2.2.2	Medición de ductilidad	55
2.2.3	Ensayo de dureza bajo la norma ASTM E18	56
2.2.3.1	Equipo.....	56
2.2.3.2	Procedimiento	57
2.2.4	Ensayo Charpy bajo la norma ASTM E23.....	58
2.2.4.1	Equipo.....	58
2.2.4.2	Procedimiento	58
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	61
3.1	Realización de tratamientos térmicos de recocido, temple y revenido	61
3.1.1	Recocido	61
3.1.2	Temple	62
3.1.3	Temple con Revenido.....	63
3.2	Caracterización de las propiedades mecánicas de los aceros tratados térmicamente	64
3.2.1	Ensayo de tracción	64
3.2.1.1	Probetas testigo	64
3.2.1.2	Probetas Recocidas.....	65
3.2.1.3	Probetas templadas	66
3.2.1.4	Probetas templadas y revenidas	67
3.2.2	Resultados de ductilidad.....	69
3.2.3	Ensayo de dureza.....	70
3.2.4	Ensayo Charpy	71
3.2.4.1	Pobretas testigo	71
3.2.4.2	Pobretas recocidas	72
3.2.4.3	Pobretas templadas	73
3.2.4.4	Pobretas templadas y revenidas	73

3.3	Comparación de los tratamientos térmicos de los aceros ASTM A36 y ASTM A572 GR50	75
3.3.1	Probetas testigo.....	76
3.3.2	Probetas Recocidas.....	77
3.3.3	Probetas templadas.....	79
3.3.4	Probetas templadas y revenidas.....	80
3.3.5	Análisis de Ventajas y desventajas de los tratamientos térmicos.....	82
3.3.5.1	Ventajas.....	82
3.3.5.2	Desventajas	83
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	85
4.1	Conclusiones.....	85
4.2	Recomendaciones.....	87
	Referencias	88
	ANEXO I.....	92
	CERTIFICADO DE CALIDAD DE LOS ACEROS ASTM A36 Y ASTM A572 GR50.....	92
	ANEXO II.....	94
	INFORME DEL ENSAYO DE TRACCIÓN REALIZADO POR EL LABORATORIO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES.....	94
	ANEXO III.....	115
	DATOS OBTENIDOS DEL ENSAYO DE DUREZA EN EL LABORATORIO DE METALOGRAFÍA, DESGASTE Y FALLA	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Estructura BCC de la ferrita y FCC de la austenita	5
Figura 1.2. Diagrama de fase en equilibrio de Hierro Carbono.....	6
Figura 1.3. Fotomicrografía de a) ferrita y b) austenita.....	8
Figura 1.4. Transformación de un acero hipoeutectoide (0.38% de carbono) durante el enfriamiento y su respectiva fotomicrografía.....	9
Figura 1.5. Microestructura bainítica	10
Figura 1.6. Micrografía de la bainita superior (a) y bainita inferior (b).....	10
Figura 1.7. Estructura martensítica en aceros hipoeutectoides y en aceros hipereutectoides	11
Figura 1.8. Microestructura perlítica (a), bainítica (b) y martensítica (c)	11
Figura 1.9. Indentadores para las pruebas de dureza Brinell y Rockwell	12
Figura 1.10. Curva esfuerzo deformación ingenieril con los puntos más importantes del mismo.....	13
Figura 1.11. Comparación de curvas esfuerzo deformación	13
Figura 1.12. Resistencia a la fluencia compensada	14
Figura 1.13. Zona de estricción de una probeta sometida a tracción	14
Figura 1.14. Curva esfuerzo deformación para materiales dúctiles y frágiles	15
Figura 1.15. Ensayo Charpy	16
Figura 1.16. Diagrama esfuerzo-deformación unitaria del acero ASTM A572 GR50 y ASTM A36	19
Figura 1.17. Calentamientos y enfriamientos controlados.....	20
Figura 1.18. Difusión de metales.....	21
Figura 1.19. Mecanismos de difusión: a) por vacancias, b) intersticial	22
Figura 1.20. Nucleación y crecimiento de grano de la perlita y la bainita superior e inferior	22
Figura 1.21. Diagrama TTT para un acero eutectoide y un acero hipereutectoides	24
Figura 1.22. Diagrama de Transformación con Enfriamiento Continuo	25
Figura 1.23. Rango de temperatura del proceso de recocido completo	26
Figura 1.24. Recocido de un acero 1080	26
Figura 1.25. Efecto de la temperatura de recocido en la microestructura y las propiedades mecánicas	27
Figura 1.26. Gradiente de durezas y microestructuras en un proceso de temple	29
Figura 1.27. Estructura martensítica después del temple.....	30
Figura 1.28. Mecanismos de remoción de calor durante el temple.....	30

Figura 1.29. Diagrama TTT con diferentes medios de enfriamiento	31
Figura 1.30. Curvas Jominy o de Templabilidad para varios aceros	33
Figura 1.31. Propiedades mecánicas versus temperatura de revenido	34
Figura 1.32. Evolución de la martensita revenida en función de la temperatura de revenido	35
Figura 1.33. Evolución de la martensita revenida en función de la temperatura.....	36
Figura 1.34. Superficie descarburada de una cero de medio carbono	37
Figura 1.35. Curvas esfuerzo deformación obtenidas para el recocido y el normalizado de la investigación de Senthikumar y Ajiboye	40
Figura 1.36. Curvas esfuerzo deformación obtenidas para el temple y el recocido de la investigación de Senthikumar y Ajiboye.....	40
Figura 2.1. Placas de acero de donde se extrajeron las probetas	42
Figura 2.2. Medidas de las probetas para el ensayo de tracción.....	43
Figura 2.3. Principales probetas para el Ensayo Charpy.....	43
Figura 2.4. Probetas extraídas del material base	44
Figura 2.5. Elaboración de la caja.....	45
Figura 2.6. Caja con agarraderas y base de viruta.....	45
Figura 2.7. Probetas de dureza introducidas.....	45
Figura 2.8. Cubrimiento de las probetas con limalla.....	46
Figura 2.9. Equipo de protección personal.....	47
Figura 2.10. Probetas recocidas extraídas de la caja.....	48
Figura 2.11. Limpieza de las probetas con papel de carburo de silicio de 400 o 600 granos por pulgada cuadrada.....	49
Figura 2.12. Extracción de la probeta	49
Figura 2.13. Enfriamiento en agua	50
Figura 2.14. Probetas fuera del agua.....	50
Figura 2.15. Probetas templadas extraídas de la caja con limalla	50
Figura 2.16. Probetas revenidas enfriadas al aire	51
Figura 2.17. Probetas de ensayo de Tracción y ensayo Charpy identificadas.....	52
Figura 2.18. Probetas para ensayo de dureza identificadas.....	52
Figura 2.19. Máquina universal de ensayos.....	53
Figura 2.20. Certificaciones de calibración de la máquina	54
Figura 2.21. Marcación de la longitud libre.....	54
Figura 2.22. Probeta colocada en la máquina	54
Figura 2.23. Obtención de datos.....	55
Figura 2.24. Medición de la longitud libre antes de la prueba.....	55

Figura 2.25. Medición de la longitud libre después de la prueba	56
Figura 2.26. Colocación de la probeta	57
Figura 2.27. Marcas dejadas por el indentador	57
Figura 2.28. Máquina universal para el ensayo Charpy	58
Figura 2.29. Colocación de las probetas	59
Figura 2.30. Caída del yunque	59
Figura 2.31. Lectura de los datos y marcación de probetas	60
Figura 3.1. Probetas recocidas para ensayo de tracción.....	61
Figura 3.2. Probetas recocidas para ensayo Charpy y dureza	62
Figura 3.3. Probetas templadas para ensayo de tracción	62
Figura 3.4. Probetas templadas para ensayo Charpy y dureza.....	63
Figura 3.5. Probetas templadas y revenidas para ensayo de tracción	63
Figura 3.6. Probetas testigo utilizadas en el ensayo de tracción	65
Figura 3.7. Curvas esfuerzo deformación de las probetas testigo	65
Figura 3.8. Probetas para ensayo de tracción recocidas.....	66
Figura 3.9. Curvas esfuerzo deformación de las probetas recocidas	66
Figura 3.10. Probetas para ensayo de tracción templadas.....	67
Figura 3.11. Curvas esfuerzo deformación de las probetas templadas	67
Figura 3.12. Probetas para ensayo de tracción templadas y revenidas	68
Figura 3.13. Curvas esfuerzo deformación de las probetas templadas y revenidas	68
Figura 3.14. Diagrama de caja y bigotes de los resultados del límite de fluencia	69
Figura 3.15. Diagrama de caja y bigotes de los resultados de la resistencia a la tracción	69
Figura 3.16. Diagrama de caja y bigotes de los resultados del porcentaje de elongación	70
Figura 3.17. Diagrama de caja y bigotes de los resultados de dureza	71
Figura 3.18. Probetas testigo utilizadas en el ensayo Charpy	72
Figura 3.19. Probetas recocidas utilizadas en el ensayo Charpy	72
Figura 3.20. Probetas templadas utilizadas en el ensayo Charpy	73
Figura 3.21. Probetas templadas y revenidas utilizadas en el ensayo Charpy	74
Figura 3.22. Diagrama de caja y bigotes de los resultados de tenacidad a la fractura	74
Figura 3.23. Comparación de las propiedades mecánicas de las probetas tratadas térmicamente con las propiedades de la probeta testigo para el acero ASTM A36.....	75
Figura 3.24. Comparación de las propiedades mecánicas de las probetas tratadas térmicamente con las propiedades de la probeta testigo para el acero ASTM A572 GR50	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Influencia de las diferentes microestructuras en las propiedades mecánicas de los aceros	17
Tabla 1.2. Composición química del acero ASTM A36	18
Tabla 1.3. Propiedades del acero ASTM A36	18
Tabla 1.4. Composición química del acero ASTM A572 GR50 en sus diferentes grados.19	
Tabla 1.5. Propiedades del acero ASTM A572 GR50	20
Tabla 1.6. Influencia de las condiciones de enfriamiento en la microestructura	32
Tabla 1.7. Condiciones de cada tratamiento térmico realizado por el Journal of material Science and Engineering	37
Tabla 1.8. Resultados de la investigación del Journal of material Science and Engineering	38
Tabla 1.9. Propiedades obtenidas después del enfriamiento en aire del trabajo de Esam y Ventakesh.....	38
Tabla 1.10. Propiedades obtenidas después del enfriamiento en agua del trabajo de Esam y Ventakesh.....	39
Tabla 1.11. Efectos de los tratamientos térmicos en la dureza del acero AISI 1020	39
Tabla 1.12. Condiciones de cada tratamiento térmico de la investigación de Senthikumar y Ajiboye.....	40
Tabla 1.13. Resultados de la investigación de Senthikumar y Ajiboye	40
Tabla 1.14. Propiedades obtenidas después del temple	41
Tabla 2.1. Medidas para las probetas del ensayo de tracción.....	43
Tabla 2.2. Dimensiones de las probetas para el Ensayo Charpy.	44
Tabla 2.3. Distribución del número total de probetas extraídas	44
Tabla 2.4. Características técnicas de la mufla	46
Tabla 2.5. Características técnicas del termómetro digital	47
Tabla 2.6. Tiempo de permanencia.....	48
Tabla 2.7. Durómetro Rockwell C	56
Tabla 3.1. Propiedades mecánicas obtenidas para el acero ASTM A36	76
Tabla 3.2. Propiedades mecánicas obtenidas para el acero ASTM A572 GR50	76

RESUMEN

El presente trabajo de titulación realizó la comparación de los tratamientos térmicos de recocido, temple y revenido en los aceros ASTM A36 y ASTM A572 GR50 con el fin de analizar el impacto que cada tratamiento tuvo en cada uno a través del análisis del cambio de sus propiedades mecánicas. Se realizaron tratamientos térmicos de recocido, temple y temple más revenido a 900°C y 500°C, en el caso del revenido, en probetas para ensayo de tracción, ensayo Charpy y ensayo de dureza, con muestras de 5 probetas cada uno, dando un total de 90 probetas tratadas térmicamente. La extracción de las probetas del material base, los tratamientos térmicos y la caracterización de las propiedades mecánicas se ejecutaron en los distintos laboratorios de la Escuela Politécnica Nacional. Las propiedades mecánicas obtenidas en la caracterización se compararon con las propiedades de probetas testigo mediante el uso de diagramas de caja de bigotes que permitieron analizar tanto la dispersión de los resultados como posibles valores atípicos en cada muestra. Los resultados obtenidos indicaron que ambos aceros responden favorablemente al tratamiento térmico de recocido. Sin embargo, no es el caso del tratamiento térmico de temple, el cual no cumplió su propósito en el acero ASTM A572 GR50 debido al bajo contenido de carbono, lo que evitó la formación de martensita, lo que permitió concluir que los tratamientos térmicos en los aceros ASTM A36 y ASTM A572 GR50 permiten ajustar sus propiedades mecánicas; sin embargo, están limitados por su composición química.

Palabras clave: Acero, propiedad mecánica, recocido, temple, revenido, caracterización

ABSTRACT

In this engineering thesis, annealing, hardening and tempering heat treatment processes were conducted upon ASTM A36 and ASTM A572 GR50 steels so that the impact of each process could be analyzed through the examination of the change of their mechanical properties. To do that, annealing, hardening and tempering processes at 900°C and 500°C (tempering) were performed on tensile, Charpy and hardness test specimens, divided into samples of five specimens each. The extraction of the specimens, heat treatment processes and the mechanical properties characterizations were executed at the Escuela Politécnica Nacional's laboratories. The mechanical properties after the performing of heat treatments were compared with specimens that were not heat treated by using Box Plot diagrams so that dispersion and outlier points of each sample could be analyzed. The results show that both steels respond properly to annealing, but ASTM A572 GR50 steel did not respond as wished to harden due to the little amount of carbon this steel has, which avoid the martensite transformation. In conclusion, heat treatment on ASTM A36 and ASTM A572 GR50 steel allowed to fit mechanical properties for several applications; however, heat treatment processes depend on chemical composition.

Keywords: Steel, mechanical property, annealing, quenching, tempering, characterization.

COMPARACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS EN LOS ACEROS MÁS UTILIZADOS EN EL ECUADOR

INTRODUCCIÓN

En el Ecuador, no existe suficiente información estructurada acerca de la influencia que tienen los tratamientos térmicos en los materiales más utilizados en la industria, como son el acero ASTM A36 y el ASTM A572 GR50 [1]. Tratamientos térmicos como el revenido, recocido y el temple son utilizados en las distintas ramas de la industria ecuatoriana, tales como la industria del transporte, la maquinaria industrial o las estructuras de aceros, para mejorar sus prestaciones. Con frecuencia, un ingeniero se ve en la necesidad de realizar un tratamiento térmico con el fin de mejorar las propiedades mecánicas de los materiales, reducir tensiones residuales introducidas durante los diferentes procesos de fabricación, como la soldadura y el conformado mecánico; o endurecer la superficie para mejorar la resistencia al desgaste [2]. En el presente trabajo se analizaron las ventajas y desventajas de los tratamientos térmicos de revenido, recocido y temple en los aceros ASTM A36 y ASTM A572 GR50, los cuales han ganado gran acogida en la industria [3].

Dentro del ámbito de la ingeniería mecánica, el uso de los tratamientos térmicos permite variar las propiedades mecánicas de los materiales a través de la manipulación de variables como la temperatura y el tiempo al que los materiales son expuestos. Los tratamientos térmicos permiten manipular estas variables para obtener las propiedades mecánicas que son requeridas en una determinada aplicación [2]. Los diferentes procesos de manufactura pueden crear un estado de esfuerzos residuales en las diferentes piezas o elementos estructurales que perjudican notoriamente el desempeño de éstos, facilitando procesos como el desgaste de las superficies; además de los procesos de corrosión [4].

Los tratamientos térmicos, al ser procesos que permiten mejorar las propiedades mecánicas de un material, como el incremento o reducción de la dureza, la ductilidad del material, proporcionan un pilar fundamental para combatir varios procesos de desgaste, y entregan piezas o elementos de buena calidad, incrementando su vida útil. Es por esta razón que es necesario realizar un análisis de los beneficios y desventajas de realizar tratamientos térmicos en los aceros ASTM A36 y ASTM A572 GR50.

Los aceros ASTM A36 y ASTM A572 GR50 han ganado gran importancia, pues son muy versátiles en cuanto a las aplicaciones que pueden tener. Sin embargo, Dichos aceros presentan limitaciones como los costos de mantenimiento, susceptibilidad al pandeo, la

formación de óxidos, entre otras [1]. Por esta razón, es necesario analizar los diferentes tratamientos térmicos con el fin de reducir las desventajas a dichos aceros, incrementando los beneficios que se puedan obtener de éstos. Ensayos de caracterización, posteriores a la aplicación de los tratamientos, permiten determinar las propiedades mecánicas del material, los cuales constituyen la base para realizar un análisis comparativo de las ventajas y desventajas de los tratamientos térmicos de revenido, recocido y temple en los aceros ASTM A36 y ASTM A572 GR50.

Los tratamientos térmicos, así como los ensayos de caracterización sobre estos materiales se llevaron a cabo dentro de las instalaciones de la Escuela Politécnica Nacional, en el laboratorio de Conformado Mecánico, para los tratamientos térmicos; en el laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla, para el ensayo de dureza y, en el laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones, para el ensayo de Tracción y para el ensayo Charpy.

Objetivo general

Comparar los tratamientos térmicos en los aceros más utilizados en el Ecuador.

Objetivos específicos

- Establecer las principales características de los aceros ASTM A36 y ASTM A572 GR50.
- Recopilar información sobre los tratamientos térmicos de revenido, recocido y temple.
- Realizar tratamientos térmicos de revenido, recocido y temple para los aceros ASTM A36 y ASTM A572 GR50.
- Caracterizar las propiedades mecánicas de los aceros tratados térmicamente.
- Analizar las ventajas y desventajas de los diferentes tratamientos térmicos.

Alcance

En el presente trabajo se realiza la comparación de los tratamientos térmicos de recocido, revenido y temple en los aceros ASTM A36 y ASTM A572 GR50, que son los aceros estructurales más utilizados en el Ecuador. La investigación busca analizar los cambios de las propiedades mecánicas de estos aceros después de haber sido tratados térmicamente, basados en las normas ASTM E8 (ensayo de tracción), ASTM E18 (ensayo de dureza) y ASTM E23 (ensayo de impacto), para verificar si se cumple o no el o los objetivos de cada tratamiento térmico. Finalmente, con los aceros tratados y caracterizados, se quiere analizar las ventajas y desventajas de cada tratamiento y su posible aplicación dentro de la industria.

1 MARCO TEÓRICO

El siguiente apartado presenta una revisión bibliográfica que permite comprender lo que son los tratamientos térmicos y su influencia en las propiedades mecánicas de los aceros. En este capítulo se esclarecen los conceptos importantes para la comprensión del trabajo, los cuales permitirán interpretar los resultados obtenidos con el fin de cumplir con los objetivos propuestos.

1.1 Generalidades del acero y su clasificación

El acero es una solución sólida de hierro y carbono a la cual pueden introducirse otros elementos aleantes como el cromo, el manganeso, el vanadio, el silicio, el fósforo, entre otros. Sin embargo, la cantidad de carbono presente en el acero es la principal responsable de sus propiedades mecánicas, pues repercute directamente en las fases que componen la microestructura antes o después de un tratamiento térmico [5].

Existen dos tipos principales de solución sólida en los aceros. La primera, denominada ferrita (α - α), es una solución sólida intersticial; y la segunda, de naturaleza sustitucional, se denomina austenita (γ - γ) [5]. Con respecto a la temperatura, la ferrita se forma a temperaturas menores que la austenita. La figura 1.1 muestra que mientras la ferrita tiene estructura cristalina BCC (estructura cúbica centrada en el cuerpo), la austenita presenta una estructura FCC (red cúbica centrada en las caras).

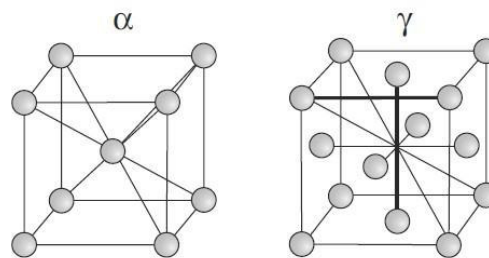


Figura 1.1. Estructura BCC de la ferrita y FCC de la austenita
(Fuente: [5])

Mientras los átomos de carbono dan lugar a soluciones sólidas intersticiales, ocupando las vacancias presentes en la estructura BCC; otros elementos de aleación como el manganeso, el silicio o el níquel sustituyen los lugares del hierro en la estructura FCC, formando una solución sólida sustitucional.

1.1.1 Diagrama Hierro Carbono

Los cambios de fase en los materiales pueden inducirse variando la temperatura, la composición, y la presión externa. Durante una transformación de fase, una solución sólida avanza hacia un estado de equilibrio cuando el enfriamiento ocurre con velocidades extremadamente lentas; y se caracteriza por tener un diagrama de fases en el cual se pueden analizar las fases obtenidas, la composición y las cantidades relativas de los nuevos microconstituyentes [6]. El Diagrama hierro-carbono de la figura 1.2 representa un diagrama en estado de equilibrio y permite estudiar los cambios microestructurales de aceros y fundiciones en función de la temperatura, la composición química y la solubilidad de la matriz.

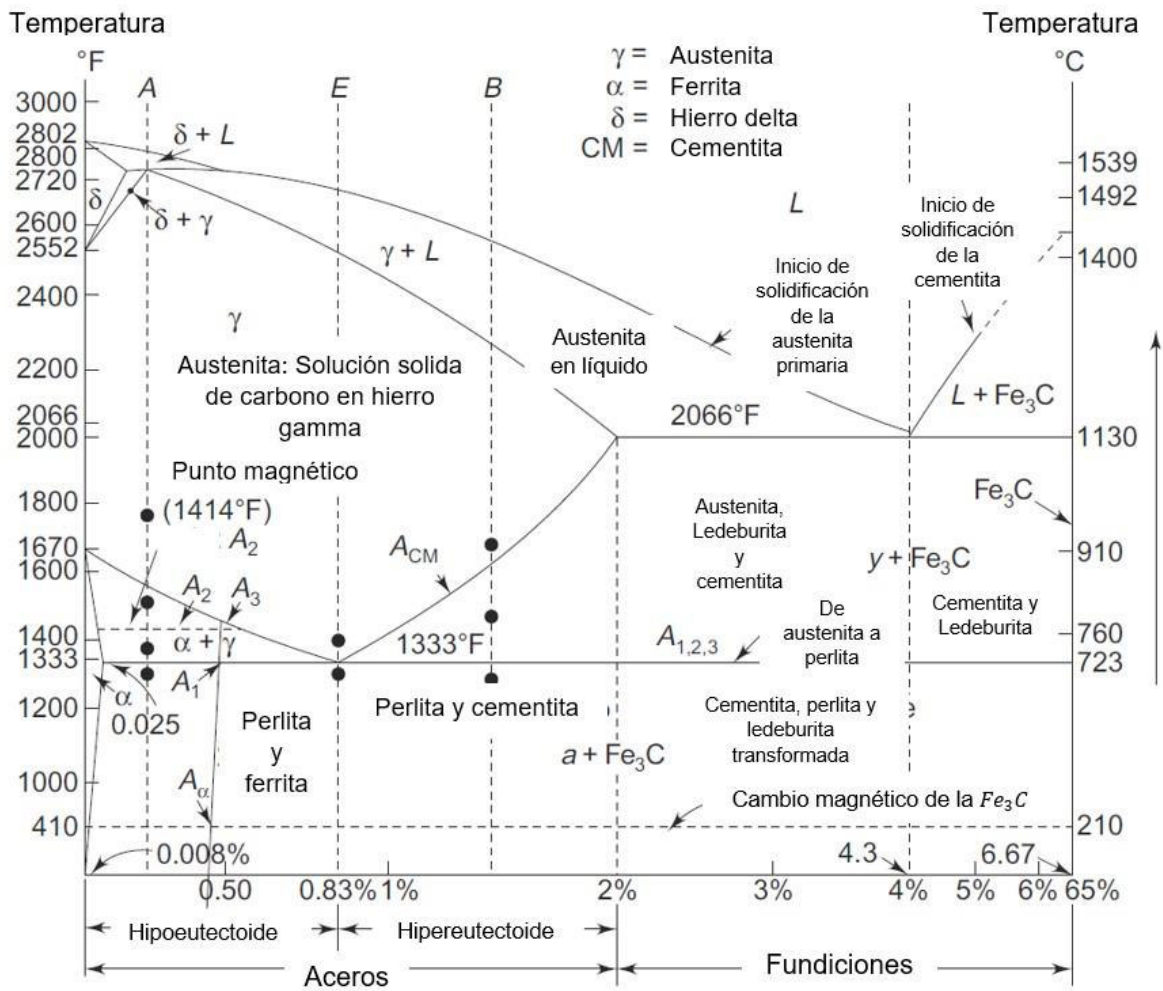


Figura 1.2. Diagrama de fase en equilibrio de Hierro Carbono

(Fuente: [5])

Sin embargo, en la industria es muy común la necesidad de llevar a cabo tratamientos térmicos a velocidades de enfriamiento variables. Por esta razón, es deseable que el material se encuentre en una fase que se denomina metaestable que representa una

estructura en equilibrio aparente (tiende a buscar un estado más estable). En el caso del acero, la austenita representa una fase metaestable de la cual se pueden obtener nuevas estructuras como la perlita (condiciones de equilibrio) o la martensita (enfriamiento brusco) [6]. Las condiciones de equilibrio representan un estado en el cual la velocidad de enfriamiento es talmente lenta que permite la difusión completa de los átomos de carbono fuera de la matriz ferrítica, resultando en nuevas estructuras como la perlita.

El diagrama hierro-carbono está dividido en 2 grandes regiones en función del porcentaje de carbono. Por debajo del 2% de carbono se presentan aceros, mientras que, por encima de este valor, se denominan fundiciones. En la región de los aceros, el exceso de carbono forma carburo de hierro; mientras que, en las fundiciones, grafito [5].

Un punto importante dentro de los aceros es el punto donde ocurre la reacción eutectoide (0.83% de carbono). El punto eutectoide es aquel donde la austenita se transforma en la mezcla de dos sólidos diferentes (ferrita y carburo de hierro) en forma de perlita [7]. Con respecto a este punto, se distinguen los aceros hipoeutectoides (debajo del punto eutectoide) y aceros hipereutectoides (encima del punto eutectoide) [5].

El diagrama hierro carbono también presenta algunas líneas relevantes que indican líneas de solubilidad y transformación, necesarias para el análisis de tratamientos térmicos. Estas líneas son la línea A_1 , la cual representa la línea de reacción eutectoide, se encuentra

a

723°C y es la máxima temperatura a la cual se puede encontrar perlita; la línea A_3 , entre

de 723°C y 912°C, se conoce como línea de transformación alotrópica de austenita en ferrita

o límite de la ferrita; y la línea A_{cm} , entre 723°C a 1130°C, considerada como el

límite de la cementita [5]. La línea A_3 se encuentra solamente en aceros hipoeutectoides,

mientras que la A_{cm} en aceros hipereutectoides. Por encima de las líneas A_3 y A_{cm} , se

encuentra la región austenítica y por debajo de la línea A_1 se encuentra ferrita y perlita, cuyas fracciones dependen del porcentaje de carbono.

En aceros aleados hipoeutectoides, la línea de transformación de la ferrita en austenita (A_1) puede calcularse en función de sus elementos aleantes [8], según la ecuación 1.1.

Donde:

$$T = 723 - 20.7(\% \text{ Mn}) - 16.9(\% \text{ Si}) + 29.1(\% \text{ S}) - 16.9(\% \text{ C}),$$

1
(
o

$$T = 723 - 20.7(\% \text{ Mn}) - 16.9(\% \text{ Si}) + 29.1(\% \text{ S}) - 16.9(\% \text{ C}) \pm 11.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2
2

Ecuación 1-1
(Fuente: [9])

(% Mn) = Porcentaje de Manganeso

(%Ni) = Porcentaje de Níquel (%S) = Porcentaje de Silicio (%C) = Porcentaje de Cromo

De igual manera, el valor de la temperatura en la línea A_{3} , la cual representa el límite de transformación alotrópica de austenita en ferrita, para una composición determinada, se puede calcular con la ecuación 1.2.

$$A_3 \text{ (}^\circ\text{C)} = 910 - 203\sqrt{\%C} - 15.2(\%Ni) + 44.7(\%S) + 104(\%Mn) + 31.5(\%V),$$

$$A_3 \text{ (}^\circ\text{C)} = 910 - 203\sqrt{\%C} - 15.2(\%Ni) + 44.7(\%S) + 104(\%Mn) + 31.5(\%V) \pm 16.7^\circ\text{C}$$

Ecuación 1-2
(Fuente: [9])

Donde:

(%C) = Porcentaje de Carbono (%Ni) = Porcentaje de Níquel (%S) = Porcentaje de Silicio (%Mn) = Porcentaje de Vanadio (%V) = Porcentaje de Molibdeno

1.1.2 Microestructura del acero

La microestructura del acero, para una composición química determinada, es el producto de las transformaciones de fase durante el enfriamiento desde la región austenítica. Si la reacción se lleva a cabo bajo condiciones de equilibrio, se pueden obtener 3 tipos de microestructuras conocidas como ferrita, perlita y el carburo de hierro (cementita). La figura 1.3 muestra la apariencia que tienen la ferrita y la austenita.

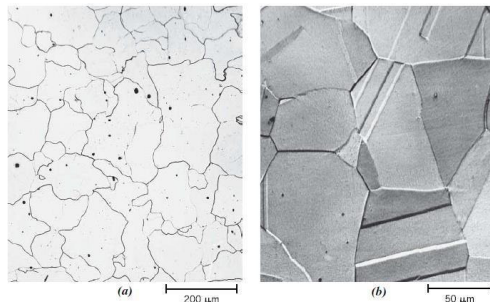


Figura 1.3. Fotomicrografía de a) ferrita y b) austenita
(Fuente: [6])

1.1.2.1 Transformación perlítica

Durante el calentamiento, el hierro pasa de una estructura BCC a una estructura FCC rica en carbono, denominada austenita. En el diagrama hierro carbono se puede observar que mientras la ferrita tiene una solubilidad limitada de 0.025% de carbono a una temperatura de 723°C, la austenita tiene una solubilidad de hasta 2% a una temperatura de 1147°C. Debido a la baja solubilidad de la ferrita, el carburo de hierro (Fe_3C) aparece como un precipitado que se forma por el carbono remanente que no puede disolverse en la estructura cristalina del hierro alfa [7].

En aceros hipoeutectoides, durante el enfriamiento, la formación de perlita inicia por encima de la línea A3, en la región austenítica. Una vez que la temperatura disminuye por debajo de la línea A3, aparecen los primeros granos de ferrita, los cuales dan lugar a lo que se conoce como ferrita proeutectoide. La aparición de este tipo de ferrita es una consecuencia directa de la pérdida de solubilidad de la austenita, la cual libera átomos de carbono, facilitando la aparición del carburo de hierro por debajo de la línea A1.

Finalmente, por debajo de la línea A1, los granos de austenita remanentes pierden carbono, dando lugar a una estructura que se denomina perlita. La perlita es una estructura formada por láminas alternadas de cementita y ferrita. La figura 1.4 muestra la evolución de la microestructura para un acero hipoeutectoide y la microfotografía de un acero con 0.38% de carbono, donde se puede visualizar la presencia de perlita, además de ferrita proeutectoide [6].

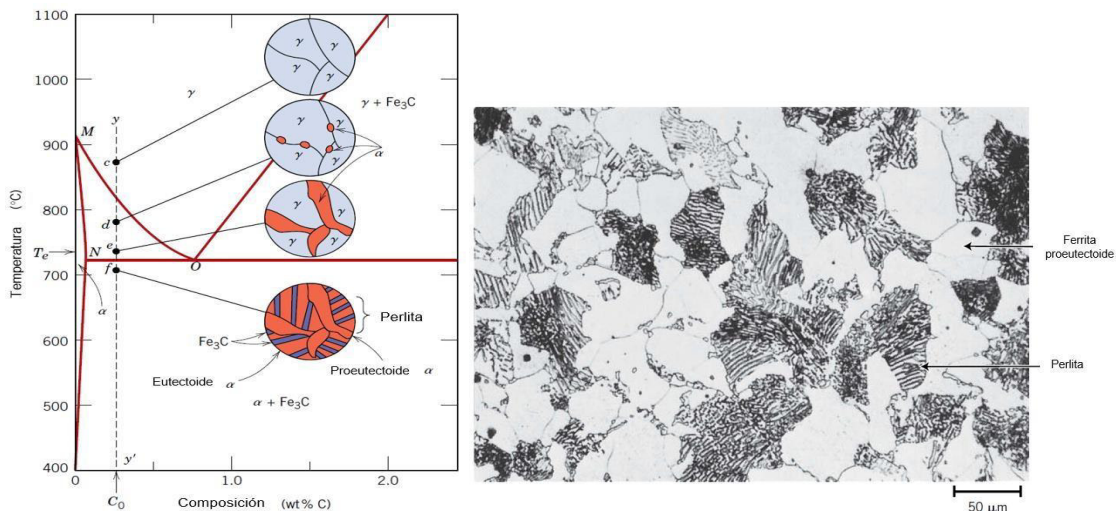


Figura 1.4. Transformación de un acero hipoeutectoide (0.38% de carbono) durante el enfriamiento y su respectiva fotomicrografía

(Fuente: [6])

1.1.2.2 Transformación bainítica

La estructura perlítica se forma bajo condiciones de equilibrio. Sin embargo, procesos como el temple se llevan a cabo con velocidades de enfriamiento mayores a las del equilibrio. Cuando se tiene un enfriamiento medio o moderado, se obtiene un producto intermedio denominado bainita.

La bainita es una microestructura cuya matriz ferrítica se asemeja a agujas o placas, cuyas fases constituyentes son ferrita y cementita. En la figura 1.5 se puede observar la micrografía electrónica de un grano de bainita, el cual está compuesto por una matriz ferrítica con partículas alargadas de carburo de hierro [6].

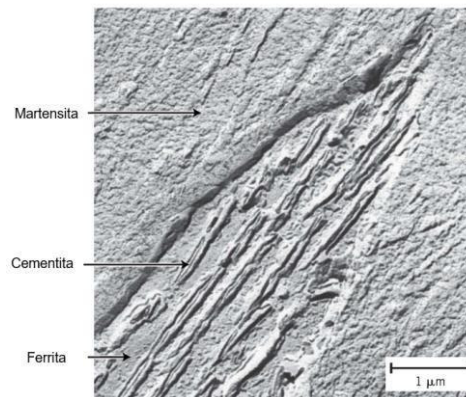


Figura 1.5. Microestructura bainítica
(Fuente: [6])

La estructura bainítica puede dividirse en bainita superior y bainita inferior. La bainita superior se caracteriza por tener precipitados de carburo de hierro en los bordes de la matriz ferrítica que tiene forma de plumas; mientras que la bainita inferior destaca por tener una matriz ferrítica en forma de agujas, más fina y distorsionada, y presenta precipitados de carburo de hierro a lo largo de toda la matriz. La figura 1.6 muestra la diferencia entre la estructura bainítica superior y la inferior [6].

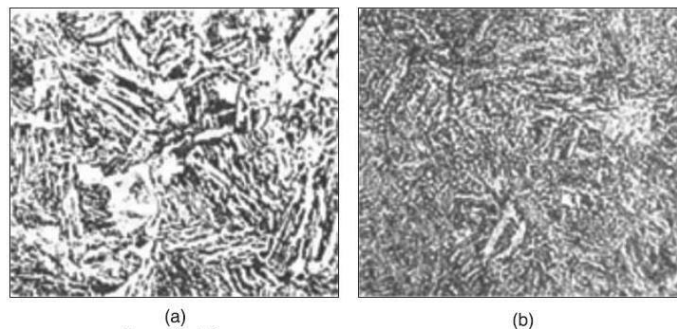


Figura 1.6. Micrografía de la bainita superior (a) y bainita inferior (b)
(Fuente: [5])

1.1.2.3 Transformación martensítica

Cuando la austenita es enfriada con velocidades muy altas, la estructura que se obtiene se denomina martensita, la cual es una solución sólida supersaturada donde la celda unitaria del hierro está muy distorsionada debido al intento de los átomos de carbono de dejar la estructura ferrítica, pues no tuvieron el tiempo de difundir fuera de la estructura austenítica; por esta razón, la martensita es capaz de transformarse rápidamente en otras estructuras durante el calentamiento y es extremadamente frágil, lo cual la vuelve una estructura peligrosa debido a que esta condición tiende a formar grietas incluso a temperatura ambiente.

Dado que la martensita no cuenta con el proceso de difusión, esta transformación ocurre de manera instantánea y se caracteriza por la nucleación rápida de granos martensíticos y de su rápido crecimiento. Al igual que la bainita inferior, su estructura es acicular y puede contener granos de austenita retenida. La figura 1.7 muestra la estructura martensítica en aceros hipoeutectoides a la izquierda y para aceros hipereutectoides en la derecha [6].

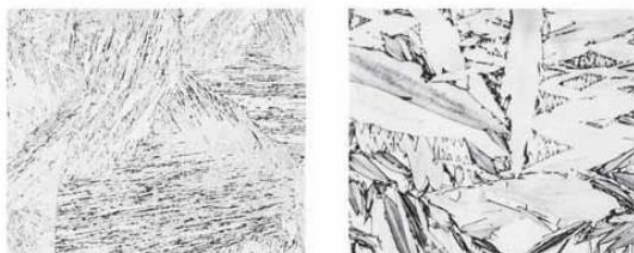


Figura 1.7. Estructura martensítica en aceros hipoeutectoides y en aceros hipereutectoides
(Fuente: [6])

Las propiedades mecánicas de los aceros son enormemente afectadas por el cambio de la microestructura. Por este motivo, es necesario conocer qué propiedades pueden modificarse con cada tipo de microestructura. Tal es el caso de la martensita, la cual es una estructura más dura que la bainita y, a su vez, la bainita es más dura que la perlita. La figura 1.8 compara las micrografías de la estructura martensítica con la perlítica y la bainítica.

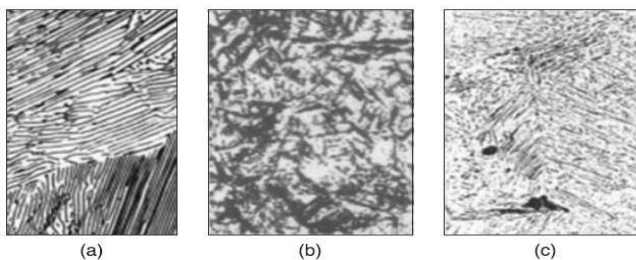


Figura 1.8. Microestructura perlítica (a), bainítica (b) y martensítica (c)
(Fuente: [5])

1.1.3 Propiedades mecánicas de los aceros

El acero es un material que posee excelentes propiedades mecánicas con relación a su costo y peso, lo que lo convierte en un material competitivo en el mundo entero. A continuación, se presentan algunas características de las propiedades mecánicas más importantes de los aceros:

1.1.3.1 Dureza

La dureza se define como la resistencia que presenta un determinado material ante una deformación plástica localizada y está relacionada directamente con el nivel de desgaste en la superficie del material [6]. Su valor se obtiene mediante ensayos estandarizados como el ensayo de dureza Brinell o los ensayos Rockwell. Estos ensayos comparten procedimientos similares, pero difieren en el tipo de indentador que utilizan. La figura 1.9 indica un esquema de los indentadores que pueden usarse para llevar a cabo los ensayos de dureza Brinell y Rockwell.

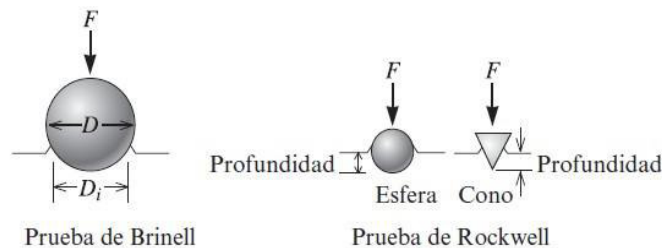


Figura 1.9. Indentadores para las pruebas de dureza Brinell y Rockwell
(Fuente: [7])

1.1.3.2 Resistencia

La resistencia se puede definir como la capacidad de un material para soportar cargas externas sin deformarse, deteriorarse o fracturarse de algún modo. Cuando un material se encuentra sometido a una carga externa (tensión, compresión o cortante), se genera un esfuerzo dentro del material como respuesta y un proceso de deformación. La deformación se define como el cambio de forma que presenta un material ante la aplicación de cargas externas y puede ser elástica, si el material vuelve a su estado natural después de retirar la carga; o plástica, si se produce un cambio en su geometría. La deformación unitaria se define como el cambio de dimensión por unidad de longitud y puede calcularse según la ecuación 1.3, donde L_f representa la longitud final y L_i , la longitud inicial [7].

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Ecuación 1-3

(Fuente: [7])

Cuando se grafica la relación entre el esfuerzo generado por una carga de tracción (eje y) y la deformación unitaria (eje x), se obtiene la que se conoce como Curva esfuerzo-deformación, como se muestra en la figura 1.10. Esta gráfica se obtiene mediante el Ensayo de tracción y es importante porque permite distinguir las zonas elástica y plástica, el módulo de Young o de elasticidad, el límite elástico, la resistencia a la tensión, la resistencia a la rotura y la resistencia a la fluencia.

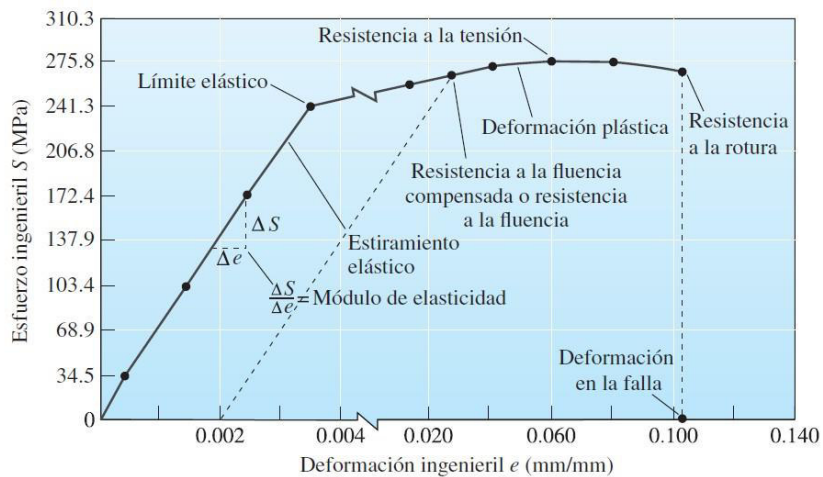


Figura 1.10. Curva esfuerzo deformación ingenieril con los puntos más importantes del mismo

(Fuente: [7])

La curva esfuerzo-deformación es una herramienta importante dentro del estudio de las propiedades mecánicas de los materiales, pues permite visualizar y comparar entre diferentes materiales y los procesos a los cuales se han sometido, como es el caso de los tratamientos térmicos. La figura 1.11 muestra las propiedades del hierro puro comparadas con la de los aceros con y sin tratamiento térmico.

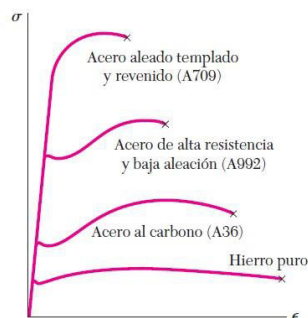


Figura 1.11. Comparación de curvas esfuerzo deformación

(Fuente: [9])

1.1.3.2.1 Resistencia a la fluencia

En el acero, la resistencia a la fluencia representa el valor del esfuerzo necesario para iniciar el movimiento de dislocaciones, dando lugar al deslizamiento; y representa el esfuerzo crítico necesario para pasar de la zona elástica a la zona plástica. Es un valor difícil de obtener debido a que requiere de equipos demasiado sensibles; por lo cual, se ha llegado al acuerdo de tomar este punto como el valor del esfuerzo necesario para causar una deformación del 0.2% y se conoce como resistencia a la fluencia compensada [2]. En la figura 1.12 se puede observar esta aproximación.

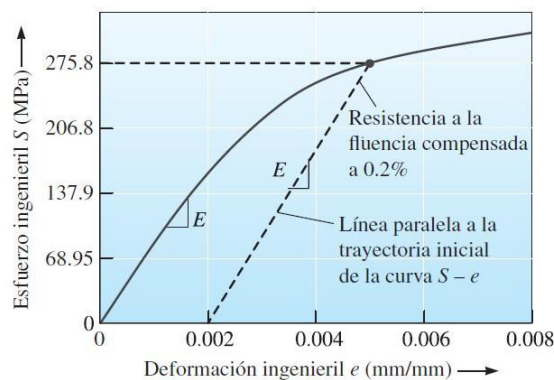


Figura 1.12. Resistencia a la fluencia compensada
(Fuente: [7])

1.1.3.2.2 Resistencia a la tensión

La resistencia a la tensión representa el valor máximo de esfuerzo que soporta un material antes de empezar su rotura y es el punto más alto de la curva esfuerzo deformación ingenieril. En el material, se caracteriza por la presencia de una zona localizada con mayor deformación, con forma de “cuello de botella”, denominada zona de estricción, como se observa en la figura 1.13 [7].

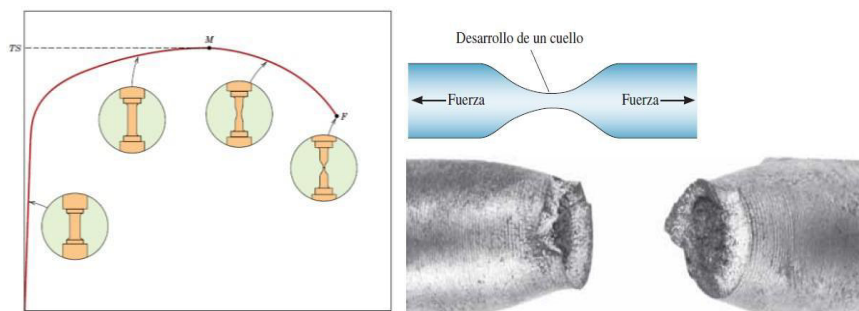


Figura 1.13. Zona de estricción de una probeta sometida a tracción
(Fuente: [6], [7])

1.1.3.3 Ductilidad y Fragilidad

La ductilidad representa la capacidad que posee un material para ser deformado plásticamente antes de fracturarse cuando una carga externa es aplicada y puede ser representada por medio del porcentaje de elongación [7]. El porcentaje de elongación representa la cantidad de deformación plástica durante la falla y se calcula por medio de la ecuación 1.4 En un ensayo de tracción, este valor se halla midiendo la distancia entre las marcas calibradas del espécimen antes y después de la rotura, denotados g_0 y g_f ,

respectivamente. Otra forma de representar la ductilidad es mediante la reducción del área.

$$\% \text{ Reducción del Área} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \cdot 100$$

Ecuación 1-4
(Fuente: [7])

Un concepto asociado a la ductilidad es la fragilidad que presenta un material. Si bien la ductilidad expresa la cantidad de deformación que ocurre antes de la fractura, la fragilidad indica la poca o nula deformación plástica ante una carga aplicada. Los materiales fragilizados presentan una mayor resistencia; sin embargo, son los que mayores catástrofes a nivel industrial, pues su falla ocurre de manera repentina sin un aviso previo. La figura 1.14 muestra la diferencia entre las curvas esfuerzo-deformación de un material frágil y uno dúctil.

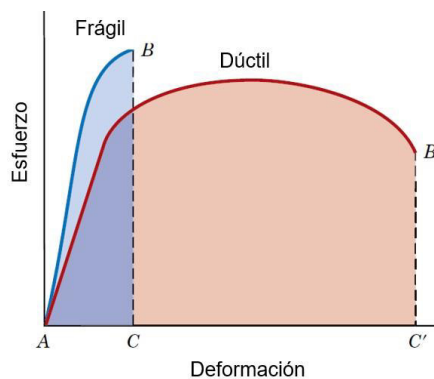


Figura 1.14. Curva esfuerzo deformación para materiales dúctiles y frágiles
(Fuente: [6])

1.1.3.4 Tenacidad

La tenacidad indica la cantidad de energía que un material absorbe antes de fracturarse. Por una parte, la tenacidad a la tensión representa la cantidad de energía absorbida bajo una carga tractiva y puede calcularse como el área bajo la curva esfuerzo deformación

hasta llegar al punto de rotura. La ecuación 1.5 indica la forma de calcular el valor de la tenacidad en función del límite de fluencia y la resistencia a la tracción [2]. Las unidades de la tenacidad a la tracción son $\frac{J}{m^3}$.

$$U = \int_0^f \sigma_y dy \cong \frac{\sigma_y^2}{2}$$

Ecuación 1-5

(Fuente: [2])

La tenacidad al impacto, por otro lado, se define como la capacidad que presenta un material para soportar un golpe causado por un impacto. El valor de la energía se obtiene por medio del ensayo denominado Charpy [7]. La figura 1.15 muestra un esquema breve del ensayo de impacto Charpy.

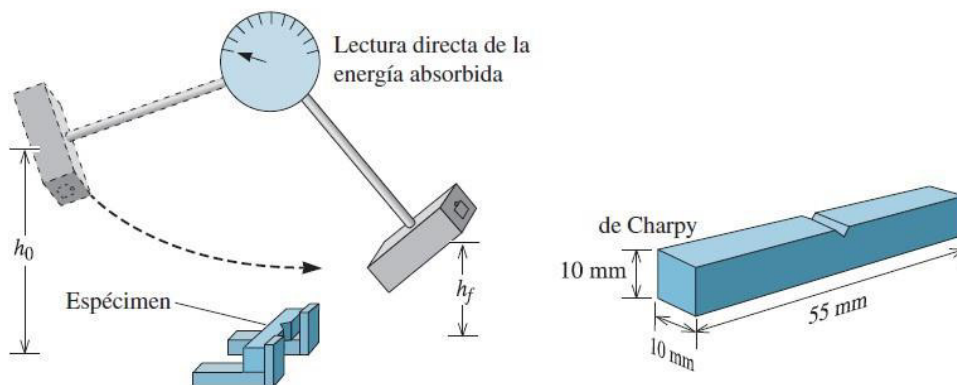


Figura 1.15. Ensayo Charpy

(Fuente: [7])

1.1.3.5 Influencia de la microestructura en las propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas del acero se ven completamente afectadas por el mínimo cambio que sufra su microestructura, la cual puede ser cambiada por medio de tratamientos térmicos. La tabla 1.1 muestra la influencia que tienen las principales microestructuras del acero en sus propiedades mecánicas.

Además de la microestructura, otros factores como el tamaño de grano, las inclusiones y las segregaciones alteran las propiedades del acero. Por ejemplo, un tamaño de grano fino es beneficioso para mejorar la mayoría de las propiedades, excepto la maquinabilidad; sin embargo, mientras el tamaño de grano pequeño las altera positivamente, las inclusiones

tienen un efecto contrario, pues representan lugares potenciales para la formación de esfuerzos residuales [5].

Tabla 1.1. Influencia de las diferentes microestructuras en las propiedades mecánicas de los aceros

Fases y Microestructura	Resistencia a la fluencia	Resistencia al impacto	Resistencia a la fatiga	Ductilidad /Tenacidad		Maquinabilidad
				D	T	
Austenita	↓	↑↑	↓	↑	↑	↓
Ferrita	↓↓	↑	↓↓	↑	-	-
Perlita	↑	↓	↑	↓	-	↑
Bainita	↑↑	↓	↑	-	↑	↓↓
Martensita	↑↑↑	↑	↑↑	-	↑↑	↑
Carburos	↑↑	↓↓	↓	↓↓	↓↓	↓↓↓
Tamaño de grano (fino)	↑	↑	↑	↑	↑	↓
Inclusiones	-	↓	↓↓	↓	↓	↓

(Fuente: [5])

1.1.4 Aceros ASTM A36 y ASTM A572 grado 50

En esta sección se detallan las propiedades mecánicas, la aplicación y la composición química de los aceros ASTM A36 y ASTM A572 GR50, los cuales son el objeto de estudio del presente trabajo.

1.1.4.1 Clasificación del acero

El conocimiento del tipo, el grado y la especialidad del acero es crucial al momento de realizar un tratamiento térmico, pues permite seleccionar el proceso más adecuado. En primera instancia, los aceros pueden dividirse en aceros simples, los cuales contienen solamente hierro y carbono; y los aceros aleados, con hierro, carbono, azufre, fósforo, entre otros. A su vez, los aceros simples pueden ser de bajo, medio y alto contenido de carbono mientras que los aceros aleados pueden ser de baja y alta aleación [5].

Por otra parte, el Instituto Americano del hierro y el acero (AISI) y la Sociedad Americana Automovilística (SAE) han creado un sistema de designaciones que se basa en un número de 4 dígitos. Los primeros números designan los principales elementos de aleación y los dos o tres siguientes los números que representan el porcentaje de carbono. De esta forma, un acero AISI 1040 indica que el acero contiene un 0,40%C y es de baja aleación [7].

También, la Sociedad Americana para pruebas de Materiales (ASTM) clasifica a los aceros según la aplicación que tendrá en la industria. En base a esto, se emplea una numeración específica para los aceros según una letra y tres números consecutivos como es el caso del acero ASTM A36 y ASTM A572 GR50. La letra indica A denota que se trata de una especificación para aceros y el número indica el valor mínimo de resistencia a la tracción expresada en

($\frac{KSI}{10^3}$).

$\frac{MPa}{10^2}$

1.1.4.1 Propiedades mecánicas y composición química del acero ASTM A36

El acero ASTM A36 es uno de los aceros más utilizados en el Ecuador para la construcción de plataformas petroleras, piezas de puentes, depósitos de combustibles y estructuras soldadas [10]. Este tipo de acero se desarrolló en Estados Unidos con el fin de elaborar mejores estructuras remachadas y atornilladas; sin embargo, su facilidad para crear estructuras soldadas permitió que su uso se extienda rápidamente, incluso dentro del Ecuador. Además de su empleo estructural, este acero puede emplearse para la elaboración de vehículos blindados, construcción de barcos y la fabricación de armamento pesado [11].

Pertenece a los aceros aleados y se rige bajo la norma ASTM A36. Su composición química se detalla en la tabla 1.2 Cabe recalcar que, aunque el contenido de manganeso no se encuentra normado, su contenido dentro del acero debe ser especificado en el certificado de calidad.

Tabla 1.2. Composición química del acero ASTM A36

C	Si	Mn	S	P	Cu
0,26-0,29	≤0,40	---	≤0,05	≤0,04	≥ 0,20

(Fuente: [12])

Generalmente, este acero es laminado en caliente con formas rectangulares, cuadradas, redondas, placas o en secciones como vigas con forma en H, vigas I, canal U, tubos, entre otras [13]. El acero ASTM A36 presenta propiedades mecánicas aceptables, buena soldabilidad y es muy económico. La tabla 1.3 resume las propiedades mecánicas más importantes del acero ASTM A36.

Tabla 1.3. Propiedades del acero ASTM A36

Propiedad Mecánica	Unidades	
	Sistema Internacional	Sistema Inglés
Límite de Fluencia, min	250 MPa	36 Ksi
Resistencia a la tracción	400-550 MPa	58-80 Ksi
Módulo de elasticidad	200 GPa	29*10 ³ Ksi
Porcentaje de elongación (mín.)	En 50 mm = 20%	
Dureza Rockwell B	69-85 [HRB]	

(Fuente: [12])

1.1.4.2 Propiedades mecánicas y composición química del acero ASTM A572 grado 50.

Este material es un acero de alta resistencia y baja aleación, empleado en una variedad de aplicaciones estructurales debido a que su relación resistencia-peso supera a aquella del hormigón. Es utilizado en vigas principales de edificios, dando soporte a cimientos y techos; y en vigas secundarias, ayudando a la principal a soportar el peso [14]. Su ventaja frente al acero ASTM A36 es su mayor resistencia, como se puede observar en la figura 1.16; y su menor densidad, convirtiéndolo en un material económico, de bajo peso y muy resistente.

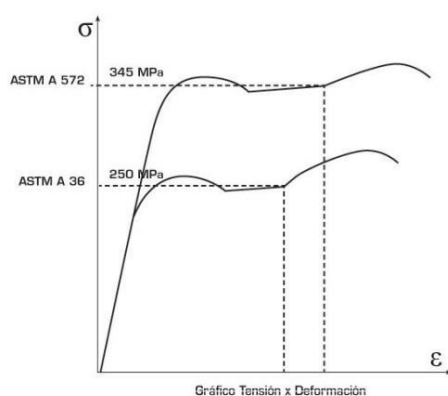


Figura 1.16. Diagrama esfuerzo-deformación unitaria del acero ASTM A572 GR50 y ASTM A36 (Fuente: [15])

Se presenta bajo diferentes grados como son el grado 42, 50, 60 y 65; los cuales se diferencian por tener diferentes cantidades de sus elementos aleantes, otorgándole al acero diferentes propiedades mecánicas. Por ejemplo, el grado 60 es usado para barras de construcción con límite de fluencia mínimo de 60 Ksi mientras que el grado 50 indica un mínimo de 50 Ksi [11]. El acero ASTM A572 grado 50 es el más común y se considera uno de los más aplicables en el país.

El acero ASTM A572 GR50 es un acero de bajo contenido de carbono que, a diferencia del acero ASTM A36, no presenta cobre dentro de sus aleantes. La composición química de este acero, y sus diferentes grados, puede observar la tabla 1.4.

Tabla 1.4. Composición química del acero ASTM A572 GR50 en sus diferentes grados

Grado	%C máx.	%Mn máx.	%P máx.	%S máx.	%Si máx.
50	0,23	1,35	0,04	0,05	0,4

(Fuente: [16])

El acero ASTM A572 GR50 presenta buenas propiedades, al igual que el acero ASTM A36, como, por ejemplo: alta ductilidad, buena dureza y resistencia a la fatiga. Las propiedades de este acero se describen en la tabla 1.5.

Tabla 1.5. Propiedades del acero ASTM A572 GR50

Propiedad Mecánica	Unidades	
	S. Internacional	S. Inglés
Límite de Fluencia, min	345 MPa	50 Ksi
Resistencia a la tracción	450 MPa	65,3 Ksi
Porcentaje de elongación (min)	19 %	
Dureza Rockwell B	74 [HRB]	

(Fuente: [16])

1.2 Generalidades de los tratamientos térmicos de revenido, recocido y temple

1.2.1 Generalidades de los tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos son procesos térmicamente asistidos que permiten alterar la microestructura de un material por medio de enfriamientos y calentamientos controlados. La figura 1.17 muestra el proceso de tratamientos térmico que se aplica a una herramienta de acero A6. Dado que los cambios en las propiedades de los aceros se llevan a cabo a través de los cambios de su microestructura, los tratamientos térmicos son la base necesaria para que el cambio microestructural ocurra [5]. Por lo tanto, escoger un acero que presente una microestructura inicial favorable para la formación de fases, como la perlita o la martensita, permite obtener las propiedades mecánicas que más se adapten a la aplicación requerida.

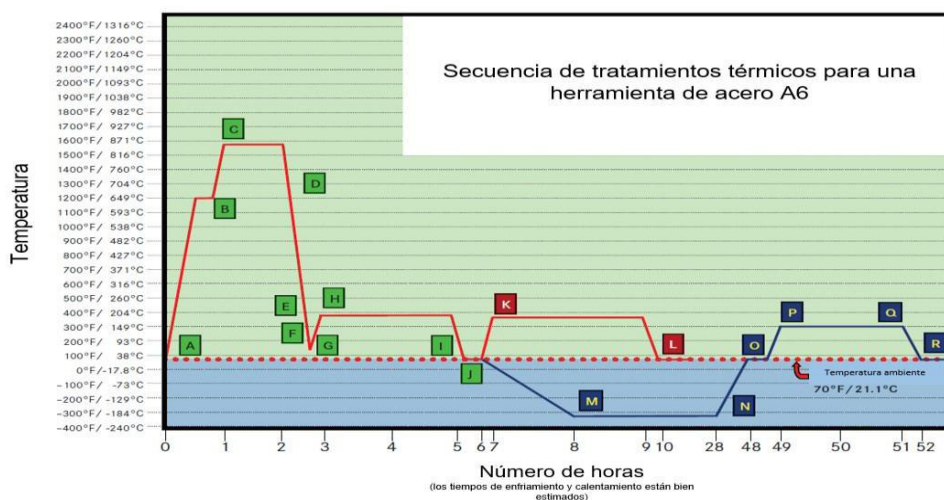


Figura 1.17. Calentamientos y enfriamientos controlados

(Fuente: [17])

El cambio de microestructura involucra transformaciones de fase, las cuales pueden ser de 3 tipos. En primer lugar, se tiene las transformaciones que dependen de la difusión atómica y que no implican el cambio de fases presentes ni la composición; en segundo lugar, existen las transformaciones que dependen de la difusión atómica e implican un cambio de la composición y el número de fases presentes. Mientras la solidificación de metales puros, transformaciones alotrópicas, la recristalización y crecimientos del tamaño de grano, forman parte del primer tipo de transformación, la reacción eutectoide es un ejemplo típico del segundo tipo. Finalmente, en tercer lugar, se tienen las transformaciones sin difusión que se caracterizan por la formación de una fase metaestable, como es el caso de la transformación martensítica.

1.2.1.1 Difusión atómica en soluciones sólidas

La reacción eutectoide es una de las reacciones más importantes para el cambio de microestructura y se sustenta en la transferencia de carbonos desde la ferrita a la austenita o viceversa. Este proceso de transferencia de material, debido al movimiento atómico, se denomina difusión. Por lo tanto, la difusión se define como el flujo neto de iones, partículas, átomos o moléculas bajo la presencia de un gradiente de concentración y en presencia de la temperatura [7]. La figura 1.18 ilustra el proceso de difusión.



Figura 1.18. Difusión de metales

(Fuente: [18])

Los átomos de los materiales sólidos se encuentran en movimiento constante; por lo cual, cambian rápidamente sus posiciones. Ante la presencia de temperaturas altas, una fracción del número total de átomos puede ser capaz de realizar un movimiento y, por lo tanto, difundirse en un solvente [6]. Según cuál sea el movimiento de los átomos dentro de una celda cristalina, se pueden distinguir dos mecanismos de difusión; el primero, denominado mecanismo de difusión de vacantes; y el segundo, intersticial.

En un movimiento difusivo por vacantes, los átomos y las vacancias intercambian sus posiciones, mientras que, en la difusión intersticial, los átomos se mueven desde una posición intersticial a otra cercana, que se encuentre desocupada. Este mecanismo es

utilizado para la difusión del carbono en el hierro pues son pequeños e idóneos para ocupar posiciones intersticiales [6]. La figura 1.19 ilustra ambos mecanismos de difusión.

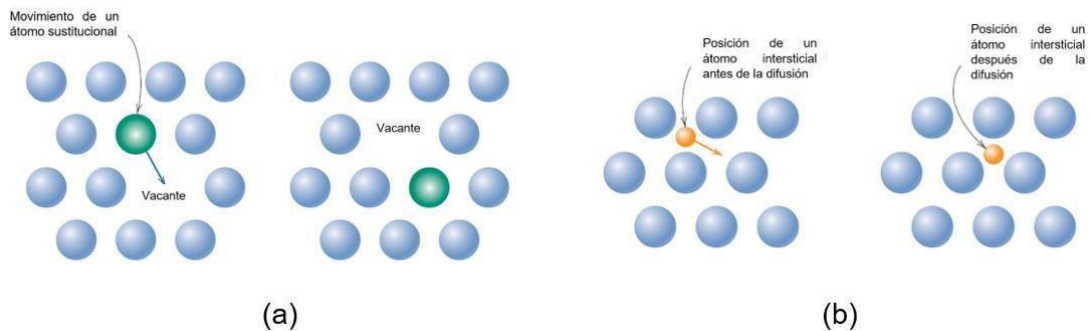


Figura 1.19. Mecanismos de difusión: a) por vacancias, b) intersticial
(Fuente: [6])

1.2.1.2 Nucleación y crecimiento del tamaño de grano

Las transformaciones de fase conllevan la formación de al menos una fase nueva con diferentes características físicas y químicas que la original. La mayoría de las transformaciones de fase empiezan con la formación de numerosos cristales pequeños de nuevas fases que crecen hasta que se finaliza la transformación [6].

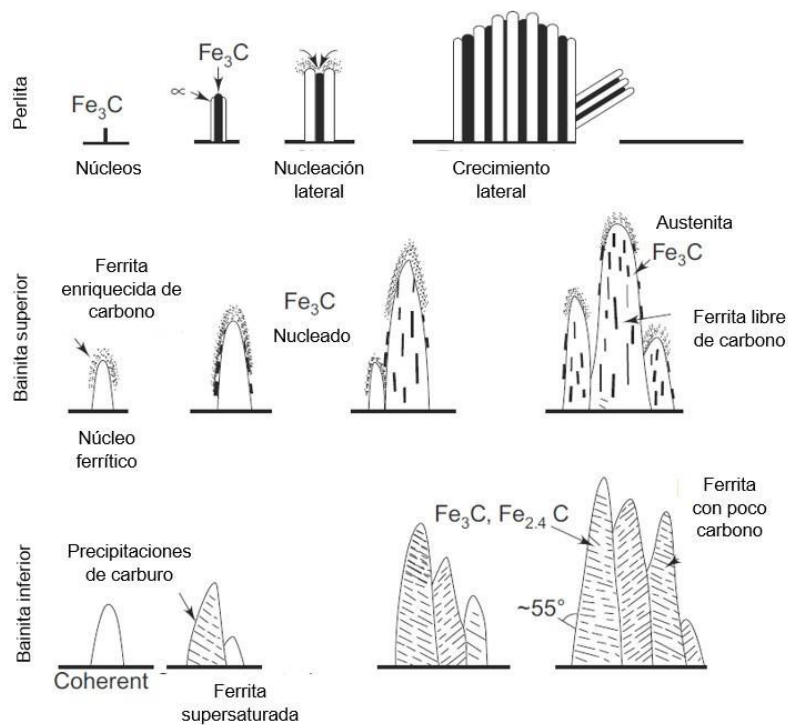


Figura 1.20. Nucleación y crecimiento de grano de la perlita y la bainita superior e inferior
(Fuente: [5])

La nucleación puede definirse como la aparición de partículas muy pequeñas (núcleos) que son capaces de crecer. Las transformaciones de fase en el acero ocurren por procesos de nucleación de cristales y su posterior crecimiento. Por ejemplo, la nucleación de pequeños cristales de carburo de hierro, y su eventual crecimiento, favorecen la formación de perlita. La figura 1.20 muestra los procesos de nucleación y crecimiento de grano de la perlita y la bainita.

Estos procesos dependen completamente de la tasa de enfriamiento, pues es esta la que determina las características morfológicas de las fases resultantes. Si la tasa de enfriamiento es alta, la tasa de nucleación es alta; sin embargo, el crecimiento de grano es limitado, pues no se tiene tiempo suficiente para que ocurra, lo que se traduce en un grano fino. Por otro lado, si la tasa de enfriamiento es baja, el crecimiento de grano es alto y, por lo tanto, se obtienen granos más gruesos [5].

El mecanismo de la nucleación comienza cuando una fase a alta temperatura, como la austenita, se vuelve inestable durante el enfriamiento y comienza a nuclear en una fase que es termodinámicamente estable a temperaturas inferiores, como la ferrita. Una vez que los núcleos se vuelven energéticamente estables y alcanzan una masa crítica, el crecimiento de grano comienza [5]. La nucleación ocurre preferentemente en los bordes de grano de la austenita, las interfases de las inclusiones y áreas densas de dislocaciones, pues son sitios que tienen alta energía interfacial; por lo cual, proveen la energía necesaria para activar la nucleación.

1.2.1.3 Diagramas de Transformación tiempo y temperatura (TTT)

El tiempo y la temperatura son parámetros importantes en la formación de los núcleos y su crecimiento e influyen en su velocidad de transformación. Debido a que varios tipos de transformaciones ocurren en estado sólido, es necesario tener una forma de relacionar las variables de tiempo, temperatura y porcentaje de transformación de una sola vez. Esta función lo cumplen los diagramas TTT, los cuales son propios para cada material [6]. El diagrama TTT para un acero eutectoide (arriba) y un acero hipereutectoide (abajo) pueden observarse en la figura 1.21.

En primer lugar, se puede observar la presencia de la temperatura eutectoide como una línea horizontal por encima de la cual solamente existe austenita. La transformación de austenita a perlita ocurre solamente cuando se tiene una aleación superenfriada debajo del punto eutectoide [6]. El diagrama también muestra las curvas de los tiempos requeridos para el inicio y fin de la transformación perlítica. A la derecha de la curva de inicio existe

solamente austenita, mientras que detrás de la línea de finalización, existe solamente perlita. Por otra parte, en el espacio entre la línea de inicio y fin de transformación, existe una mezcla de las dos estructuras, pues la austenita se encuentra en el proceso de transformación a perlita. El diagrama TTT para aceros hipo e hipereutectoides tienen curvas adicionales, pues deben tomarse en cuenta la formación de ferrita y cementita proeutectoide, respectivamente.

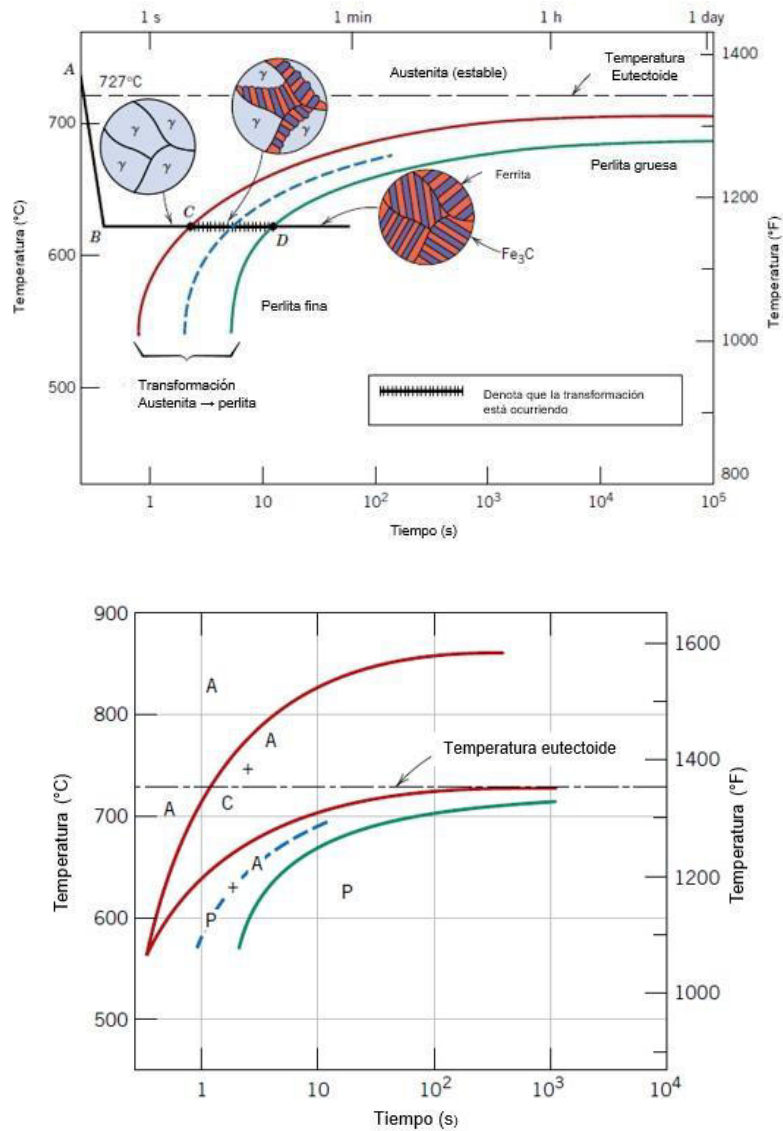


Figura 1.21. Diagrama TTT para un acero eutectoide y un acero hipereutectoides (Fuente: [6])

1.2.1.4 Diagramas de Transformación de enfriamiento Continuo (CCT)

Los diagramas TTT no son los más prácticos al momento de realizar un tratamiento térmico, pues la mayoría de los tratamientos térmicos involucran enfriamientos continuos que

ocurren a temperatura ambiente y causan un cambio de temperatura. Debido a esa condición, los diagramas TTT deben modificarse para usarse con temperaturas que cambian constantemente. Estos diagramas modificados se denominan Diagramas de Transformación con Enfriamiento continuo (CCT) [6]. La figura 1.22 muestra un diagrama CCT para un acero aleado.

Sobre el diagrama CCT de la figura 1.22 se pueden observar varias curvas de superenfriamiento que indican las tasas de enfriamiento crítico, la aparición de la nariz de transformación bainítica y las temperaturas de inicio y fin de la martensita. Además, se pueden observar el comportamiento de la transformación y la microestructura final debido a la influencia de la tasa de enfriamiento.

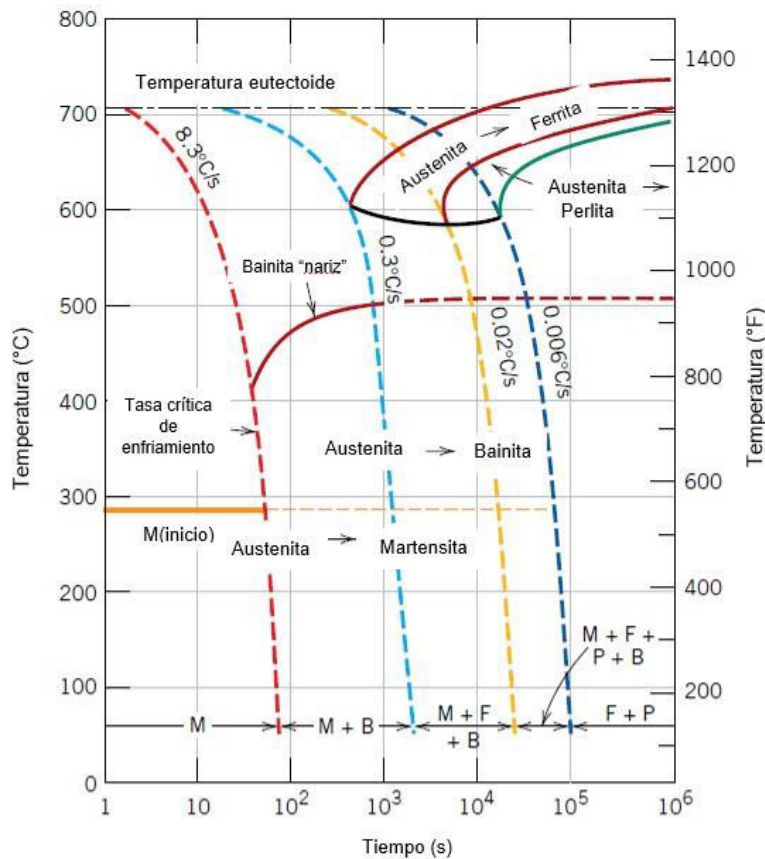


Figura 1.22. Diagrama de Transformación con Enfriamiento Continuo
(Fuente: [6])

1.2.2 Tratamiento térmico de recocido

El tratamiento térmico de recocido es un proceso de calentamiento y enfriamiento controlado con el fin de cambiar la estructura del material sin alterar su composición química. Para aceros hipoeutectoides, como es el caso del acero ASTM A36 y ASTM A572

GR50, el recocido se lleva a cabo calentando el material por encima de la temperatura crítica A3; luego, se mantiene en el horno por un periodo de tiempo; y, finalmente, se enfría dentro del horno o en un área cerrada [5]. La figura 1.23 muestra el rango de temperaturas para realizar el recocido.

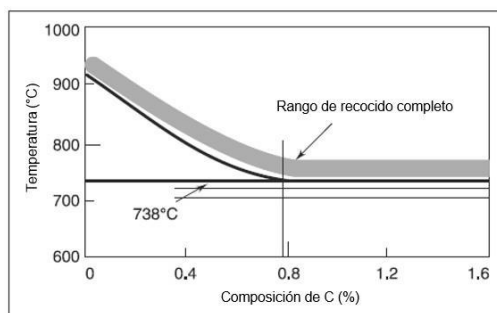


Figura 1.23. Rango de temperatura del proceso de recocido completo
(Fuente: [5])

La finalidad del recocido es la de homogeneizar y suavizar la estructura del acero, es decir, disminuir su dureza mediante la formación de perlita. Esta transformación se aplica mucho para facilitar el mecanizado, mantener estabilidad dimensional e incrementar la ductilidad del material [19]. El recocido es una transformación isotérmica que puede diseñarse mediante el uso de diagramas TTT como se indica en la figura 1.24.

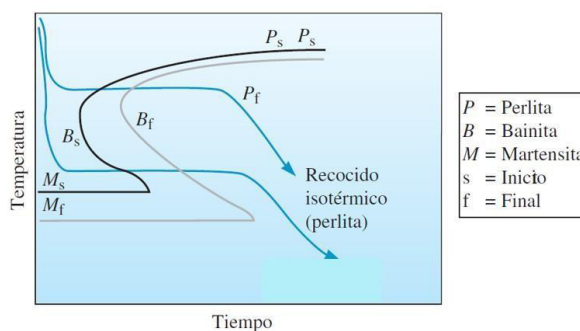


Figura 1.24. Recocido de un acero 1080
(Fuente: [7])

Entre los tipos de recocido más importantes se tiene: en primer lugar, el recocido completo, el cual permite suavizar el material por medio de la producción de granos gruesos de ferrita y espacios anchos en la estructura perlítica; el segundo corresponde a un recocido subcrítico que logra cumplir su objetivo por medio de la esferoidización de la estructura perlítica [5].

El recocido completo se lleva a cabo en tres pasos: el primero, denominado recuperación, donde se eliminan esfuerzos remanentes de procesos de manufactura precedentes; el

segundo, corresponde al periodo de recristalización, donde granos nuevos son creados debido a la energía remanente; y el tercero corresponde al crecimiento de los granos que nuclearon en el paso dos. Puede aplicarse en piezas que se han forjado, rolado o fundido. También, es utilizado para acondicionar la estructura y las propiedades en aceros inoxidables [5].

La temperatura para el recocido completo se encuentra en el rango de 750 a 1050°C, pues se requiere que esta sea suficiente para completar el proceso de austenización y homogeneización de los granos. La figura 1.25 muestra el cambio de propiedades mecánicas y de la microestructura en función de la temperatura de recocido.

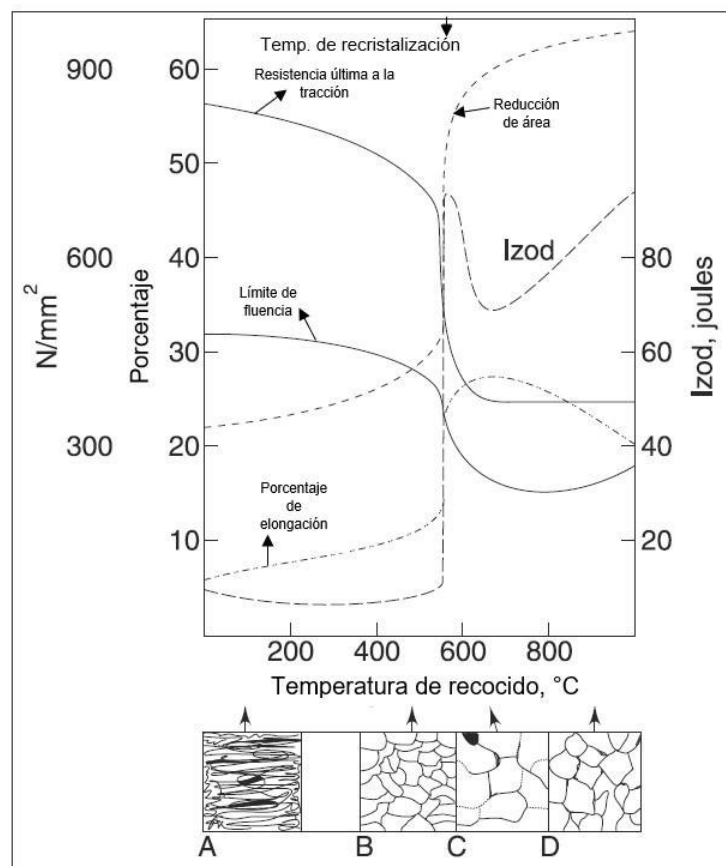


Figura 1.25. Efecto de la temperatura de recocido en la microestructura y las propiedades mecánicas
(Fuente: [5])

Sin embargo, llevar el acero a tan altas temperaturas conlleva consecuencias negativas como son la fundición de los bordes de grano. Los bordes de grano representan zonas de segregación de impurezas que pueden tener puntos de fusión menor que los del acero, lo cual provoca que sean fundidos a temperaturas menores, fragilizando el material. Debido a estos problemas, se prefiere realizar los tratamientos térmicos de recocido subcrítico, de

proceso, de recristalización y el de recuperación; todos ellos a temperaturas por debajo de la línea A1 [5].

1.2.3 Tratamiento térmico de temple

El temple es un tratamiento térmico que permite endurecer la superficie del acero. Este proceso se lleva a cabo calentando el material hasta una temperatura superior a la línea A_{13} , manteniéndolo por un periodo de tiempo que permita la austenización completa, y después enfriándolo rápidamente con el fin de obtener la mayor cantidad de martensita posible [6].

A diferencia del recocido, los procesos de temple se realizan en basándose en el diagrama CCT, pues es un proceso fuera del equilibrio, cuya tasa de enfriamiento depende del medio utilizado (agua, aceite, polímeros, etc.). Además del tiempo, el diagrama CCT permite observar las variables más importantes del temple como son la temperatura de austenización, la temperatura de inicio y fin de la martensita, las narices bainítica y perlítica y las tasas de enfriamiento para diferentes medios.

Además, el temple es un proceso que permite obtener un gradiente de durezas a lo largo del material; pues, debido a la relativamente baja conductividad térmica del acero, la tasa de enfriamiento disminuye conforme se llega al centro del material, creando también un perfil de microestructuras. Teóricamente, la superficie tiene una tasa de enfriamiento elevada, por lo cual se crea martensita; el área entre la superficie y el centro se enfría moderadamente, obteniéndose bainita; y el centro de material se enfría con una tasa baja de enfriamiento, lo cual podría dar lugar a perlita.

La figura 1.26 muestra el gradiente de dureza y de microestructuras para un acero eutectoide obtenida mediante el ensayo Jominy. De ser necesaria la estructura martensítica incluso en el centro del material, el acero debe contener una cantidad considerable de aleantes que permitan desplazar las narices perlítica y bainítica, en el diagrama CCT, lo más a la derecha posible; o, a su vez, utilizar un medio de enfriamiento que tenga una tasa extremadamente alta de enfriamiento, lo cual en la práctica no es tan sencillo de obtener.

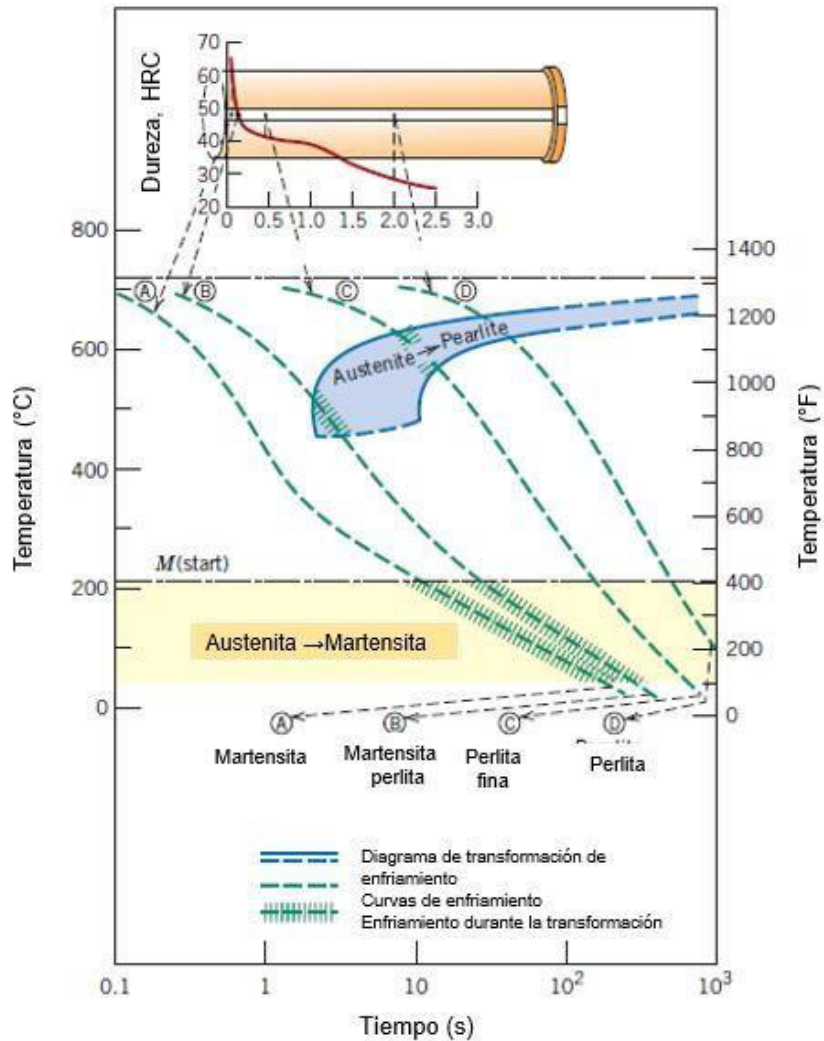


Figura 1.26. Gradiente de durezas y microestructuras en un proceso de temple
(Fuente: [6])

El temple involucra la austenización del acero a temperaturas altas y su posterior enfriamiento rápido con el fin de obtener martensita, evitando la formación de cualquier estructura más blanda como la ferrita o la perlita [5]. Con este fin, el enfriamiento es la clave del éxito para el endurecimiento. Sin embargo, en la práctica, no es posible obtener una estructura que sea 100% martensítica, pues un porcentaje de material queda en forma de austenita retenida. Esta condición se puede verificar en la figura 1.27 donde se puede observar la micrografía de la estructura martensítica (granos en forma de agujas) y la austenita retenida que no se transformó en martensita (regiones blancas).



Figura 1.27. Estructura martensítica después del temple
(Fuente: [6])

1.2.3.1 Mecanismos de remoción del calor

Durante el temple, el calor es removido de la pieza durante tres etapas. La primera etapa se caracteriza por la creación de una cortina de vapor que evita el contacto directo de la pieza con el medio de enfriamiento, disminuyendo la tasa de enfriamiento y donde el calor es removido por conducción. La segunda etapa, por otro lado, se caracteriza la ebullición aparente del medio de enfriamiento con una tasa de enfriamiento mayor con respecto a la primera; mientras mayor sea la tasa de enfriamiento en esta etapa, más efectivo será el temple. La figura 1.28 esquematiza las tres etapas de remoción del calor que presenta el proceso de temple.

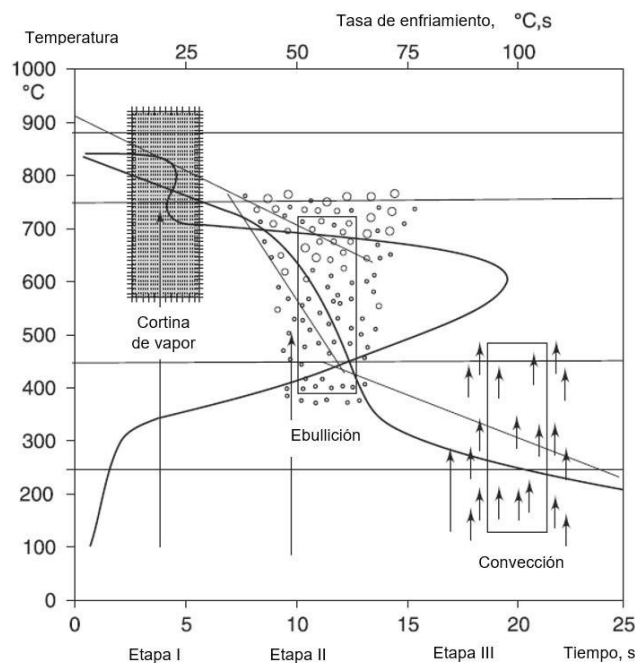


Figura 1.28. Mecanismos de remoción de calor durante el temple
(Fuente: [5])

La tercera etapa es un proceso donde el calor es removido por medio de convección, con tasas de enfriamiento necesariamente bajas, con el fin de disminuir el choque térmico durante la formación de la martensita y, por ende, esfuerzos residuales y posibles distorsiones o agrietamientos [5].

El medio de enfriamiento es un tema importante al momento de hablar de los mecanismos de remoción del calor, pues de estos depende las velocidades de enfriamiento de cada una de las etapas. La figura 1.29 muestra un diagrama de transformación tiempo y temperatura con diferentes medios de enfriamiento. Por ejemplo, el agua y sus soluciones permiten tener una tasa de enfriamiento rápida; sin embargo, conlleva el problema de agrietamiento, distorsión de la pieza y, por lo tanto, se sugiere usarlo solo en aceros simples, con geometrías sencillas.

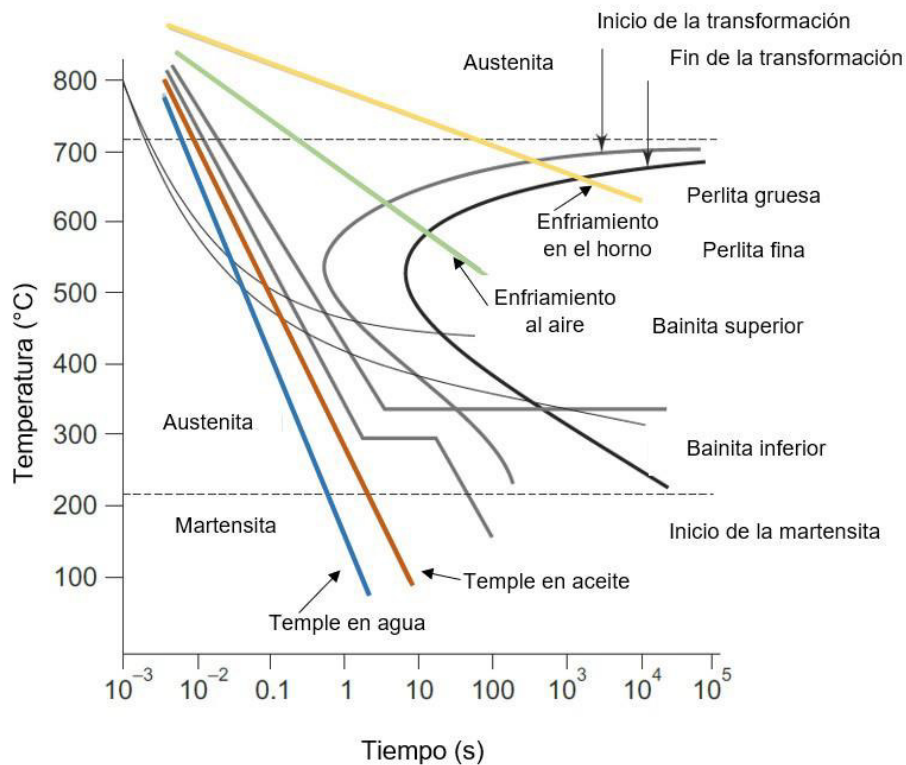


Figura 1.29. Diagrama TTT con diferentes medios de enfriamiento (Fuente: [5])

El medio de enfriamiento es el que proporciona la velocidad con la que una pieza tratada térmicamente es enfriada. Como se había mencionado con anterioridad, la velocidad de enfriamiento desde la región austenítica es la que determina la microestructura final de un material. A continuación, la tabla 1.6 resume la influencia de los medios de enfriamiento en la microestructura final que presenta un acero.

Tabla 1.6. Influencia de las condiciones de enfriamiento en la microestructura

Microestructura	Condición para el enfriamiento	Morfología de la microestructura
Ferrita	Enfriamiento en equilibrio como el enfriamiento en el horno o al aire.	Granos gruesos si se enfría dentro del horno y granos finos si se enfría al aire.
Perlita	Enfriamiento en el horno (equilibrio)	Láminas de ferrita y perlita con espaciamiento pequeño.
Bainita superior	Enfriamiento rápido hasta alcanzar la nariz perlítica, y luego enfriada isotérmicamente.	Ferrita en forma de plumas con precipitados de carbono en los bordes de grano, preferentemente.
Bainita inferior	Enfriamiento rápido hasta por debajo de la nariz perlítica, y luego enfriada isotérmicamente o bajo enfriamiento continuo.	Granos de ferrita acicular con precipitados de carburos a lo largo de toda la matriz, similar a la martensita revenida.
Martensita	Enfriamiento lo suficientemente rápido como para evitar el choque con la nariz bainítica, asegurando la entrada directa en la zona martensítica, como en el caso del temple y el aceite en la figura 1.30.	Ferrita en forma de agujas con zonas densamente distorsionadas y sin la presencia de carburos en la matriz (Martensita sin revenir).

(Fuente: [5])

1.2.3.2 Templabilidad del acero

La templabilidad del acero es la capacidad que tiene para endurecerse a profundidad durante tratamiento térmico de temple. Cuando se temple un acero, la velocidad de enfriamiento es alta en la superficie y disminuye hacia el centro, formando un gradiente de durezas a lo largo de la pieza, como se ilustró en la figura 1.26.

El ensayo Jominy es uno de los métodos más usados para determinar la templabilidad de un material. Este ensayo estandarizado consiste en el enfriamiento de una probeta de diámetro de 1 pulgada y largo de 4 pulgadas, austenizada, a la cual se rocía un chorro de agua con una cierta presión (referenciada según la norma vigente) en uno de los extremos de la probeta. De esta manera, a lo largo de la probeta, cada punto tendrá una determinada velocidad de enfriamiento y, por lo tanto, se podrán medir valores diferentes de dureza de la probeta [20]. El resultado final del ensayo Jominy es una gráfica de dureza en función de la distancia desde el extremo templado. La figura 1.30 muestra un esquema del ensayo Jominy a la izquierda y las gráficas de dureza versus distancia del extremo templado para varios aceros a la derecha.

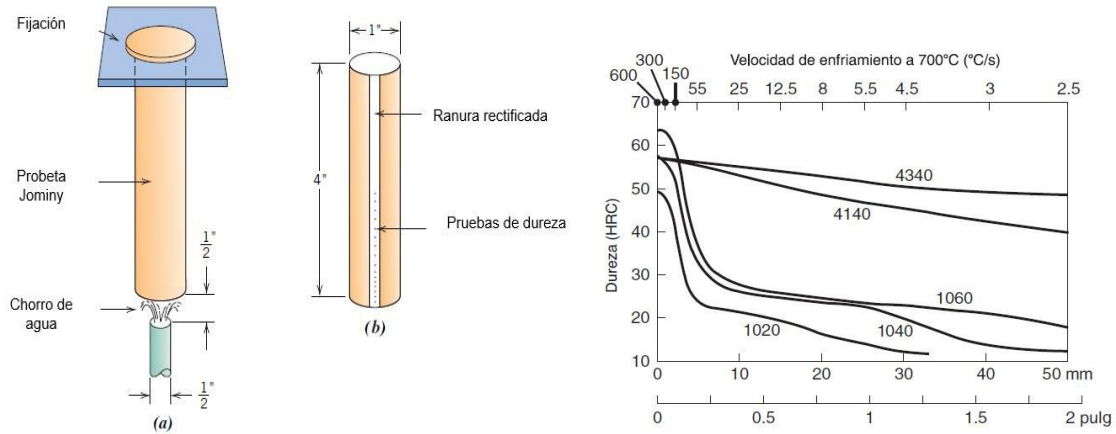


Figura 1.30. Curvas Jominy o de Templabilidad para varios aceros

(Fuente: [20], [6])

1.2.3.3 Problemas que pueden presentarse durante el temple

El temple, al igual que el recocido, presenta problemas durante su desarrollo que son la distorsión y el agrietamiento debido a esfuerzos residuales y la aparición de otras microestructuras diferentes a la martensita.

El primer caso, es decir, el agrietamiento y distorsión, es un fenómeno que ocurre debido a la formación de esfuerzos residuales durante el enfriamiento y ocurre, generalmente, cuando se usa agua como medio de enfriamiento. Para evitar este problema, se puede utilizar otros medios de enfriamiento como polímeros, aceite o agua caliente. También, es imperativo realizar un tratamiento térmico de alivio de esfuerzos residuales con el fin de obtener martensita revenida.

El siguiente problema para afrontar es no producir la cantidad necesaria de martensita durante el temple, pues obtener 100% de martensita a lo largo de toda la pieza requiere de un acero que tenga altísima templabilidad, lo cual no es posible. Una de las formas de incrementar la templabilidad del acero es aumentando la cantidad de carbono y elementos aleantes, lo que conlleva el riesgo de incrementar la formación de grietas y distorsionar el material. En consecuencia, la forma más adecuada de incrementar la templabilidad es eligiendo el correcto medio de enfriamiento [5].

1.2.4 Tratamiento térmico de revenido

El revenido y el alivio de esfuerzos son tratamientos térmicos a temperaturas relativamente bajas, en comparación con el recocido y el temple, que persiguen objetivos diferentes y que son realizados después del temple. Mientras el revenido es usado para restaurar la

tenacidad al impacto del material, el alivio de esfuerzos busca reducir o eliminar posibles esfuerzos residuales que se forman durante el temple y se lleva a cabo a temperaturas no superiores a los 220°C [5]. En la figura 1.31 se puede corroborar que la disminución de esfuerzos residuales requiere bajas temperaturas, pero el incremento de tenacidad requiere temperaturas de revenido mayores.

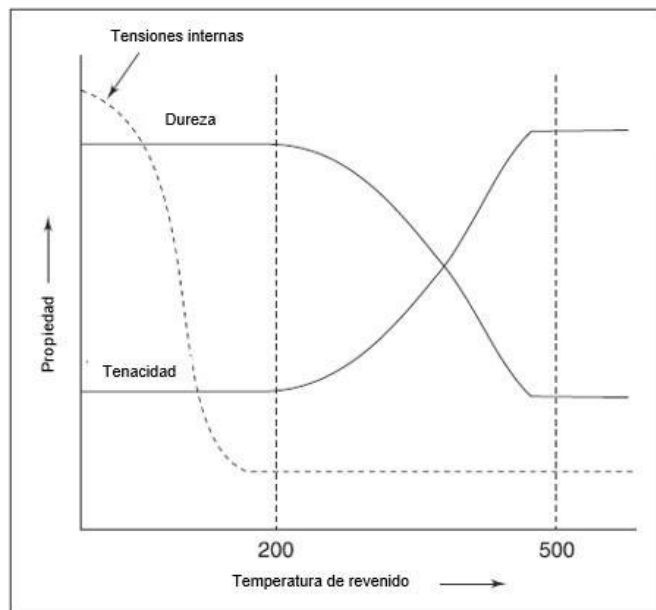


Figura 1.31. Propiedades mecánicas versus temperatura de revenido
(Fuente: [5])

El revenido es un proceso dependiente del tiempo y de la temperatura, pues es un proceso difusivo y se lleva a cabo a temperaturas mucho menores a las de la línea $\diamond\diamond_1$, entre 200 y 650°C debido a no se requiere un cambio microestructural, sino recuperar la tenacidad al impacto que el material pierde por la fragilización del material durante la formación de martensita durante el temple [5].

En este proceso, la martensita primero es liberada de esfuerzos residuales y, posteriormente, precipitan fases transicionales como el $\diamond\diamond_{2,4}C$ debido al incremento de la movilidad de los átomos de carbono en la celda unitaria del hierro. Finalmente, con el aumentar de la temperatura, una mayor cantidad de carbón sale de la estructura martensítica, formando carburos completamente regulares, entre ellos el $\diamond\diamond_3C$. La estructura que se obtiene después del revenido se conoce como martensita revenida, la cual consta de una estructura ferrítica en forma de agujas con precipitados de carburos a lo largo de toda la matriz [5].

La figura 1.32 muestra los cambios microestructurales de la martensita con el cambio de la temperatura de revenido. La primera imagen muestra la estructura de agujas de la martensita templada; la segunda, la formación de carburos de transición, los cuales se forman en un rango de temperaturas entre 100 y 200°C; entre 200 y 300°C, ocurre la precipitación de carburos normales; finalmente, la última imagen muestra carburos esferoidizados dentro o fuera de los bordes de grano, lo cual ocurre entre 400 y 650°C.

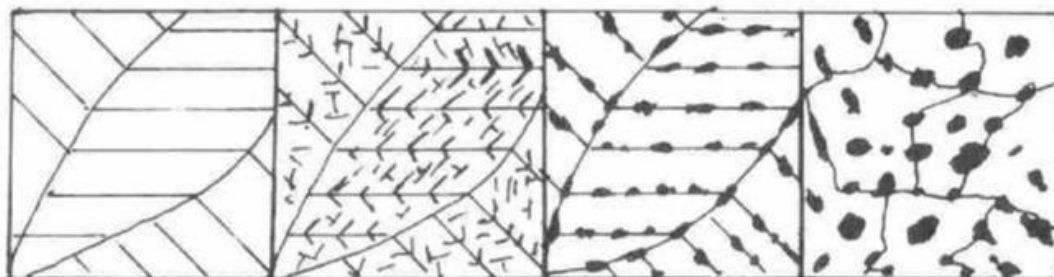


Figura 1.32. Evolución de la martensita revenida en función de la temperatura de revenido
(Fuente: [5])

Luego de haberse templado una pieza, el revenido debe llevarse a cabo tan pronto como sea posible con el fin de evitar el agrietamiento y la distorsión debido a los esfuerzos residuales. Este proceso permite disminuir la fragilidad que presenta la martensita después de haber sido templada. El agrietamiento es una tendencia natural de un cuerpo para disminuir sus esfuerzos internos, pues es un mecanismo para liberar esfuerzos almacenados y es más notorio en aceros aleados; por lo cual se recomienda que el revenido sea llevado a cabo tan pronto como sea posible. La formación de grietas es un mecanismo natural de los materiales para auto aliviar esfuerzos residuales y puede ocurrir incluso a temperatura ambiente [5].

1.2.4.1 Fragilidad por revenido

Teóricamente, la temperatura mínima para el revenido debe estar por encima de la temperatura de inicio de la martensita. Sin embargo, es necesario que sea llevado a cabo con mucho cuidado para poder prevenir problemas posteriores como la fragilidad por revenido.

Durante el revenido pueden producirse dos tipos de fragilidad, la fragilidad por revenido y la fragilidad azul. La fragilidad por revenido afecta a aceros simples y aleados que han sido enfriados lentamente desde temperaturas mayores a 575°C o mantenidos dentro del horno (entre 450 y 650°C) por tiempos excesivos; sin embargo, puede ser revertido calentándolo por encima de 575°C y enfriándolos rápidamente. El segundo tipo, es de carácter no

reversible y ocurre en un rango de temperaturas de 250 a 400°C; puede ser evitado manteniendo la pieza por periodos cortos de revenido.

La fragilidad azul es provocada por la precipitación de carburos durante la descomposición de la martensita en forma de películas en los bordes de grano. Por otro lado, la fragilidad por revenido a altas temperaturas podría deberse a la segregación de impurezas en los bordes de grano. La figura 1.33 ilustra la caída de la tenacidad al impacto entre los rangos de temperatura donde se fragiliza el material debido a procesos de revenido.

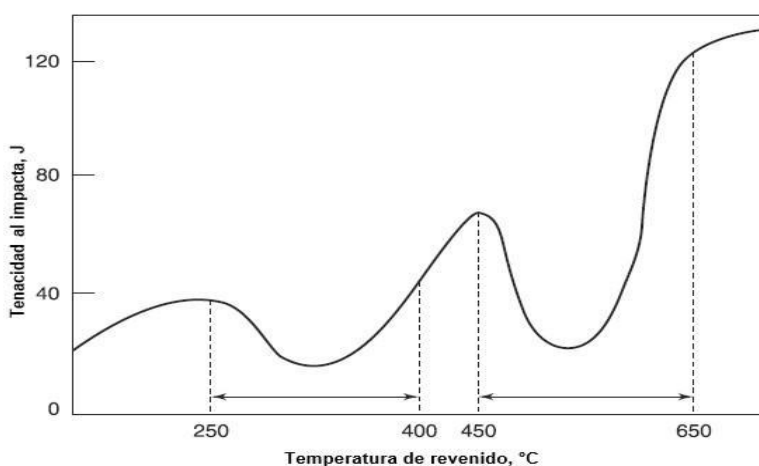


Figura 1.33. Evolución de la martensita revenida en función de la temperatura (Fuente: [5])

1.2.5 Descarburación del acero a altas temperaturas

Los principales problemas con el que se tiene que lidiar al realizar tratamientos térmicos es la descarburación de la superficie y la oxidación del material debido a las altas temperaturas de trabajo. La oxidación del acero comienza cuando el acero reacciona con el oxígeno del aire, formando películas de óxido en la superficie del material y provocando su desprendimiento en forma de capas, causando su deterioro [5]. Mientras mayor es el tiempo y la temperatura, mayor es el deterioro de la calidad superficial del acero. También, La oxidación limita la transferencia del calor entre el horno y la pieza, y favorece la descarburación del material, dejando zonas con menor dureza a lo largo de este.

La descarburación de la superficie del material es perjudicial para la resistencia al desgaste y a la fatiga del material y puede ser parcial o total. Es muy peligroso en procesos de endurecimiento como el temple debido a que la superficie no presenta carbono, lo cual no permite la formación de martensita en la superficie [5]. La figura 1.34 ilustra una capa descarburada de acero.

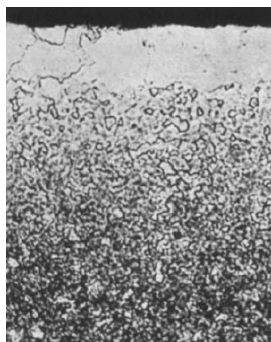


Figura 1.34. Superficie descarburada de una cero de medio carbono
(Fuente: [5])

Por esta razón, es una actividad crítica el controlar la atmosfera del horno para evitar este problema. La atmósfera puede controlarse proveyendo una atmosfera protectora en altas temperaturas, mejorando la transferencia de calor hacia las piezas, suministrando una fuente adicional que proteja la superficie como la viruta de acero que será la primera a perder el carbón superficial o mejorando el acabado superficial de las piezas.

1.3 Estudios previos

Los tratamientos térmicos en aceros de bajo contenido de carbono y de baja aleación han sido estudiados poco en los últimos años, por lo cual esta información es limitada. La información encontrada se basa en su mayoría en aceros de medio contenido de carbono y para propiedades como el límite de fluencia y la resistencia última, mas no para otras propiedades como el porcentaje de elongación o la tenacidad.

De acuerdo con el Journal of Material Science & Engineering en su artículo Análisis del comportamiento y el cambio microestructural del acero ASTM A36 aplicando varios tratamientos térmicos, se realizaron diferentes tratamientos térmicos en probetas de acero A36 [21]. La tabla 1.7 muestra un resumen de los procesos que se llevaron a cabo en cada tratamiento, mientras que la tabla 1.8 muestra los resultados de dicha investigación.

Tabla 1.7. Condiciones de cada tratamiento térmico realizado por el Journal of material Science and Engineering

Condición	Recocido	Normalizado	Endurecimiento	Revenido
Temperatura, °C	910	910	910	450
Tiempo de permanencia, min	70	70	30	70
Medio de enfriamiento	ceniza	Aire	agua	Aire

(Fuente: [21])

Tabla 1.8. Resultados de la investigación del Journal of material Science and Engineering

Propiedades mecánicas					
Tratamiento térmico	Resistencia a la tracción (MPa)	Dureza (BHN)	Porcentaje de elongación (%)	Límite de fluencia (MPa)	Módulo de Young (GPa)
Sin tratar	402,45	69,8	23,16	220,03	207,88
Recocido	389,34	62,15	25,22	212,54	302,32
Normalizado	452,13	120,36	22,7	242,26	288,12
Endurecimiento	734,32	293,4	6,9	278,11	632,47
Revenido	421,76	100,1	23,2	232,78	293,63

(Fuente: [21])

Por otro lado, en 2015, Esam y Ventakesh [22] estudiaron el efecto de la temperatura y el régimen de enfriamiento en las propiedades mecánicas del acero de alta resistencia y baja aleación ASTM A572. Las temperaturas en el análisis utilizadas en el estudio de la prueba de tensión a altas temperaturas fueron de 20°C, 400°C, 500°C, 600°C y 800°C y se calentaron con una tasa de 10 °C/min durante 30 minutos. Por otro lado, también se estudiaron los esfuerzos residuales del material a las mismas temperaturas y adicionalmente a 1000°C. El tiempo de permanencia fue de 2 horas y se usó aire y agua como medios de enfriamiento. A continuación, las tablas 1.9 y 1.10 muestran un resumen importante de las propiedades obtenidas para el enfriamiento en aire y en agua, respectivamente.

Tabla 1.9. Propiedades obtenidas después del enfriamiento en aire del trabajo de Esam y Ventakesh

Temperatura	Límite de fluencia	Resistencia a la tracción	Porcentaje de elongación
20	452,5	534,7	8,2
400	477,9	507,8	5,6
500	465,9	522,3	6,5
600	452,3	513,5	5,7
700	325,5	449,1	6,1
800	272,8	374,2	9,3
1000	204,0	324,5	11,3

(Fuente: [22])

Tabla 1.10. Propiedades obtenidas después del enfriamiento en agua del trabajo de Esam y Ventakesh

Temperatura (°C)	Límite de fluencia (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	Porcentaje de elongación (%)
20	486,5	562,5	7,0
200	504,3	545,5	4,7
400	507,5	550,1	6,0
500	465,7	521,9	6,5
600	460,8	527,8	3,4
700	414,1	522,5	6,5
800	360,6	536,9	3,9
1000	447,2	568,6	3,4

(Fuente: [22])

En cambio, en el estudio acerca del efecto de los tratamientos térmicos en aceros de bajo carbono [23], se realizaron tratamientos térmicos en un acero AISI 1020 con el fin de analizar el cambio en la dureza del material, el acero en cuestión tiene un porcentaje de carbono de 0.2, igual que el acero ASTM A36 utilizado en este trabajo. Las temperaturas de operación estuvieron en el rango de 850 a 900°C por dos horas y enfriados diferentemente. Los resultados de esta investigación se presentan en la tabla 1.11.

Tabla 1.11. Efectos de los tratamientos térmicos en la dureza del acero AISI 1020

Tratamiento térmico	Dureza antes del tratamiento	Dureza después del tratamiento
Recocido	106	129
Temple	106	427
Normalizado	106	156

(Fuente: [23])

Por otro lado, un estudio acerca del efecto de los tratamientos térmicos en las propiedades mecánicas de aceros de medio carbono fue llevado a cabo por Senthikumar y Ajiboye en 2012 [24]. En este caso, un acero con 0.30% de carbono se empleó para la realización de tratamientos térmicos de recocido, normalizado y temple en agua y revenido. La tabla 1.12 muestra las condiciones de trabajo para cada tratamiento y la tabla 1.13 muestra los resultados obtenidos en esta investigación. También, la figura 1.35 y 1.36 muestran las diferencias obtenidas entre las curvas esfuerzo deformación para cada uno de estos procesos.

Tabla 1.12. Condiciones de cada tratamiento térmico de la investigación de Senthikumar y Ajiboye

Condición	Recocido	Normalizado	Endurecimiento	Revenido
Temperatura, °C	870	850	850	350
Tiempo de permanencia, min	60	120	120	-
Medio de enfriamiento	horno	aire	agua	aire

(Fuente: [24])

Tabla 1.13. Resultados de la investigación de Senthikumar y Ajiboye

Tratamiento térmico	Límite de fluencia (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)
Recocido	270	410
Normalizado	330	460
Endurecimiento	650	610
Revenido	440	700

(Fuente: [24])

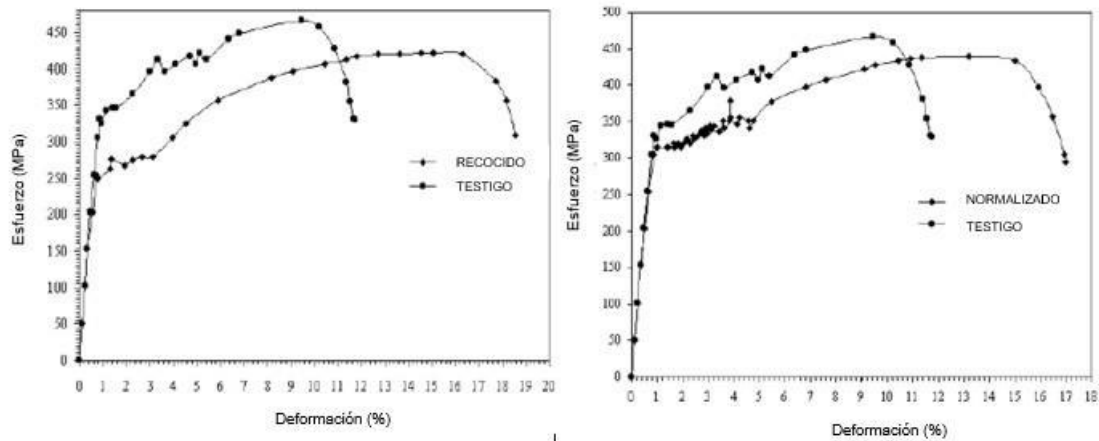


Figura 1.35. Curvas esfuerzo deformación obtenidas para el recocido y el normalizado de la investigación de Senthikumar y Ajiboye

(Fuente: [24])

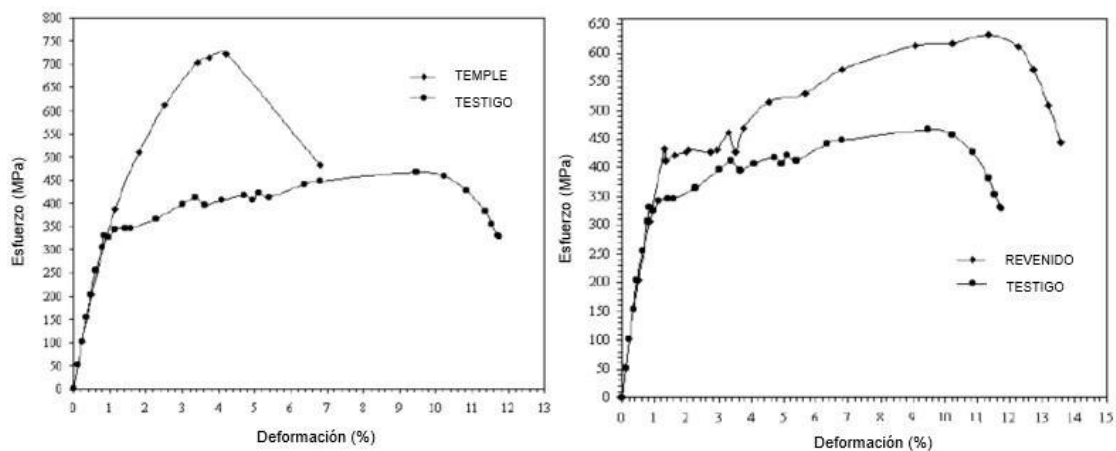


Figura 1.36. Curvas esfuerzo deformación obtenidas para el temple y el recocido de la investigación de Senthikumar y Ajiboye

(Fuente: [24])

Finalmente, en un estudio acerca de las propiedades mecánicas en aceros dulces (bajo contenido de carbono) [25], se utilizó el acero ASTM A36 para comprobar el efecto del temple sobre este tipo de aceros. La temperatura empleada en el proceso fue de 800°C con enfriamiento en salmuera (90% agua y 10% sal). La tabla 1.14 muestra el cambio de las propiedades mecánicas después de este proceso.

Tabla 1.14. Propiedades obtenidas después del temple

Propiedades mecánicas	Antes del temple	Después del temple
Resistencia a la tracción (MPa)	450	325
Límite de fluencia (MPa)	250	200
Módulo de elasticidad (MPa)	210	190
Módulo de volumen (GPa)	140	98
Módulo cortante (GPa)	79,3	39
Coefficiente de Poisson	0,266	0,26
Porcentaje de elongación (%)	23	14
Dureza (HRC)	63	67

(Fuente: [25])

2 METODOLOGÍA

El presente apartado detalla los pasos que se llevaron a cabo para poder tratar térmicamente los aceros ASTM A36 y ASTM A572 GR50 y caracterizar sus propiedades mecánicas después de cada tratamiento, las cuales fueron la base para poder comparar las ventajas y desventajas entre los tratamientos térmicos de recocido, temple y revenido. El siguiente procedimiento fue adecuado a partir de la metodología descrita por William Bryson en su obra 'Heat Treatment, Master control Manual' [17].

2.1 Realización de los tratamientos térmicos de recocido, temple y revenido

En esta sección se describe el procedimiento que se siguió para la obtención de probetas recocidas, templadas y revenidas. También, se detallan los valores de las temperaturas y tiempos de permanencia dentro de la mufla, los materiales y los equipos que se utilizaron.

2.1.1 Extracción de las probetas a partir del material base

Las probetas utilizadas en el presente trabajo se extrajeron de placas de acero ASTM A36 y ASTM A572 GR50, adquiridas en DIPAC S.A y KUBIEC-CONDUIT S.A, respectivamente, y cuyos certificados de calidad pueden visualizarse en el anexo I. La figura 2.1 muestra las placas de acero de donde se extrajeron las probetas; en la izquierda, se pueden visualizar las probetas de acero ASTM A36 y, en la derecha, las de acero ASTM A572 GR50.



Figura 2.1. Placas de acero de donde se extrajeron las probetas
(Fuente: propia)

Las probetas se extrajeron en el Laboratorio de máquinas y herramientas de la Escuela Politécnica Nacional, según las especificaciones de las normas bajo las cuales se realizó la caracterización. De esta manera, las probetas para ensayo de tracción se obtuvieron con base en la norma ASTM E8-18 (Métodos de prueba estándar para ensayos de tracción de

materiales metálicos), la cual especifica que su geometría y dimensiones son las presentadas en la figura 2.2 y en la tabla 2.1, respectivamente.

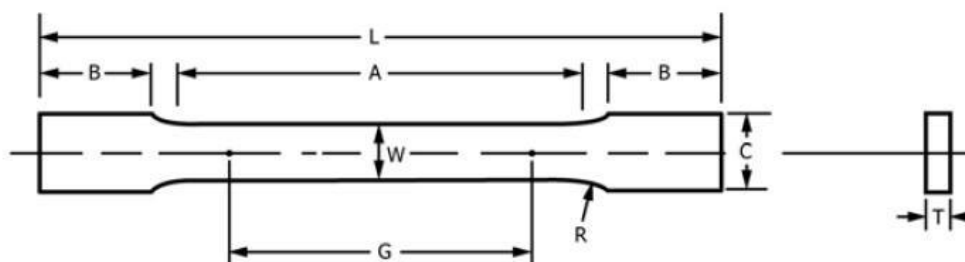


Figura 2.2. Medidas de las probetas para el ensayo de tracción

(Fuente: [26])

Tabla 2.1. Medidas para las probetas del ensayo de tracción

Dimensión	Símbolo	Medida [mm]
Longitud libre	G	$50 \pm 0,1$
Ancho	W	$12,5 \pm 0,2$
Espesor	T	6
Radio de filete mínimo	R	12,5
Longitud total	L	250
Longitud de la sección reducida paralela	A	57
Longitud de la sección de agarre	B	75
Ancho de la sección de agarre	C	20

(Fuente: [26])

Por otro lado, las probetas para ensayo Charpy se extrajeron con base en la norma ASTM E23-18 (Métodos estándar de pruebas para ensayos de impacto en probetas con muesca de materiales metálicos), la cual especifica que su geometría y dimensiones son las que se observan en la figura 2.3 y en la tabla 2.2, respectivamente. Cabe mencionar que, según esta norma, la muesca debe realizarse posterior al tratamiento térmico, por lo cual inicialmente, solo se realizaron probetas en forma de prisma rectangular de 10x10x55 mm.

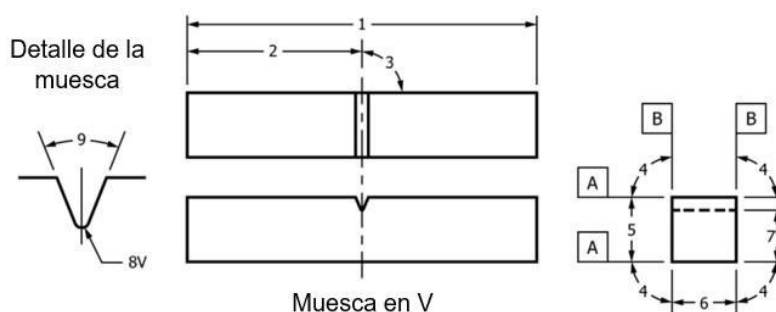


Figura 2.3. Principales probetas para el Ensayo Charpy

(Fuente: [27])

Tabla 2.2. Dimensiones de las probetas para el Ensayo Charpy.

ID	Descripción	Dimensiones
1	Longitud de la probeta	55
2	Centro del entalle	27,5
3	Longitud del entalle con respecto al origen	90°
4	Ángulos laterales adyacentes	90°
5	Ancho	10
6	Espesor	10
7V	Longitud del ligamento	8
7U	Longitud del ligamento	5
8V	Radio del entalle	0,25
9	Ángulo del entalle	45°

(Fuente: [27])

Para el ensayo de dureza, se eligieron probetas de 30x10x6 mm, pues la norma ASTM E18 (Métodos estándar de pruebas para dureza Rockwell en materiales metálicos) no especifica dimensiones. La figura 2.4 muestra el conjunto principal de probetas que se extrajeron del material base.



Figura 2.4. Probetas extraídas del material base

(Fuente: propia)

Se realizaron muestras de 5 probetas para poder corroborar estadísticamente los cambios de propiedades. Las probetas extraídas fueron 120 en total, distribuidas según la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Distribución del número total de probetas extraídas

Ensayo	Probeta								
	Testigo		Recocida		Templada		Templada y revenida		
	A36	A572	A36	A572	A36	A572	A36	A572	
Ensayo de Tracción	5	5	5	5	5	5	5	5	
Ensayo Charpy	5	5	5	5	5	5	5	5	
Ensayo de Dureza	5	5	5	5	5	5	5	5	
Número total de probetas:						120 (60 ASTM A36 y 60 ASTM A572)			

(Fuente: propia)

2.1.2 Preparación de las probetas para su ingreso a la mufla

Una vez obtenidas las probetas del material base, se prepararon para su ingreso a la mufla, para lo cual:

- 1) Se preparó una caja para poder ingresar las probetas a la mufla según la figura 2.5, con el fin de facilitar el ingreso y la salida de las probetas de la mufla. También, se colocaron agarraderas para permitir su manipulación con las pinzas.



Figura 2.5. Elaboración de la caja
(Fuente: propia)

- 2) Después, se puso una base de limalla para evitar la descarburación del acero por la parte inferior, como se aprecia en la figura 2.6.



Figura 2.6. Caja con agarraderas y base de viruta
(Fuente: propia)

- 3) Se Introdujeron las probetas en la caja como se muestra en la figura 2.7.



Figura 2.7. Probetas de dureza introducidas
(Fuente: propia)

- 4) Finalmente, se cubrió completamente las probetas con limalla para evitar la descarbonización en los lados y la parte superior, como se observa en la figura 2.8.



Figura 2.8. Cubrimiento de las probetas con limalla
(Fuente: propia)

2.1.3 Precalentamiento de la mufla

Paralelamente a la preparación de las probetas, se precalentó la mufla hasta una temperatura de 700°C, justo por debajo de la temperatura A_1 . Las líneas A_1 para ambos aceros se calcularon con la ecuación 1.1, dando como resultado $1.0572 \times 10^3 \text{ } ^\circ\text{C} = 716^\circ\text{C}$

y $1.0572 \times 10^3 \text{ } ^\circ\text{C} = 707^\circ\text{C}$. El tiempo de precalentamiento desde que se llegó a la

temperatura de 700°C fue por un tiempo de 10 minutos con una tasa de calentamiento de la mufla de 20 °C/min. Las tasas de calentamiento se calcularon asumiendo una variación lineal, como la variación de la temperatura respecto a la variación del tiempo.

2.1.3.1 Equipos

Para la realización de los tratamientos térmicos, se utilizó la mufla presente en el Laboratorio de Conformado mecánico, y sus especificaciones técnicas se pueden observar en la tabla 2.4. También, se usó un termómetro digital que permitió controlar la temperatura y sus especificaciones técnicas se muestran en la tabla 2.5.

Tabla 2.4. Características técnicas de la mufla

	Valores	Equipo
Fabricante	Linderberg	
Modelo	51828	
Potencia	5600 watts	
Voltaje	240 voltios	
Amperaje	20 amperios	
Frecuencia	50-60 Hercios	



Rango de temperaturas	100-1000°C	
------------------------------	------------	--

(Fuente: propia)

Tabla 2.5. Características técnicas del termómetro digital

	Valores	Equipo
Fabricante	Fluke	
Modelo	54 II	
Termocuplas	J (-210°C a 1200°C), K (-200°C a 1372°C), T (-250°C a 400°C), E (-150°C a 1000°C), R y S (0°C a 1767°C), N (-200°C a 1300°C)	
Lectura	°C, °F y K	
Baterías	3 baterías AAA, duración de 1000 horas	
Resolución de pantalla	0.1°C, 0.1K<1000	
Exactitud de temperatura	Tipo J, K, T, E y N: $\pm [0.05\% + 0,3^\circ\text{C}]$	
Tamaño	173x86x38 mm	
Peso	400 g	

(Fuente: propia)

2.1.4 Elevación de la temperatura hasta la austenización

En primer lugar, las probetas se introdujeron en la mufla con la ayuda de equipo de protección personal como pinzas de acero, guantes, mandil y gafas. La figura 2.9 muestra el equipo de seguridad que se utilizó para introducir y retirar las probetas de la mufla.

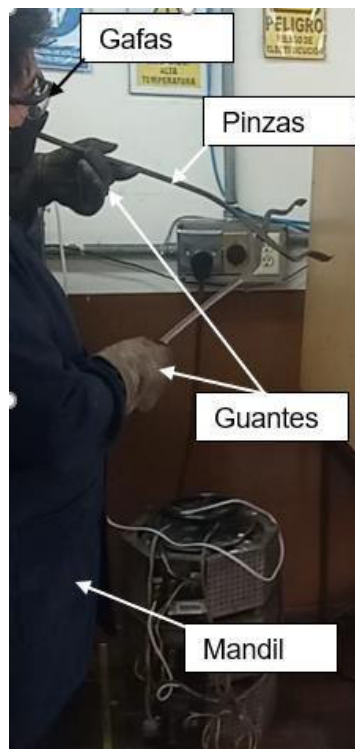


Figura 2.9. Equipo de protección personal

(Fuente: propia)

Acto seguido, se elevó la temperatura hasta 900°C, temperatura de austenización. Las temperaturas A_3 para el acero ASTM A36 y ASTM A572 GR50, de acuerdo con la ecuación 1.2, son de 825°C y 795°C, respectivamente. Por esta razón, 900°C es un valor que asegura la austenización de ambos aceros. Además, esta temperatura se usó sea para los procesos de recocido que para los de temple.

Finalmente, se mantuvieron las probetas en la mufla según los tiempos especificados en la tabla 2.6. Los tiempos de permanencia difieren debido a que se tratan de volúmenes diferentes de material. Cabe recordar que mientras mayor sea el tiempo de austenización, mayor es el tamaño del grano de austenita que se produce.

Tabla 2.6. Tiempo de permanencia

Probeta	Tiempo de permanencia a 900°C
Ensayo de Tracción	4 horas
Ensayo Charpy	2,5 horas
Ensayo de dureza	2,5 horas

(Fuente: [28])

2.1.5 Enfriamiento de las probetas

El enfriamiento de las probetas se llevó a cabo diferenciando entre el proceso de recocido y el de temple. Para el tratamiento de recocido, el enfriamiento se llevó a cabo dentro de la mufla con una tasa de enfriamiento de 58 °C/h. La figura 2.10 muestra las probetas extraídas de la mufla después del proceso de recocido.



Figura 2.10. Probetas recocidas extraídas de la caja

(Fuente: propia)

Adicionalmente, las probetas recocidas se limpiaron superficialmente con la ayuda de papel de carburo de silicio de 400 o 600 granos por pulgada cuadrada debido a que, al momento de su extracción, presentaban una capa de óxido, como se observa en la figura 2.11. Las probetas que más presentaron este problema fueron las probetas para ensayo de tracción.



Figura 2.11. Limpieza de las probetas con papel de carburo de silicio de 400 o 600 granos por pulgada cuadrada
(Fuente: propia)

Para el proceso de temple, el enfriamiento se realizó con agua a 16°C en una cubeta de plástico cuya base se cubrió de limalla para evitar que se derrita. La tasa de enfriamiento de las probetas fue de 13 °C/s que, al igual que en el caso del calentamiento, se calculó asumiendo que la variación de temperatura es lineal. El proceso de enfriamiento se resume en los siguientes pasos.

1. Se retiraron las probetas de la mufla, utilizando el equipo de protección personal, como se muestra en la figura 2.12.



Figura 2.12. Extracción de la probeta
(Fuente: propia)

2. Se introdujeron las probetas en el agua, asegurando que el agua cubra las probetas homogéneamente. La figura 2.13 muestra este paso.



Figura 2.13. Enfriamiento en agua
(Fuente: propia)

3. Las probetas se retiraron del agua una vez que se enfriaron, como se observa en la figura 2.14.



Figura 2.14. Probetas fuera del agua
(Fuente: propia)

4. La figura 2.15 muestra las probetas se extrajeron de la caja con limalla y se colocaron sobre material refractario.



Figura 2.15. Probetas templadas extraídas de la caja con limalla
(Fuente: propia)

2.1.6 Introducción las probetas nuevamente en la mufla

A diferencia del recocido o el temple, el revenido se llevó a cabo a una temperatura de 500°C y fue solo aplicado a 30 probetas (10 probetas para ensayo Charpy, 10 para ensayo de dureza y 10 para ensayo de Tracción), previamente templadas. El tiempo de permanencia en la mufla fue de 1,5 horas para las probetas para ensayo de tracción y 1 hora para las probetas para ensayo Charpy y ensayo de dureza [8].

Una vez que las probetas se retiraron de la mufla, se colocaron sobre ladrillos (material refractario) y se enfriaron en aire con una tasa de enfriamiento aproximada de 20 °C/min para las probetas para el ensayo de tracción, y 30 °C/min para las probetas de ensayo de dureza y ensayo Charpy. La figura 2.16 muestra la extracción y el enfriamiento sobre material refractario de las probetas revenidas.



Figura 2.16. Probetas revenidas enfriadas al aire
(Fuente: propia)

2.1.7 Identificación de las probetas

Luego de la finalización de cada tratamiento térmico, y para evitar la confusión de ellas, se procedió a marcar las probetas con la ayuda de un marcador para metal. Cada una de las probetas se marcó en función del tipo de material, sea este acero ASTM A36 o A572 GR50, y en función del tipo de tratamiento al que se sometieron. De esta forma se utilizó el código AT, para las probetas testigo; R, para las probetas recocidas; T, para el de temple; y T+R, para las probetas que fueron templadas y revenidas. Las figuras 2.17 y 2.18 muestran todas las probetas que se trataron e identificaron.



Figura 2.17. Probetas de ensayo de Tracción y ensayo Charpy identificadas
(Fuente: propia)



Figura 2.18. Probetas para ensayo de dureza identificadas
(Fuente: propia)

2.2 Caracterización de las propiedades mecánicas de los aceros tratados térmicamente

En este apartado se presentan los equipos y procedimientos utilizados para la realización de los ensayos de tracción, de dureza y Charpy, bajo las normas ASTM.

2.2.1 Ensayo de tracción bajo la norma ASTM E8-18

Las propiedades de resistencia como el límite de fluencia, la resistencia última a la tracción, el módulo de Young, entre otras, pueden ser determinadas por medio del ensayo de tracción para materiales metálicos que se realiza bajo la norma ASTM E8-18 (Métodos de prueba estándar para ensayos de tracción de materiales metálicos), la cual permite obtener

dichas propiedades bajo condiciones de carga uniaxial. Entre las características más importantes de las normas se tiene las medidas de las probetas y el procedimiento a seguir.

2.2.1.1 Máquina universal de ensayos

Esta máquina emplea fuerzas que se encuentran dentro de un rango definido para la misma y con una velocidad que debe verificarse. La figura 2.19 muestra la máquina general de ensayos digital que se encuentra en el Laboratorio de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional.



Figura 2.19. Máquina universal de ensayos
(Fuente: propia)

2.2.1.2 Procedimiento

Las probetas extraídas del material base, cuyas dimensiones se pudieron observar en la figura 2.2 y en la tabla 2.1, fueron ensayadas bajo temperatura ambiente de 22,8°C y humedad relativa de 50,4%, según lo muestra el informe técnico presentado en el anexo II. El procedimiento realizado en este ensayo se presenta a continuación:

1. Se preparó la máquina general de ensayos, la cual fue revisada antes con el fin de evitar errores durante el ensayo. Con este fin, se comprobaron las calibraciones de la máquina como se puede observar en la figura 2.20.

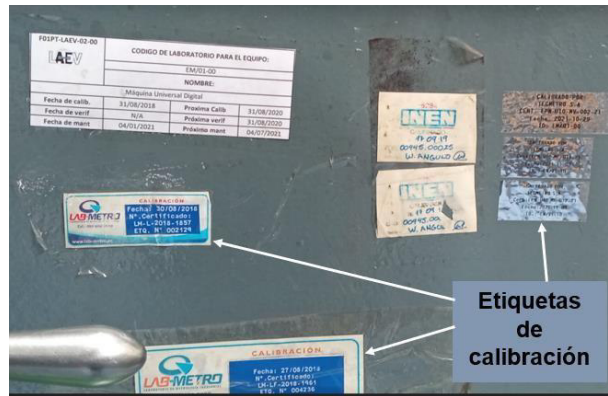


Figura 2.20. Certificaciones de calibración de la máquina
(Fuente: propia)

2. Se marcó la longitud libre (G) en la probeta, la cual sirvió de utilidad para determinar la elongación de esta, según la figura 2.21.

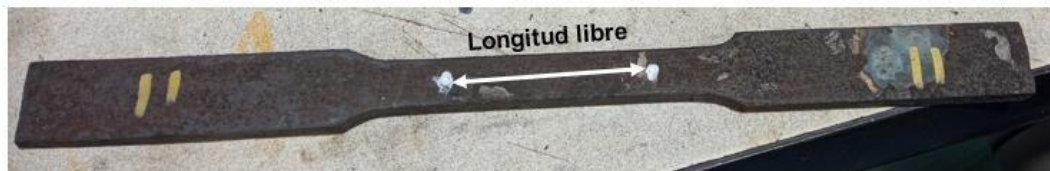


Figura 2.21. Marcación de la longitud libre
(Fuente: propia)

3. Se verificó que las medidas de las probetas sean las indicadas en la tabla 2.5 con la ayuda de un calibrador.
4. Se enceró la máquina de ensayos, es decir, se hizo que el medidor de fuerza marque un valor de cero, evitando así que existiese precarga durante el ensayo.
5. Se colocó la probeta en la máquina sosteniéndola con las mordazas, evitando a toda costa que el agarre se diese en la longitud libre, como se ilustra en la figura 2.22.



Figura 2.22. Probeta colocada en la máquina
(Fuente: propia)

6. Se inició el ensayo y se tomaron los datos con un dinamómetro, los cuales se transfirieron a un computador, como se puede observar en la figura 2.23.

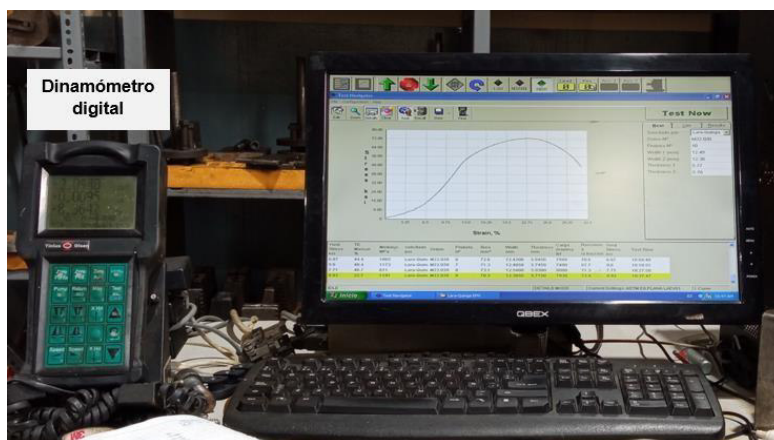


Figura 2.23. Obtención de datos
(Fuente: propia)

2.2.2 Medición de ductilidad

La medición de la ductilidad se realizó por medio del cálculo porcentaje de elongación, obtenido con el ensayo de tracción que se describió anteriormente [26]. Para poder calcular el porcentaje de elongación, se siguió el siguiente procedimiento:

1. Se midió la distancia entre las marcas de calibración que se hicieron sobre la probeta antes de haber sido sometidas a la prueba, como se muestra en la figura 2.24.



Figura 2.24. Medición de la longitud libre antes de la prueba
(Fuente: propia)

2. Se hizo coincidir las partes fracturadas, después del ensayo, y se midió la longitud libre, como se muestra en la figura 2.25.



Figura 2.25. Medición de la longitud libre después de la prueba
(Fuente: propia)

2.2.3 Ensayo de dureza bajo la norma ASTM E18

Esta norma indicó el procedimiento para realizar el ensayo de dureza Rockwell sobre las probetas tratadas térmicamente y sobre las probetas testigo. Dado que este ensayo provee información de un lugar específico del material y no del material en general, fue necesario tomar mediciones en varios puntos del material examinado [28].

2.2.3.1 Equipo

El equipo que se utilizó para medir la dureza de las piezas fue un durómetro Rockwell HR-150A, presente en el laboratorio del Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla, cuyas especificaciones técnicas se presentan en la tabla 2.7.

Tabla 2.7. Durómetro Rockwell C

	Valores	Equipo
Modelo	HR-150A	
Fuerza preliminar	98N.07N	
Fuerza total de prueba	588,4N, 980,7N, 471N (60,100,150 kgf)	
Rango de prueba	20-88 HRA 20-100 HRB 20-70 HRC	
Indentador de bola	1,588 mm	
Máxima altura de la prueba	170 mm	
Resolución de la dureza	0,5 HR	
Dimensiones	466x238x630 mm	
Peso	70 kg	

(Fuente: propia)

2.2.3.2 Procedimiento

El ensayo de dureza constó de 6 mediciones, 3 en cada lado de la probeta. Cada una de las mediciones se llevó a cabo según el procedimiento que se presenta a continuación [28].

1. Se verificó el correcto funcionamiento del equipo y se colocó la probeta en el durómetro como se puede observar en la figura 2.26.

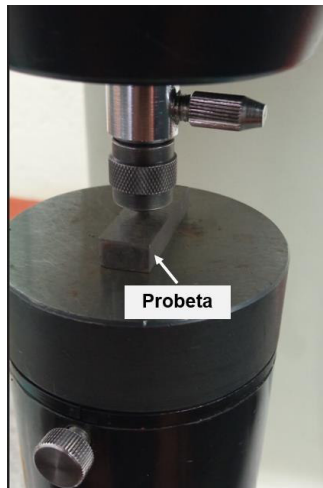


Figura 2.26. Colocación de la probeta

(Fuente: propia)

2. Se hizo contactar el indentador con la superficie de la pieza y se aplicó una fuerza preliminar, misma que se mantuvo por un tiempo de permanencia de 5 segundos.
3. Después, se incrementó la fuerza del indentador y se mantuvo por un tiempo de permanencia de alrededor de 15 segundos.
4. Una vez terminado el tiempo de permanencia, se removió la fuerza aplicada y se tomaron los datos. La figura 2.27 muestra los puntos provocados después de haber sido aplicado el ensayo.



Figura 2.27. Marcas dejadas por el indentador

(Fuente: propia)

2.2.4 Ensayo Charpy bajo la norma ASTM E23

El ensayo Charpy es un método que permitió cuantificar la cantidad de energía que absorbe un material bajo cargas de impacto a una determinada temperatura. Las condiciones ambientales para este ensayo fueron: temperatura ambiente de 22,8°C y 50,4% de humedad relativa.

2.2.4.1 Equipo

El equipo necesario para este ensayo fue el presente en el Laboratorio de Esfuerzos y Vibraciones y puede observarse en la figura 2.28.



Figura 2.28. Máquina universal para el ensayo Charpy
(Fuente: propia)

2.2.4.2 Procedimiento

Las probetas y sus dimensiones, que se utilizaron en este ensayo, pueden observarse en la figura 2.3 y en la tabla 2.2, respectivamente. El procedimiento que se siguió, según esta norma, consistió en los siguientes pasos:

1. Se preparó y verificó la máquina para el ensayo, levantando el péndulo hasta la posición especificada para este propósito.
2. Se posicionó la probeta en el espacio adecuado para ellas con la ayuda de pinzas autocentrantes como, se muestra en la figura 2.29.



Figura 2.29. Colocación de las probetas
(Fuente: propia)

3. Acto seguido, se dejó caer el péndulo sobre la probeta según la figura 2.30.



Figura 2.30. Caída del yunque
(Fuente: propia)

4. Finalmente, se tomaron los datos de la energía absorbida por la probeta. Cuando las probetas no se separaron en dos partes, se marcaron como 'no rota' [27]. La figura 2.31 ilustra este paso.



Figura 2.31. Lectura de los datos y marcación de probetas
(Fuente: propia)

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de los procesos de recocido, temple y revenido, y de la caracterización de las propiedades mecánicas obtenidas después de cada tratamiento; así como su respectiva comparación con base en la mejora o pérdida de propiedades.

3.1 Realización de tratamientos térmicos de recocido, temple y revenido

A continuación, se presentan las fotografías resultantes de las probetas que se sometieron a tratamientos térmicos de recocido, temple y revenido.

3.1.1 Recocido

Los resultados del tratamiento térmico de recocido fueron probetas oxidadas y con pérdida de material en la superficie, como se puede observar en la figura 3.1. La oxidación ocurrió en ambos materiales sin alguna distinción y especialmente en las probetas para ensayo de tracción. Las probetas correspondientes a los ensayos Charpy y de dureza, que pueden observarse en la figura 3.2, no fueron afectadas ni por la oxidación ni por la delaminaciones. Estos fenómenos se atribuyen a la reacción del material con el oxígeno presente en el aire, lo que empeoró con el tiempo de permanencia dentro de la mufla.

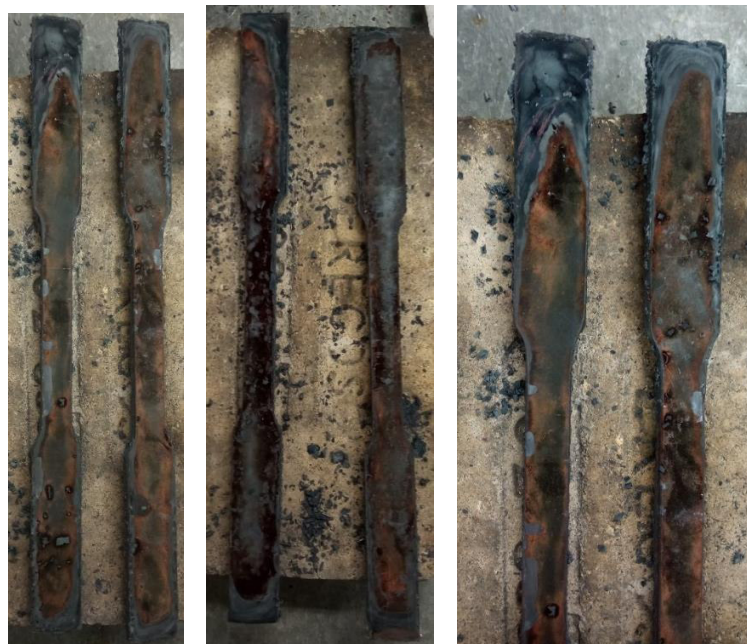


Figura 3.1. Probetas recocidas para ensayo de tracción
(Fuente: propia)



Figura 3.2. Probetas recocidas para ensayo Charpy y dureza
(Fuente: propia)

3.1.2 Temple

Al igual que en el tratamiento térmico de recocido, las probetas de temple presentaron pérdida de material en su superficie. También, en este caso, las probetas que presentaron este problema fueron las probetas para ensayo de tracción, como se puede notar en la figura 3.3. Las probetas templadas para ensayo Charpy y de dureza se pueden visualizar en la figura 3.4. Así como en las probetas recocidas, el problema de la pérdida de material, en este tratamiento, también se atribuye a la reacción del hierro del material con el oxígeno del aire.



Figura 3.3. Probetas templadas para ensayo de tracción
(Fuente: propia)



Figura 3.4. Probetas templadas para ensayo Charpy y dureza

(Fuente: propia)

3.1.3 Temple con Revenido

Las probetas que, además de haber sido templadas, se revinieron, no presentaron alguna particularidad después de haber sido tratadas. Las pérdidas de material de la superficie que se observan en la figura 3.5 son las remanentes del proceso de temple y solo aparecen en la superficie de las probetas para ensayo de tracción y no en las de ensayo Charpy y dureza.



Figura 3.5. Probetas templadas y revenidas para ensayo de tracción

(Fuente: propia)

3.2 Caracterización de las propiedades mecánicas de los aceros tratados térmicamente

En este apartado, se presentan las propiedades mecánicas obtenidas durante la caracterización. Los resultados se presentan en forma de diagrama de caja y bigotes, obtenidos con el programa Minitab 18, con el fin de poder mostrar la dispersión de los datos en cada proceso alrededor de la mediana. El valor de la parte superior representa la media y no la mediana y los datos se han clasificado en función del tipo de acero y tratamiento térmico, tomando en cuenta posibles valores atípicos. Para identificar cada proceso, se utilizó la misma codificación de la metodología; de esta forma, AT representa las probetas testigo, las probetas recocidas; T, las probetas templadas; T+R, las probetas templadas y revenidas. Para determinar los valores atípicos se utilizó el programa Minitab 18, con la ayuda de la prueba de Dixon, con un nivel de confianza del 95%.

Al final de este apartado, se muestran las tablas que presentan los valores de las propiedades mecánicas y sus variaciones en forma porcentual de las probetas tratadas térmicamente en comparación con las propiedades de las probetas testigo, en el caso del recocido y temple; y con las propiedades de las probetas templadas, para el revenido. El anexo II muestra el informe técnico con los resultados del ensayo de tracción y ensayo Charpy, entregado por el ingeniero Edison Castro, profesor encargado del Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones.

3.2.1 Ensayo de tracción

A continuación, se presentan los resultados del ensayo de tracción. En primer lugar, se presentan las probetas fracturadas de cada tratamiento realizado con el fin de analizar el tipo de fractura en cada una. Después, se muestran las curvas esfuerzo deformación para cada uno de los aceros. Finalmente, se presenta el diagrama de caja y bigotes para el límite de fluencia y la resistencia a la tracción.

3.2.1.1 Probetas testigo

La figura 3.6 muestra que las probetas testigo del acero ASTM A36 se rompieron dentro de la longitud libre, mientras que las del acero ASTM A572 GR50 lo hicieron en puntos diferentes, dentro y fuera de la longitud libre. Sin embargo, en ambos casos, se puede observar la fractura en forma de copa-cono, representativo de materiales dúctiles, además de la zona de estricción.



Figura 3.6. Probetas testigo utilizadas en el ensayo de tracción
(Fuente: propia)

Por otro lado, la figura 3.7 muestra las curvas esfuerzo deformación obtenidas para cada uno de los aceros. Como se puede observar, ambas curvas son las representativas de materiales dúctiles y tenaces. Además, se puede observar claramente que el acero ASTM A572 GR50 es menos dúctil que el ASTM A36; sin embargo, es más tenaz.

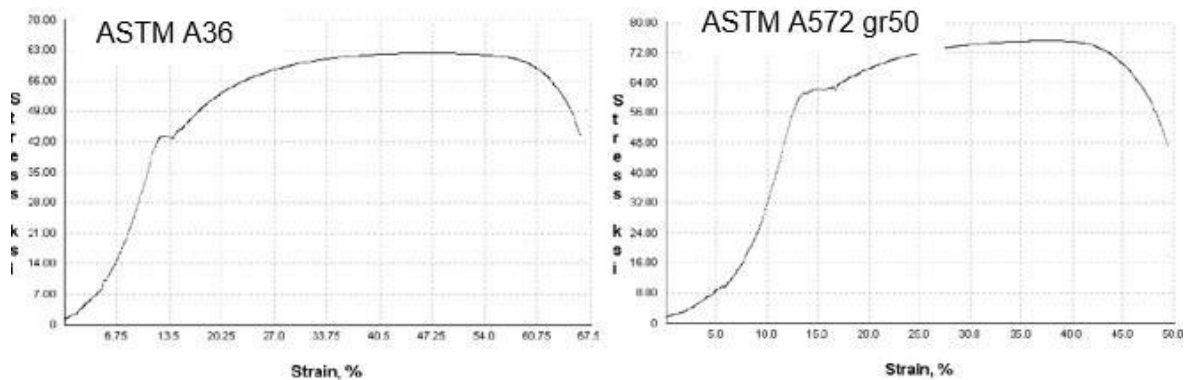


Figura 3.7. Curvas esfuerzo deformación de las probetas testigo
(Fuente: propia)

3.2.1.2 Probetas Recocidas

El resultado del ensayo de tracción en las probetas recocidas se puede observar en la figura 3.8. En este caso, se puede notar que la mayoría de las probetas de acero ASTM A572 GR50 fallaron fuera de la zona de la longitud libre, mientras que las probetas de acero ASTM A36 lo hicieron dentro, pero en posiciones distintas. Se pueden observar fracturas de naturaleza dúctil, en forma de copa-cono y zona de estricción. En el caso del acero ASTM A36, las probetas presentaron un comportamiento similar, pero con menor ductilidad.



Figura 3.8. Probetas para ensayo de tracción recocidas
(Fuente: propia)

La figura 3.9 muestra las curvas esfuerzo deformación de los aceros recocidos. Al igual que en el caso anterior, estas curvas son típicas de materiales dúctiles. Se puede notar claramente que las probetas recocidas de acero ASTM A572 GR50 son más dúctiles que el acero ASTM A36 y también más tenaces.

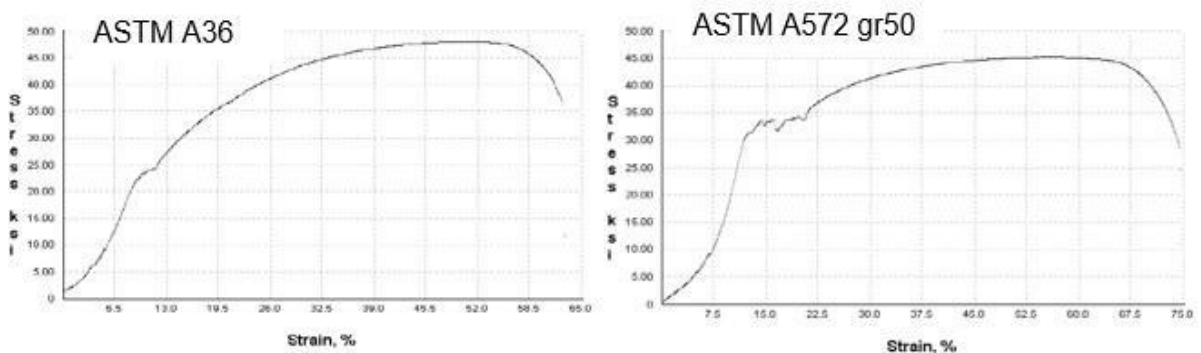


Figura 3.9. Curvas esfuerzo deformación de las probetas recocidas
(Fuente: propia)

3.2.1.3 Probetas templadas

En cuanto a rotura, las probetas templadas presentaron comportamientos similares en ambos aceros, pues algunas probetas fallaron dentro y otras fuera de la longitud libre, como se observa en la figura 3.10. De igual manera, las probetas de los dos aceros presentan zona de estricción y fractura tipo copa-cono, característica de las fracturas dúctiles. No obstante, las probetas de acero ASTM A36 presentan menor ductilidad como se puede observar en las curvas esfuerzo deformación de la figura 3.11.



Figura 3.10. Probetas para ensayo de tracción templadas
(Fuente: propia)

También, en este caso, las curvas esfuerzo deformación de la figura 3.11 representan a materiales dúctiles. No obstante, las probetas de acero ASTM A572 GR50 presenta mayor ductilidad y tenacidad que el acero ASTM A36.

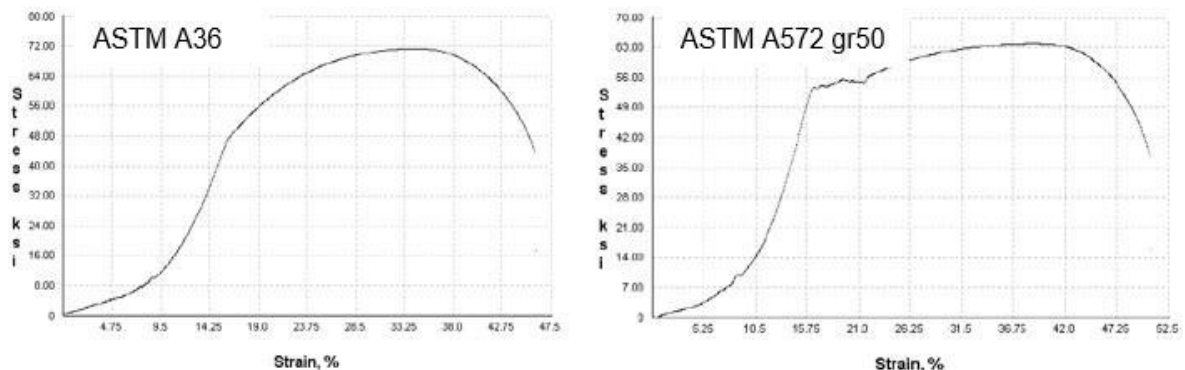


Figura 3.11. Curvas esfuerzo deformación de las probetas templadas
(Fuente: propia)

3.2.1.4 Probetas templadas y revenidas

la figura 3.12 presenta los resultados de las probetas templadas que se trataron térmicamente con revenido. Nótese que las probetas de ambos aceros se fracturaron dentro y fuera de las marcas de la longitud libre. También, las probetas de ambos aceros presentaron fractura dúctil con una notoria zona de estricción, con zonas de naturaleza fibrosa y superficies de fractura copa-cono.



Figura 3.12. Probetas para ensayo de tracción templadas y revenidas
(Fuente: propia)

Para este proceso, las curvas esfuerzo deformación de los dos aceros se presentan en la figura 3.13. Al igual que en los procesos anteriores, estas curvas son representativas de materiales dúctiles.

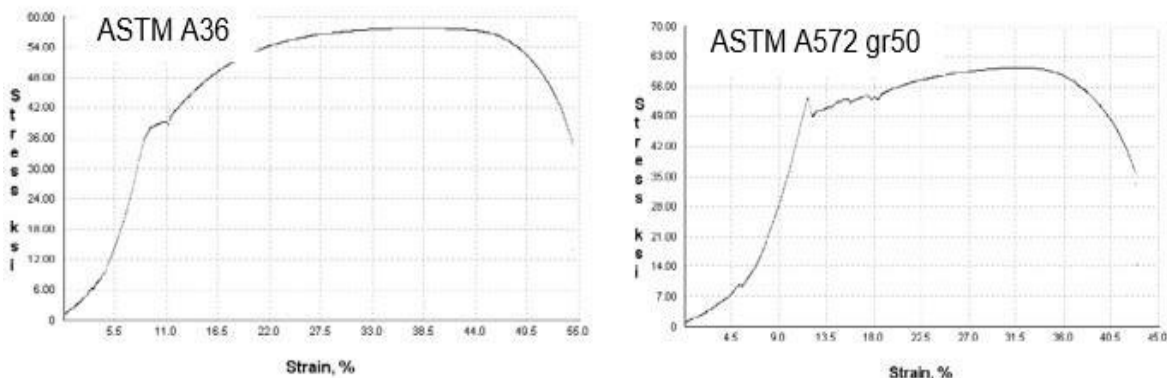


Figura 3.13. Curvas esfuerzo deformación de las probetas templadas y revenidas
(Fuente: propia)

Las figuras 3.14 y 3.15 muestran los resultados del límite de fluencia y resistencia a la tracción en términos de dispersión. Como se puede observar, todos los procesos presentan una dispersión aceptable y no se presentan valores atípicos sea en el acero ASTM A36 que en el ASTM A572 GR50.

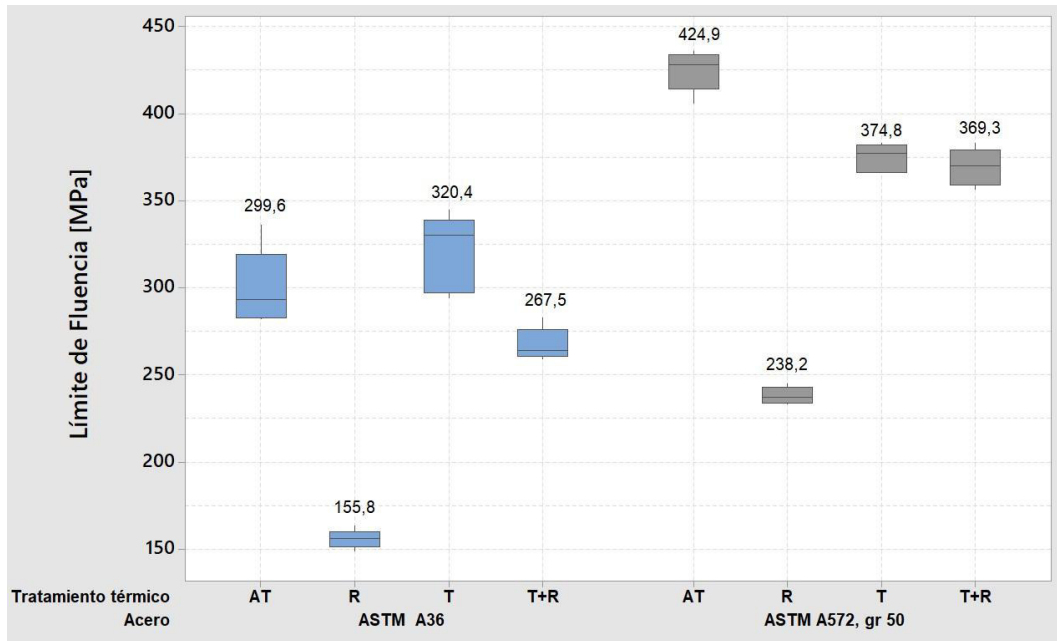


Figura 3.14. Diagrama de caja y bigotes de los resultados del límite de fluencia (Fuente: propia)

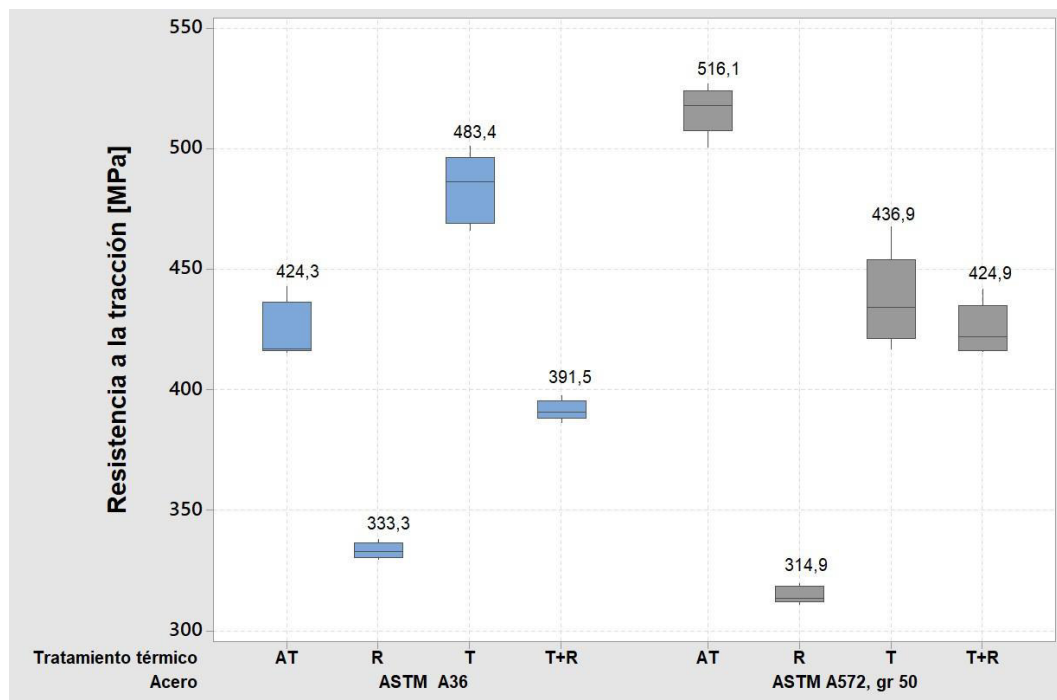


Figura 3.15. Diagrama de caja y bigotes de los resultados de la resistencia a la tracción (Fuente: propia)

3.2.2 Resultados de ductilidad

La ductilidad también es obtenida por medio del ensayo de tracción a través del cálculo del porcentaje de elongación. Por lo tanto, son válidas las mismas afirmaciones hechas en el apartado anterior acerca de las fracturas de las probetas. Es importante mencionar que los

valores del porcentaje de elongación no representan los valores reales de las probetas pues, como se indica en el informe técnico del anexo II, los valores se tomaron del movimiento del cabezal de la máquina y no del uso de un extensómetro.

La figura 3.16 presenta el diagrama de caja y bigotes para esta propiedad en particular. Se puede observar que en este caso se obtuvieron dispersiones diferentes para cada propiedad y en cada acero. En primer lugar, el acero ASTM A36 presentó alta dispersión y un valor atípico en el proceso de temple, solamente. Contrariamente, el acero ASTM A572 GR50 presenta dispersión alta en la mayoría de los procesos.

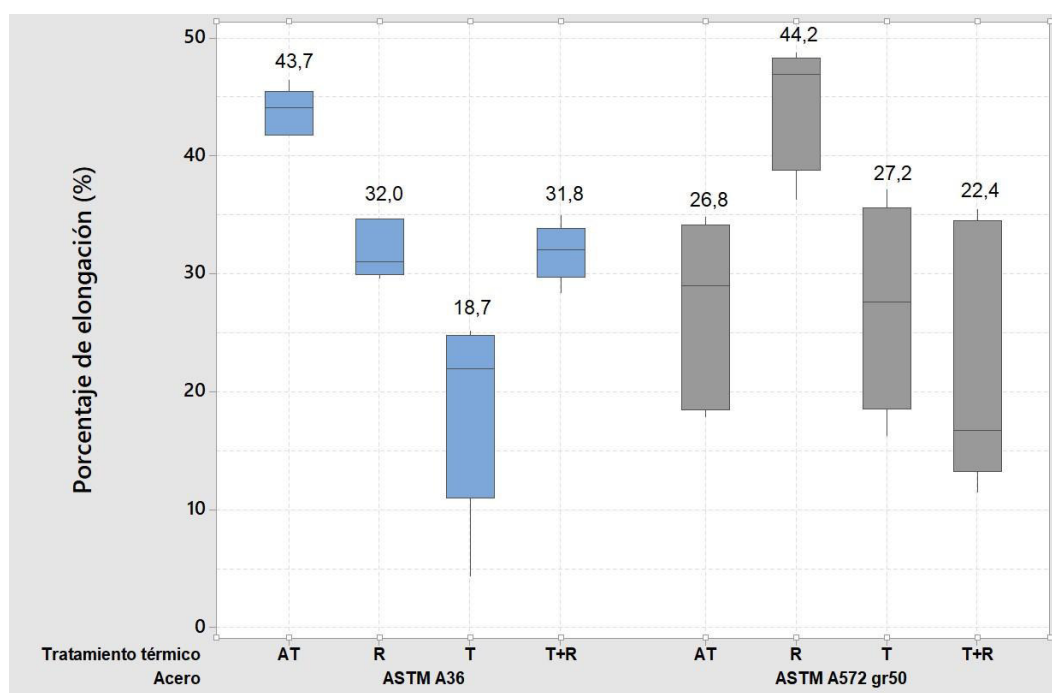


Figura 3.16. Diagrama de caja y bigotes de los resultados del porcentaje de elongación (Fuente: propia)

3.2.3 Ensayo de dureza

El ensayo de dureza fue realizado en el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla y llevado a cabo por la ingeniera Patricia Proaño. El resultado de este ensayo fueron probetas con puntos en los cuales se realizaron las indentaciones y de las cuales no se puede extraer algún otro dato relevante. Los valores de cada una de las indentaciones efectuadas pueden visualizarse en el anexo III y los resultados finales del ensayo de dureza, tanto para las probetas testigo como para las tratadas térmicamente, pueden visualizarse en la figura 3.17. Como se puede observar en el diagrama, en ambos casos se presenta moderada dispersión y datos atípicos en el proceso de recocido de cada acero.

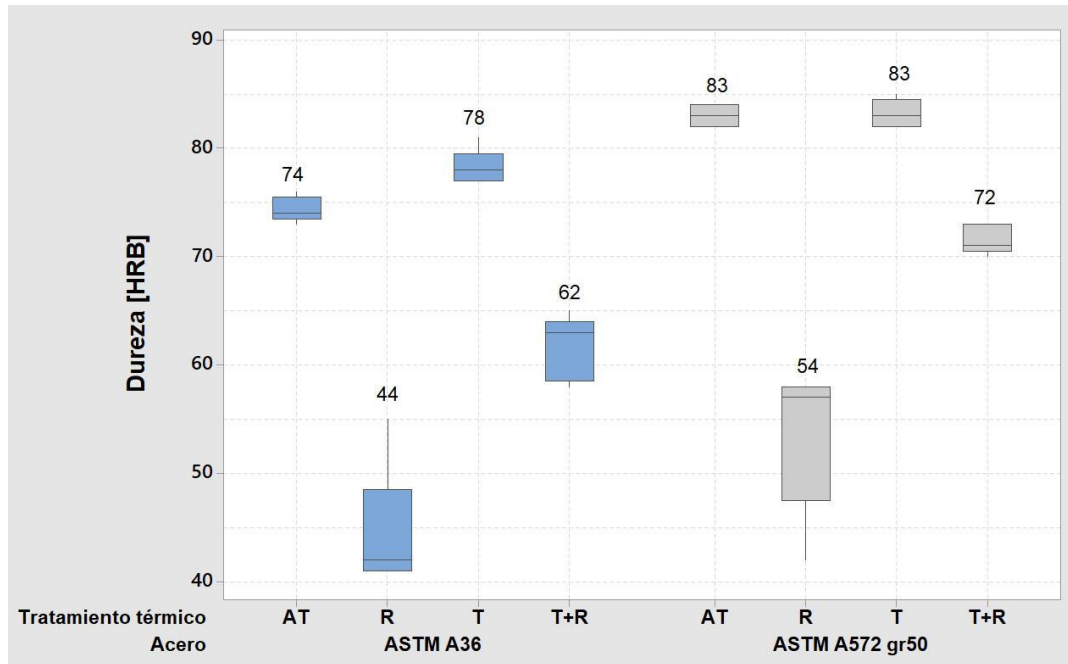


Figura 3.17. Diagrama de caja y bigotes de los resultados de dureza
(Fuente: propia)

3.2.4 Ensayo Charpy

Por otra parte, de la figura 3.18 a la 3.21 se pueden observar las probetas fracturadas como resultado del ensayo Charpy. Las probetas de la izquierda muestran las probetas de acero ASTM A36, mientras que las de la derecha las del acero ASTM A572 GR50. Las fracturas visualizadas después del ensayo Charpy sirven para encontrar zonas de fractura dúctil y zonas frágiles en cada una de las probetas ensayadas como un soporte a los resultados numéricos.

3.2.4.1 Probetas testigo

En la figura 3.18, se puede observar que las probetas de acero ASTM A36 presentaron fractura dúctil, representada por zonas de aspecto fibroso. Se puede notar que, de la muestra de 5 probetas, solamente dos se separaron en su totalidad; sin embargo, a pesar de haberse roto, presentan características de rotura dúctil, similares a las de sus semejantes. Por otra parte, las probetas testigo de acero ASTM A572 GR50 presentaron fracturas dúctiles caracterizadas por zonas de desgarramiento de aspecto fibroso. A diferencia de las probetas de acero ASTM A36, todas las probetas se deformaron, pero ninguna se rompió.

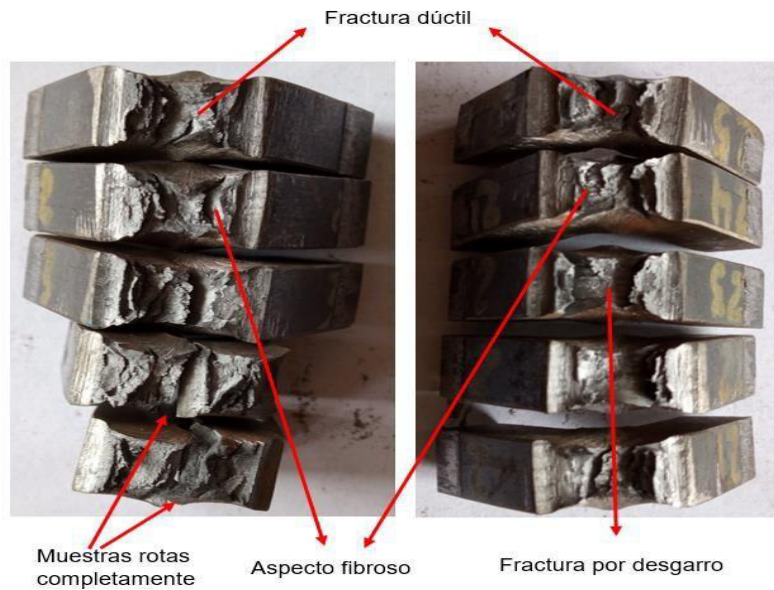


Figura 3.18. Probetas testigo utilizadas en el ensayo Charpy
(Fuente: propia)

3.2.4.2 Pobretas recocidas

Los resultados del ensayo Charpy de estas probetas se presentan en la figura 3.19. En primer lugar, se puede observar que las probetas recocidas de acero ASTM A36 se fracturaron todas, sin excepción, y presentaron zonas de fractura frágil, caracterizadas por zonas brillantes en su superficie y poca presencia de zonas fibrosas. Con respecto a las probetas recocidas del acero ASTM A572 GR50, preponderó la fractura dúctil con zonas de desgarro y aspecto fibroso. En este caso, ninguna de las probetas de la muestra se rompió y la fractura ocurrió hasta aproximadamente la mitad de la probeta.

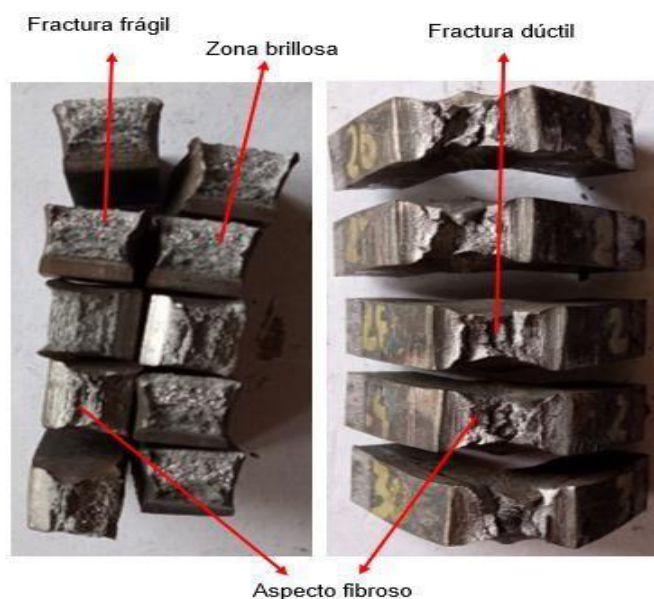


Figura 3.19. Probetas recocidas utilizadas en el ensayo Charpy
(Fuente: propia)

3.2.4.3 Pobretas templadas

Las probetas templadas y ensayadas mediante ensayo Charpy se presentan en la figura 3.20. En primer lugar, las probetas de acero ASTM A36 presentaron fractura frágil con bajísima deformación y zonas brillantes, características innegables de este tipo de fractura, en dos de sus probetas. A pesar de la presencia de fragilidad, ninguna de estas probetas se fracturó completamente. Por otra parte, las probetas templadas de acero ASTM A572 GR50 se caracterizan por presentar fractura dúctil, evidenciada por la presencia de zonas de desgarramiento de aspecto fibroso. A pesar de no presentar evidencia de fragilidad, en esta muestra se fracturaron dos probetas completamente.

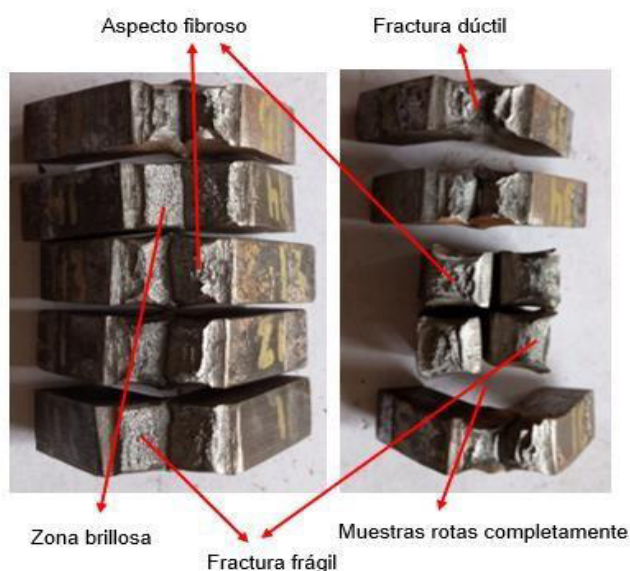


Figura 3.20. Probetas templadas utilizadas en el ensayo Charpy
(Fuente: propia)

3.2.4.4 Pobretas templadas y revenidas

Finalmente, las muestras que pasaron por un proceso de revenido, después de haber sido templadas, se observan en la figura 3.21. Se puede observar que las probetas de acero ASTM A36 presentaron fractura dúctil, caracterizadas por zonas de aspecto fibroso, al igual que en las probetas ASTM A572 GR50. En ninguno de los dos casos, las probetas de cada muestra se rompieron.

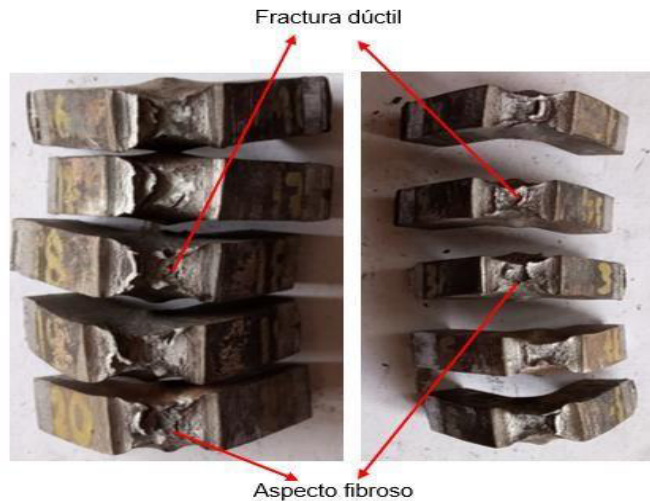


Figura 3.21. Probetas templadas y revenidas utilizadas en el ensayo Charpy
(Fuente: propia)

En términos de dispersión, la figura 3.22 muestra el diagrama de caja y bigotes para la tenacidad a la fractura. Como se puede observar, en el acero ASTM A36, el proceso de temple fue el que presentó mayor dispersión y con la presencia de dos datos atípicos, los cuales corresponden a las 2 probetas con fragilidad completa de la figura 3.22. Por otro lado, en el acero ASTM A572 GR50, se nota dispersión aceptable, aunque mayor que en el resto de los procesos. La causa la dispersión en el proceso de temple se atribuye a un enfriamiento diferente de las probetas al momento de introducirse en el agua.

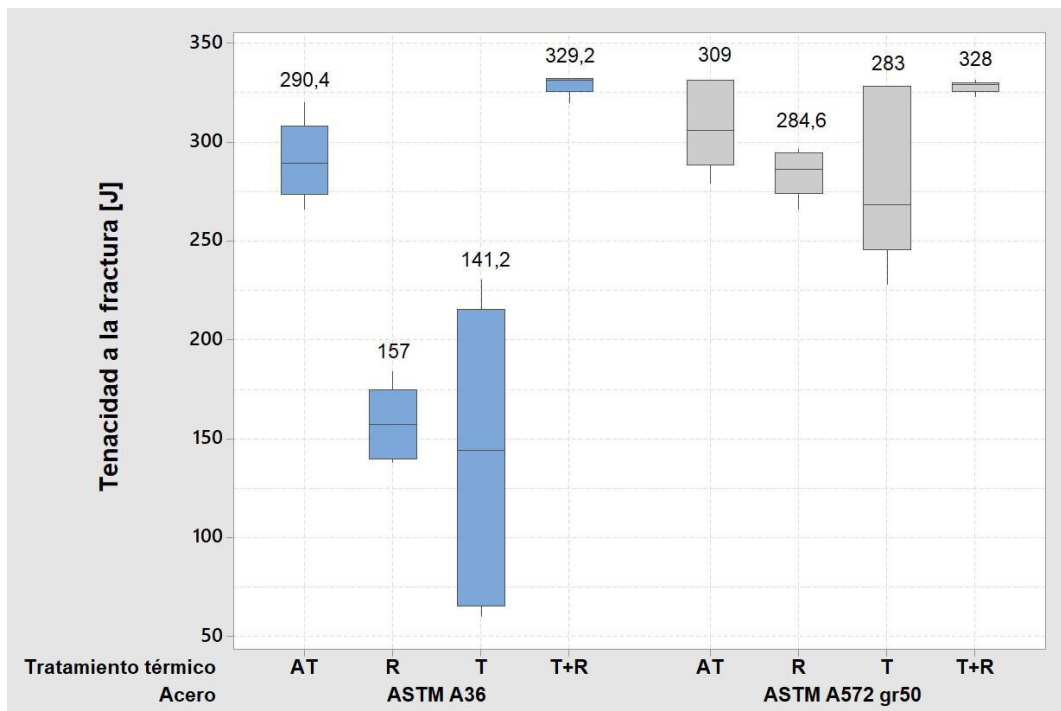
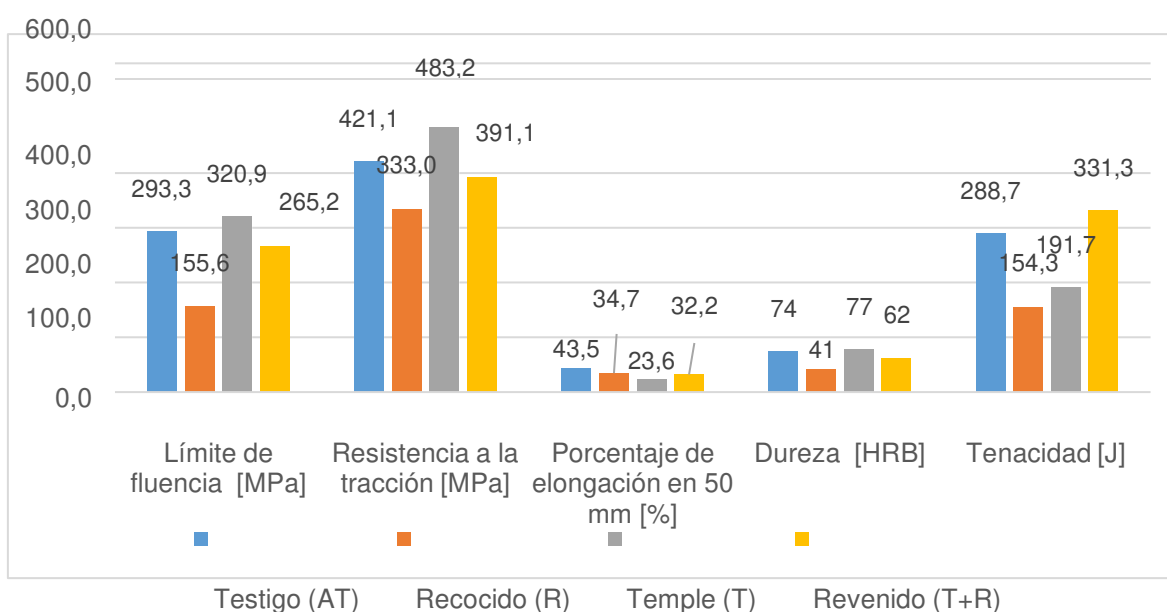


Figura 3.22. Diagrama de caja y bigotes de los resultados de tenacidad a la fractura
(Fuente: propia)

3.3 Comparación de los tratamientos térmicos de los aceros ASTM A36 y ASTM A572 GR50

Las probetas tratadas térmicamente se caracterizaron mediante ensayos de Tracción, ensayo de Dureza y ensayo Charpy, como se mostró en el apartado anterior. Los resultados generales de las propiedades mecánicas obtenidas a través de los ensayos realizados se presentan en la figura 3.23, para el acero ASTM A36, y en la figura 3.24, para el acero ASTM A572 GR50.

También, las tablas 3.1 y 3.2 muestran los cambios porcentuales de cada propiedad comparada con las propiedades obtenidas para las probetas testigo del acero ASTM A36 y ASTM A572 GR50, respectivamente. Cabe mencionar que tanto los cambios porcentuales como los valores reportados en las figuras se obtuvieron del promedio de los tres valores intermedios de cada muestra, eliminando los valores atípicos que generaban dispersión de los datos y acercando más los valores a la media. El análisis de los datos de esta manera crea una desviación de 2% de los datos con respecto a los resultados originales con el cálculo de los resultados con los 5 valores completos. El signo negativo de las tablas representa la reducción de una determinada propiedad, mientras que el signo positivo su incremento. Para las probetas de recocido y temple, que se compararon con los resultados de las probetas testigo, su simbología es R% y T%, respectivamente. En el caso del revenido (T+R%), la variación de las propiedades se comparó sea con las probetas testigo (AT vs. T+R%) que con las probetas templadas (T vs. T+R%).



(Fuente: propia)

Figura 3.23. Comparación de las propiedades mecánicas de las probetas tratadas térmicamente con las propiedades de la probeta testigo para el acero ASTM A36

(Fuente: propia)

Tabla 3.1. Propiedades mecánicas obtenidas para el acero ASTM A36

ASTM A36	R%	T%	AT vs. T+R %	T vs. T+R%
Límite de fluencia [MPa]	-47	9	-10	-17
Resistencia a la tracción [MPa]	-21	15	-7	-19
Porcentaje de elongación en 50 mm [%]	-20	-46	-26	36
Dureza [HRB]	-44	4	-17	-20
Tenacidad [J]	-47	-34	15	73

(Fuente: propia)

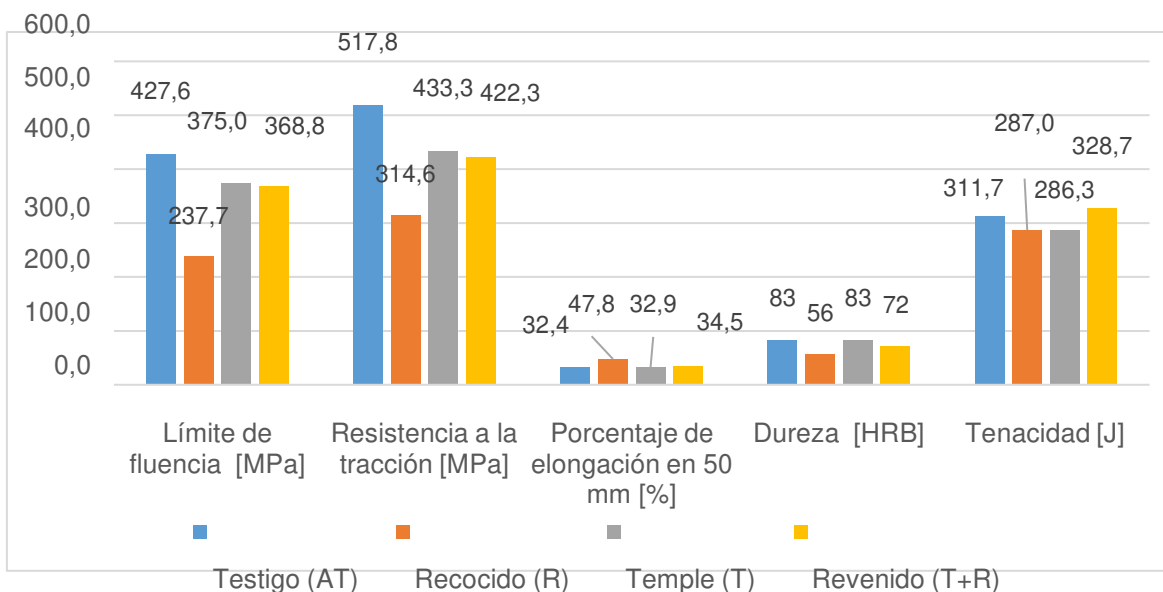


Figura 3.24. Comparación de las propiedades mecánicas de las probetas tratadas térmicamente con las propiedades de la probeta testigo para el acero ASTM A572 GR50

(Fuente: propia)

Tabla 3.2. Propiedades mecánicas obtenidas para el acero ASTM A572 GR50

ASTM A572 GR50	R%	T%	AT vs. T+R %	T vs. T+R%
Límite de fluencia [MPa]	-44	-12	-14	-2
Resistencia a la tracción [MPa]	-39	-16	-18	-3
Porcentaje de elongación en 50 mm [%]	48	2	6	5
Dureza [HRB]	-33	0	-14	-14
Tenacidad [J]	-8	-8	5	15

(Fuente: propia)

3.3.1 Probetas testigo

De la caracterización de las probetas testigo del acero ASTM A36 se obtuvo un límite de fluencia de 293,3 MPa, resistencia a la tracción de 421,1 MPa, porcentaje de elongación de 43,5 %, dureza de 74 HRB y energía de impacto de 288,7 J. Por otro lado, para el acero ASTM A572 GR50 se obtuvo un límite de fluencia de 427,6 MPa, resistencia a la tracción

de 517,8 MPa, porcentaje de elongación de 32,4 %, dureza de 83 HRB y energía de impacto de 311,7 J. Estos valores pueden observarse en la figura 3.23 y 3.24,

respectivamente. También se puede observar en estas figuras que los valores de las propiedades mecánicas del material base se encuentran dentro del rango de valores aceptados por las normas ASTM A36 y ASTM A572 GR50. Estos valores pueden compararse con los de las tablas 1.3 y 1.5, respectivamente

Además, se pudo constatar que el acero ASTM A572 GR50 posee mejores propiedades mecánicas que el acero ASTM A36, a pesar de que su contenido de carbono es 0,13%, el cual es menor que 0,20% del acero ASTM A36, como se puede observar en los certificados de calidad de ambos aceros, en el anexo I. El incremento elevado de la resistencia del acero ASTM A572 GR50 se debe a su composición química pues contiene elementos de aleación como el manganeso, el cromo, el niobio, el arsénico, y el molibdeno en mayor concentración [8]. Los elementos de aleación antes mencionados incrementan la resistencia a la tracción de los materiales. Finalmente, se trata de dos materiales dúctiles, lo cual se pudo corroborar en el tipo de fractura observada en las probetas y en las curvas esfuerzo deformación que se presentan en el anexo II.

3.3.2 Probetas Recocidas

Teóricamente, el tratamiento térmico de recocido permite homogenizar la estructura del acero, incrementar la tenacidad, la ductilidad y disminuir la resistencia y la dureza [5]. Los resultados de la figura 3.23, para el acero ASTM A36, hacen notar que las propiedades como el límite de fluencia y la resistencia a la tracción, y la dureza disminuyeron de 293,3 MPa a 155,6 MPa, de 421,1 MPa a 333,0 MPa y de 74 HRB a 41 HRB, respectivamente. Según la tabla 3.1, estas disminuciones corresponden al 47%, 21% y 44%, respectivamente. Este resultado concuerda con la investigación [21], donde la resistencia y el límite de fluencia de las probetas recocidas disminuyeron, aunque en menor proporción, debido a que el periodo de permanencia de las probetas en la mufla fue menor y que el medio de enfriamiento fue diferente.

Sin embargo, Atípicamente a lo que se esperaba, la figura 3.23 muestra que el porcentaje de elongación y la tenacidad a la fractura del acero ASTM A36 disminuyeron de 43,5% a 34,7% y de 288,7 J a 154,3 J, respectivamente, lo que corresponde a una disminución del 20% y 47%, respectivamente. Esta disminución implica que el material perdió ductilidad, lo que también se pudo evidenciar en la superficie fracturada con zonas brillosas de las probetas en las figuras 3.10 y 3.20. Resultados diferentes se obtuvieron en el estudio [21], pues el porcentaje de elongación incremento durante el recocido.

La causa más probable de la disminución de porcentaje de elongación y la tenacidad a la fractura fue la fusión prematura de los bordes de grano del material. Esto ocurre cuando el

acero se mantiene durante un largo periodo de tiempo a altas temperaturas de austenización. Bajo estas condiciones, los bordes de grano del acero disminuyen su punto de fusión debido la mayor cantidad de energía interfacial que existe en ellos, lo que causa fragilidad [8].

Por otro lado, para el acero ASTM A572 GR50, la figura 3.24 muestra que el límite de fluencia disminuyó de 427,6 MPa a 237,7 MPa, la resistencia a la tracción de 517,8 MPa a 314,6 MPa y la dureza de 83 HRB a 56 HRB, como se esperaba en este proceso, lo que corresponde a una disminución del 44%, 39% y 33%, respectivamente, según la tabla 3.2.

A diferencia del acero ASTM A36, la figura 3.24 indica que el acero A572 GR50 presentó mayor porcentaje de elongación después del recocido, incrementando de 32,4% a 47,8%, lo que implica un incremento del 48% de ductilidad con respecto a la probeta testigo. La ganancia de ductilidad se evidencia en la fractura tipo copa-cono que presentaron las probetas de tracción de la figura 3.10. Sin embargo, la tenacidad a la fractura disminuyó de 311,7 J a 287,0 J, lo que representa una disminución de 8%. También en este caso, los resultados obtenidos para el límite de fluencia y la resistencia a la tracción concordaron con la investigación [22], pues ambas propiedades disminuyen al enfriarse dentro de la mufla durante el recocido.

Si se compara el efecto que el recocido tuvo sobre cada acero, se puede aseverar que el acero ASTM A36 fue afectado en mayor porcentaje que el ASTM A572 GR50, pero se debe tener en cuenta que su porcentaje de elongación disminuyó en 20%, en lugar de aumentar; sin embargo, el acero ASTM A572 GR50 cumplió con todos los objetivos del tratamiento, incluido el incremento del porcentaje de elongación en 48%. También, se puede observar que el acero ASTM A572 GR50 continuó siendo el que presentó mayores propiedades mecánicas después del recocido, exceptuando por la resistencia a la tracción que disminuyó a 314,6 MPa, un valor incluso menor que la resistencia a la tracción del material base del acero ASTM A36.

Cabe mencionar, que en ambos aceros presentaron pérdida de material, en igual proporción, en la superficie debido a fenómenos de corrosión, como se pudo evidenciar en la figura 3.1. La pérdida de material pudo también haber influido en las propiedades mecánicas debido a que pudo existir descarburación de la superficie, causando la disminución de la dureza y la formación de zonas menos resistentes en la probeta que provoquen la fractura de estas fuera de la longitud de calibración durante el ensayo de tracción.

3.3.3 Probetas templadas

El objetivo principal del temple es incrementar la dureza y la resistencia del material tratado; sin embargo, el temple conlleva la disminución de la tenacidad y el porcentaje de elongación, fragilizando al material, debido a la formación de estructuras duras como la bainita y la martensita.

En el caso del acero ASTM A36, se cumplieron los objetivos del tratamiento, pues el límite de fluencia incrementó de 293,3 MPa a 320,9 MPa, la resistencia a la tracción de 421,1 MPa a 483,2 MPa y la dureza de 74 HRB a 77 HRB, como se muestra en la figura 3.23, lo que implica un incremento del 9%, 15% y 4%, respectivamente, como lo indica la tabla 3.1. Por otro lado, el porcentaje de elongación disminuyó de 43,5% a 23,6% y la tenacidad de 288,7 J a 191,7 J, correspondientes a una disminución del 46% y 34%, respectivamente. No obstante, el material no presentó fragilidad, lo que se pudo corroborar en la curva esfuerzo deformación de la figura 3.13, característica de materiales dúctiles.

Resultados similares en cuanto a cumplimiento de los objetivos del temple, se obtuvieron en el estudio [21] donde se nota el incremento del límite de fluencia y la resistencia a la tracción; sin embargo, el incremento de propiedades fue notablemente mayor. La razón de esto fue que no se obtuvo martensita en la microestructura del acero debido a que la tasa de enfriamiento de las probetas dentro del agua fue mitigada por la presencia de la limalla y de la caja que las contenía. Resultados diferentes se obtuvieron en la investigación [25], donde las propiedades disminuyeron, notándose que la temperatura de austenización fue de 800°C, por debajo de la línea A1, y el medio de enfriamiento fue salmuera (90% agua y 10% sal).

Para el acero ASTM A572 GR50 se puede observar en la figura 3.24 que la dureza permaneció en un valor de 83 HRB, al igual que el porcentaje de elongación que cambió de 32,4 % a 32,9 %, lo que representa un cambio porcentual de 2%, como se muestra en la tabla 3.2. Por otro lado, el límite de fluencia y la resistencia a la tracción disminuyeron, en lugar de incrementar, de 427,6 MPa a 375,0 MPa y de 517,8 MPa a 433,3 MPa, respectivamente. Esto representa un cambio de 12% en el límite de fluencia y 16% en la resistencia a la tracción, con respecto a las propiedades del material base. La única propiedad que siguió la tendencia del proceso de temple fue la tenacidad a la fractura, que disminuyó de 311,7 J a 286,3 J, lo que representa una disminución del 8%, resultado similar al obtenido en el proceso de recocido.

La razón de que la dureza no cambie es que la tratabilidad térmica de un acero, especialmente en el temple, depende de su composición química y, especialmente, del

contenido de carbono disponible para la saturación de la celda cristalina del hierro en la formación de martensita [5]. El contenido de carbono para este acero, según el certificado de calidad, es de 0,13% de carbono, el cual es un valor bajo para poder proporcionarle buena templabilidad. Como prueba de ello, la investigación [24] muestra las propiedades mecánicas obtenidas para un acero de contenido de carbono mayor (0.30% de carbono), donde se puede notar un incremento elevado del límite de fluencia y la resistencia a la tracción, y la disminución considerable del porcentaje de elongación, incluso por debajo del 4%.

Al igual que en el recocido, las propiedades de las probetas templadas del acero ASTM A572 GR50 continuaron a ser mayores que en el acero ASTM A36, con excepción de la resistencia a la tracción, a pesar de haber disminuido. Una curiosidad de este proceso fue que la dispersión de los resultados del porcentaje de elongación y la tenacidad fueron altos debido a la presencia de datos atípicos que se atribuyen a un enfriamiento no uniforme de las probetas, sea en el acero ASTM A36 que en el ASTM A572 GR50.

Adicionalmente, las probetas templadas presentaron pérdida de material en su superficie cuando se extrajeron de la mufla, lo que empeoró con su inserción en el medio de enfriamiento; sin embargo, no se presentó corrosión debido a que no hubo el tiempo necesario para su formación por su introducción en el agua. Se presume que ocurrió descarburación en la superficie, a pesar de que fueron cubiertas por limalla durante su estadía dentro de la mufla.

3.3.4 Probetas templadas y revenidas

El revenido es un tratamiento térmico que se lleva a cabo a bajas temperaturas y cuyo propósito es aliviar los esfuerzos residuales que pudiesen generarse durante el temple, disminuyendo la fragilidad y recuperando tenacidad, a cambio de una pérdida porcentual baja de resistencia y dureza.

De acuerdo con la figura 3.23, la tenacidad a la fractura en el acero ASTM A36 incrementó de 191,7 J a 331,3 J con respecto a la probeta que fue templada, un aumento de 73% de acuerdo con la tabla 3.1, como se esperaba para este proceso. También, el porcentaje de elongación incrementó de 23,6% a 32,2%, lo que evidencia el incremento de la ductilidad en 36% y, por lo tanto, la disminución de la fragilidad. Sin embargo, el límite de fluencia disminuyó de 320,9 MPa a 265,2 MPa, la resistencia a la tracción de 483,2 MPa a 391,1 MPa, y la dureza de 77 HRB a 62 HRB, representando el 17%,19 y 20% de disminución.

A pesar de que los resultados en comparación con la probeta templada cumplen con los objetivos del temple, las propiedades comparadas con la probeta testigo no son el caso. Se puede evidenciar en la tabla 3.1 y en la figura 3.23 que todas las propiedades en estas probetas disminuyeron por debajo de las obtenidas para la probeta testigo, con excepción de la tenacidad a la fractura. De este modo, se puede observar que la tenacidad a la fractura en el acero ASTM A36 incrementó de 288,7 J a 331,3 J, lo que representa un aumento de 15%.

Sin embargo, el límite de fluencia disminuyó de 293,3 MPa a 265,2 MPa, la resistencia a la tracción de 421,1 MPa a 391,1 MPa, el porcentaje de elongación de 43,5% a 32,2% y la dureza de 74 HRB a 62 HRB. Esto difiere de los resultados obtenidos en el estudio [21], donde el revenido permitió disminuir las propiedades obtenidas después del temple en porcentajes considerables; sin embargo, en ningún momento estas propiedades fueron más bajas que las propiedades del material sin tratar, incluyendo el porcentaje de elongación que se mantuvo constante.

Una tendencia similar es el cambio de propiedades que presentó el acero ASTM A572 GR50, comparándolo con las propiedades del material base. Con este fin, la figura 3.24 y la tabla 3.2 permiten observar que el límite de fluencia disminuyó de 427,6 MPa a 368,8 MPa, la resistencia a la tracción de 517,8 MPa a 422,3 MPa y la dureza de 83 HRB a 72 HRB, lo que en términos de porcentaje representa un valor de 14%, 18% y 14%, respectivamente. Sin embargo, el porcentaje de elongación incrementó de 32,4% a 34,5% y la tenacidad a la fractura de 311,7 J a 328,7 J. El incremento del porcentaje de elongación en 6% y la tenacidad a la fractura en 5% no son ganancias elevadas de elongación y tenacidad si se comparan con la pérdida de resistencia del 18% que tuvo el material después del revenido.

Por otro lado, si se compara los resultados del revenido con el proceso de temple, la figura 3.24 y la tabla 3.2 muestran que el revenido cumplió en parte su objetivo; pues, la tenacidad a la fractura incrementó del 286,3 J a 328,7, lo que representa un incremento del 15%. También, el porcentaje de elongación incrementó en 5%, pasando de 32,9% a 34,5%. Por otro lado, el límite de fluencia disminuyó en 2%, pasando de 375,0 MPa a 368,8 MPa; la resistencia a la tracción en 3%, de 433,3 MPa a 422,3 MPa; la dureza en 14%, de 83 HRB a 72 HRB. Aunque la dureza disminuyó, el material conservó su resistencia, ganando un 15% de tenacidad a la fractura.

Finalmente, al igual que en procesos anteriores, es el acero ASTM A36 el que presenta mayores cambios porcentuales de propiedades, especialmente en el caso de la tenacidad,

la cual en el acero ASTM A36 fue de 73% en comparación del 15% del acero ASTM A572 GR50. La razón de este cambio significativo de propiedades en el acero ASTM A36 se atribuye al porcentaje de carbono de 0,20%, además de los otros aleantes que presenta este acero, lo cual favorece la formación de carburos que son los principales causantes del cambio de propiedades [5]. Cabe destacar que una vez más, el acero ASTM A572 GR50 es el material que sigue teniendo las mejores propiedades, exceptuando por la tenacidad a la fractura que en el acero ASTM A36 fue de 331,3 J mientras que en el ASTM A572 GR50 fue de 328,7 J, una diferencia menor del 1%.

3.3.5 Análisis de Ventajas y desventajas de los tratamientos térmicos

A continuación, se describen las ventajas y desventajas que se identificaron de la realización de tratamientos térmicos de recocido, temple y revenido de los aceros ASTM A36 y ASTM A572 GR50.

3.3.5.1 Ventajas

- a) Los tratamientos térmicos sobre los aceros ASTM A36 y ASTM A572 GR50 permitieron modificar sus propiedades mecánicas, adecuándolas para diferentes aplicaciones, como se pudo observar en las figuras 3.23 y 3.24, respectivamente. De este modo, se puede incrementar el ciclo de vida de un determinado componente, incrementando su funcionalidad, durabilidad y generando un valor agregado.
- b) El tratamiento térmico de recocido en el acero ASTM A572 GR50 permitió incrementar su porcentaje de elongación en 48%, evitando su fragilización. Pues, es de conocimiento general que la fractura frágil ocurre con poco o nada de deformación, lo que implica que no existe una forma de identificarla antes de que ocurra; por lo cual ocurre súbitamente sin previo aviso. Por esta razón, la fragilidad en el acero es indeseable dentro de la industria [6].
- c) El tratamiento térmico de recocido permitió disminuir la dureza y la resistencia a la tracción tanto en el acero ASTM 36 como en el acero ASTM A572 GR50, lo cual es muy útil en procesos de maquinado y arranque de viruta, pues evita el desgaste excesivo de la herramienta de corte y disminuye los tiempos de producción, ya que permite trabajar con velocidades de corte mayores [4].
- d) El tratamiento térmico de temple, que solo funcionó en el acero ASTM A36, permitió incrementar la dureza de este acero, volviéndolo un material con buena resistencia al desgaste y a la indentación de la superficie, lo cual es útil en el diseño de

elementos mecánicos como los dientes de engranajes, rodamientos, levas, placas de embrague, flechas, entre otros [4].

- e) Al tener el acero ASTM A36 un bajo contenido de carbono (0.20%) y, por lo tanto, de templabilidad baja, se evitó la excesiva fragilización del material durante el temple, como se observó en la figura 3.23 y en la curva esfuerzo deformación de la figura 3.11, lado izquierdo.
- f) El proceso de temple en el acero ASTM A36 permitió incrementar el límite de fluencia y la resistencia a la tracción en 9% y 15%, respectivamente. Esto permite trabajar con cargas mayores a las soportadas por el material original, mejorando el diseño de los elementos mecánicos, sin tener la necesidad de cambiar de material [2].
- g) El proceso de revenido después del temple permitió incrementar la tenacidad a la fractura, sea en el acero ASTM A36 en 15% que en el acero ASTM 572 GR50 en 5%, con respecto a la del material base, lo que los vuelve más aptos para ser usados en procesos de manufactura que requieren alta absorción de energía como la fabricación de pernos o el forjado en frío [4].
- h) Con el tratamiento térmico de revenido se pudo incrementar la tenacidad a la fractura del acero ASTM A36 (331,3 J) a un valor ligeramente superior que la del acero ASTM A572 GR50 (328,7 J), superando, en ambos aceros, a la tenacidad a la fractura del material base.

3.3.5.2 Desventajas

- a) La temperatura y tiempo de recocido deben ser seleccionadas de forma que se evite el sobrecalentamiento de las probetas, pues un tiempo de permanencia extenso en temperaturas altas puede causar la fragilización del material por la fusión prematura de los bordes de grano, como se pudo observar en la pérdida de porcentaje de elongación de las probetas de tracción de acero ASTM A36 en 20% [8].
- b) El enfriamiento en la mufla durante el recocido puede ser un problema si no se maneja adecuadamente la atmósfera que protege las probetas. Como se pudo observar en este estudio, el tratamiento térmico de recocido dio como resultado probetas corroídas y con pérdida de material, sea en el acero ASTM A36 que en el A572.
- c) A pesar de que el recocido es un tratamiento térmico que permite mejorar la maquinabilidad de los aceros debido a la reducción de su resistencia y dureza, muchas veces a valores inferiores a los requeridos para una aplicación específica,

con frecuencia es necesario realizar un tratamiento térmico de temple después que la pieza se haya maquinado, para restaurar o mejorar la resistencia y la dureza.

- d) Los aceros de baja aleación son poco sensibles al tratamiento térmico de temple debido a que no cuentan con el contenido de carbono apropiado para sobresaturar la matriz ferrítica [5]. Por lo tanto, presentan baja templabilidad, lo que se pudo evidenciar en el bajo incremento de dureza y resistencia que presentó el acero ASTM A36, que contiene 0.20% de carbono, y más aún el cambio de dureza nulo y la disminución de la resistencia en el acero ASTM A572 GR50 con un contenido de carbono del 0.13%.
- e) Dado que el revenido es un proceso que permite aliviar esfuerzos residuales y disminuir la fragilidad del material, incrementando la tenacidad. Este proceso no fue útil en el caso del presente trabajo, pues al no haber cambiado las propiedades significativamente en ambos aceros durante el temple, la resistencia disminuyó por debajo de la del material base.
- f) Los tratamientos térmicos pueden conllevar problemas de descarburación de la superficie y a la oxidación de las probetas cuando no se trabaja con atmósferas protectoras que eviten la interacción de las probetas con los gases circundantes, causando la pérdida de material en la superficie. Este problema fue identificado en las probetas de ambos aceros después del proceso de recocido y de temple.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

Debido a la poca información referente al comportamiento que tienen los aceros ASTM A36 y ASTM A572 GR50 ante tratamientos térmicos, el presente trabajo de investigación fue llevado a cabo, del cual se establecen las siguientes conclusiones:

Por medio de la recopilación de información acerca de los tratamientos térmicos de recocido, revenido y temple, así como, del establecimiento de las propiedades mecánicas y composición química de los aceros ASTM A36 y ASTM A572 GR50, en el presente trabajo de investigación se pudo comparar los tratamientos térmicos de recocido, temple y revenido en los aceros más utilizados en el Ecuador, mediante la caracterización mecánica de las propiedades obtenidas antes y después de cada tratamiento y el posterior análisis de sus ventajas y desventajas.

En el presente trabajo de investigación se establecieron las principales características de los aceros ASTM A36 y ASTM A572 GR50. Estos aceros presentan bajos contenidos de carbono 0.20%C y 0.13%C, respectivamente, lo cual afectó negativamente su templabilidad. A pesar de que el acero ASTM A572 GR50 presentó un contenido de carbono inferior al acero ASTM A36, éste posee resistencia a la tracción y límite de fluencia mayores que las del acero ASTM A36. La menor cantidad de carbono del acero ASTM A572 GR50 se compensa en un contenido mayor de otros aleantes como el cromo o el manganeso.

La recopilación de información sobre los tratamientos térmicos de recocido, temple y revenido permitió diseñar sus procedimientos en función de la temperatura, el tiempo de permanencia y el medio de enfriamiento utilizado en cada uno. De esta forma, se pudo notar que el procedimiento de los procesos de recocido y temple difieren solamente en el medio de enfriamiento empleado. De esta forma, se utilizó agua en el caso del temple y enfriamiento dentro del horno, en el caso del recocido; mientras que el revenido se realizó posterior al temple, con enfriamiento al aire libre y a una temperatura menor que la usada en los procesos de recocido y temple.

En este trabajo de investigación se realizaron tratamientos térmicos de recocido, temple y revenido a probetas de acero ASTM A36 y ASTM A572 GR50. Se pudo notar que las probetas de tracción recocidas y templadas presentaron problemas de pérdida de material en la superficie debido a la oxidación del carbono con el oxígeno del aire por las altas

temperaturas de austenización y los tiempos de permanencia prolongados a los cuales fueron sometidas.

La caracterización de las propiedades mecánicas de los aceros tratados térmicamente permitió confrontar sus valores con las propiedades de las probetas testigo, permitiendo identificar incrementos y disminuciones de éstas, además de posibles anomalías y variaciones en el proceso, como la fragilización ocurrida en las probetas recocidas de acero ASTM A36, o la obtención nula de martensita en las probetas de acero ASTM A572 GR50, lo que se tradujo en un cambio nulo de dureza. Los resultados numéricos obtenidos se respaldaron con el análisis de las correspondientes superficies fracturadas, sea en las probetas de ensayo de tracción que en las de ensayo Charpy, además de las curvas esfuerzo-deformación obtenidas.

Se analizaron las ventajas y desventajas de los tratamientos térmicos de recocido, temple y revenido en los aceros ASTM A36 y ASTM A572 GR50, lo cual permitió confrontar estos procesos y su utilidad para modificar las propiedades mecánicas para ajustarlas a aplicaciones específicas. De este modo, el temple puede ser utilizado en el endurecimiento de los dientes de engranajes; el recocido, en el mejoramiento de la maquinabilidad de piezas en la industria metalmeccánica; o el revenido, para aliviar esfuerzos residuales e incrementar la tenacidad, mejorando capacidad del acero para soportar impactos.

4.2 Recomendaciones

Como parte complementaria a este estudio, se sugiere realizar las micrografías correspondientes a cada uno de los tratamientos térmicos, en una probeta de cada muestra, con el fin de conectar los resultados obtenidos con la microestructura correspondiente.

Dado que el tamaño de grano es un parámetro importante en la determinación de la templabilidad de un acero y en las propiedades mecánicas que se pueden obtener mediante un tratamiento térmico, se debe realizar un análisis del tamaño de grano con base a la norma ASTM E -112 (Métodos estándares de prueba para la determinación del tamaño de grano promedio).

Es aconsejable realizar un estudio de la variación de las propiedades mecánicas del acero en función del tiempo y la temperatura en estos aceros. Por lo tanto, se sugiere la realización de un diseño de experimentos donde las propiedades mecánicas son la respuesta y el tiempo y la temperatura, las variables vinculadas a las causas.

Debido a su bajo contenido de carbono, las propiedades mecánicas de los aceros ASTM A36 y ASTM A572 GR50 no se vieron afectadas drásticamente durante la aplicación de tratamientos térmicos. Con el fin de culminar el estudio de los efectos que tienen los tratamientos térmicos sobre estos aceros, se invita a comparar los resultados con aceros de contenido de carbono mayores.

Las probetas de ensayo de tracción que fueron recocidas y templadas presentaron pérdida de material en su superficie, junto con la presencia de óxido. Es necesario corroborar que haya, o no, existido descarburación a través del análisis en un microscopio con una muestra transversal del material para observar la integridad del carbono en la superficie del acero.

Referencias

- [1] D. O. Aranda Pazmiño y V. P. Dután Amay, «Estudio de los aceros estructurales para la construcción de carrocerías para buses,» Escuela Politécnica NAcional , 07 2009. [En línea]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1634>. [Último acceso: 2021 08 25].
- [2] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, USA: Mc Graw Hill, 2012.
- [3] M. H. Almendriz, R. P. Vaca y E. P. Medina, Estudio de la temperatura de precalentamiento sobre la microestructura y propiedades mecánicas de aceros ASTM A36 y ASTM A572, Riobamba: Escuela Politécnica de Chimborazo, 2021.
- [4] S. Schmid y K. Serope, Manufactura, ingeniería y tecnología, 7 ed., México: Pearson, 2015.
- [5] S. K. Mandal, Heat Treatment of Steels, New Delhi: McGraw Hill Education, 2015.
- [6] J. William D. Callister, Material Science and Engineering, an introduction, USA, 2014.
- [7] D. R. Askeland y W. J. Wright, Ciencia e ingeniería de los materiales, España: CENGAGE Learning, 2016.
- [8] J. Dosset, Practical Heat treating, Basic Principals, Estados Unidos: ASM International, 2020.
- [9] F. P. Beer, E. R. Johnston, J. T. DeWolf y D. F. Mazurek, Mecánica de Materiales, Mexico: McGraw-Hill, 2013.
- [10] F. M. G. Miranda, «Estudio del comportamiento del acero A36 mediante ensayos de tracción para determinar fallas en elementos estructurales, mediante la norma ASTM E-8,» 2012. [En línea]. Available: <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/3035/1/Tesis%20I.%20M.%20148%20-%20Guz%C3%B1ay%20Miranda%20Fernando%20Mes%C3%ADas.pdf>.
- [11] K. M. Espinoza de la Vega y E. M. Pazmiño Guevara, «Evaluacion experimental de las propiedades mecanicas de los aceros estructurales, A-36, A-572 Y A-588, para la obtencion de los diagramas de esfuerzo-deformacion,» 2019. [En línea]. Available:

<http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/17648/TESIS%20FINAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

- [12] ASTM, «ASTM A36/A36M-19: Standard Specification for Carbon Structural Steel,» ASTM International, 2019 07 04. [En línea]. Available: https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CA0036_A0036M-19%7Cen-US. [Último acceso: 2021 11 01].
- [13] O. D. A. Pazmiño, «Estudio de aceros estructurales para la construcción de carrocerías para buses,» 2009. [En línea]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1634/1/CD-2300.pdf>.
- [14] F. S. Navichoc Ujpán, Vigas principales y secundarias, Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 2015.
- [15] M. Hernández , «Estudio de la soldabilidad del acero estructural ASTM A572 grado 50 con proceso SMAW,» 2018. [En línea]. Available: https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/3046/1/TGT_1630.pdf.
- [16] ASTM, «ASTM A572/A572M-21e1: Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel,» ASTM International, 2021 06 16. [En línea]. Available: https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CA0572_A0572M-21E01%7Cen-US. [Último acceso: 2021 11 11].
- [17] W. E. Bryson, Heat Treatment, MAster Control Manual, Munich: Hanser Publications, 2015.
- [18] N. M. C. Aguilar, «Soluciones sólidas,» 2020. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/document/445464389/Endurecimiento-por-solucion-solida-docx>.
- [19] J. A. P. Patiño, «Tratamientos termicos de los aceros,» 1996. [En línea]. Available: <http://eprints.uanl.mx/435/1/1020115008.PDF>.
- [20] F. D. d. C. Rodriguez, «Aceros, estructuras y tratamientos tfo12. [En línea]. Available: http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/aceros%20estructuras%20y%20tratamientos%20termicos.pdf.

- [21] J. Hasan, «Analysis of Mechanical Behavior and Microstructural Characteristics Change of ASTM A-36 Steel Applying Various Heat Treatment,» *Journal of Material Science & Engineering*, vol. 5, 2016.
- [22] A. Esam y K. Ventakesh, «Effect of temperature and cooling regime on mechanical properties of high-strength low-alloy steel,» *Fire and Materials*, 2015.
- [23] R. Mahbobur, S. Hasan y K. Karim, «Effect of Heat Treatment on Low Carbon Steel: An Experimental Investigation,» *Trans Tech Publications*, vol. 860, pp. 7-12, 2016.
- [24] T. Senthilkumar y T. K. Ajiboye, «Effect of heat treatment processes on the mechanical properties of medium carbon steel,» *Journal of Minerals and Materials Characterization & Engineering*, vol. 11, nº 2, pp. 143-152, 2012.
- [25] R. Jha, S. Ranjan, R. Kumar y M. Sharma, «Investigation of heat treatment on Mechanical Properties of Mild Steel,» *International Journal of Engineering Sciences*, vol. 25, nº 63019, pp. 24-28, 2017.
- [26] ASTM, «ASTM E8/E8M-21: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials,» ASTM International, 27 05 2021. [En línea]. Available: https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CE0008_E0008M-21%7Cen-US. [Último acceso: 25 11 2021].
- [27] ASTM, «ASTM E23-18: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials,» ASTM International, 05 11 2018. [En línea]. Available: <https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CE0023-18%7Cen-US>. [Último acceso: 26 12 2021].
- [28] ASM, Handbook Vol.4 , Heat Treating, Estados Unidos de América: ASM International, 1991.
- [29] ASTM, «ASTM E18-20:Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials,» ASTM , 26 03 2020. [En línea]. Available: <https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CE0018-20%7Cen-US>. [Último acceso: 15 12 2021].
- [30] F. Rodriguez, «Perfiles estructurales,» 2019. [En línea]. Available: http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m5/Perfiles_estructurales_2019-1.pdf.

- [31] Crystal, «Tatamiento termico de temple para el acero,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.nzdl.org/cgi-bin/library.cgi?e=d-00000-00---off-0gtz--00-0----0-10-0---0---0direct-10---4-----0-1l--11-en-50---20-about---00-0-1-00-0-0-11-1-0utfZz-8-00&a=d&c=gtz&cl=CL3.3&d=HASH014e32ed215adb38c797ca07.3>.
- [32] H. Michaelsen y B. Nielsen, «Struers -Ensuring Certainty,» [En línea]. Available: <https://www.struers.com/es-ES/Knowledge/Hardness-testing#applicationspecialists>.

ANEXO I.

CERTIFICADO DE CALIDAD DE LOS ACEROS ASTM A36 Y ASTM A572 GR50

ARCELORMITTAL BRASIL S.A.			Certificado de Qualidade / Mill Sheet / Quality Certificate							Pág: 4 de 05											
Usina / Plant: ArcelorMittal Tubarão			Ordem de Venda / Order No: 196328714 / 000007		N° do pedido do cliente / Buyer ref. No: 0006000107/000002		N° pedido do consumidor / Customer Ref. No:	N° do certificado / Certificate: 004030837501	Data de emissão / Issue Date: 06.12.2021												
Av. Brigadeiro Eduardo Gomes, 526, Polo Industrial Tubarão, Serra-ES, CEP 29160-904 CNPJ: 17.469.701/0104-92 Telefone: +55(27)3348-1240/3348-2220 Fax: +55(27)3348-1482/3348-2271			Consumidor / Customer: ARCELORMITTAL INTERNATIONAL LUXEMBO			Cliente final / End user: KUBIEC															
Aplicação / Application: CONSTRUÇÃO CIVIL E PERFILAÇÃO - PERFIS DOBRADOS / CIVIL CONSTRUCTION AND PROFILING - PROFILES FOLDED			Produto / Product: Bobina Laminada a Quente / Hot Rolled Coil			Norma do Produto / Product Standard: ASTM A572-50			Part Number: CONFORME NORMA												
Espessura / Thickness: (MM)		Largura / Width: (MM)	Borda / Edge: Natural	Tipo de dimensão / type of dimension: Nominal	Óleo / Oil: Não/No	Aspecto Superficial / Surface Aspect: X	Cond. Especial / Special Cond. NORMAL		N° Protocolo / No Protocol: EQ0009-00-59												
Composição Química/ Chemical Composition (%) - L = Análise de Panela / Ladle Analysis - P = Análise de Produto / Product Analysis																					
Contas	Cód.	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	N	H	Sn	As	Ti	B	Ca	XD
2488278	L	0,13	0,012	0,890	0,015	0,0057	0,036	0,007	0,007	0,026	0,001	0,000	0,0170	0,0025		0,001	0,0017	0,000	0,0000	0,0002	0,017

N° da amostra / Sample No:	Pos. / Dir. / Position / Direction	Tração / Tensile Unidade / Unit = MPa Base / Basis = GL=50mm, W=12,5mm						Dobramento / Bending		Dureza / Hardness Test:		BH		Impacto / Charpy Unid. Temp. / Temp. Unit: Unid. Energ. / Energy Unit: CPTS:				DWTT Unid. Temp. / Temp. Unit: CPTS:				T. Grão / Grain Size		Inclusões / Inclusion		Anisotropia / Anisotropy		Expansão de furo / hole expansion							
		LE / YS	LR / TS	Resq. El. / Yield Ratio (%)	Along. / Elong (%)	Red. Área (%) / Area Reduc.	Pos. - Dir. / Position-Direction	Jug. / Judgment (Angulo / Ratio)	Posição / Position	Média / Average	BH1	BH2	Pos. - Dir. / Position-Direction	Temperatura / Temperature	TR5 / TR1	Energia / Energy F. Ductil/Ductile F. Frágil Exp. Lateral/ L. Expansion	Pos. - Dir. / Position-Direction	Temperatura / Temperature	Área ductil % / Ductile Area %				TOF / FGS	TOA / ACS	Embutimento / Cupping test (mm)		n		i	r	t				
		1	2	3	Méd / Ave	1	2	3	Méd / Ave	1	2	3	Méd / Ave	1	2	3	Méd / Ave	1	2	3	4														
T0638632T	T4T	410	504	81	31									/																					
T0638633T	T4T	409	503	81	31									/																					
T0638913T	T4T	409	502	81	31									/																					

Número do lote / Lot ID	N° da nota fiscal / Issue Number	Peso líq. / Net weight t	Contida / Heat No	Comprimento Real / Real Length (m)	Amostra 1 / Sample 1	Amostra 2 / Sample 2	Amostra 3 / Sample 3	Códigos / Codes		Obs.
KA111491	005383006	18,000	2485278	213,00	T0638632T			(1) POSIÇÃO / POSITION	GI/INCLUSÕES	XD NB + TI + V
KA111492	005383006	17,160	2485278	198,00	T0638632T			1 - Topo / Head	TIPO / TYPE	
KA111511	005383006	18,000	2485278	213,00	T0638632T			2 - % Alongura / % Width	A - Sulfuro / Sulfuride	
KA111512	005383006	17,320	2485278	199,00	T0638632T			3 - Corpo / Body	B - Alumínio / Alumina	
KA111501	005383006	17,900	2485278	205,00	T0638633T			4 - % Alongura / % Width	C - Oxido / Oxide	
KA111502	005383006	17,490	2485278	200,00	T0638633T			5 - Direção / Dir.	D - Oxido / Oxide	
KA147401	005383006	17,690	2485278	208,00	T0638913T			6 - Direção / Dir.	E - Furo / Hole	
KA147402	005383006	17,740	2485278	205,00	T0638913T			7 - Direção / Dir.	F - Furo / Hole	
								8 - Direção / Dir.	G - Oxido / Oxide	
								9 - Direção / Dir.	H - Oxido / Oxide	

CERTIFICAMOS QUE O MATERIAL AQUI DESCRITO, FOI INSPECIONADO E APROVADO DE ACORDO COM AS ESPECIFICAÇÕES, QUE NÃO ESTÁ CONTAMINADO POR RADIODATIVIDADE ACIMA DOS LIMITES NORMAIS E QUE O MATERIAL NÃO SOFREU CONTAMINAÇÃO POR MERCÚRIO DURANTE O SEU PROCESSO DE FABRICAÇÃO. / WE HEREBY CERTIFY THAT THE MATERIAL DESCRIBED HEREIN HAS BEEN SATISFACTORY INSPECTED IN ACCORDANCE WITH THE SPECIFICATIONS, HAS NOT BEEN CONTAMINATED BY ANY RADIOACTIVITY ABOVE NORMAL BACKGROUND LEVELS AND HAS NOT COME INTO CONTACT WITH ANY MERCURY BEARING INSTRUMENTS OR MERCURE CONTAMINANTS DURING ITS PRODUCTIVE PROCESS.

PROCESSO DE FABRICAÇÃO: ACARIA LD - INDOZAMENTO CONTÍNUO - LAMINAÇÃO A QUENTE CONTÍNUO / MANUFACTURING PROCESS: BASIC OXGEN LD, CONTINUOUS CASTING, HOT STRIP MILL (w/Inert). LICENÇA PARA USO DA MARCA AMBIENT DE QUALIDADE AMBIENTAL - ROTULO ECOLÓGICO AMBI - PARA EMPRESAS (BOBINA LAMINADA A QUENTE), LICENÇA PARA USO DA MARCA AMBIENT DE QUALIDADE AMBIENTAL - TO THE COMPANY (HOT ROLLED COIL)

CERTIFICAÇÕES NAVAR / SHIPPING CERTIFICATIONS: ABS, BV, DNV GL, LR, RINA, CCS, NK, KR.


André Carvalho Prado
 Gerência de Assistência Técnica a Clientes
 Customer Technical Support Manager

ARCELORMITTAL BRASIL S.A.		Certificado de Qualidade / Mill Sheet / Quality Certificate								Pág: 1											
Usina / Plant: ArcelorMittal Tubarão		Ordem de Venda / Order No:	Nº do pedido do cliente / Buyer ref. No:	Nº pedido do consumidor / Customer Ref. No:	Nº do certificado / Certificate	Data de emissão / Issue Date:															
Av. Brigadeiro Eduardo Gomes, 526, Polo Industrial Tubarão, Serra-ES, CEP 29160-904 CNPJ: 17.469.791/0104-82 Telefone:+55(27)3348-1240/3348-2220 Fax:+55(27)3348-1482/3348-2271		196207827 / 000009	0006000066/000007	003939930501	04.11.2021																
Consumidor / Customer: ARCELORMITTAL INTERNATIONAL LUXEMBO		Cliente final / End user: DIPAC MANTA SA																			
Aplicação / Application: DISTRIBUIÇÃO E CENTROS DE SERVIÇOS - CORTE EM CHAPAS /SERVICE AND DISTRIBUTION CENTERS - CUT TO LENGTH		Produto / Product: Bobina Laminada a Quente / Hot Rolled Coil			Norma do Produto / Product Standard: ASTM A36			Part Number: CONFORME NORMA													
Espessura / Thickness: (MM)		Largura / Width: (MM)		Borda / Edge: Natural	Tipo de dimensão / type of dimension: Nominal	Óleo / Oil: Não/No	Aspecto Superficial/ Surface Aspect: X	Cond. Especial / Special Cond. NORMAL		Nº Protocolo / No Protocol: EQ0006-00-87											
Composição Química / Chemical Composition (%) - L = Análise de Panela / Ladle Analysis - P = Análise de Produto / Product Analysis																					
Corrida	Cód.	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	N	H	Sn	Ti	B	Ca		
1499108	L	0,20	0,012	0,748	0,016	0,0074	0,034	0,006	0,007	0,013	0,000	0,0001	0,0034			0,0010	0,004	0,0000	0,0000		


Nº de amostra / Sample No:	Tração/ Tensile Unidade / Unit = MPa Base / Basis = GL=50mm, W=12,5mm					Dobramento Bending		Dureza/ Hardness Test:		BH		Impacto / Charpy Unid. Temp. / Temp. Unit: Unid. Energ. / Energy Unit: CPITS:				DWTT Unid. Temp. / Temp. Unit: CPITS :				T. Grão / Grain Size		Inclusões / Inclusion		Anisotropia / Anisotropy				Expansão de furo / Hole expansion					
	Pos. Dir. / Direction	LE /YS	LR /TS	Razão R / Yield Ratio (%)	Along. / Elong (%)	Red. Área (%) Area Reduc.	Pos. Dir. / Position Direction	Julg. / Judgment (Angular / Ratio)	Posição / Position	Médias / Average	BH1	BH2	Pos. Dir. / Position Direction	Temperatura / Temperature	F. Dúctil/Ductile F. Frágil Exp. Lateral / L. Expansion			Pos. Dir. / Position Direction	Temperatura / Temperature	Área dúctil % / Ductile Area %			TGF / FGS	TGA / AGS	Enfriamento / Cooling test	n	r		r	r			
															1	2	3			Méd/ Ave.	1	2									3	Méd/ Ave.	
T0637802T	T4T	287	487	58	30								/																				

Número do lote / Lot ID	Nº da nota Recal / Issue Number	Peso Br. / Net weight	Corrida / Heat No	Comprimento Real / Real Length (m)	Amostra 1 / Sample 1	Amostra 2 / Sample 2	Amostra 3 / Sample 3	Códigos / Codes		Obs. Grau de aço sem garantia de testes mecânicos. Quando apresentados os valores são somente para referência. / Mechanical properties only for reference when shown.
								(R) POSIÇÃO / POSITION	(D) INCLUIÇÕES	
KA110331	005320891	12,050	1499108	130,00	T0637802T			(R) Tapa / Head	(D) TIPO	
KA110332	005320891	12,050	1499108	122,00	T0637802T			(R) 1 - Largura / Width	(D) A - Dúctil / Ductile	
								(R) 2 - Massa / Bulk	(D) B - Aluminado / Aluminized	
								(R) 3 - Largura / Width	(D) C - Oxidado / Oxidized	
								(R) 4 - Massa / Bulk	(D) D - Oxidado / Oxidized	
								(R) 5 - Direção / Direction	(D) E - Total / Total	
								(R) 6 - Direção / Direction	(D) F - Flaco / Thin	
								(R) 7 - Transversal	(D) G - Grosso / Heavy	
								(R) 8 - Dobramento / Bend		
								(R) 9 - Aprobado / Approved		

CERTIFICAMOS QUE O MATERIAL AQUI DESCRITO, FOI INSPECIONADO E APROVADO DE ACORDO COM AS ESPECIFICAÇÕES, QUE NÃO ESTÁ CONTAMINADO POR RADIATIVIDADE ACIMA DOS LIMITES NORMAIS E QUE O MATERIAL NÃO SUFRIU CONTAMINAÇÃO POR MERCÚRIO DURANTE O SEU PROCESSO DE FABRICAÇÃO. / WE HEREBY CERTIFY THAT THE MATERIAL DESCRIBED HEREIN HAS BEEN SATISFACTORILY INSPECTED BY ACCORDANCE WITH THE SPECIFICATIONS, HAS NOT BEEN CONTAMINATED BY ANY RADIOACTIVITY ABOVE NORMAL BACKGROUND LEVELS AND HAS NOT COME INTO CONTACT WITH ANY MERCURY BEARING INSTRUMENTS OR MERCURY CONTAMINANTS DURING ITS PRODUCTIVE PROCESS.

PROCESSO DE FABRICAÇÃO: AÇARIA LD - LINGOTAMENTO CONTÍNUO - LAMINAÇÃO A QUENTE CONTÍNUO / MANUFACTURING PROCESS: BASIC OXYGEN LD, CONTINUOUS CASTING, HOT STEEL MILL ON VESSELS, LAMINATION FOR USE OF BRANDS ABNT, ABNT ECOLABEL, ABNT - PAZDAQUENÇA (BOBINA LAMINADA A QUENTE) LICENSE FOR USING ABNT ENVIRONMENTAL MARK - ABNT ECOLABEL - TO THE COMPANY (HOT ROLLED COIL)

CERTIFICAÇÕES NBR-15530 / SHIPBUILDING CERTIFICATIONS: ABS, BV, DNV GL, LR, RINA, CCS, NK, NKS, NIS.


André Carvalho Prado
 Gerência de Assistência Técnica a Clientes
 Customer Technical Support Manager

ANEXO II.

INFORME DEL ENSAYO DE TRACCIÓN REALIZADO POR EL LABORATORIO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
MECÁNICA



LABORATORIO DE ANÁLISIS
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

F01-PE-LAEV-01 Rev.01

INFORME TÉCNICO

LAEV – M22.020

Quito, 8 de marzo de 2022

Solicitado por: M.Sc. Mario Granja
Persona de contacto: Franklin Lara, Alex Quinga
Teléfono: 0984906533
Correo: alex.quinga@epn.edu.ec
Fecha de recepción: 24/02/2022
Fecha de ejecución: 02/03/2022 – 03/03/2022

ORDEN DE TRABAJO N°: DM-OTI0029-2022

1. **MUESTRAS:** Cuarenta (40) probetas planas de acero para ensayo de tracción, y cuarenta (40) probetas metálicas para ensayo de impacto Charpy.

2. GENERALIDADES E IDENTIFICACIÓN:

La siguiente descripción fue proporcionada por el cliente:

Título de la tesis: COMPARACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS ACEROS MÁS UTILIZADOS EN EL ECUADOR

En la tabla 1 se muestra la identificación de las muestras a ser ensayadas:

Tabla 1. Identificación de las muestras

Ensayo	Id. cliente	Id. LAEV
Tracción	1-5 (A36 R)	M22.020.01 - M22.020.05
	6-10 (A36 T)	M22.020.06 - M22.020.10
	11-15 (A36 T+R)	M22.020.10 - M22.020.15
	16-20 (A572 R)	M22.020.16 - M22.020.20
	21-25 (A572 T)	M22.020.21 - M22.020.25
	26-30 (A572 T+R)	M22.020.26 - M22.020.30
	31-35 (A36)	M22.020.31 - M22.020.35
Impacto Charpy	36-40 (A572)	M22.020.36 - M22.020.40
	1-5 (A36)	M22.020.41 - M22.020.45
	6-10 (A36 R)	M22.020.46 - M22.020.50
	11-15 (A36 T)	M22.020.51 - M22.020.55
	16-20 (A36 T+R)	M22.020.56 - M22.020.60
	21-25 (A572)	M22.020.61 - M22.020.65
26-30 (A572 R)	M22.020.66 - M22.020.70	

Tabla 1. (Continuación)

Impacto Charpy	31-35 (A572 T)	M22.020.71 - M22.020.75
	36-40 (A572 T+R)	M22.020.76 - M22.020.80

3. CONDICIONES AMBIENTALES:

Temperatura: $22,8 \pm 2,1$ °C

Humedad relativa: $50,4 \pm 7,9$ %

4. ENSAYO DE TRACCIÓN MATERIAL BASE

En las tablas de la 2 a la 10 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de tracción.

Tabla 2. Ensayo de tracción grupo A36 R

Id.	Ancho Promedio	Espesor Promedio	Carga máxima registrada		Límite de fluencia		Resistencia a la tracción		% elongación en 50 mm
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	ksi	MPa	
M22.020.01	12,78	5,93	5 634	25 062	23,7	163,2	48,0	331,0	34,7
M22.020.02	12,71	5,82	5 474	24 352	22,3	153,6	47,7	329,5	*30,3
M22.020.03	12,47	5,87	5 514	24 529	22,6	156,0	48,6	335,4	34,6
M22.020.04	12,62	5,75	5 504	24 485	22,8	157,1	48,9	337,8	*29,6
M22.020.05	12,75	5,82	5 544	24 663	21,6	149,1	48,2	332,7	*31,0

* Falla fuera de las marcas

Tabla 3. Ensayo de tracción grupo A36 T

Id.	Ancho Promedio	Espesor Promedio	Carga máxima registrada		Límite de fluencia		Resistencia a la tracción		% elongación en 50 mm
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	ksi	MPa	
M22.020.06	12,42	5,85	7 931	35 277	47,9	330,3	70,4	486,1	*17,5
M22.020.07	12,41	5,75	7 471	33 234	42,7	294,3	67,5	466,3	25,1
M22.020.08	12,54	5,83	8 070	35 899	48,2	332,6	71,2	491,6	24,4
M22.020.09	12,31	5,72	7 921	35 232	50,0	344,9	72,6	501,0	*4,4
M22.020.10	12,44	5,78	7 621	33 900	43,5	299,7	68,4	472,0	21,9

* Falla fuera de las marcas

Tabla 5. Ensayo de tracción grupo A36 T+R

Id.	Ancho Promedio	Espesor Promedio	Carga máxima registrada		Límite de fluencia		Resistencia a la tracción		% elongación en 50 mm
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	ksi	MPa	
M22.020.11	12,53	5,85	6 413	28 526	38,3	264,0	56,4	389,6	28,4
M22.020.12	12,48	5,86	6 453	28 704	41,0	282,6	56,9	392,9	34,9
M22.020.13	12,60	5,78	6 503	28 926	39,1	269,9	57,6	397,6	31,0
M22.020.14	12,42	5,83	6 353	28 260	38,0	261,8	56,6	390,7	32,8
M22.020.15	12,38	5,82	6 253	27 816	37,6	259,4	56,0	386,5	32,0

Tabla 6. Ensayo de tracción grupo A572 R

Id.	Ancho Promedio	Espesor Promedio	Carga máxima registrada		Límite de fluencia		Resistencia a la tracción		% elongación en 50 mm
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	ksi	MPa	
M22.020.16	12,56	5,93	5 345	23 774	35,5	244,7	46,3	319,5	41,2
M22.020.17	12,73	5,92	5 305	23 597	34,0	234,8	45,4	313,4	48,7
M22.020.18	12,92	5,90	5 325	23 686	33,8	233,3	45,1	311,0	46,9
M22.020.19	12,52	5,87	5 235	23 286	34,9	241,0	46,0	317,2	*36,3
M22.020.20	12,43	6,02	5 265	23 419	34,4	237,4	45,4	313,3	47,8

* Falla fuera de las marcas

Tabla 7. Ensayo de tracción grupo A572 T

Id.	Ancho Promedio	Espesor Promedio	Carga máxima registrada		Límite de fluencia		Resistencia a la tracción		% elongación en 50 mm
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	ksi	MPa	
M22.020.21	12,55	5,95	6 992	31 102	53,1	366,1	60,4	417,0	34,0
M22.020.22	12,42	5,83	6 922	30 791	55,6	383,0	61,7	425,7	*20,8
M22.020.23	12,56	6,06	7 990	35 543	54,7	377,2	67,7	467,5	27,6
M22.020.24	12,41	5,88	7 112	31 635	53,1	366,2	62,9	434,0	37,1
M22.020.25	12,61	5,97	7 441	33 101	55,3	381,6	63,8	440,2	*16,3

* Falla fuera de las marcas

Tabla 8. Ensayo de tracción grupo A572 T+R

Id.	Ancho Promedio	Espesor Promedio	Carga máxima registrada		Límite de fluencia		Resistencia a la tracción		% elongación en 50 mm
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	ksi	MPa	
M22.020.26	12,65	5,94	7 032	31 280	51,8	356,9	60,4	416,8	33,6
M22.020.27	12,52	5,94	7 152	31 813	54,4	375,0	62,0	428,3	*11,5
M22.020.28	12,58	6,02	7 511	33 412	55,6	383,0	64,0	441,7	*15,0
M22.020.29	12,53	5,85	6 842	30 436	53,7	370,2	60,2	415,7	*16,7
M22.020.30	12,63	5,97	7 142	31 768	52,4	361,2	61,1	421,8	35,4

* Falla fuera de las marcas

Tabla 9. Ensayo de tracción grupo A36

Id.	Ancho Promedio	Espesor Promedio	Carga máxima registrada		Límite de fluencia		Resistencia a la tracción		% elongación en 50 mm
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	ksi	MPa	
M22.020.31	12,54	5,83	7 272	32 346	48,7	336,1	64,2	442,9	41,8
M22.020.32	12,55	5,86	7 092	31 546	43,9	302,6	62,2	429,4	44,1
M22.020.33	12,57	5,87	6 882	30 614	40,9	282,1	60,2	415,4	41,7
M22.020.34	12,50	5,88	6 882	30 614	41,2	283,9	60,4	417,0	44,5
M22.020.35	12,77	5,90	7 052	31 369	42,6	293,5	60,4	416,8	46,4

Tabla 10. Ensayo de tracción grupo A572

Id.	Ancho Promedio	Espesor Promedio	Carga máxima registrada		Límite de fluencia		Resistencia a la tracción		% elongación en 50 mm
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	ksi	MPa	
M22.020.36	12,74	5,98	8 919	39 673	62,1	428,0	75,5	521,4	33,4
M22.020.37	12,59	6,01	8 949	39 807	63,2	435,9	76,3	526,7	34,8
M22.020.38	12,57	5,98	8 450	37 586	58,9	406,0	72,5	500,6	*17,9
M22.020.39	12,52	6,01	8 749	38 918	62,7	432,2	75,0	517,9	*19,0
M22.020.40	12,52	6,00	8 669	38 563	61,3	422,6	74,5	514,0	29,0

* Falla fuera de las marcas

5. ENSAYO DE IMPACTO CVN

- Temperatura de ensayo: $23,5 \pm 0,2$ °C

En las tablas de la 11 a la 18 se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de impacto CVN realizado a las probetas.

Tabla 11. Resultados obtenidos del ensayo de impacto CVN, A36.

Identificación	Energía de Impacto	
	ft-lbf	J
M22.020.41	218	296
M22.020.42	236	320
M22.020.43	213	289
M22.020.44	207	281
M22.020.45	196	266
Promedio*	213	289

Tabla 12. Resultados obtenidos del ensayo de impacto CVN, A36 R.

Identificación	Energía de Impacto	
	ft-lbf	J
M22.020.46	116	157
M22.020.47	102	138
M22.020.48	136	184
M22.020.49	122	165
M22.020.50	104	141
Promedio*	114	155

Tabla 13. Resultados obtenidos del ensayo de impacto CVN, A36 T.

Identificación	Energía de Impacto	
	ft-lbf	J
M22.020.51	44	60
M22.020.52	148	201
M22.020.53	106	144
M22.020.54	52	71
M22.020.55	170	230
Promedio*	102	138

Tabla 14. Resultados obtenidos del ensayo de impacto CVN, A36 T+R.

Identificación	Energía de Impacto	
	ft-lbf	J
M22.020.56	245	332
M22.020.57	245	332
M22.020.58	244	331
M22.020.59	244	331
M22.020.60	236	320
Promedio*	244	331

Tabla 15. Resultados obtenidos del ensayo de impacto CVN, A572.

Identificación	Energía de Impacto	
	ft-lbf	J
M22.020.61	244	331
M22.020.62	220	298
M22.020.63	226	306
M22.020.64	244	331
M22.020.65	206	279
Promedio*	230	312

Tabla 16. Resultados obtenidos del ensayo de impacto CVN, A572 R.

Identificación	Energía de Impacto	
	ft-lbf	J
M22.020.66	196	266
M22.020.67	208	282
M22.020.68	218	296
M22.020.69	216	293
M22.020.70	211	286
Promedio*	212	287

Tabla 17. Resultados obtenidos del ensayo de impacto CVN, A572 T.

Identificación	Energía de Impacto	
	ft-lbf	J
M22.020.71	242	328
M22.020.72	168	228
M22.020.73	198	268
M22.020.74	194	263
M22.020.75	242	328
Promedio*	211	286


Tabla 18. Resultados obtenidos del ensayo de impacto CVN, A572 T+R.

Identificación	Energía de Impacto	
	ft-lbf	J
M22.020.76	244	331
M22.020.77	243	329
M22.020.78	242	328
M22.020.79	243	329
M22.020.80	238	323
Promedio*	243	329

*El promedio de las muestras se calcula con los tres valores intermedios de energía de impacto.

En el anexo se presentan las gráficas de las curvas de esfuerzo vs deformación de los ensayos de tracción realizados a las probetas, cabe indicar que, la escala del porcentaje de deformación está calculado en función al desplazamiento del cabezal, por lo que, no corresponde al real debido a los deslizamientos existentes durante el ensayo.

Nota.- Los resultados contenidos en el presente informe corresponden únicamente a las muestras ensayadas por el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV). Además, los valores de fuerza que se emiten en el presente documento (y con los que se ha evaluado la conformidad) corresponden a valores corregidos en función del último certificado de calibración del equipo de fuerza y no se ha utilizado el valor de la incertidumbre

	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Firma:	 <p>En nombre del servicio prestado por: JONATHAN FERNANDO CASTRO REVIELO</p>	<p>WILSON IVAN GUACHAMIN ACERO</p> <p>Firmado digitalmente por: WILSON IVAN GUACHAMIN ACERO Fecha: 2022.03.08 12:20:43 +0500</p>
Nombre:	Ing. Jonathan Castro, M.Sc.	Ph.D. Wilson Guachamín
Cargo:	ESPECIALISTA DE LABORATORIO	JEFE
LABORATORIO DE ANALISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES		

ANEXO

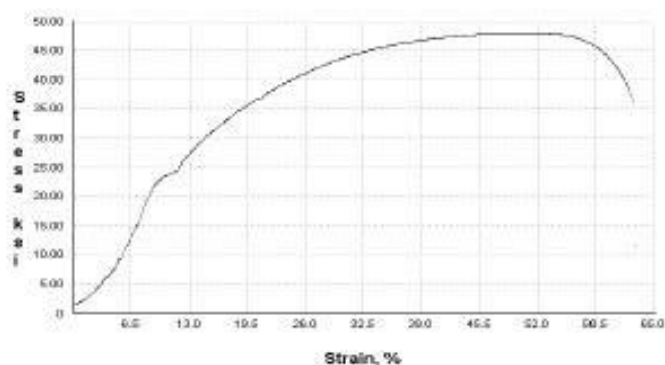


Figura 1. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 1

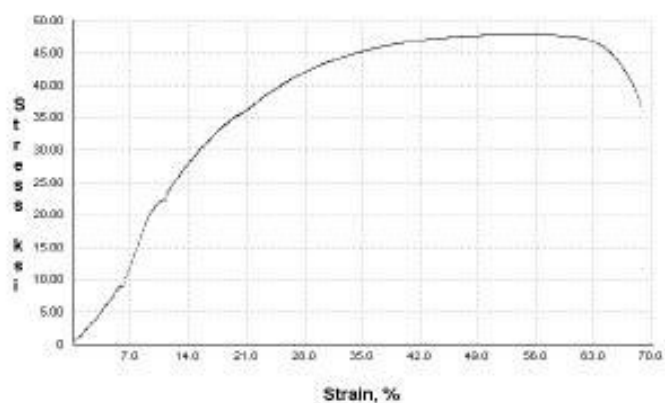


Figura 2. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 2

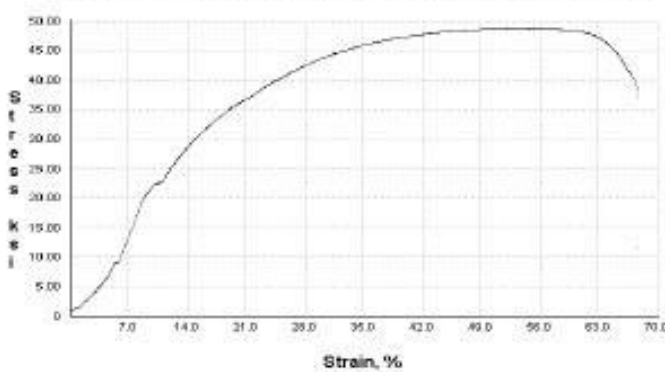


Figura 3. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 3

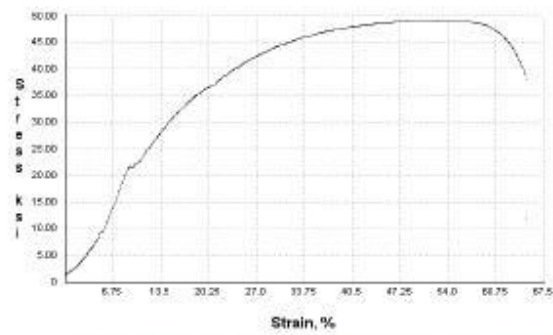


Figura 4. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 4

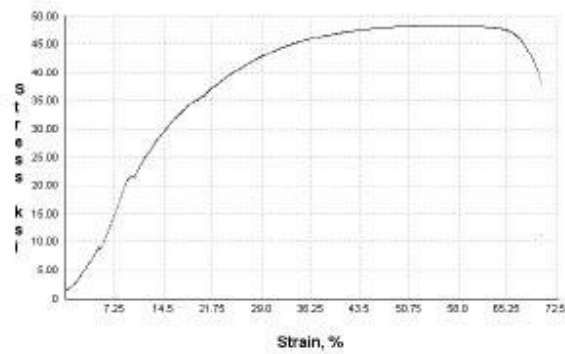


Figura 5. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 5

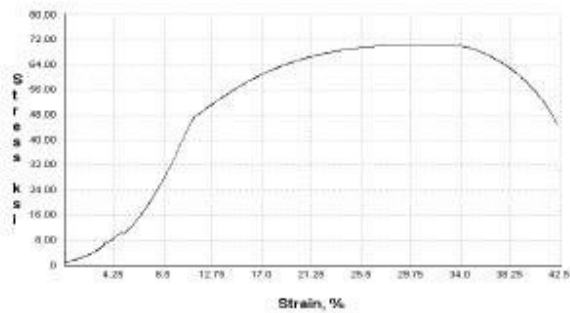


Figura 6. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 6

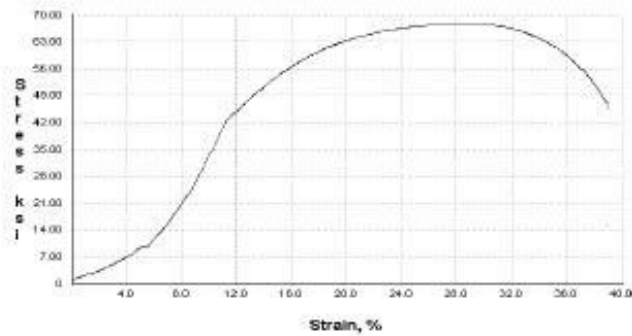


Figura 7. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 7

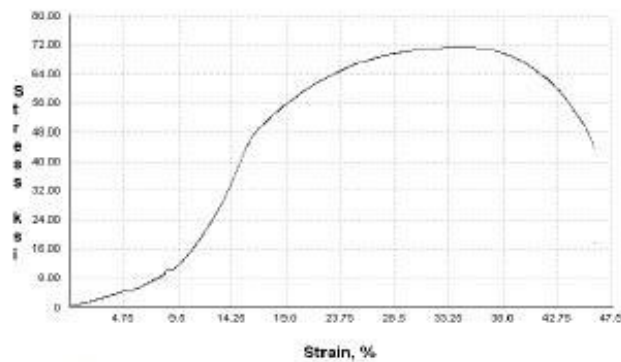


Figura 8. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 8

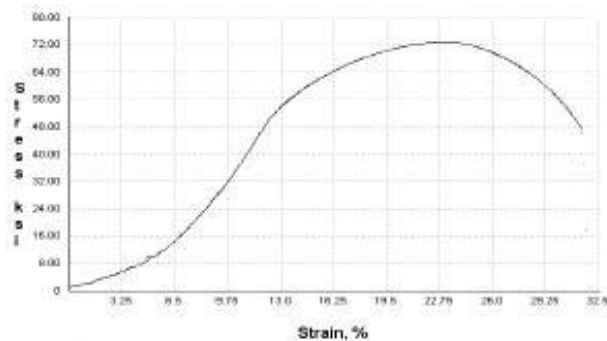


Figura 9. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 9

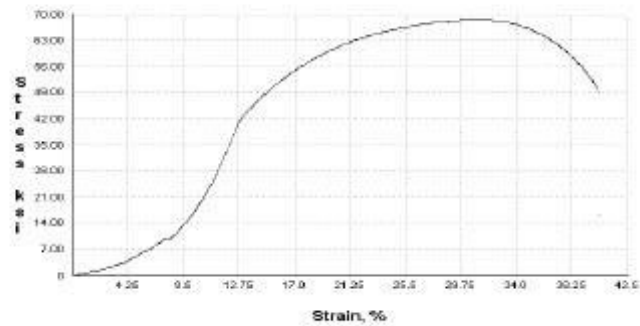


Figura 10. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 10

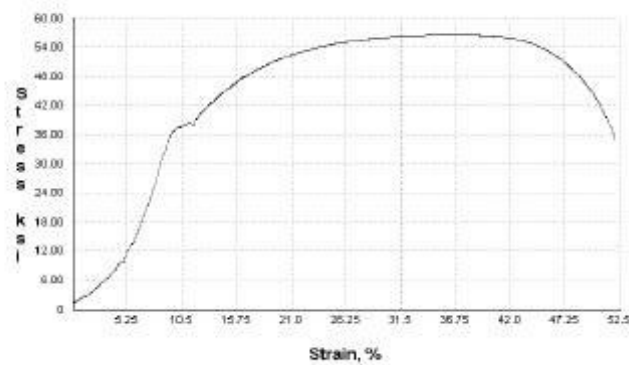


Figura 11. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 11

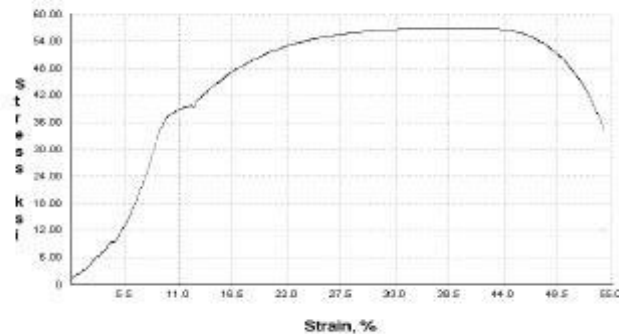


Figura 12. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 12

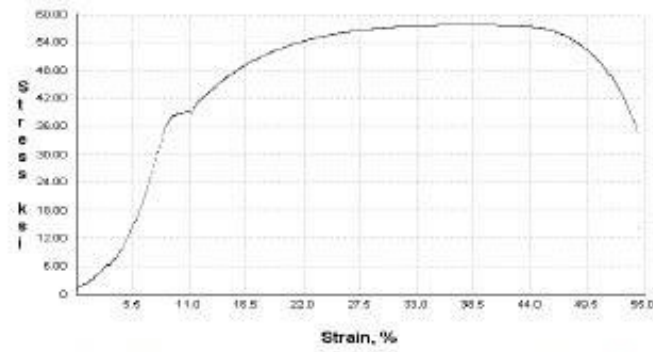


Figura 13. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 13

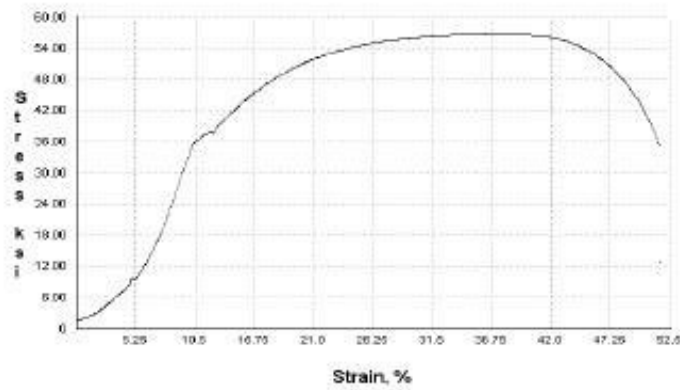


Figura 14. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 14

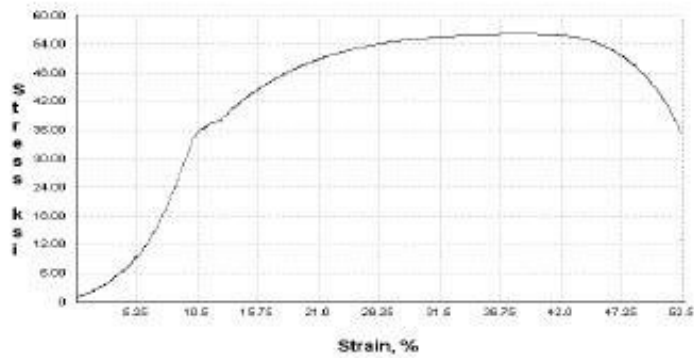


Figura 15. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 15

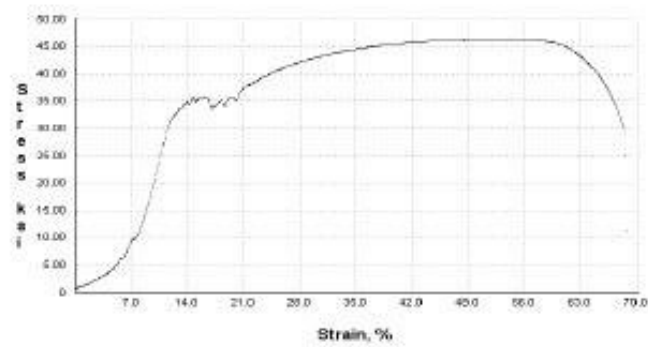


Figura 16. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 16

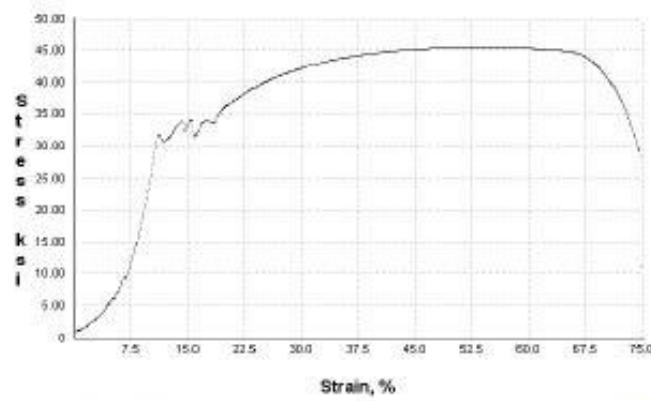


Figura 17. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 17

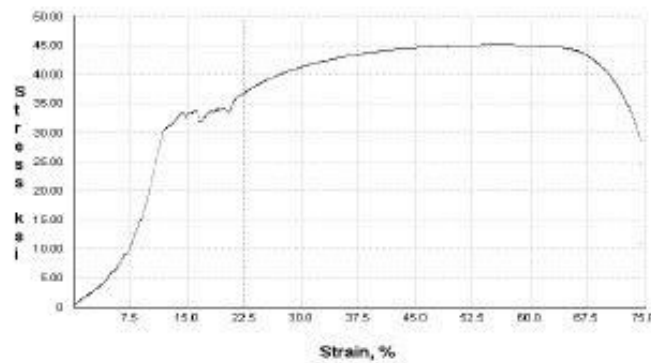


Figura 18. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 18

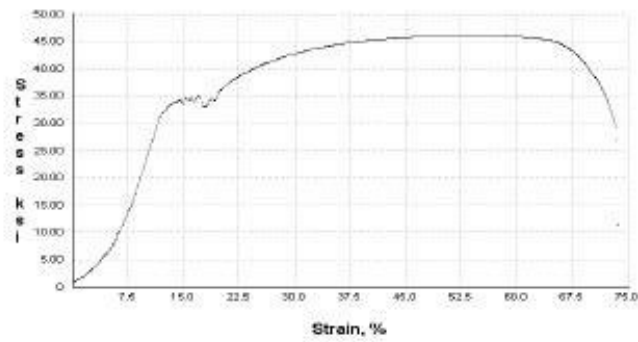


Figura 19. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 19

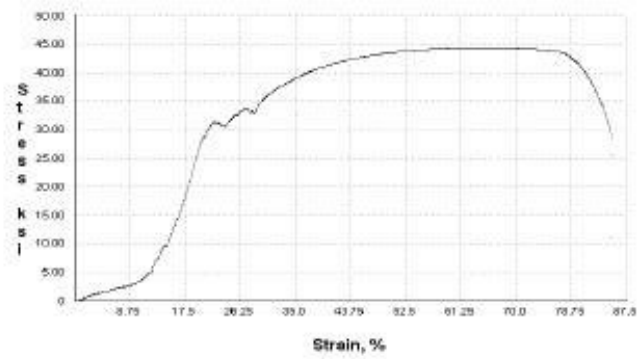


Figura 20. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 20

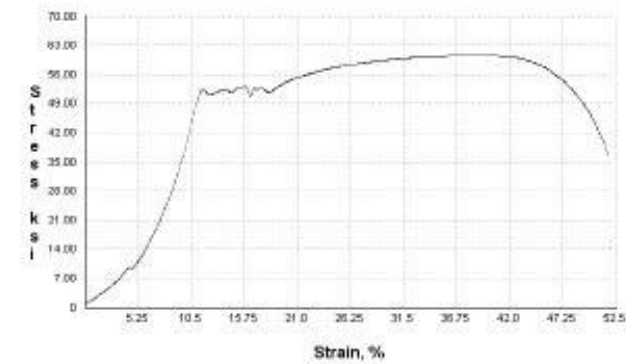


Figura 21. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 21

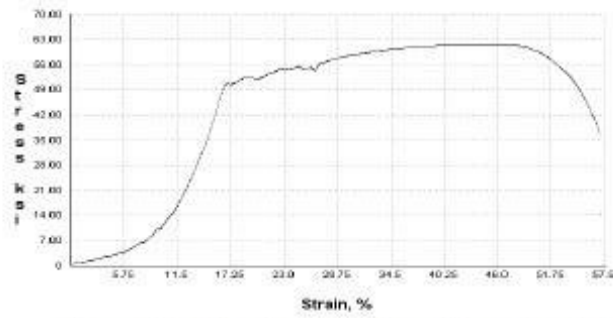


Figura 22. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 22

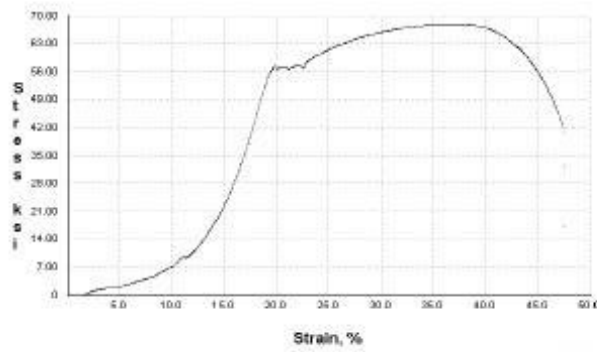


Figura 23. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 23

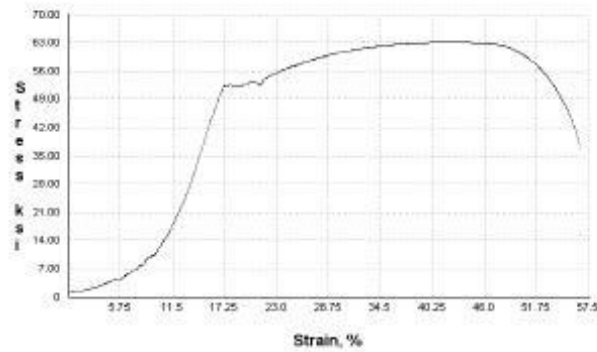


Figura 24. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 24

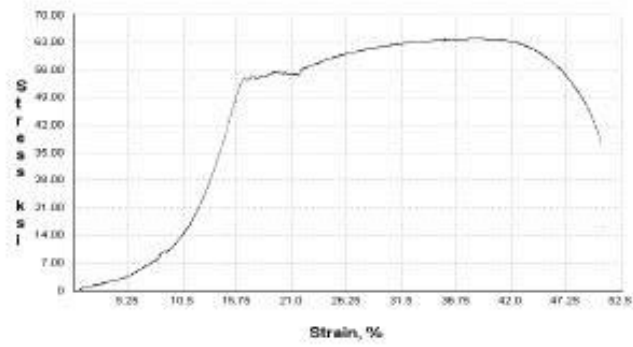


Figura 25. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 25

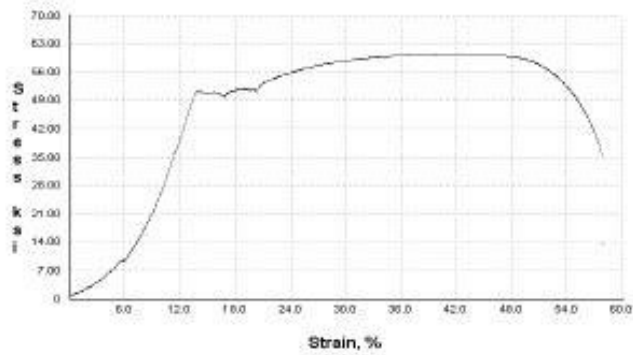


Figura 26. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 26

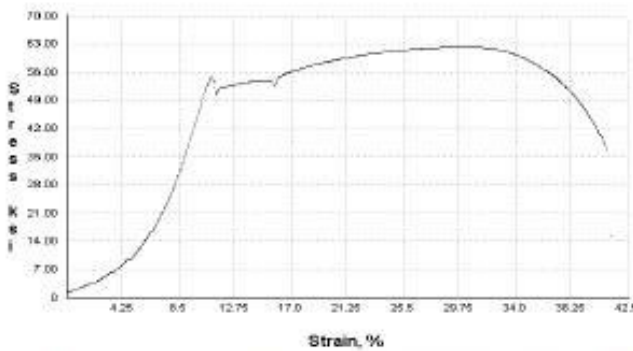


Figura 27. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 27

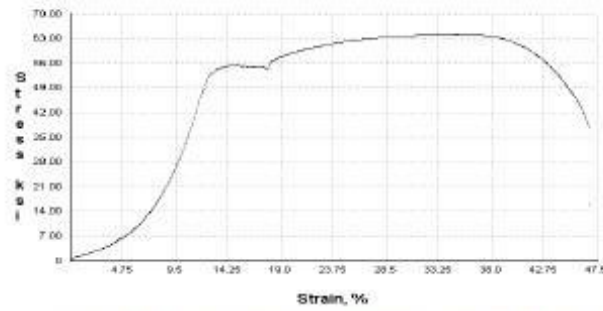


Figura 28. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 28

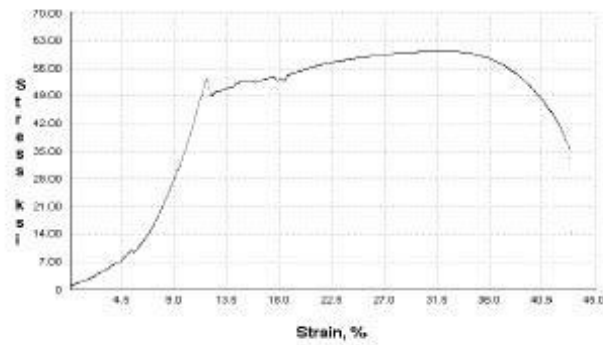


Figura 29. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 29

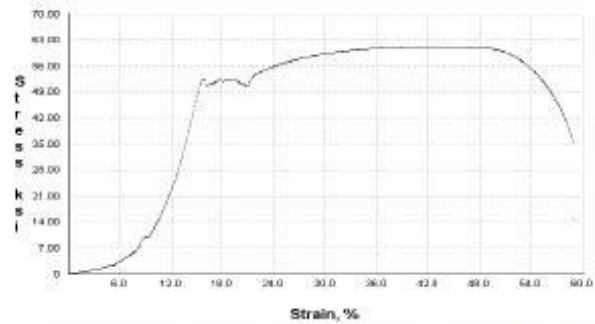


Figura 30. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 30

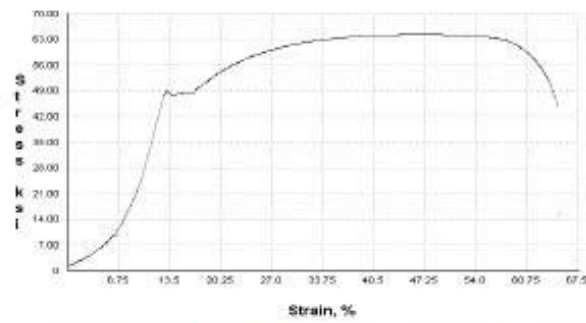


Figura 31. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 31

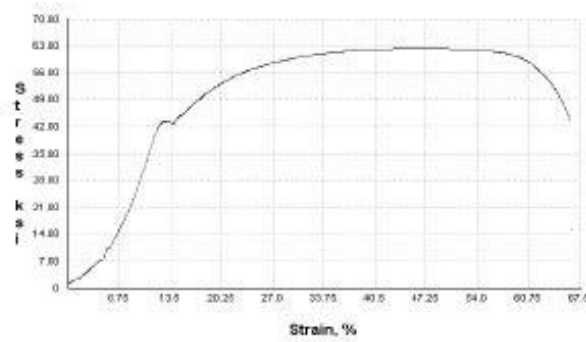


Figura 32. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 32

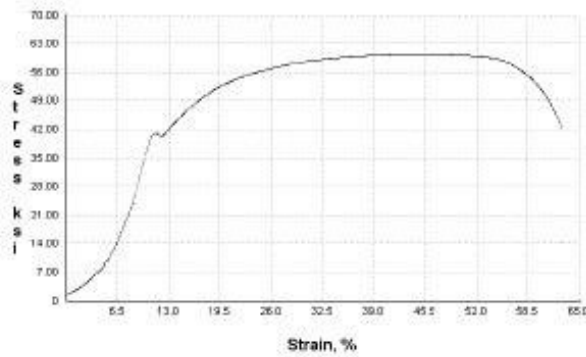


Figura 33. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 33

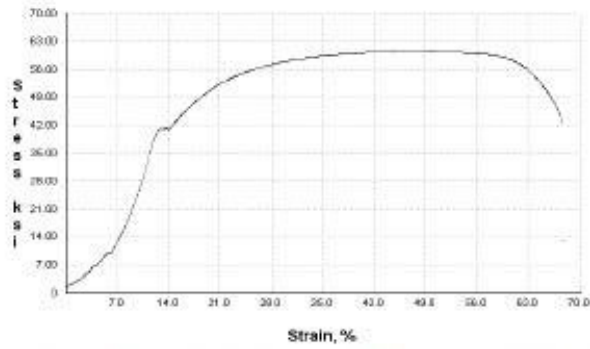


Figura 34. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 34

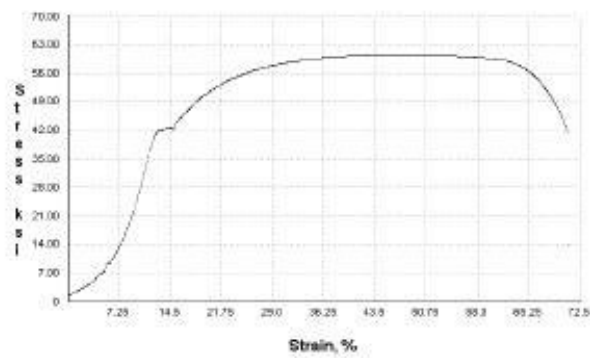


Figura 35. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 35

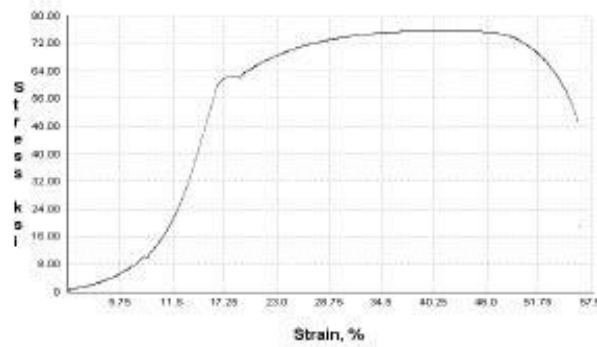


Figura 36. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 36

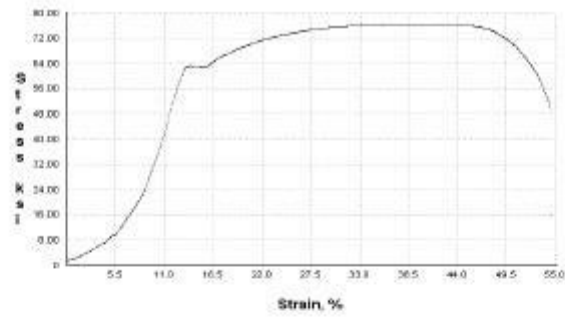


Figura 37. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 37

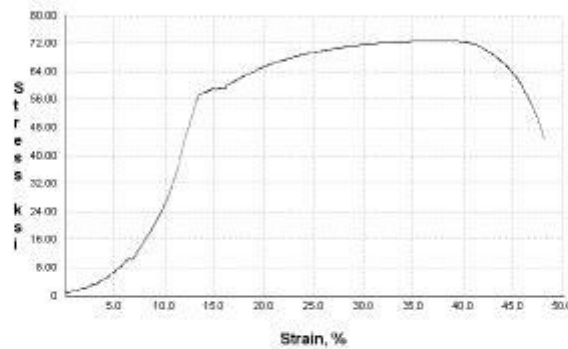


Figura 38. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 38

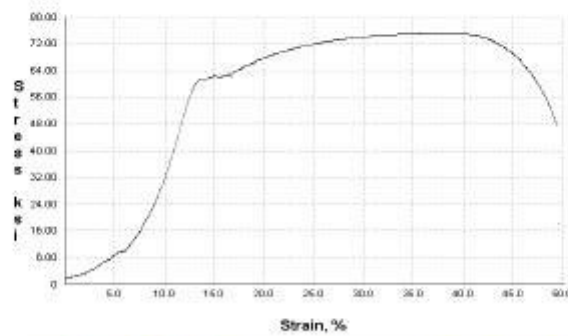


Figura 39. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 39

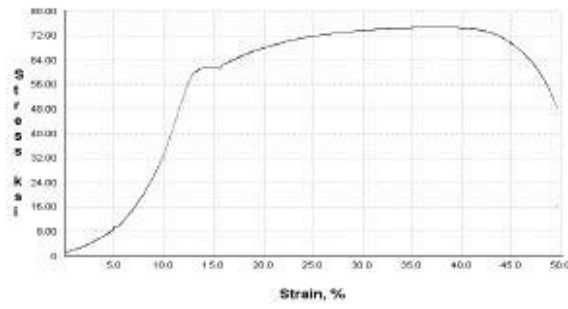


Figura 40. Grafica esfuerzo vs deformación probeta # 40

ANEXO III.

DATOS OBTENIDOS DEL ENSAYO DE DUREZA EN EL LABORATORIO DE METALOGRAFÍA, DESGASTE Y FALLA

Resultados de ensayo de Dureza - Acero A36						
Sin tratamiento térmico (AT)						
Dureza (HRB)		Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5
	1	75	74	75	78	73
	2	75	74	75	75	73
	3	74	75	75	76	74
	4	73	73	74	74	73
	5	73	75	75	75	74
	6	72	73	74	78	72
Tratamiento térmico de Recocido (R)						
Dureza (HRB)		Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5
	1	45	52	43	42	46
	2	40	55	42	44	41
	3	46	55	38	42	36
	4	35	56	30	40	40
	5	37	57	40	40	43
	6	42	56	42	41	41
Tratamiento térmico de Temple (T)						
Dureza (HRB)		Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5
	1	67	79	82	74	75
	2	73	78	79	78	79
	3	78	78	82	80	77
	4	81	77	81	77	77
	5	82	80	82	79	76
	6	77	76	82	73	76
Tratamiento térmico de Temple con revenido (T+R)						
Dureza (HRB)		Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5
	1	59	59	64	63	62
	2	58	59	65	64	64
	3	57	62	65	60	62
	4	57	59	65	65	61
	5	62	58	66	62	63
	6	59	56	67	63	64

Resultados de ensayo de Dureza - Acero A572 GR50						
Sin tratamiento térmico (AT)						
Dureza (HRB)		Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5
	1	80	83	81	83	85
	2	84	84	81	84	85
	3	82	82	80	84	85
	4	80	84	84	84	80
	5	83	84	83	81	83
	6	83	85	83	83	83
Tratamiento térmico de Recocido (R)						
Dureza (HRB)		Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5
	1	46	61	51	53	53
	2	36	60	59	54	54
	3	43	58	59	53	54
	4	43	56	59	50	60
	5	43	56	59	55	59
	6	41	56	58	55	59
Tratamiento térmico de Temple (T)						
Dureza (HRB)		Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5
	1	81	81	81	86	85
	2	80	83	82	83	82
	3	80	83	84	83	84
	4	80	80	87	82	83
	5	86	81	87	84	82
	6	83	81	86	85	83
Tratamiento térmico de Temple con revenido (T+R)						
Dureza (HRB)		Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5
	1	68	73	67	72	71
	2	70	63	72	70	72
	3	70	71	75	70	72
	4	72	69	75	70	75
	5	71	72	75	73	72
	6	75	70	75	72	75