



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

**INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
LICENCIATURA EN INGENIERÍA
MINERO-METALÚRGICA**

**TESIS
EFECTO DEL TIEMPO Y TEMPERATURA DE UN
TRATAMIENTO ISOTÉRMICO SOBRE LAS
PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN ACERO DE ALTA
RESISTENCIA**

**Para obtener el título de
Licenciada en Ingeniería Minero-Metalúrgica**

Presenta

Nayeli Basilio Ortiz

Directora

Dra. Marissa Vargas Ramírez

Mtro. César Yeshua Becerra Mayorga

Comité tutorial

**Dr. Martín Reyes Pérez
Dr. Edgar Cardoso Legorreta**

Pachuca de Soto, Hidalgo., septiembre, 2025



Mineral de la Reforma, Hgo., a 11 de septiembre de 2025

Número de control: ICBI-D/1635/2025
Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado a la egresada de la Licenciatura en Ingeniería Minero Metalúrgica **Nayeli Basilio Ortiz**, quien presenta el trabajo de titulación "**Efecto del tiempo y temperatura de un tratamiento isotérmico sobre las propiedades mecánicas de un acero de alta resistencia**", ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: M. en C. Cesar Yeshua Becerra Mayorga

Secretario: Dr. Edgar Cardoso Legorreta

Vocal: Dra. Marissa Vargas Ramírez

Suplente: Dr. Martín Reyes Pérez

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

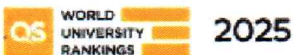
Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI



GVR/YCC

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001
direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergarar@uaeh.edu.mx

"Amor, Orden y Progreso"



uaeh.edu.mx

Agradecimientos

Con estima y reconocimiento, extiendo mi gratitud a la directora de tesis Dra. Marissa Vargas Ramírez y codirector Mtro. César Yeshua Becerra Mayorga por su inestimable conocimiento y paciencia como guías imprescindibles de esta investigación.

CONTENIDO

CAPÍTULO I - INTRODUCCIÓN.....	11
1.1 Objetivo general	11
1.2 Objetivos específicos.....	11
1.3 Planteamiento del problema	11
1.4 Preguntas de investigación.....	12
1.5 Justificación.....	12
1.6 - Hipótesis	13
CAPÍTULO 2 - ANTECEDENTES	14
2.1 Problemática en el proceso de manufactura	16
2.1.1 Conformado y estampado	16
2.1.2 Soldabilidad	16
2.2 Costos.....	16
2.3 Diseño y Desarrollo.....	16
2.4 Regulación y Estándares.....	17
CAPÍTULO 3.- MARCO TEÓRICO	18
3.1 Etapas de fundición	18
3.1.1 Elaboración o elección de moldes	18
3.1.2 Preparación del horno.....	21
3.1.3 Técnica de fusión	22
3.1.4 Vaciado	22
3.1.5 Solidificación y enfriamiento.....	23
3.2 Aceros	23
3.3 Elementos aleantes	24
3.4 Clasificación de aceros	28
3.5 Aceros avanzados de alta resistencia	32
3.5.1 Tipos de Aceros Avanzados de Alta Resistencia	33
3.6 Tratamientos térmicos	36
3.6.1 Tratamientos continuos	36
3.6.2 Tratamientos isotérmicos	38
3.6.3 Temperatura de austenización	39
3.6.4 Tiempo de mantenimiento	39
3.6.5 Diagrama TTT.....	40
3.6.6 Fases presentes en un AHSS	41
3.8 Caracterización	43
3.9 Pruebas mecánicas.....	45

CAPÍTULO 4- DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	47
4.1- Fundición	49
4.2 Tratamiento térmico	54
4.3 Caracterización	57
4.4- Pruebas mecánicas.....	59
Capítulo 5- RESULTADOS.....	61
5.1 Fundición.....	62
5.2 Metalografías.....	62
5.3 Ensayo de impacto.....	69
5.4 Ensayo de dureza Rockwell	70
5.5 Ensayo de desgaste	76
CONCLUSIONES	78
REFERENCIAS.....	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ferroaleaciones utilizadas en el proceso de fusión	62
Tabla 2. Composición química final del acero de alta resistencia	62
Tabla 3. Análisis de las microestructuras de un acero avanzado de alta resistencia austemperizado a 300°C durante 30, 60 y 90 minutos	65
Tabla 4. Análisis de las microestructuras de un acero avanzado de alta resistencia sometido austemperizado a 350°C durante 30, 60 y 90 minutos.....	68
Tabla 5. Energía absorbida por las probetas con y sin tratamiento térmico a diferentes tiempos.....	69
Tabla 6. Dureza HRC en material base.....	70
Tabla 7. Dureza HRC de la segunda probeta de material base.....	70
Tabla 8. Dureza HRC de la probeta de 30 minutos a 300°C.....	71
Tabla 9. Dureza HRC de la probeta de 60 minutos a 300°C.....	72
Tabla 10. Dureza HRC de la probeta de 90 minutos a 300°C.....	72
Tabla 11. Dureza HRC de la probeta de 30 minutos a 350°C.....	73
Tabla 12. Dureza HRC de la probeta de 60 minutos a 350°C.....	74
Tabla 13. Dureza HRC de la probeta de 90 minutos a 350°C.....	74
Tabla 14. Volumen de huellas por ensayo de desgaste	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Partes de una caja de moldeo temporal. Obtenido de Procesos de Conformación de Aleaciones, Capítulo 1; moldeo. (2020)	20
Figura 2 Partes de un molde permanente y etapas de un proceso de vaciado. Obtenido de Carrillo, V. Relación de la dureza con la microestructura de un acero de baja aleación (2018).....	21
Figura 3 Diagrama de fases Fe - Fe ₃ C. Obtenido del curso Producción de Aleaciones. Guzmán, C. (2020)	24
Figura 4 Clasificación de elementos aleantes en aceros	25
Figura 5 Efecto de los elementos aleantes del grupo gamágenos en aceros. Obtenido del curso Tratamientos de Aleaciones. Illescas, F. (2022)	27
Figura 6 Efecto de los elementos aleantes del grupo alfégenos en aceros. Obtenido del curso Tratamientos de Aleaciones. Illescas, F. (2022)	28
Figura 7 Microestructura de un acero AISI 1020. Obtenido de Tratamientos térmicos básicos. Universidad de Sevilla	31
Figura 8 Representación de las fases en un acero de alta resistencia de doble fase- DP. Obtenido de MIT International Journal of Mechanical Engineering. (2011)	34
Figura 9 Maclas como límites de grano en un acero avanzado tipo TWIP. Obtenido de Soldabilidad de Aceros Twip por el proceso de Soldadura HLAW para la Aplicación Automotriz. Cortés, J. (2017)	35
Figura 10 Diagrama Temperatura-tiempo de los tratamientos térmicos continuos. Obtenido de Askeland, The Science & Engineering of Materials, 4ta edición	37
Figura 11 Tratamientos isotérmicos graficados en un diagrama TTT de un acero al carbono. Obtenido del curso de Tratamientos de Aleaciones. Illescas, F. (2022)	38
Figura 12 Tratamiento térmico continuo representado en un diagrama TTT de un acero 1040.....	40
Figura 13 Tratamiento isotérmico en un diagrama TTT de un acero 1040	40
Figura 14 Tratamientos térmicos de austemperizado (línea verde) Obtenido de	42
Figura 15 Pruebas de impacto tipo Charpy e Izod con las dimensiones correspondientes de las probetas. Obtenido de The Science & Engineering of Material, Askeland 4ta edición	47
Figura 16 Diagrama de las etapas del proceso experimental realizado en la investigación.....	48
Figura 17 Inicio del proceso de moldeo en arena	49
Figura 18 a) Derecha: secado b) Izquierda: desmolde de cajas.....	49

Figura 19 Fundición de carga de chatarra como preparación del horno	50
Figura 20 A) Convertidor B) Cuba	51
Figura 21 Material fundido proveniente de la cuba.....	51
Figura 22 metal recién vaciado en moldes de arena donde se dejó enfriar hasta temperatura ambiente.....	52
Figura 23 Espectrómetro de chispa Shimadzu 8000. Obtenido de Principle of Optimal Emission Spectrometry. Shimadzu. Sitio: https://www.shimadzu.com/an/products/elemental-analysis/oes-app/principle-of-optical-emission-spectrometry/option.html	52
Figura 24 Ferroaleaciones utilizadas en el proceso de fusión	53
Ilustración 25 Dimensiones de las probetas A) Para ensayo de impacto Charpy B) Para ensayo de desgaste	53
Figura 26 Horno Thermo Scientific Type F6000	54
Figura 27 Segundo horno utilizado donde se llevó a cabo el enfriamiento en baño de sales.....	55
Figura 28 Tratamiento térmico en las probetas que se mantuvieron a 30, 60 y 90 minutos en el baño de sales a 300°C.....	56
Figura 29 Tratamiento térmico en las probetas mantenidas a 30, 60 y 90 minutos en el baño de sales a 350°C	56
Figura 30 Pulidora de doble disco donde se realizó el desbaste de probetas	57
Figura 31 Pulidora de un disco. Se utilizó con un paño para la etapa final de la caracterización	57
Figura 32 Pâte de diamante para los acabados finales de las probetas, aplicada con algodón.....	58
Figura 33 Microscopio Unitron MEC2 utilizado para el análisis microestructural. Obtenido de Microscopios metalográficos. Microanálisis. Sitio: https://microanalisis.mx/category/microscopia-y-analisis-de-imagenes/microscopios-metalograficos/	58
Figura 34 Dimensiones de la probeta de impacto Charpy	60
Figura 35 Péndulo de ensayo Charpy Modelo IT-30	60
Figura 36 Dimensiones de las probetas para ensayo de desgaste.....	61
Figura 37 Equipo 53LIM para ensayo de desgaste	61
Figura 38 Metalografía de un AHSS Austemperizado a 300°C por 30 minutos	63
Figura 39 Metalografía de un AHSS Austemperizado a 300°C por 60 minutos	64
Figura 40 Metalografía de un AHSS Austemperizado a 300°C por 90 minutos	65
Figura 41 Metalografía de un AHSS Austemperizado a 350°C por 30 minutos	66
Figura 42 Metalografía de un AHSS Austemperizado a 350°C por 60 minutos	67

Figura 43 Metalografía de un AHSS Austemperizado a 350°C por 90 minutos	67
Figura 44 Puntos de prueba de dureza en la probeta de material base.....	70
Figura 45 Puntos de prueba de dureza en segunda probeta de material base.....	71
Figura 46 Puntos de prueba de dureza en la probeta de 30 minutos a 300°C	71
Figura 47 Puntos de prueba de dureza en la probeta de 60 minutos a 300°C	72
Figura 48 Puntos de prueba de dureza en la probeta de 90 minutos a 300°C	72
Figura 49 Puntos de prueba de dureza en la probeta de 30 minutos a 350°C	73
Figura 50 Puntos de prueba de dureza en la probeta de 60 minutos a 350°C	74
Figura 51 Puntos de prueba de dureza en la probeta de 90 minutos a 350°C	74
Figura 52 Gráfico de durezas Rockwell C de las probetas austemperizadas	75

Resumen

Se fabricó un acero avanzado de alta resistencia (AHSS) a partir de una investigación experimental que comenzó con la modificación de la composición química de un acero de bajo contenido en carbono mediante la adición de elementos aleantes. Posteriormente, se sometió el material a un tratamiento térmico de austemperizado a 300 y 350 °C, con tres tiempos de mantenimiento en baño de sales para cada temperatura: 30, 60 y 90 minutos, respectivamente.

Con el fin de analizar las propiedades mecánicas y los cambios microestructurales inducidos por el tratamiento térmico, se fabricaron probetas con las dimensiones establecidas para los distintos ensayos y para la caracterización metalográfica. Se realizaron pruebas de dureza, impacto Charpy y desgaste, tanto en el material base como en las probetas tratadas térmicamente. En términos generales, los resultados mostraron un incremento de los valores de dureza y resistencia al impacto, así como un mejor comportamiento frente al desgaste en las probetas austemperizadas en comparación con el material base, que también se ensayó como referencia para evaluar el efecto del tratamiento térmico.

Para el análisis metalográfico, fue necesario eliminar la capa superficial de las probetas mediante técnicas de desbaste y pulido para exponer la microestructura interna. A continuación, se realizaron ataques químicos con reactivos de diferentes concentraciones hasta identificar el que permitió una mejor revelación microestructural para su observación bajo el microscopio óptico.

Abstract

An advanced high-strength steel (AHSS) was manufactured based on experimental research that began with modifying the chemical composition of a low-carbon steel by adding alloying elements. The material was then subjected to self-tempering heat treatment at 300 and 350 °C, with three holding times in a salt bath for each temperature: 30, 60, and 90 minutes, respectively.

In order to analyze the mechanical properties and microstructural changes induced by the heat treatment, test specimens were manufactured with the dimensions established for the different tests and for metallographic characterization. Hardness, Charpy impact, and wear tests were performed on both the base material and the heat-treated test specimens. In general terms, the results showed an increase in hardness and impact resistance values, as well as better wear performance in the austempered test specimens compared to the base material, which was also tested as a reference to evaluate the effect of heat treatment.

For the metallographic analysis, it was necessary to remove the surface layer of the test pieces using grinding and polishing techniques to expose the internal microstructure. Chemical etching was then carried out with reagents of different concentrations until the one that allowed the best microstructural revelation for observation was identified.

CAPÍTULO I - INTRODUCCIÓN

1.1 Objetivo general

Analizar los resultados del efecto del tiempo y la temperatura de un tratamiento de austemperizado sobre un acero de alta resistencia, mediante la evaluación de las propiedades mecánicas y las fases presentes, con el fin de lograr una caracterización completa del acero.

1.2 Objetivos específicos

1. Fabricar un acero de alta resistencia y aplicar un tratamiento térmico de austemperizado.
2. Modificar la microestructura y las propiedades del acero mediante un tratamiento isotérmico.
3. Evaluar las propiedades mecánicas del acero mediante una prueba de dureza, de impacto Charpy y prueba de desgaste.
4. Aplicar las técnicas de una caracterización completa de un acero mediante un estudio metalográfico.

1.3 Planteamiento del problema

Los aceros avanzados de alta resistencia utilizados en la industria automotriz deben cumplir con una serie de requisitos específicos, a fin de garantizar la seguridad y la fiabilidad de los vehículos. Los tratamientos isotérmicos son una técnica efectiva para lograr estas propiedades, son un tipo específico de tratamiento térmico que tiene la ventaja de producir una microestructura más homogénea y controlada en el acero, lo que resulta en una serie de beneficios específicos que los hace adecuados para su uso en aplicaciones automotrices críticas, como la suspensión, la dirección, el chasis y los componentes del motor.

Existen desafíos en la aplicación de estos aceros de alta resistencia en la fabricación de automóviles como lo son la disponibilidad y los costos de fabricación, que pueden limitar su uso.

1.4 Preguntas de investigación

1. ¿Cuáles son los desafíos y limitaciones actuales en la aplicación del tratamiento isotérmico en la producción de aceros de alta resistencia?
2. ¿Cuáles son las técnicas de análisis microestructural utilizadas para evaluar los efectos del tratamiento isotérmico en los aceros de alta resistencia?
3. ¿Qué fases microestructurales benefician directamente al material respecto a las condiciones deseadas?

1.5 Justificación

Debido a la presencia cada vez mayor de los aceros avanzados de alta resistencia principalmente en la industria automotriz, es necesario el estudio de los procesos de fabricación, desde las etapas de fundición hasta los tratamientos posteriores al maquinado, con el fin de optimizarlos y lograr una reducción de costos, mejores condiciones que faciliten el maquinado y con piezas que cumplan las propiedades mecánicas requeridas para garantizar la seguridad.

Se han realizado muchos esfuerzos para ampliar la tecnología del acero y los procesos de fabricación para crear vehículos más ligeros e incrementar la seguridad en el uso del acero.

Una de estas propiedades es la absorción de energía. Por ejemplo, en una colisión, el acero de alta resistencia absorbe el impacto y se deforma más que el acero convencional, reduciendo el exceso de energía del impacto, reduciendo así los daños causados. Los daños a los ocupantes del vehículo son menores y menos mortales.
[1]

Este trabajo de investigación permitirá conocer y aplicar adecuadamente el tratamiento térmico de austemperizado como alternativa para lograr las propiedades

mecánicas requeridas de estos aceros especializados sin que esto implique un costo elevado en la adquisición.

1.6 - Hipótesis

Las propiedades de dureza y tenacidad del acero se incrementan mediante la aplicación de un tratamiento isotérmico de austemperizado, sometiendo las probetas a 300 y 350°C durante 30, 60 y 90 minutos.

CAPÍTULO 2 - ANTECEDENTES

En la búsqueda de materiales óptimos para fabricar vehículos seguros, se ha establecido una relación entre diseños innovadores, materiales ligeros y resistentes, además de procesos de manufactura avanzados que permitan fácil soldabilidad de las piezas, que los vehículos sean estables y seguros, donde también se logre una reducción en el consumo de combustible.

Los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS) por sus siglas en inglés, son un tipo de material que ha sido diseñado para cumplir con los requisitos específicos de la industria automotriz [2]. A lo largo del tiempo, los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS) han seguido una trayectoria marcada por la necesidad de mejorar la seguridad vehicular, reducir el peso de los componentes y mantener la viabilidad económica en los procesos de manufactura. En las décadas anteriores al año 2000, la industria automotriz se sustentaba principalmente en el uso de aceros convencionales, cuya resistencia y ductilidad eran limitadas en comparación con los estándares actuales. Fue en la primera década del siglo XXI cuando comenzó una transición hacia materiales con mejores propiedades mecánicas, motivada por el desarrollo de diseños más innovadores y exigencias de eficiencia energética [3].

Durante los años comprendidos entre 2000 y 2010, se intensificaron los esfuerzos por incorporar nuevas composiciones químicas y tratamientos térmicos que permitieran obtener materiales más resistentes y con buena conformabilidad. Este periodo marcó el inicio del reconocimiento técnico de los AHSS como materiales clave para el futuro del sector automotriz. Ya para la década de 2010, la implementación de estos aceros se consolidó significativamente, observándose un incremento en su aplicación en diseños estructurales de vehículos. En este contexto, diversos estudios reportaron que los AHSS permitían una reducción de hasta un 25% en la masa de los vehículos sin generar un aumento en los costos de producción, mejorando a su vez la resistencia al impacto en caso de colisiones [4].

En los últimos diez años, los AHSS se han convertido en un estándar dentro de la industria automotriz, consolidando su presencia en un porcentaje cada vez mayor de las estructuras vehiculares. Este avance ha sido posible gracias a un mayor entendimiento de la metalurgia del acero, especialmente en lo que respecta a las

fases constituyentes como la martensita y la ferrita, y al control preciso de los diagramas temperatura-tiempo-transformación (TTT), los cuales permiten optimizar la formación de estructuras endurecidas. Asimismo, se ha perfeccionado el uso de elementos aleantes como aluminio, magnesio, zinc y cobre, con el fin de alcanzar composiciones químicas específicas que doten al acero de las propiedades deseadas. Así, el desarrollo e implementación de los AHSS representan un hito en la ingeniería de materiales aplicada a la movilidad, al combinar ligereza, seguridad y eficiencia productiva en un mismo material [5].

La estructura metalográfica de un acero varía en condiciones de equilibrio, donde el enfriamiento es lento, o por la aplicación de un tratamiento térmico en condiciones de no equilibrio. Eso es debido a que durante la solidificación que tendrá lugar en un determinado tiempo, se forman diferentes fases que dependen de la velocidad de enfriamiento. Las propiedades que posee un acero se correlacionan con su composición química, y las fases y constituyentes presentes. [6]

Los AHSS son constituidos principalmente por una matriz ferrítica y cantidades variables de martensita, que es el más duro de los componentes de la transformación de la austenita. Los materiales metálicos no ferrosos presentes incluyen aleaciones de aluminio, magnesio, zinc y cobre como elementos aleantes para modificar la composición química hasta los estándares deseados. [7] Sin embargo, estos aceros también se clasifican por su mecanismo de endurecimiento, que da lugar a estructuras complejas en cada caso. Para lograr que la solidificación tenga lugar en la sección del diagrama donde se forma la martensita es necesario un enfriamiento de alta velocidad, lo cual puede observarse gráficamente en un diagrama Temperatura-tiempo-transformación (TTT).

La implementación de aceros avanzados de alta resistencia (AHSS) en la industria automotriz ofrece múltiples beneficios, pero también enfrenta varios desafíos. A continuación, se detallan los principales problemas asociados con su implementación:

2.1 Problemática en el proceso de manufactura

2.1.1 Conformado y estampado

- **Limitada ductilidad:** Los aceros avanzados de alta resistencia, tienen una ductilidad limitada en comparación con los aceros convencionales, lo cual dificulta lograr un conformado complejo sin agrietarse
- **Retorno elástico (Springback):** Posterior al conformado, los aceros avanzados de alta resistencia tienden a volver parcialmente a su forma original, lo que dificulta la precisión en las dimensiones finales de los productos.

2.1.2 Soldabilidad

- **Propiedades Térmicas:** La soldadura en los aceros avanzados de alta resistencia puede modificar las propiedades mecánicas debido a la sensibilidad al calor.
- **Tecnologías de soldadura avanzada:** Es de vital importancia el uso de técnicas avanzadas de soldadura, como la soldadura láser o por fricción, las cuales pueden ser costosas y requieren equipos especializados. [8]

2.2 Costos

- **Costo de producción:** La producción de aceros avanzados de alta resistencia implica procesos metalúrgicos avanzados y aleaciones complejas, lo que incrementa el costo de la materia prima en comparación con los aceros convencionales.
- **Inversión inicial:** El uso de aceros de avanzados de alta resistencia en la producción automotriz requiere una inversión inicial significativa en equipos y tecnología de manufactura avanzada

2.3 Diseño y Desarrollo

- **Diseño Estructural:** La alta resistencia y menor ductilidad de los aceros avanzados de alta resistencia requieren nuevos enfoques en el diseño estructural para maximizar los beneficios sin comprometer la integridad del componente.

- **Simulación y Pruebas:** Es necesario desarrollar y validar modelos de simulación precisos para predecir el comportamiento de los AHSS durante el conformado y en condiciones de servicio.[9]

2.4 Regulación y Estándares

- **Normas de Seguridad:** Los componentes fabricados con AHSS deben cumplir con estrictas normas de seguridad y rendimiento, lo que puede implicar pruebas adicionales y ajustes en los procesos de manufactura.
- **Estándares de la Industria:** La industria automotriz está en constante evolución en términos de estándares y regulaciones, lo que puede exigir adaptaciones continuas en el uso de AHSS. [10]

CAPÍTULO 3.- MARCO TEÓRICO

La fundición como todo proceso productivo conlleva una serie de etapas consecuentes para la obtención de aleaciones. Comienza con la elaboración o elección de los moldes donde será vaciado el metal líquido, posteriormente se prepara el horno, en esta etapa se elige el recubrimiento del mismo dependiendo del material que se funde y se realiza un precalentamiento. Después se lleva a cabo la técnica de fusión, etapa donde se analizan aspectos como temperaturas y tiempos de calentamiento, secuencia de la carga metálica, entre otros. Se realiza el vaciado, el cual puede ser en lingotes, generalmente cuando se produce metal primario o en moldes con formas y dimensiones previstas para un uso específico del metal en forma de pieza. Finalmente se deja al metal solidificar y una vez que se haya enfriado, se desmolda. Para cada producto se lleva a cabo una técnica de fusión diferente, aunque siguiendo las bases generales de la fundición, que son calentar el metal hasta su estado líquido, vaciar en un molde y dejar que este solidifique.

3.1 Etapas de fundición

3.1.1 Elaboración o elección de moldes

La elaboración de moldes es un proceso de vital importancia en la fundición de metales, específicamente en la fundición de metales ferrosos.

Los tipos de moldes pueden variar dependiendo de ciertos factores como el material del molde, el método de producción y las características del producto para el que fue elaborado. [11]. Estos moldes son;

Moldes temporales

- ***Moldes de arena***

Este tipo de moldes consiste en la mezcla de arena de sílice y bentonita a un 30-35% con una cantidad moderada de agua. Son llamados así debido a que solo pueden ser utilizados una o pocas veces. [12]

La bentonita, un tipo de arcilla constituida principalmente por montmorillonita, es comúnmente utilizada en la industria metalúrgica debido a su capacidad para formar

moldes resistentes y maleables que pueden soportar altas temperaturas y presiones. Los tipos de bentonita se clasifican principalmente según su catión dominante en la estructura cristalina y sus propiedades físicas y químicas. [13] Estas son:

Bentonita Sódica:

- La bentonita sódica contiene predominantemente el catión sodio (Na^+) en su estructura cristalina.
- Su fórmula química típica es similar a la de la montmorillonita ($Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 2H_2O$), que es el mineral principal en la bentonita sódica.
- La presencia de sodio en la estructura de la bentonita sódica le confiere propiedades de hinchamiento y mayor capacidad de retención de agua en comparación con la bentonita cálcica. [13][14]

Bentonita Cálcica:

- La bentonita cálcica contiene predominantemente el catión calcio (Ca^{2+}) en su estructura cristalina.
- Su fórmula química también es similar a la de la montmorillonita, pero con una mayor presencia de calcio en lugar de sodio.
- La presencia de calcio en la estructura de la bentonita cálcica resulta en una menor capacidad de hinchamiento y retención de agua en comparación con la bentonita sódica.

Existen dos tipos de moldes para la elaboración de moldes temporales.

1. Moldeo manual: Consiste en el moldeo realizado de forma artesanal (manual).
2. Moldeo con máquina: Consiste en el moldeo realizado mediante el uso de una máquina de moldeo. El uso de este tipo de máquinas facilita la automatización de este proceso y aumenta notablemente la productividad.

El proceso de elaboración de un molde temporal comienza con la mezcla de arena de sílice, bentonita y agua. Posteriormente la mezcla de arena se comprime alrededor del patrón de la pieza deseada a presiones y temperaturas específicas con el fin de que mantenga su forma durante el proceso de fundición. Es importante considerar en

el diseño del molde los conductos internos de la pieza donde el metal líquido será vertido para su posterior solidificación. En la figura 1 se observan las cavidades internas antes mencionadas.

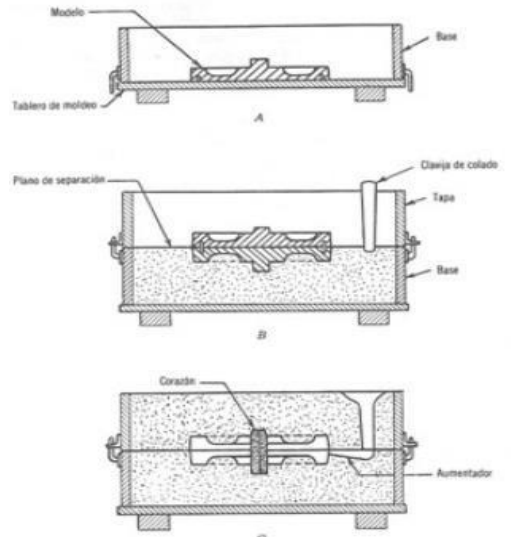


Figura 1 Partes de una caja de moldeo temporal. Fuente: Venkatesh, R. (2022)

Moldes permanentes

A comparación de los moldes temporales, los moldes permanentes están construidos de materiales duraderos, como lo es el acero o el hierro fundido, y tienen una vida útil muy alta.

Los moldes permanentes se fabrican por procesos de maquinado y son acabados o pulidos a mano. Se aplica un recubrimiento refractario al molde antes del vaciado.

- Moldes de gravedad: La fundición por gravedad en moldes permanentes, generalmente utiliza moldes metálicos también llamados coquillas, se utilizan varias veces y están diseñados para sacar las piezas fácilmente, generalmente se usan para fundir piezas de bajo punto de fusión como aluminio, zinc y aleaciones de cobre. [15]

Como puede observarse en la figura 2, son muy similares que los moldes temporales, con la diferencia del material con el cual están hechos.

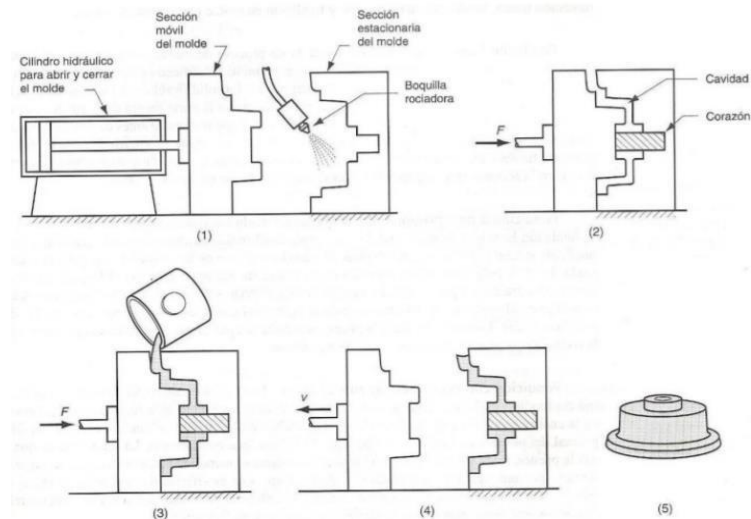


Figura 2 Partes de un molde permanente y etapas de un proceso de vaciado. Fuente: Carrillo, V. (2018)

3.1.2 Preparación del horno

En esta fase se realiza la inspección y evaluación del recubrimiento refractario del horno, verificando su integridad estructural y su resistencia térmica. En caso de encontrarse deterioros significativos, se realiza la reparación localizada o sustitución completa, según lo requerido para garantizar la funcionalidad del equipo. Para procesos de fundición con nuevos materiales o condiciones operativas diferentes, es imprescindible seleccionar el tipo de material refractario que se empleará en el reactor. Para esto se considera su estabilidad química frente a las escorias y gases generados, así como la resistencia mecánica y térmica frente a las temperaturas de operación.

Los materiales refractarios se clasifican químicamente en tres categorías principales; ácidos, básicos y neutros, dependiendo de su comportamiento frente a ambientes químicos específicos dentro del horno. Entre los compuestos más utilizados en la industria metalúrgica destacan la magnesita (MgO) y sílice (SiO_2).

El proceso de precalentamiento del horno constituye una etapa crítica en la preparación del horno, puesto que optimiza el consumo energético y disminuye el tiempo requerido para alcanzar la temperatura de fusión.

El calor que se requiere en un proceso de fusión es la suma del calor requerido para elevar la temperatura de la carga a su punto de fusión, más el calor para la transformación del metal de sólido a líquido, conocido como calor de fusión y por

último el calor necesario para que el baño alcance la temperatura de vaciado. Con el precalentamiento del horno se asegura alcanzar gradualmente las temperaturas mencionadas, lo cual prolonga la vida útil del revestimiento, del equipo y mejora la eficiencia energética y la calidad del producto fundido.

3.1.3 Técnica de fusión

En la fundición de hierro, aluminio y cobre existen dos tipos de material de carga disponible para el proceso. Esta puede presentarse en forma de lingote o chatarra, la primera se refiere al material con más alta pureza, pero que resulta más costoso, la chatarra, en cambio, es más barata y se dispone con mayor facilidad, sin embargo, requiere de una inspección rigurosa para poder ser utilizada. Dentro de la chatarra existen dos subgrupos, el material blando y el macizo. Las piezas se clasifican de acuerdo a las dimensiones, el contenido de aleantes y su proceso previo de fabricación. Los materiales se consideran blandos cuando provienen del conformado mecánico, tienen un bajo contenido de elementos aleantes y representan una cantidad baja de material en el baño metálico. El macizo proporciona la mayor cantidad de masa en el baño, tiene alto contenido de aleantes y es material proveniente de fundición.

En una secuencia de carga adecuada, el horno se carga primero con el material macizo, ya que requiere mayor energía para comenzar a fundirse, posteriormente se agrega el material blando. Al utilizar chatarra de cualquiera de los tipos, es necesaria una inspección previa, la chatarra debe estar limpia, libre de rebabas, sin recubrimientos u otras impurezas que afecten la composición del baño o que puedan causar alguna reacción adversa. [16]

3.1.4 Vaciado

Cuando el baño alcanza la temperatura, está listo para ser vertido en el molde. Para realizar un correcto vaciado, el metal debe fluir por todas las partes del molde antes de solidificar, ya sea en el caso de la fabricación de lingotes o piezas coladas. Esto se logra controlando, temperatura, mediante el sobrecalentamiento del metal líquido, velocidad de vaciado, que se refiere al caudal vertido. Cuando la velocidad es

excesiva se produce turbulencia que puede ocasionar la captación de gases y escoria en el metal y la erosión en caso de los moldes de arena. Una velocidad muy baja tampoco es ideal, puesto que el metal comienza a solidificar antes de ser vaciado completamente, generando defectos internos y superficiales en la pieza.

Se puede tener mayor control del caudal mediante ecuaciones de fluidos como Torricelli y el diseño del conducto del sistema de colada, factores que dependerán de cada proceso productivo.

3.1.5 Solidificación y enfriamiento

Como parte conjunta de aplicar adecuadamente la técnica de vaciado, se tienen las condiciones de enfriamiento adecuadas. La solidificación comienza a ocurrir desde el vaciado, pues la temperatura del metal líquido desciende, a medida que se produce el enfriamiento, existe un fenómeno de contracción en la etapa de cambio de estado líquido a sólido del metal y otra que ocurre cuando el metal ya es sólido, durante el tiempo que demore en llegar a la temperatura ambiente. Dicha contracción es debida al sobrecalentamiento para realizar el vaciado y siempre se considera dentro del rango aceptable. Cuando el fenómeno es excesivo, se generan reducciones conocidas como rechupes.[16][17]

3.2 Aceros

Las aleaciones producto de la fundición se clasifican primeramente en ferrosas y no ferrosas, dependiendo del metal base con el cual se trabaje. Dentro del primer grupo se obtienen los hierros y los aceros.

Un acero es una aleación cuyos principales elementos presentes son el hierro y el carbono, dichos elementos brindan las propiedades del acero dependiendo de su proporción. El rango dentro del cual se considera acero a una aleación ferrosa es 0.018% a 2.11% de carbono. Posterior al segundo valor se tiene un hierro. Los aceros son utilizados en innumerables industrias, con distintos fines y por ello se tiene una clasificación de acuerdo a su aplicación y composición química, ya que está brinda

diferentes características específicas para su uso, así como el nivel de elementos aleantes presentes.[18]

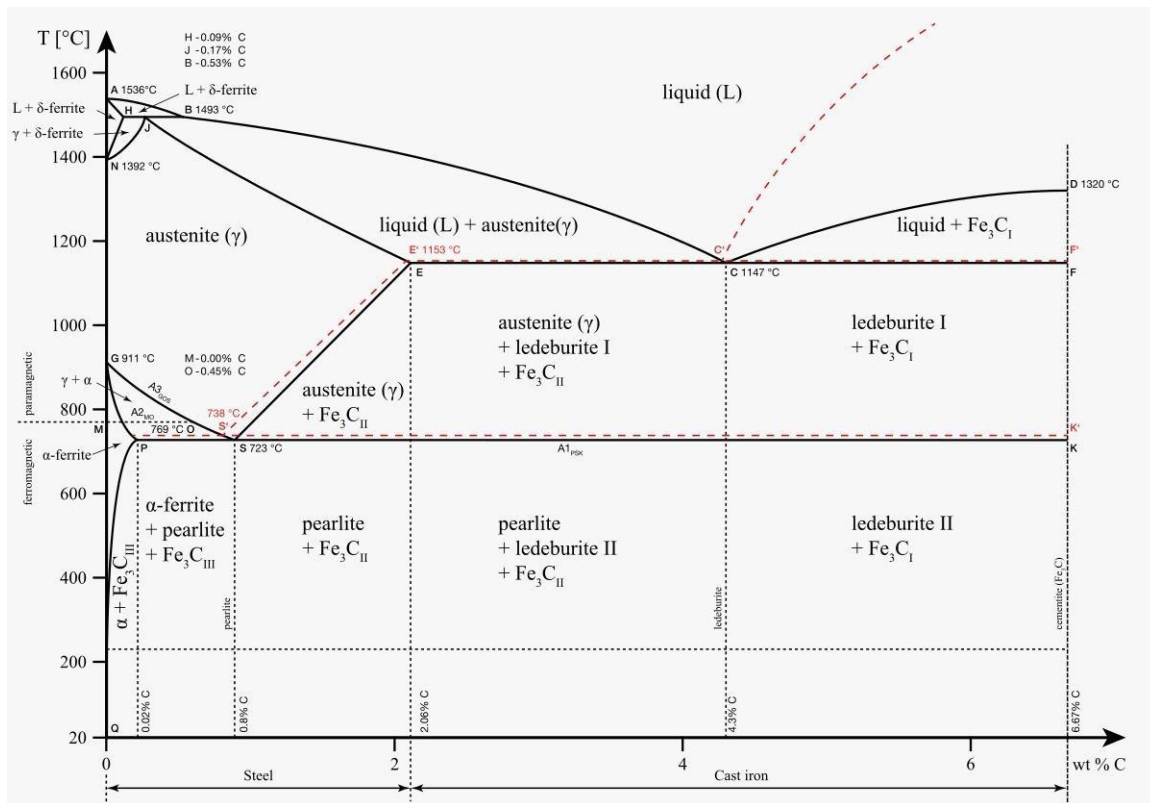


Figura 3 Diagrama de fases Fe - Fe₃C. Fuente; ASM Handbook (2006)

En esta figura se pueden observar las distintas fases del hierro, con la adición de C en su composición. Además de zonas donde cambia el estado físico de cada aleación, puntos de transformación y las temperaturas a las cuales suceden los cambios.

Además de tener múltiples aleaciones únicamente adicionando carbono, con el objetivo de mejorar las características del acero, se agregan otros elementos en proporción.

3.3 Elementos aleantes

En la producción de acero, la presencia de otros elementos puede resultar beneficiosa o perjudicial, dependiendo de cuáles sean y principalmente la proporción en peso de estos. Cuando propician condiciones indeseables, se conocen como impurezas, que deben ser eliminadas o reducir su contenido mediante procesos específicos y controlados para no afectar más la composición y calidad de la aleación. En tales casos que no es posible la eliminación completa, existen parámetros permisibles de

acuerdo a normas. Algunos de los elementos cuyo control es de suma importancia son:

- Fósforo: que de manera general se admite un límite máximo del 0.04% en aceros, disminuye la ductilidad del acero al disolverse en ferrita. Otro inconveniente de su presencia es cuando forma PFe_3 al ser segregado durante la solidificación, que forma un eutéctico en conjunto con ferrita y cementita de bajo punto de fusión, haciendo el material frágil.
- Azufre: ocurre algo similar, forma un sulfuro de Fe con bajo punto de fusión ubicándose en los límites de grano, lo cual no permite trabajar en caliente al material. [19]

Por otra parte, cuando los elementos son adicionados para un resultado beneficioso en las características del acero, se denominan aleantes. Cada elemento reacciona de manera distinta en una aleación Fe-C, y su adición debe ser analizada con detalle previamente para lograr los objetivos de aleación. Con su implementación se busca modificar propiedades mecánicas, eléctricas y magnéticas, además de facilitar tratamientos térmicos. Estos elementos, se clasifican generalmente por las fases que logran estabilizar. En la figura 4 se muestra una clasificación de los elementos con relación a la fase que propician en los aceros.



Figura 4 Clasificación de elementos aleantes en aceros. Fuente propia

Los elementos del primer grupo, y como bien indica su nombre, comparten la característica de abrir la zona y en un diagrama de equilibrio Fe-C, por subgrupo y proporción cada elemento aleante es capaz de expandir o contraer la zona.

- Níquel: a medida que aumenta el elemento, se observa el incremento de A4 y decrecimiento de A3, lo cual abre la zona y en un diagrama de equilibrio Fe- C. Cuando el porcentaje de níquel es mayor a 32%, la red FCC es estable en un enfriamiento hasta temperatura ambiente, en tal caso se obtiene un acero austenítico.
- Manganeso: una de los objetivos de adicionar Mn, en un rango de 0,3% a 0.6% es reaccionar con el azufre, del cual se habló anteriormente, para formar SMn con un punto mayor de fusión que el SFe, asegurando las propiedades plásticas y trabajo en caliente de la aleación. Al igual que el níquel, amplía la zona y disminuye la temperatura eutectoide. Aumenta la solubilidad del carbono en la austenita, lo cual propicia la formación de carburos y aumenta la capacidad de endurecimiento.
- Cobre: en proporciones bajas, se incrementa A4 y desciende A3, pero a medida que incrementa el elemento, se contrae la zona y. Se agrega en menores cantidades para proporcionar propiedades contra la corrosión que puede ocasionarse por la presencia del fósforo. En la medida que se adiciona, no más de 1%, la resistencia de la aleación aumenta, pero la ductilidad disminuye.
- Carbono: es el principal elemento endurecedor, en un diagrama de equilibrio, se comporta como los elementos de su grupo (abrir la zona y) pero la contrae, en la medida de su aumento. Las principales propiedades mecánicas que se incrementan con la presencia de carbono es la dureza, resistencia a la tracción y mejora la respuesta a tratamientos térmicos de endurecimiento. En altos contenidos puede disminuir la soldabilidad y tenacidad del acero.
- Nitrógeno: cuando está presente en acero aleados con vanadio, mejora el endurecimiento por precipitación.

La estabilización de la fase gama, se muestra en la figura 5 como una expansión de la misma, o lo que se ha explicado como abrir la zona de transformación.

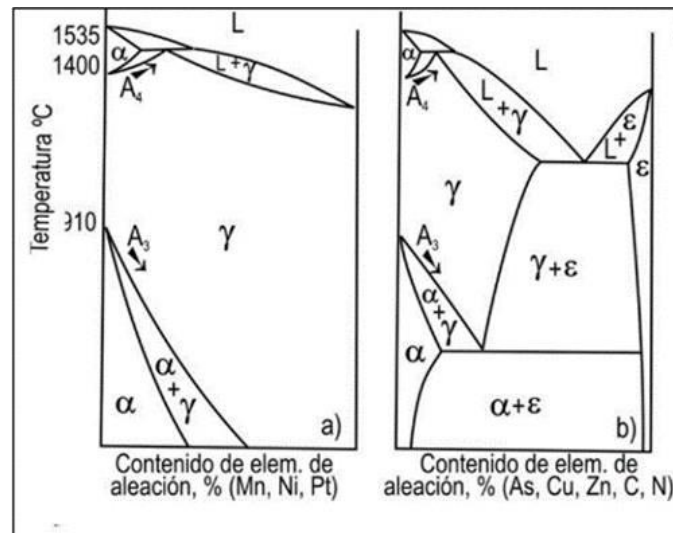


Figura 5 Efecto de los elementos aleantes del grupo gamágenos en aceros. Fuente; Majji, R. (2019)

Los elementos denominados alfégenos, son aquellos con influencia de cerrar la zona α , y dependiendo del subgrupo y/o proporción, de expandir o contraer dicha zona.

- Cromo: en el caso del cromo, su presencia hace descender A_4 e incrementar A_3 , pero con un comportamiento tal que llegan a coincidir, cerrando la zona γ y expandiendo α . En conjunto con el cobre, mejora la resistencia a la corrosión y tiene mayor efecto sobre la templabilidad que el manganeso, en presencia conjunta con níquel y molibdeno. En procesos de soldadura, influye directamente en la templabilidad de la zona de transformación.
- Molibdeno: en contenidos cercanos a 0.3% fungen como desoxidante en aceros soldables y como el manganeso, evita la formación del sulfuro de Fe. Es un elemento que expande la zona α , resultado del incremento de A_3 y decremento de A_4 . Disminuye el porcentaje en peso del carbono en la composición eutectoide y aumenta la temperatura de este punto.
- Silicio: mediante endurecimiento por solución sólida provoca el aumento del valor de resistencia a la cedencia y es un desoxidante en los aceros laminados.
- Vanadio: es formador de carburos, lo cual provoca el refinamiento de grano de la ferrita y mediante precipitación, favorece el endurecimiento. Las propiedades mecánicas que se ven favorecidas por este elemento son la resistencia a la tracción, dureza y límite de fluencia. La presencia de este elemento disminuye la

velocidad crítica de enfriamiento. Tal como sucede con el grupo anterior, en la figura 6 se muestra la expansión de la zona de transformación de alfa. [20]

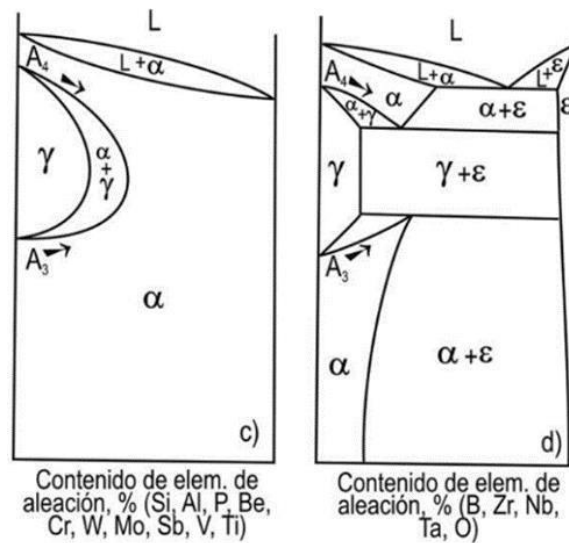


Figura 6 Efecto de los elementos aleantes del grupo alfégenos en aceros. Fuente; Majji, R. (2019)

3.4 Clasificación de aceros

3.4.1 Al carbono

- Bajo carbono: el porcentaje en peso de este elemento no supera el 2%, debido a esto su principal fase microestructural es la ferrita, con un sistema cristalino cúbico centrado en el cuerpo. Esta fase conforma aleaciones dúctiles y de baja resistencia. Son aptos para soldadura y con tratamientos de normalizado su maquinabilidad mejora.
- Medio carbono: contienen entre 2 y 5% de carbono, conformados por las fases ferrita y perlita, las cuales brindan al acero sus propiedades dependiendo de la proporción de cada una. Estos aceros son el tipo más comercial. Sus propiedades son mejores comparados a los de bajo contenido de carbono, ya que este elemento brinda dureza. Sus aplicaciones son muy variables debido a que pueden ser trabajos en frío aquellos aceros de menor contenido de carbono y someterse además a tratamientos. Posterior al tratamiento adecuado, son aptos para piezas que reciben cargas dinámicas.

- Alto carbono: son aceros con un contenido mayor al 0.5% de carbono, Su dureza y resistencia son elevadas, en contraste con su ductilidad y tenacidad. Se utilizan efectivamente cuando es necesario incrementar la dureza y resistencia al desgaste. [21]

3.4.2 Aleados

- Microaleados: son aceros con cantidades menores al 0.15% de porcentaje en peso de elementos que forman carburos, nitruros.
- Media aleación: son aceros aleados principalmente con manganeso
- Aleados: se considera un acero aleado cuando se tiene un mayor contenido de los límites de composición siguientes; 1.65% manganeso, 0.6% silicio, 0.6% cobre, y cuando se tiene níquel, cromo, molibdeno, niobio, titanio, cobalto, tungsteno, aluminio, circonio o vanadio. Son aceros que se utilizan para ser tratados térmicamente, por su composición química, se busca modificar sus propiedades mecánicas con el mínimo de distorsión y mejorar su maquinabilidad.

3.4.3 Inoxidables

Son aleaciones con porcentajes importantes de cromo, níquel y molibdeno. Resistentes a la corrosión debido a que el cromo posee una gran afinidad con el oxígeno y al reaccionar estos elementos se forma una capa que evita la oxidación del hierro presente en el acero.

- Austeníticos: son aceros con más del 0.7% de níquel, su estructura metalográfica se transforma, después del recocido, en su mayoría en austenita, como lo indica su clasificación. Poseen alto grado de deformación plástica.
- Ferríticos: su elemento aleante principal es el cromo, su estructura ferrítica brinda la propiedad de ser magnéticos. Son aceros templables por su contenido de carbono y también pueden ser endurecidos por tratamientos térmicos, llegando a contener martensita en su estructura.

3.4.4 Grado herramienta

En este tipo de aceros existe una subclasificación mediante letras, de acuerdo a sus aplicaciones y propiedades de trabajo, bajo la denominación SAE.

- W: aceros de alto carbono y sin elementos aleantes. Los más disponibles económicamente y de alta templabilidad al agua.
- A: aceros sometidos a normalizado con alto contenido de carbono. Se utilizan para elaborar piezas complejas y trabados en frío.
- D: Son considerados de alta aleación, con un contenido de carbono entre 1.1 a 1.8% que forma carburos de cromo, proporcionando alta resistencia al desgaste. Se trabajan en frío.
- T, M y S: son aceros trabajados en caliente, llamados también aceros rápidos, donde el cromo mejora la templabilidad y la presencia de tungsteno y molibdeno forman carburos estables a altas temperaturas. [22]

3.4.5 De alta resistencia

Son aceros de bajo contenido de carbono, que mediante tratamiento térmico desarrollan las propiedades mecánicas para sus aplicaciones, que generalmente son en la industria automotriz.

Las propiedades que tenga cada acero dependen, además del contenido de carbono en su composición, de las fases presentes en su estructura. Una forma de modificar esa estructura, una vez obtenido el material, se logra tratando térmicamente las aleaciones. Los aceros poseen una especial reacción a estos tratamientos, muy beneficiosa para distintas aplicaciones, por ejemplo, para la industria automotriz.

Para la presente investigación, se fundió un acero clasificado como AISI 1020 según dicha norma. Se trata de un acero de bajo carbono con aplicaciones estructurales que no reciben altos esfuerzos mecánicos, sin embargo, son muy dúctiles y debido a esto son adecuados para su trabajo en frío. Su composición química se constituye por 0.18-0.23% carbono, 0.3-0.6% manganeso, 0.15-0.35% silicio, 0.4% máximo de fósforo, 0.5% máximo de azufre y el resto de hierro. Esta proporción en peso de elementos le brindan las siguientes propiedades mecánicas; 111-126 HB dureza, 205-307 MPa de esfuerzo de fluencia, 380 MPa de esfuerzo máximo, 20-25% de máxima elongación, 40-45% reducción de área y módulo de elasticidad de 205 GPa. En el diagrama de fases Fe-C, esta aleación se encuentra en el área de aceros hipoeutectoides, constituyéndose entonces de una microestructura de ferrita y perlita a temperatura ambiente. [23]

En la figura 7 se observa la microestructura de un acero de bajo carbono, como el utilizado en la investigación presente.

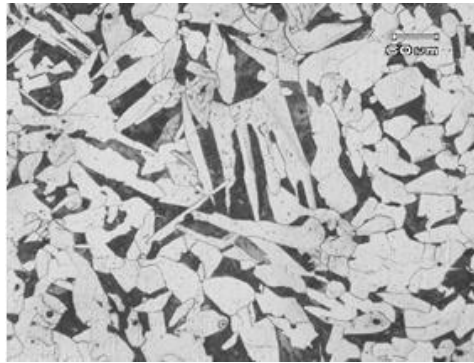


Figura 7 Microestructura de un acero AISI 1020. Fuente; Ashok, K. (2022)

Las diferentes fases formadas poseen peculiaridades y características que tendrá el acero final, su composición y el tratamiento que se le aplique determinan la formación de cada una.

Fases microestructurales presentes en aceros.

Ferrita: representada por la letra griega α , es una solución que se presenta en el acero cuyo porcentaje de carbono esté entre los valores 0.0008-0.218% de su composición química a temperaturas entre los 25 y 727°C.

Perlita: en los diagramas de fases se encuentra como una mezcla de la fase α y el compuesto Fe_3C , así es como se encuentra en un diagrama de fases, con una presencia de carbono de 0.77%, entre un rango de temperatura de 25 a 727°C.

Austenita: se presenta a altas temperaturas entre 912 y 1400°C en los aceros con 0.00001-2.11% de carbono, es una solución eutécticoide caracterizada por su resistencia a la tracción con valores que van de los 800 a 1050 MPa.

Cementita: Un compuesto con 6.69% de carbono que se presenta entre los 25 y 1227°C, se representa con el símbolo de sus componentes Fe_3C . Es una fase caracterizada por su dureza, que puede ser hasta de 700 en escala Brinell.

Martensita: en los diagramas de fases se encuentra con la letra mayúscula M, está presente a temperaturas entre los 220 y 330°C. También se caracteriza por ser una fase que brinda dureza con valores desde los 58 a 68 en escala Rockwell C.

Bainita: como la Perlita, esta fase es una mezcla de α y Fe_3C , pero esta tiene presencia a temperaturas específicas por las cuales se clasifica como inferior (250-350°C) y superior (350-550°C) sus valores de resistencia a la tracción van de los 750 a 830MPa y durezas entre los 40 y 60 en escala Rockwell C.

Como se ha mencionado anteriormente, la cantidad de carbono presente en los aceros cambia la estructura metalográfica y por tanto las propiedades finales que tendrá. Al describir brevemente las fases podemos corroborar lo dicho y comprender mejor el objetivo de analizar los cambios de fases dados al aplicar un tratamiento de autemperizado en la presente investigación. Así como hacer más notorias las diferencias por las cuales se clasifican los aceros.

3.5 Aceros avanzados de alta resistencia

Las regulaciones y normativas de esta industria, como factores externos, incitan al desarrollo de nuevas tecnologías y técnicas que se acaten tanto al marco legal, como a los requerimientos de los usuarios. Como factores internos dentro de esta industria, se pueden destacar aquellos relacionados directamente con la comercialización, la competencia de mercado y el posicionamiento de las empresas, entre otros. Por ejemplo, la sustentabilidad del proceso completo de producción, que sea coherente con las regulaciones gubernamentales sobre los niveles de contaminación, el aumento de la seguridad, que se refiere al resguardo de la vida humana en situaciones imprevistas. Debido a las exigencias de cada industria, existe una clasificación de los aceros, que involucra características que adquiere desde su fundición, ajuste químico, trabajo de conformado y tratamientos. [24]

Una de estas clasificaciones son los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS), son aleaciones fabricadas para asegurar la relación entre excelentes propiedades mecánicas y óptima capacidad de conformado. Su distinción respecto de los aceros convencionales radica en que los primeros presentan una única fase de estructura ferrítica, mientras que los ASHH poseen una estructura con distintas fases presentes en proporciones para originar distintas propiedades mecánicas.

Están diseñados para su uso en aplicaciones automotrices, donde se requiere una resistencia y durabilidad superiores. Estos aceros se han vuelto cada vez más populares en la industria automotriz debido a su capacidad para mejorar la seguridad, reducir el peso y mejorar la eficiencia del combustible. [25]

Se utilizan en diversas piezas automotrices, como chasis, carrocería, suspensión y componentes de motor. Estos aceros tienen una resistencia a la tracción mucho mayor que los aceros convencionales, lo que significa que pueden soportar cargas pesadas y son menos propensos a deformarse o romperse en situaciones de estrés. Cerca del 70% de la estructura de un automóvil está constituida por aceros de distintas clasificaciones y el resto de aleaciones variadas.

Debido al enfoque del presente trabajo, los aceros que se analizan con detalle son precisamente los AHSS y cómo el efecto de un tratamiento isotérmico logra modificar sus propiedades para el fin al que se destinan.

3.5.1 Tipos de Aceros Avanzados de Alta Resistencia

Por su mecanismo de endurecimiento existen:

- Microaleados: se agregan elementos como niobio, titanio. Se utilizan en refuerzos de suspensión, interiores y largueros por su resistencia a la fatiga.
- Endurecidos (Bake Hardening): tratamiento a bajas temperaturas que aumenta el valor del límite elástico. Con aplicaciones en la estructura de puertas y techos de automóviles.
- Al fósforo: presentan una matriz ferrítica y hasta un contenido de 0.12% de fósforo que aumenta la resistencia. Estos son comúnmente utilizados en refuerzos de pilares y travesaños

Aquellos tratados térmicamente para lograr una estructura multifásica:

- Doble fase (DP): poseen una estructura ferrítica con presencia de una segunda fase martensítica. Comúnmente los límites de grano de estos aceros contienen ferrita, perlita y carburos de hierro. El contenido de carbono en los aceros DP es controlado debido a su incidencia en la formación y proporción de martensita en la estructura principal, de dicha proporción dependen los resultados finales de resistencia a la tracción y deformación. El endurecimiento por la martensita en conjunto con las propiedades de deformación dadas por la fase ferrítica proporciona a este tipo de aceros un mayor valor de resistencia a la tracción.

En la figura 8 se observa una representación de la formación de estas fases en este tipo de aceros.

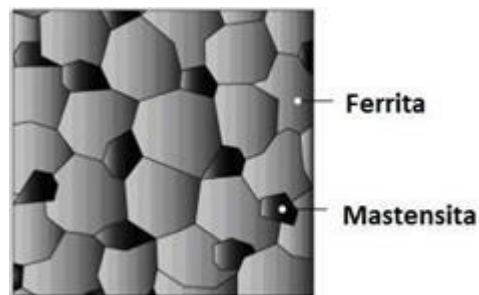


Figura 8 Representación de las fases en un acero de alta resistencia de doble fase- DP. Obtenido de MIT International Journal of Mechanical Engineering. (2011)

En la industria automotriz sus aplicaciones comprenden el conformado de estructuras de alta resistencia a colisiones y refuerzo de interiores del vehículo, para las cuales se lamina en frío. Mientras que piezas como rines, perfiles ligeros o muelle de amortiguador se trabajan en caliente.

- Fase Compleja (CP): pequeñas cantidades de martensita, austenita retenida y perlita brindan a estos aceros su propiedad de resistencia. Se caracterizan por valores altos de tenacidad y una resistencia a la fluencia mucho mayor que los aceros de doble fase.
- Plasticidad Inducida por Transformación (TRIP): en su composición química se tiene alto contenido de silicio, las fases presentes son austenita contenida en una matriz ferrítica, fases de alta dureza como bainita y martensita y cantidades variables de austenita retenida. Cuando estos aceros se someten a deformación plástica, la austenita retenida se transforma en martensita, esto debido al contenido de carbono, modificando así sus resistencia, conformabilidad y coeficiente de deformación.
- Plasticidad Inducida por Maclado (TWIP): la transformación de estos aceros tiene la particularidad de que el desplazamiento de sus dislocaciones se realiza mediante maclaje, además del comportamiento común de deslizamiento que poseen otros aceros. Así como los límites de grano actúan obstruyendo el movimiento de las dislocaciones, lo hacen de la misma forma las fronteras de las maclas, obteniéndose estas líneas características que se observan en la figura 9.

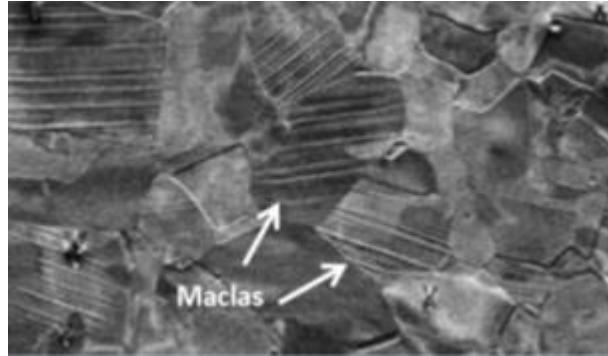


Figura 9 Maclas como límites de grano en un acero avanzado tipo TWIP. Fuente; Cortés, J. (2017)

Poseen una estructura austenítica a temperatura ambiente por su contenido alto de Mn, al ser el carbono más soluble en esta fase, actúa como estabilizador de la austenita y a la vez endurece la matriz de ferrita. La característica de estos aceros combina la resistencia con su conformabilidad, suelen tener altos módulos de elongación, aún para sus resistencias mecánicas altas que van de los 1000 a 1400MPa.

- Martensíticos: son aceros de ultra alta resistencia (1200-2500MPa) y ofrecen una relación resistencia/peso muy efectivo que los aceros convencionales trabajados en frío. El contenido de carbono que se transforma en martensita proporciona templabilidad y el endurecimiento de la fase final. Se suelen someter a revenido para incrementar su ductilidad y evitar que sus elevadas resistencias compliquen su formabilidad.
- Ferro-Bainíticos: su microestructura está constituida por ferrita y bainita, poseen un alto porcentaje de elongación lo cual proporciona alta resistencia a la fatiga. [26]

Para comprender mejor lo anterior es necesario visualizar cómo se logran esas diferencias entre los aceros mediante tratamientos térmicos, tales que, como se mencionó anteriormente modifican de manera especial a los aceros.

3.6 Tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos consisten en la transformación del material mediante la variación controlada de temperatura y tiempo de acción en diferentes condiciones que se realizan a los aceros para lograr cambios estructurales que modifiquen sus propiedades. [27] Estos procesos térmicos se representan en diagramas denominados TTT, aludiendo a las variables que definen el resultado; temperatura, tiempo y transformación. Dicha transformación se refiere al cambio que tendrán las fases ya presentes en el acero y a la formación de nuevas.

Dependiendo del tipo de tratamiento, las piezas pueden o no variar su composición química. El tiempo y la temperatura son los factores más importantes y que deben de ser fijados, de acuerdo con la composición del acero, la forma, el tamaño de las piezas y las propiedades que se desean obtener. Existen diferentes tipos de tratamientos térmicos estos se pueden clasificar como;

3.6.1 Tratamientos continuos

Estos tratamientos se distinguen cuatro tipos: recocido, normalizado, temple y revenido. Estos tratamientos se comienzan con la etapa de calentamiento hasta que la pieza a tratar alcance la temperatura a partir de la cual se hará el enfriamiento, seguido por un tiempo de sostenimiento a esa temperatura y finalmente se le hace un enfriamiento. Cada uno de estos tratamientos se resumen a continuación.

Recocido: Es un tratamiento orientado a conseguir varios objetivos, como eliminar particularidades estructurales anormales en metales y aleaciones, conferir al metal un estado de ablandamiento o reproducir el estado original del metal en caso de haber sido perturbado en otro tratamiento. Consiste en calentar la pieza hasta Ac_3 , los grados adicionales dependen del tipo de recocido, posteriormente enfriar de una forma tan lenta que semeje enfriamientos en condiciones de equilibrio, esto se logra si el enfriamiento se hace dentro del horno.

Temple: Es una operación que se realiza calentando a una temperatura por encima del punto de transformación Ac_3 o Ac_1 , enfriando con tal velocidad que se produzca un considerable aumento de la dureza, superficialmente o hasta el núcleo de la pieza, lo que se debe en general a la formación de martensita.

Normalizado: Tratamiento térmico que se da a los aceros al carbono de construcción. Se utiliza también en piezas fundidas, forjadas, laminadas, mecanizadas, etc., y en general siempre que se trate de eliminar las tensiones producidas por cualquier método de conformación. Consiste en calentar el acero a una temperatura de 30°C a 50°C superior a la crítica (A_{c3}) y, una vez transformado completamente, dejarlo enfriar al aire.

Revenido: Consiste en calentar el acero a una temperatura determinada, pero por debajo de A_{c1} , después de haber sido templado a una temperatura inferior a la de austenización y luego someterlo a uno o varios enfriamientos rápidos hasta la temperatura ambiente. [28]

El objetivo de este tratamiento es conseguir lo siguiente:

- Mejorar los efectos del temple
- Disminuir las tensiones internas originadas en el temple
- Modificar las características mecánicas disminuyendo dureza y resistencia a la rotura, así como aumentando tenacidad, plasticidad y estricción.

En la figura 10 se observa el comportamiento de los tratamientos mencionados respecto a la temperatura y el tiempo.

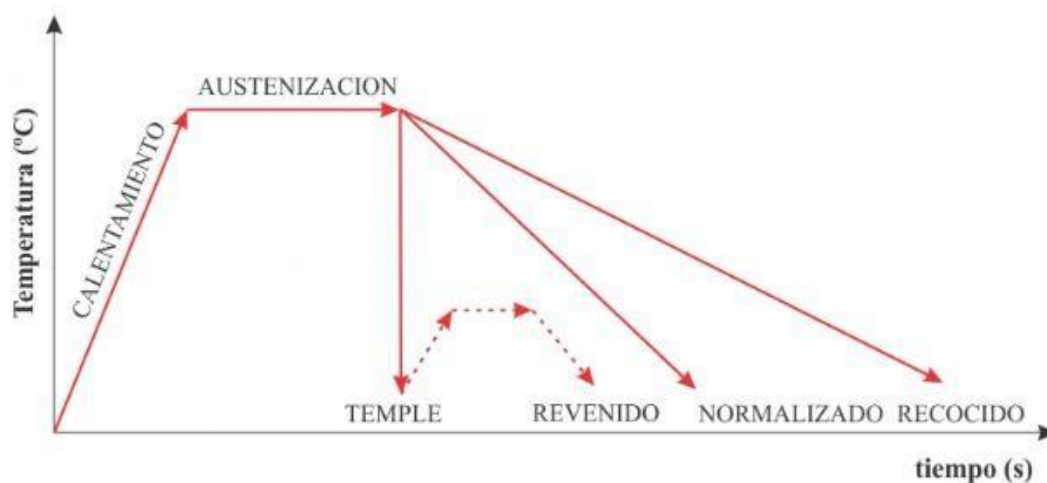


Figura 10 Diagrama Temperatura-tiempo de los tratamientos térmicos continuos. Obtenido de Askeland, *The Science & Engineering of Materials*, 4ta edición.

3.6.2 Tratamientos isotérmicos

Este tipo de tratamientos se realizan a una temperatura constante con el objetivo de obtener una microestructura específica, la cual puede ser consultada para un acero específico en su diagrama TTT. Los principales tratamientos isotérmicos son:

Martemperizado: Consiste en calentar el acero a la temperatura de austenización por encima de A_{c3} o A_{c1} , posteriormente se mantiene el tiempo necesario para que se transforme toda la austenita. Se enfría en un baño de sales fundidas manteniendo una temperatura constante durante un tiempo por encima de M_s , durante en el que la austenita no sufre ninguna transformación.

Austemperizado: Este tratamiento comienza con un calentamiento del acero por encima de la temperatura crítica y se mantiene por un periodo de tiempo que logre la transformación de la austenita, posteriormente se enfría a una temperatura por encima de M_s , a alta velocidad, en un baño de sales que mantiene dicha temperatura. Durante este recorrido se forma una estructura bainítica casi por completo. El tratamiento termina con un enfriamiento hasta temperatura ambiente. [29]

Ambos tratamientos descritos se observan en la figura 11 con información detallada.

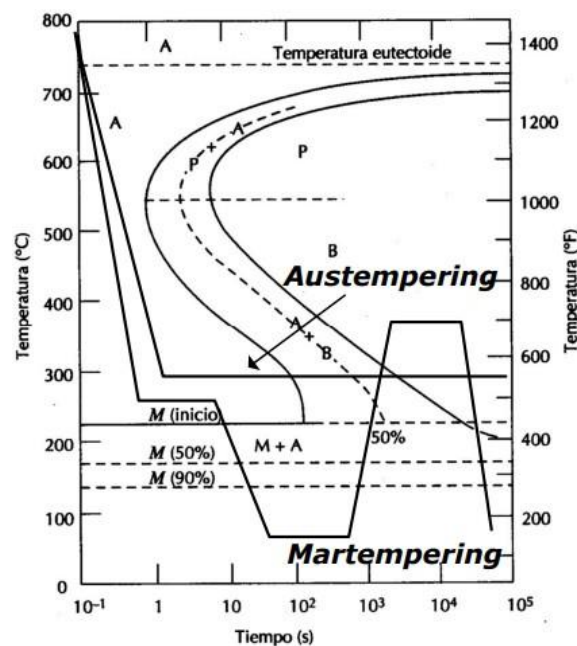


Figura 11 Tratamientos isotérmicos graficados en un diagrama TTT de un acero al carbono. Fuente; Majji, R. (2019)

El calentamiento hasta la temperatura de austenización y el tiempo de sostenimiento a esa temperatura son dos variables bastante importantes a tener en cuenta en algunos tratamientos térmicos, estas se describen a continuación;

3.6.3 Temperatura de austenización

Uno de los factores críticos dentro de los tratamientos térmicos es la temperatura de austenización, esta influye significativamente en el proceso de transformación estructural de los aceros. Esta es la temperatura por encima de la cual se calienta una pieza de acero con la finalidad de transformar su microestructura a la fase austenita

La temperatura de austenización varía con respecto al contenido de carbono en el acero; al aumentar el contenido de carbono, la temperatura de austenización disminuye hasta llegar a la temperatura eutectoide. Existe un rango de temperaturas dentro del cual se debe calentar un acero dependiendo del tratamiento térmico que se aplicará.

Rangos de temperatura en función del contenido de carbono en el acero, para tratamientos térmicos como: normalizado, recocido y temple.

En general, la temperatura de austenización se encuentra dentro del rango de temperaturas de 800 a 1000 °C, a menos que se trate de aceros de herramienta, en cuyo caso resulta ser mayor. Posterior al calentamiento de la aleación y la homogenización de su microestructura, el material se enfría de manera rápida en algún medio a menor temperatura.

3.6.4 Tiempo de mantenimiento

Si la temperatura de austenización se ha escogido correctamente, el acero permanece en estado austenítico una vez la alcance, se supone que toda la pieza está a la temperatura del horno. En ese momento se empieza a contar el verdadero tiempo de sostenimiento, necesario para preparar la estructura adecuadamente. Este tiempo depende del grado de disolución de los carburos que se desee. Como la cantidad de carburos es diferente para los distintos tipos de acero, el tiempo de permanencia también depende del acero.

3.6.5 Diagrama TTT

Se denomina diagrama o curva TTT al diagrama que relaciona el tiempo y la temperatura requeridos para una transformación que puede darse de forma isotérmica o por enfriamiento continuo como se pueden apreciar en las figuras siguientes. La figura 13 muestra un tratamiento con una línea verde que desciende desde los 1500°C a 0°C en un breve lapso de tiempo. Por otro lado, en la figura 14 se observan los tiempos de mantenimiento a cierta temperatura en un tratamiento isotérmico.

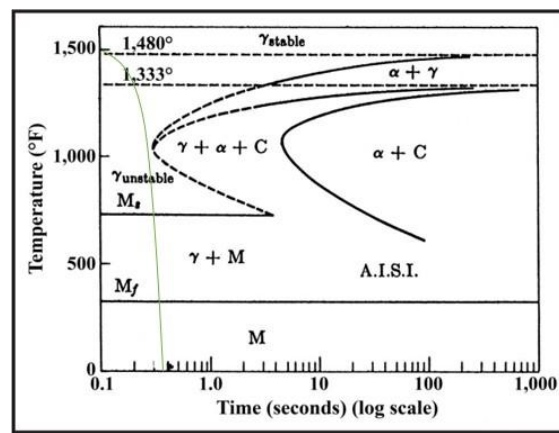


Figura 12 Tratamiento térmico continuo representado en un diagrama TTT de un acero 1040. Fuente; Sarmiento, D. R. (2022)

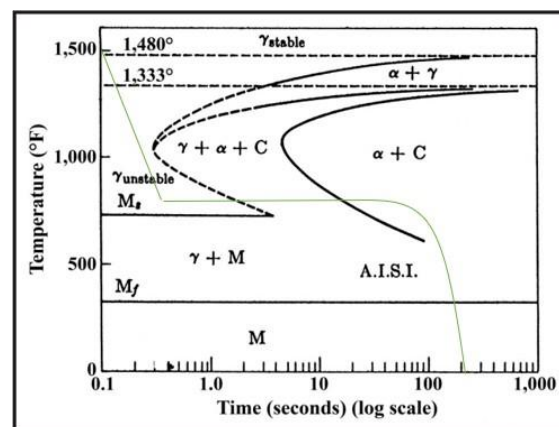


Figura 13 Tratamiento isotérmico en un diagrama TTT de un acero 1040. Fuente; Sarmiento, D. R. (2022)

Para obtener dichos diagramas, se calienta un grupo de probetas equivalentes a la temperatura de austenización, y se mantienen ahí hasta que se convierten en austenita. Conseguido esto, se enfrían bruscamente en baños de sales o metal fundido hasta la temperatura deseada, que permanecerá constante a medida que

dure el ensayo; a intervalos de tiempo determinados se sacan las probetas del baño y se enfrían bruscamente hasta temperatura ambiente.

Por medio de la prueba a microscopio de las mismas, se establece la proporción de austenita transformada en funcionalidad del tiempo y con ello, el inicio y el final de la transformación. Se recibe de esta forma el diagrama que nos da la porción de austenita transformada en funcionalidad del tiempo, a temperatura constante.

3.6.6 Fases presentes en un AHSS

Un acero de bajo carbono convencional, antes de cualquier modificación posee en su mayoría una composición ferrítica en su estructura, con propiedades de esa fase que no resultan efectivas para someter el material a trabajos demandantes de resistencia o incluso para la fabricación de piezas con dicho material que requieran tensiones o deformaciones constantes para llegar al resultado. Se han estudiado las propiedades de cada fase que pueden obtenerse mediante tratamientos térmicos, así como las variables para obtenerlas, con el fin de someter a los materiales a tratamientos específicos para lograr propiedades únicas para sus aplicaciones.

De todas las fases microestructurales, la martensita es la más encontrada en los aceros templados ya que la austenita presente en aleaciones de Fe-C transforma a martensita mediante enfriamiento, la cual estará presente como una solución sólida intersticial. Dicha transformación tiene un comportamiento adifusional, es decir, que la martensita tendrá la composición de la austenita que cambia su estructura, esta condición también permite la transformación continua durante un enfriamiento interrumpido. Las dos morfologías principales de los cristales individuales de martensita son láminas y placas. Las primeras se presentan en aceros de bajo y medio carbono, mientras que las placas son visibles aceros de alto carbono. Para lograr una estructura casi en su totalidad martensítica es necesario un enfriamiento a velocidades altas, llegando a dicha transformación sin tiempo de que ocurra la formación previa de una u otras fases.

La bainita es una transformación producto de una reacción eutectoide, de ferrita y cementita, fases que nuclean independientemente de la otra, el crecimiento de la

bainita es controlado y resultado de la difusión del carbono en la austenita. [8] Entre un rango de temperaturas de 350°C a 550°C se forma bainita superior donde se tiene lugar para una transformación del carbono rechazado durante la formación de la fase α entre las placas de ferrita y se presenta en forma de barras. En la formación de bainita inferior, que ocurre entre los 250°C y 350°C, el carbono se difunde en menor medida, haciendo que la cementita precipite internamente en las placas de ferrita, dando a estas un color oscuro cuando se observa en microscopio.

Para obtener un acero bainítico con propiedades avanzadas de resistencia es necesario un tratamiento específico donde se forme esta fase en su forma pura. El austemperizado es un tratamiento isotérmico que consiste en un enfriamiento de alta velocidad, partiendo de un tratamiento previo de austenitizado y un posterior mantenimiento a cierta temperatura dependiendo de la bainita que se desee obtener. En el primer tratamiento se calienta el acero sobre la temperatura crítica y se mantiene hasta obtener la transformación de la austenita. Para evitar la transformación no deseada de otras fases, posteriormente se realiza un enfriamiento seguido de un mantenimiento, como se observa en la figura 14.

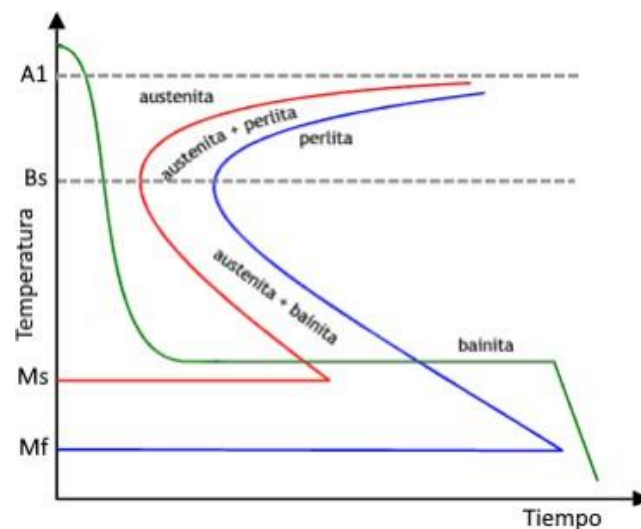


Figura 14 Tratamientos térmicos de austemperizado (línea verde). Fuente propia

En un tratamiento térmico los factores determinantes de las propiedades finales del material son el tiempo de calentamiento, las temperaturas de trabajo y la velocidad de enfriamiento. Esta velocidad puede ser calculada de manera experimental y depende de varios factores como las dimensiones y forma del material, su estado superficial y el medio utilizado para el enfriamiento. A su vez, existen variables propias

de cada sustancia utilizada como medio que influyen en en la velocidad de enfriamiento, como lo son su calor específico y la temperatura inicial, la cual dependerá del tratamiento a realizar y los objetivos, por ejemplo, para el austempering de la presente investigación, el medio se calienta previamente para alcanzar los 300 y 350°C.

Este mantenimiento se realiza en un baño de sales fundidas para controlar el enfriamiento y evitar la formación de perlita o martensita. La adición de sales al agua pura incrementa el valor del calor específico de la solución, haciendo el enfriamiento más rápido. Además de esto, los cristales formados de las sales estallan por la elevada temperatura y rompen el velo de vapor que circunda la pieza, favoreciendo la pérdida de calor. Estas soluciones salinas se emplean en un rango de temperatura de 150 a 600°C. El tratamiento produce en el acero una superior resistencia al impacto, también modifica la tenacidad y eleva también la dureza, aunque esta dependa en mayor medida de la composición del acero, que del austemperizado. [9]

El último enfriamiento se realiza en agua pura, posterior a permanecer por distintos periodos de tiempo en el baño de sales, dichos tiempos se describen a mayor detalle en el capítulo correspondiente a la parte experimental y de resultados.

3.8 Caracterización

La correcta caracterización de un acero es de vital importancia debido a que gracias a esta es posible:

Entender su composición química: El ataque químico permite obtener la composición química del acero y de las inclusiones que se encuentran presentes en la estructura.

Analizar la microestructura: permite revelar la organización interna del acero. Esto incluye la identificación de fases, granos, inclusiones, y otros factores que afectan las propiedades mecánicas del material.

Predecir su comportamiento: Al comprender la composición química y la microestructura del material, se puede predecir el comportamiento ante diferentes condiciones de carga, temperatura, corrosión, fatiga entre muchos otros factores.

Existe una serie de pasos a seguir para lograr el correcto y completo análisis micrográfico de un acero, es de crucial importancia tener un conocimiento previo del acero del cual se planean obtener su composición química y sus microestructuras. Estos pasos son:

Corte inicial: Si la muestra es sumamente grande o tiene forma irregular, se lleva a cabo un corte inicial para obtener una pieza manipulable y con una superficie más uniforme para el proceso de desbaste posterior.

Desbaste: Se refiere al proceso de preparación de una muestra la cual implica la remoción de material superficial para revelar la estructura interna. Este paso es crucial debido a que no es posible atacar químicamente a un acero los cuales comúnmente tienen una capa de escama proveniente del proceso de fundición

Este paso se lleva a cabo en máquinas desbastadoras semiautomáticas, en algunos casos se puede llegar a desbastar de manera manual en vidrios para pulir. En cualquiera de estos dos métodos es necesario disponer de lijas de carburo de silicio con una granulometría ascendente.

Pulido: Después del desbaste con la lija con granulometría más alta, la muestra se somete a un pulido, este se hace comúnmente con un abrasivo el cual puede ser una pasta o una solución preparada, esto varía dependiendo el tipo de material. Esto con el fin de eliminar marcas provenientes del desbaste y obtener una superficie más lisa y uniforme.

Ataque químico: Este proceso es necesario para revelar la microestructura del acero y poder analizar sus fases presentes. El ataque químico y el tiempo de ataque pueden variar dependiendo el tipo de material, porcentaje de carbono y elementos aleantes. Este proceso consiste en sumergir la muestra un tiempo determinado en el reactivo de ataque, posteriormente se limpia con abundante agua y alcohol para que esta no se oxide.

Análisis microestructural: Este análisis proporciona información sobre las diferentes fases, granos, inclusiones y otros detalles microestructurales presentes en

el acero. Este proceso implica el uso de un microscopio óptico o electrónico para observar la superficie de la muestra la cual fue sometida a un ataque químico.

Es posible capturar imágenes de la microestructura utilizando el microscopio, y estas imágenes se pueden analizar utilizando software especializado para medir el tamaño de grano, la cantidad de fases, la distribución de inclusiones, entre otros parámetros microestructurales.

Finalmente, los resultados del análisis microestructural se interpretan en función de las propiedades mecánicas y de rendimiento del acero. Esto puede incluir la identificación de posibles mejoras en el proceso de fabricación o la detección de errores en ya sea en el tratamiento térmico o en la fundición, la evaluación de la integridad del material y la predicción de su comportamiento en diferentes condiciones de servicio.

3.9 Pruebas mecánicas

Las propiedades mecánicas de un material son las variables que definen su comportamiento al ser sometidos ante una carga, cambio de fuerzas o desplazamientos inducidos, relacionadas con su capacidad para transmitir o resistir.

Es importante la evaluación de estas propiedades de un material, previas y posteriores al tratamiento, para ello los materiales son sometidos a ensayos mecánicos que permiten analizar las condiciones del material antes de ser empleado para su aplicación final para asegurar la calidad del producto, además de cumplir los objetivos técnicos, de seguridad y económicos del fabricante.

Los ensayos mecánicos se clasifican en destructivos y no destructivos. Las PND (pruebas no destructivas) permiten la evaluación indirecta del material mediante evaluaciones físicas y químicas sin comprometer su utilidad futura. Debido a que el material ensayado no se daña, este tipo de pruebas permiten examinar piezas en servicio, comprobación de homogeneidad durante proceso de fabricación de piezas y son parte de la inspección final de una pieza. [30]

Las pruebas mecánicas destructivas realizadas en la investigación se describen a continuación:

- **Ensayo de dureza:** por la definición de la propiedad evaluada, la prueba proporciona una medición de la resistencia del material a ser penetrado bajo la

aplicación de una carga específica en su superficie hasta generar una deformación plástica localizada denominada indentación. Esta prueba es además un indicador de la aptitud al mecanizado que posee el material. Existe una distinción de los métodos de ensayo de dureza que depende de la magnitud de la carga aplicada; para cargas superiores a 1000 gramos se dice que el método de medición es macrodureza, aplicando las escalas Brinell y Rockwell para aceros. Mientras que, para evaluar microdureza, con cargas entre 1 y 1000 gramos, se utilizan las escalas Vickers y Knoop.

Para llevar a cabo correctamente la prueba se deben considerar ciertas condiciones generales; 1) la cara de la probeta que recibe el indentador debe estar previamente pulida, plana y paralela a su base, 2) la carga debe actuar normal a la superficie, por lo cual es debido que la probeta se apoye uniformemente sobre el soporte, 3) el centro de la indentación debe situarse a una distancia considerable del borde de la probeta y de otra impronta, 4) al término de un ensayo de dureza realizado correctamente, la cara opuesta de la probeta no debe presentar marcas.

Las pruebas destructivas causan en los materiales una alteración de forma permanente en sus propiedades físicas y mecánicas. Los distintos métodos de prueba clasificados como ED (ensayos destructivos) generalmente se basan en la aplicación paulatina de una fuerza variable hasta provocar dicha alteración, que es perceptible al término de la prueba.

- **Ensayo de impacto:** La prueba se realiza en un equipo con un fundamento mecánico sencillo. Se utiliza un péndulo con una carga en su extremo que golpea, por efecto de la gravedad, a la probeta colocada en un soporte en la parte inferior del equipo. Existen dos tipos de ensayo de impacto de acuerdo con las características de la probeta. Para ambas pruebas, Izod y Charpy, las dimensiones de la probeta son las mismas, la distinción se hace por el posicionamiento de la muesca en la probeta y de esta en los soportes del equipo.

Un ensayo Charpy requiere que la muestra metálica se soporte por ambos extremos de manera horizontal y que el martillo impacte en la cara contraria a la muesca. Para el ensayo tipo Izod la probeta se soporta verticalmente y con la muesca al nivel del soporte de manera que el mazo impacte a 22 mm de la muesca en esa cara, tales condiciones se muestran en la figura 15, además de las dimensiones requeridas de las probetas.

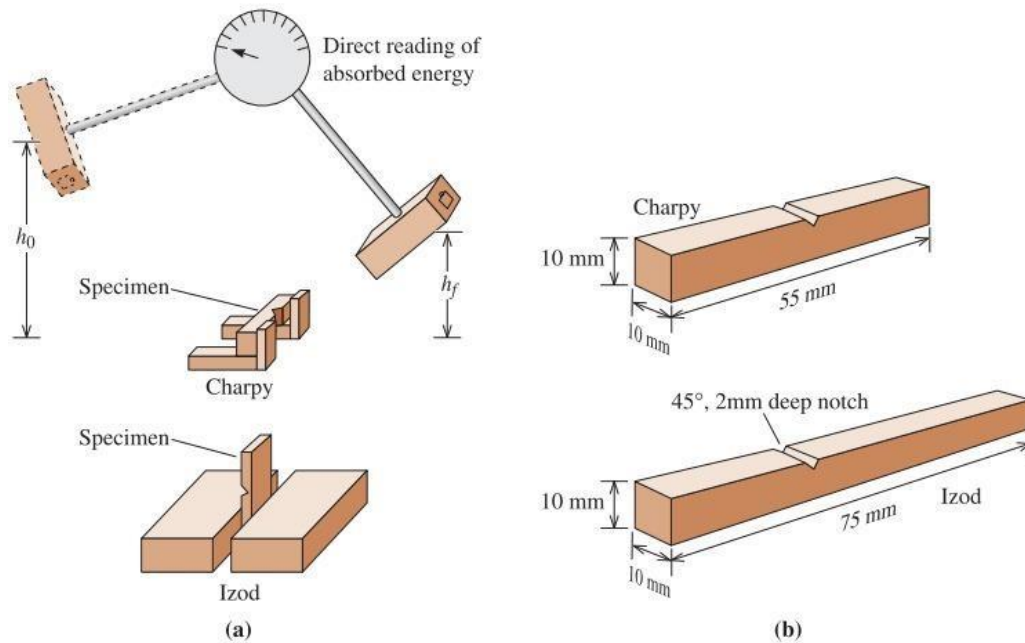


Figura 15 Pruebas de impacto tipo Charpy e Izod con las dimensiones correspondientes de las probetas. Fuente; Campboy, R. (2023)

La prueba mide la cantidad de energía absorbida por la probeta antes de romperse y es posible determinar el tipo de fractura, dúctil o frágil del material. La ductilidad es la propiedad de los materiales que permite deformaciones plásticas de alto grado antes de ser fracturados. Cuando se tiene una fractura dúctil el material presenta visibles deformaciones cercanas a la zona de la fractura. Por otro lado, cuando se habla de la fragilidad de un material se refiere a una fractura casi instantánea debido a la poca deformación plástica y la fractura de este tipo se presenta en los materiales como una superficie sin deformaciones y se extiende rápidamente.

CAPÍTULO 4- DESARROLLO EXPERIMENTAL

Mediante la experimentación y siguiendo una rigurosa secuencia de pasos, se elaboró un acero avanzado de alta resistencia. Esto partiendo de un acero comercial como en este caso es el acero AISI-SAE 1020. El proceso experimental realizado se muestra en la figura 16.



Figura 16 Diagrama de las etapas del proceso experimental realizado en la investigación. Fuente propia

4.1- Fundición

Etapas del proceso de fundición de un acero.

1. *Elaboración del molde*

Se utilizó una mezcla de arena de moldeo con un 20% de bentonita y 5% de agua que se unificaron en un molino chileno para fundición y cajas de moldeo de dos piezas, como la que se observa en la figura 17.



Figura 17 Inicio del proceso de moldeo en arena. Fuente propia

Una vez lista la forma, se dejaron secar los moldes para posteriormente retirar las cajas y esperar a ser llenados. En la figura 18 a) se observa un color más oscuro debido a la humedad aun presente en la arena, en la parte b) ya secos los moldes.



Figura 18 a) Derecha: secado b) Izquierda: desmolde de cajas. Fuente propia

2. Preparación del horno

Como primera etapa se procedió a fundir una carga de chatarra para llevar a cabo el sinterizado del material refractario, con el propósito de obtener una estructura más estable del mismo y garantizar la preparación óptima del horno, previo al proceso subsecuente de fusión del acero.

Esta primera carga se visualiza en la figura 19.



Figura 19 Fundición de carga de chatarra como preparación del horno. Fuente propia

Posteriormente se precalentó el equipo a una temperatura de 900°C antes de la carga del acero.

3. Técnica de fusión

Se utilizó un horno de inducción cuyo funcionamiento se basa en variaciones magnéticas a nivel molecular, producidas por corrientes eléctricas alternas de alta frecuencia que generan el calentamiento de la unidad de fusión. Las partes principales del horno se muestran en las figuras 20 y 21.

La secuencia de carga constituyó el acero de bajo carbono al crisol precalentado y una vez alcanzada la temperatura de fusión, se incorporaron las ferroaleaciones, que se pueden observar en la figura 25.



A)



B)

Figura 20 A) Convertidor B) Cuba. Fuente propia

Además, el horno cuenta con una unidad hidráulica y sistema de enfriamiento.

4. Vaciado

Mediante la piquera se vierte el metal líquido en un contenedor como el que se muestra en la figura 21, con dos extremos que sirven para vaciar el metal a los moldes. Este movimiento es impulsado mediante un sistema hidráulico de dos palancas a los extremos de la cuba.



Figura 21 Material fundido proveniente de la cuba. Fuente propia

5. Enfriamiento y desmoldeo

Después del vaciado se dejó enfriar a temperatura ambiente para que al día siguiente se realizará el desmoldeo. La figura 22 muestra el metal recién vaciado. Al término del enfriamiento se realizó una inspección visual del material.



Figura 22 metal recién vaciado en moldes de arena donde se dejó enfriar hasta temperatura ambiente. Fuente propia

Posteriormente a la adición de los elementos aleantes, se obtuvo una nueva composición química presentada en la tabla 2, donde se puede apreciar el aumento del porcentaje de carbono y la aparición de nuevos elementos. Esta nueva composición química fue obtenida por medio de un espectrómetro de chispa como el que se muestra en la figura 23.



Figura 23 Espectrómetro de chispa Shimadzu 8000. [8]



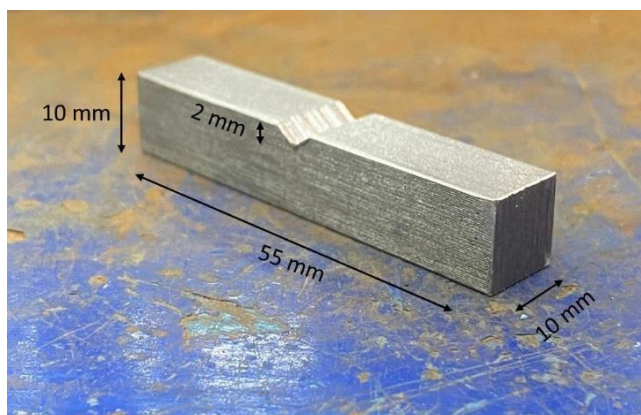
Figura 24 Ferroaleaciones utilizadas en el proceso de fusión. De izquierda a derecha; Grafito, ferro-silicio y ferro-niobio. Fuente propia

La espectroscopia de chispa funciona encendiendo un plasma creado por una chispa de alta energía descargada en una atmósfera de argón entre la muestra y el contraelectrodo. Al medir la luz emitida en este momento, se pueden analizar todos los productos químicos necesarios en menos de 30 segundos. Por tanto, se pueden identificar todos los metales, aleaciones y algunos no metales como el carbono, fósforo, azufre, oxígeno o nitrógeno.

6. Maquinado

Se realizaron probetas con dimensiones de 12.7 x 12.7 mm para las pruebas de desgaste, mientras que para las pruebas Charpy se maquinaron con dimensiones de 55 x 10 x 10 mm con una muesca a 45°, de 2 mm de profundidad en el centro, tal y como se muestran en las figuras 25.

A)



B)

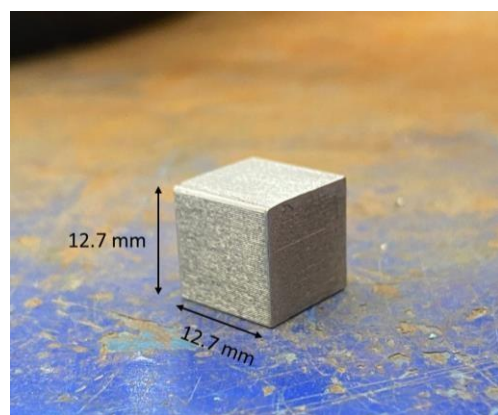


Ilustración 25 Dimensiones de las probetas A) Para ensayo de impacto Charpy B) Para ensayo de desgaste. Fuente propia

4.2 Tratamiento térmico

Una vez obtenida la composición química deseada en el acero, se aplicó un austemperizado, es decir donde las probetas se calentaron a la temperatura de austenización para posteriormente entrar a un baño de sales, compuesto de 50% KNO_3 y 50% $NaNO_3$, esto con el fin de mantenerlas a una temperatura constante y obtener una estructura bainítica.

Este tratamiento se llevó a cabo en dos hornos diferentes. Uno de ellos fue el Thermo Scientific Type F6000 Furnace, mostrado en la figura 26.



Figura 26 Horno Thermo Scientific Type F6000. Fuente propia

Este horno fue utilizado para alcanzar la temperatura de austenización en todas las probetas, la cual fue 950°C . Posteriormente llegada la temperatura, se introdujeron las probetas al horno para mantenerlas 1 hora dentro.

El siguiente paso fue trasladarlas al siguiente horno para llevar a cabo un baño de sales, el cual se aprecia en la figura 27.



Figura 27 Segundo horno utilizado donde se llevó a cabo el enfriamiento en baño de sales. Fuente propia

Una vez que se alcanzó la temperatura de 300°C en el horno, durante el proceso de austenitización. Se ingresaron las primeras 3 probetas al baño de sales donde estuvieron 30, 60 y 90. Cada 30 minutos se sacó una probeta y se enfrió en agua. Esto sucesivamente con todas las probetas con el fin de obtener una estructura bainítica. Este proceso se llevó a cabo también a la temperatura de 350°C con el fin de comparar el mismo tratamiento con diferentes temperaturas.

En las figuras 28 y 29 se observan los diagramas temperatura-tiempo donde se puede apreciar el tratamiento realizado en cada una de las condiciones.

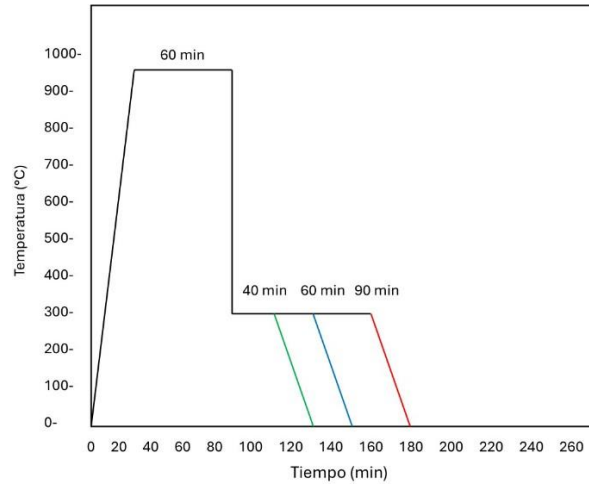


Figura 28 Tratamiento térmico en las probetas que se mantuvieron a 30, 60 y 90 minutos en el baño de sales a 300°C. Fuente propia

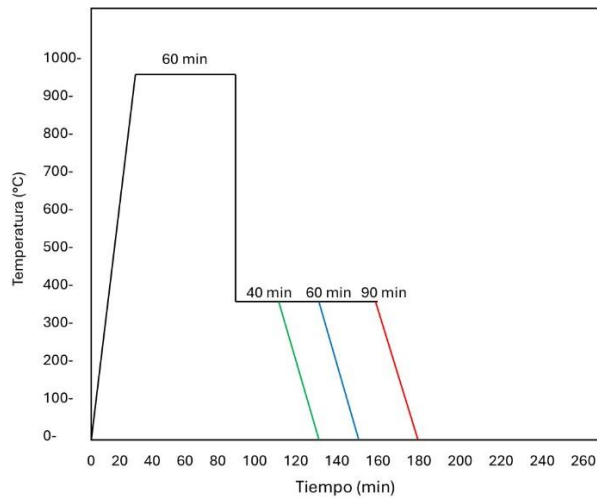


Figura 29 Tratamiento térmico en las probetas mantenidas a 30, 60 y 90 minutos en el baño de sales a 350°C. Fuente propia

4.3 Caracterización

Al haber concluido con el tratamiento isotérmico de austemperizado, las fases presentes en las probetas se vieron modificadas. Para revelarlas ante el microscopio fue necesario preparar las probetas para un ataque químico, esto implicó desbastar una de las caras de una probeta hasta tener un acabado espejo utilizando una pulidora y lijas de carburo de silicio con diferentes granulometrías las cuales iban desde 60, 80, 120... hasta la 1000, 1200 y 1500 sucesivamente, en una máquina como la mostrada en la figura 30.



Figura 30 Pulidora de doble disco donde se realizó el desbaste de probetas. Fuente propia

Para el pulido de las muestras previamente sometidas al desbaste se utilizó una pulidora, un paño y alúmina para lograr la superficie adecuada para el ataque químico.



Figura 31 Pulidora de un disco. Se utilizó con un paño para la etapa final de la caracterización. Fuente propia

Para obtener el acabado final se pulido manualmente utilizando pasta de diamante y algodón que se observa en la figura 32.



Figura 32 Pasta de diamante para los acabados finales de las probetas, aplicada con algodón. Fuente propia

Para el ataque químico se utilizó el reactivo Nital al 4%, que es una solución de ácido nítrico (HNO_3) , en distintas concentraciones, en un alcohol, generalmente etanol (C_2H_5OH) . El tiempo de aplicación varió de 1 a 4 segundos dependiendo de la temperatura y tiempo de tratamiento de las probetas.

Con el objetivo de poder comparar los resultados antes y después de distintos tratamientos y condiciones, la primera metalografía que se realizó fue del acero base que únicamente ha sido maquinado. Al haber hecho un tratamiento térmico se espera que las fases presentes en el acero base se modifiquen, esto dependerá del tiempo y temperatura al cual se haya sometido. Estas fases fueron capturadas con un microscopio digital metalúrgico.



Figura 33 Microscopio Unitron MEC2 utilizado para el análisis microestructural. Fuente [12]

4.4- Pruebas mecánicas

Ensayo de dureza

La dureza de los materiales se define como la resistencia que estos oponen a ser rayados. Las pruebas de dureza se basan en la medición de la profundidad de penetración de una determinada herramienta bajo la acción de una carga prefijada. El ensayo de dureza Rockwell es una medición de macrodureza por las unidades de fuerza utilizadas y tiene un tamaño de indentación pequeño. Utiliza esferas de acero de diámetros variables o conos de diamante.

La norma general que avala las pruebas de dureza Rockwell en materiales metálicos es la ASTM-E-18

En la escala Rockwell C el tipo de indentador utilizado es un cono de diamante a 120 grados. Esta escala fue elegida debido al material del que están fabricadas las probetas, el cual es un acero al que se le han añadido elementos aleantes y ha pasado por un tratamiento isotérmico de austemperizado. Esta escala es utilizada para aceros endurecidos y carburos.

Se tomó la dureza de las probetas del acero base y las probetas que pasaron por el tratamiento isotérmico de austemperizado para comparar las fases presentes en ellas.

Ensayo de impacto Charpy

Bajo la norma ASTM E23 Determinación de las propiedades de impacto Charpy, establece la resistencia a la rotura por un choque de flexión mediante un martillo suspendido en una máquina estandarizada con un movimiento pendular a fin de poner a prueba la mecánica de rotura del material y que tan significativos son los defectos presentes.

El ensayo consiste en un péndulo que realiza un movimiento de caída desde una altura conocida inicial, que impacta con una probeta que se encuentra a una altura conocida al final. Con el conocimiento de estas variables, además del peso del péndulo, es posible calcular la diferencia de potencial entre los puntos inicial y final. Permite conocer el comportamiento de fractura que presenta el material; dúctil o frágil.

Las dimensiones de las probetas para esta prueba mecánica se pueden apreciar en la figura 34 y el péndulo en la figura 35.

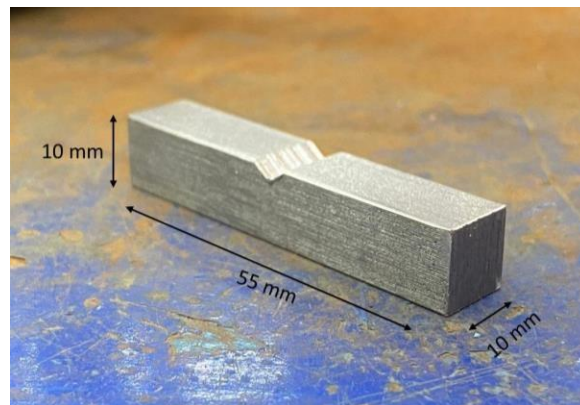


Figura 34 Dimensiones de la probeta de impacto Charpy. Fuente propia



Figura 35 Péndulo de ensayo Charpy Modelo IT-30. Fuente propia

Ensayo de desgaste

Bajo la norma ASTM-G77 se realizó la prueba de desgaste a las probetas previamente maquinadas con las dimensiones requeridas de 12.7mm por lado, tal como se muestra en la figura 42. Se utilizó el equipo TE-53SLIM Multi purpose Friction and Wear Tester con un rango de velocidad de 30 a 850 rpm, rango de carga de 42 a 750 N y un anillo de acero HRC 65 de 60mm como características del equipo.

$$a = b = c = 12.7\text{mm} \quad (1/2")$$

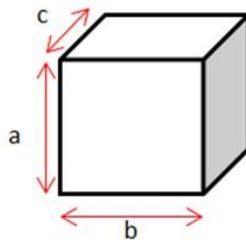


Figura 36 Dimensiones de las probetas para ensayo de desgaste. Fuente propia

El ensayo consiste en determinar la resistencia de los materiales al desgaste por deslizamiento en condiciones dadas. En la figura siguiente se observa el equipo utilizado para la prueba.

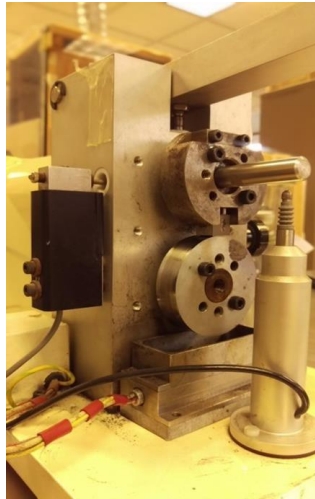


Figura 37 Equipo 53LIM para ensayo de desgaste. Fuente propia

Capítulo 5- RESULTADOS

5.1 Fundición

La aleación utilizada para la elaboración del acero de alta resistencia fue un AISI-SAE 1018. Este es un tipo de acero caracterizado por su bajo contenido de carbono, el cual suele estar en un rango de 0.15 a 0.20%

Tabla 1. Ferroaleaciones utilizadas en el proceso de fusión

FERROALEACIONES		
	Kilogramos	Gramos
Grafito	0.028	28.758
Fe-Cr Bajo	0.234	234.712
Fe-Si	0.343	343.362
Fe-Nb	0.022	22.008
Granalla Al	0.002	2.388
Mn	0.028	28.499

Tabla 2. Composición química final del acero de alta resistencia.

Elemento	C	Si	Mn	S	Cr	Nb	Al	P
%	0.42	2.18	0.68	0.04	0.94	0.11	0.016	0.003

5.2 Metalografías

En las siguientes figuras se presentan las metalografías de las muestras experimentales. En la Figura 38 se muestra la metalografía de un austemperizado a 300°C y 30 min de tratamiento, donde se puede observar que, a los 30 minutos de mantenimiento a 300°C, la metalografía muestra una mayor presencia del elemento aleante, lo que se refleja en una distribución menos uniforme de las fases. Las estructuras observadas son acículas más largas, típicas de una formación bainítica inicial. En esta etapa, la austenita retenida está presente en mayor cantidad, lo cual indica que aún puede transformarse en bainita con tiempos mayores. La microestructura predominante es una combinación de bainita y austenita retenida. En cuanto a los porcentajes de fases, se identifican 61.26 % de austenita retenida y 38.74 % de bainita inferior, estos porcentajes de fases fueron determinados con el software ImageJ. Lo que sugiere una transformación parcial que favorece propiedades como tenacidad y ductilidad.

Las zonas oscuras muestran el contenido de bainita dentro de la matriz ferrítica, las zonas blancas se refieren a la austenita retenida y carburos que se manifiestan en puntos negros.

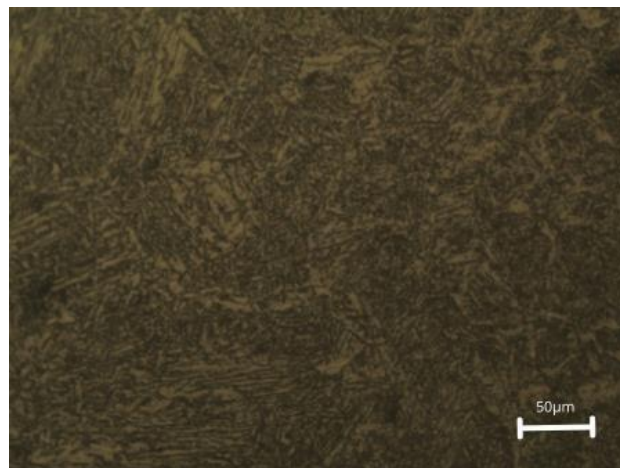


Figura 38 Metalografía de un AHSS Austemperizado a 300°C por 30 minutos. Fuente propia

En la figura 39 a 60 minutos de mantenimiento, se observa una mayor uniformidad en la distribución de fases, lo que indica un avance en la transformación de austenita a bainita. Las acículas presentes en la microestructura son más finas que en el caso de los 30 minutos, lo que sugiere un refinamiento estructural. No obstante, la austenita retenida aún está presente en una proporción significativa, siendo la microestructura

predominante la austenita retenida. En términos cuantitativos, se identifican 75.73 % de austenita retenida y solo 24.27 % de bainita inferior, lo cual indica una transformación menos eficiente hacia la fase bainítica. Esta condición puede ser útil para aplicaciones que requieren una buena combinación de resistencia y ductilidad, aunque con menor dureza.

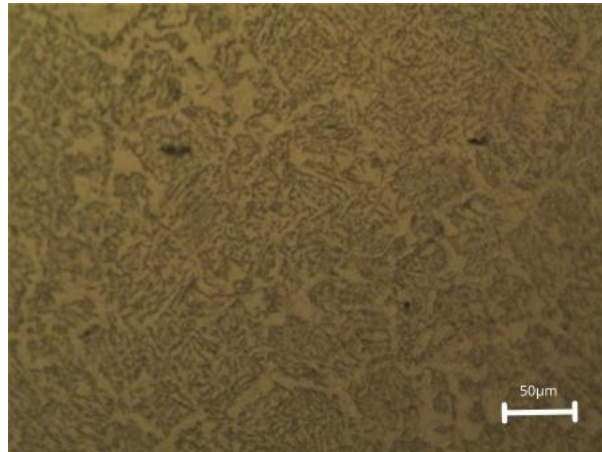


Figura 39 Metalografía de un AHSS Austemperizado a 300°C por 60 minutos. Fuente propia

Tras 90 minutos de mantenimiento, en la figura 40 la microestructura presenta una alta homogeneidad y continuidad en las fases, lo que indica una transformación bainítica más completa. Las acículas se observan más gruesas y largas, señalando una fase bainítica más desarrollada y madura. La austenita retenida se encuentra en menor cantidad, lo cual confirma un proceso de transformación más avanzado. En esta condición, la microestructura predominante es bainita inferior más desarrollada, y los porcentajes de fase reflejan esta transformación: 51.65 % de austenita retenida y 48.35 % de bainita inferior. Esta combinación es ideal para aplicaciones que requieren alta resistencia y estabilidad estructural, aunque con una tenacidad algo menor respecto a tratamientos más cortos.

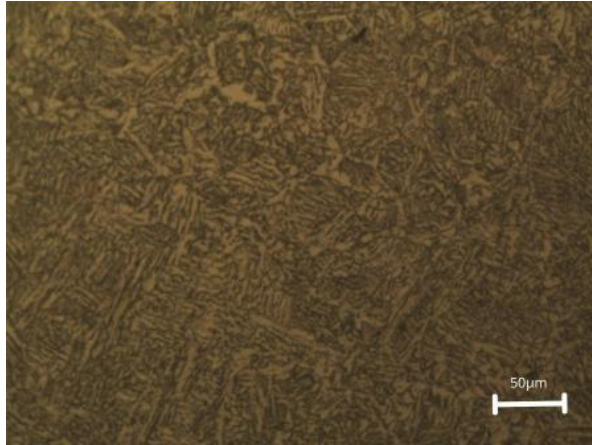


Figura 40 Metalografía de un AHSS Austemperizado a 300°C por 90 minutos. Fuente propia

Tabla 3. Análisis de las microestructuras de un acero avanzado de alta resistencia austemperizado a 300°C durante 30, 60 y 90 minutos.

Característica	30 min	60 min	90 min
Distribución de fases	Mayor presencia del elemento aleante	Menor uniformidad	Mayor homogeneidad y continuidad de fases
Tamaño de las estructuras	Acículas más largas	Acículas más finas	Acículas más gruesas y largas
Austenita retenida	Presente en mayor cantidad (Es posible transformar más cantidad a Bainita)	Presente en mayor cantidad	Menor cantidad (más transformación completada)
Microestructura predominante	Bainita retenida+ Austenita retenida	Austenita retenida	Bainita inferior más desarrollada
Porcentaje de fases	61.26% Austenita retenida 38.74% Bainita inferior	75.73% Austenita retenida 24.27% Bainita inferior	51.65% Austenita retenida 48.35% Bainita inferior

A los 30 minutos de austemperizado a 350 °C en la figura 41, la microestructura del acero presenta una distribución ligeramente heterogénea de las fases, evidenciando que el proceso de transformación aún no ha alcanzado una uniformidad total. Las estructuras observadas son acículas delgadas, características de una etapa temprana de formación bainítica. La austenita retenida se encuentra en una cantidad moderada,

lo que indica que todavía está presente en proporciones importantes y podría seguir transformándose con tiempos mayores. La microestructura predominante es una mezcla de bainita y algo de austenita, y los porcentajes obtenidos reflejan 68.09 % de austenita retenida y 31.91 % de bainita inferior, lo que sugiere un equilibrio que aporta buena ductilidad con resistencia mecánica moderada.

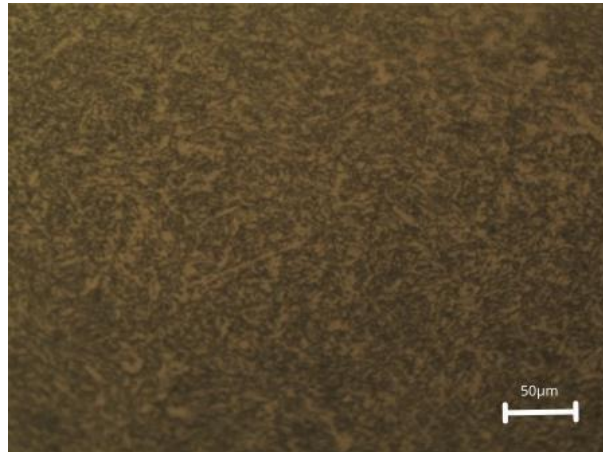


Figura 41 Micrografía de un AHSS Austemperizado a 350°C por 30 minutos. Fuente propia

En la figura 42 a los 60 minutos de tratamiento, el proceso ha avanzado significativamente, y se observa una distribución homogénea de las fases, lo que indica una mejor uniformidad en la transformación. Las acículas son más visibles y desarrolladas, mostrando una evolución en el crecimiento de la estructura bainítica. La austenita retenida se encuentra en baja proporción, señal de que ha habido una transformación más extensa hacia bainita. En esta condición, la microestructura predominante corresponde a una bainita más completa, con un 62.07 % de austenita retenida y 37.93 % de bainita inferior, mostrando un avance hacia propiedades mecánicas más equilibradas, con buena resistencia y reducción en la ductilidad.

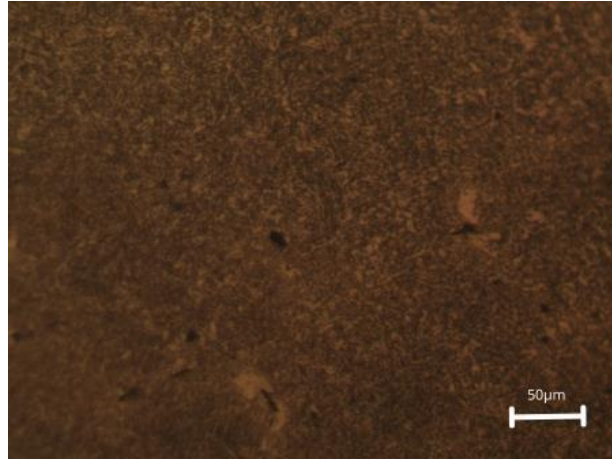


Figura 42 Metalografía de un AHSS Austemperizado a 350°C por 60 minutos. Fuente propia

Tras 90 minutos de tratamiento en la figura 43, la microestructura alcanza un alto grado de desarrollo, evidenciado por una distribución muy homogénea de fases. Las acículas se presentan gruesas y coalescidas, lo cual indica una madurez estructural bainítica. La austenita retenida es mínima, confirmando que casi toda la fase austenítica ha sido transformada. La microestructura predominante es de bainita completa, con un 52.93 % de austenita retenida y 47.07 % de bainita inferior, lo que sugiere una condición ideal para aplicaciones que requieran alta resistencia y estabilidad estructural, aunque con una posible disminución de la tenacidad frente a tratamientos de menor duración.

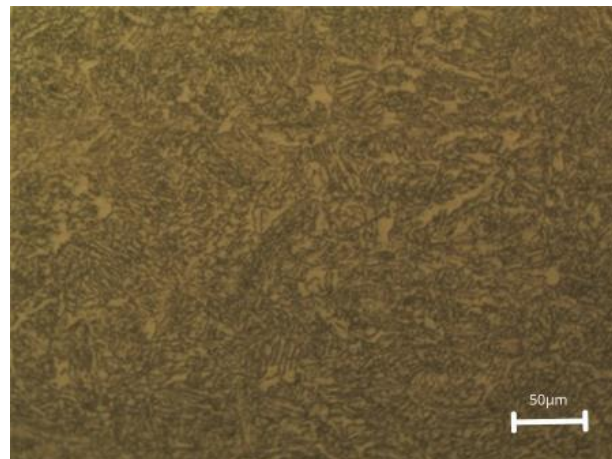


Figura 43 Metalografía de un AHSS Austemperizado a 350°C por 90 minutos. Fuente propia

Tabla 4. Análisis de las microestructuras de un acero avanzado de alta resistencia sometido austemperizado a 350°C durante 30, 60 y 90 minutos.

Característica	30 min	60 min	90 min
Distribución de fases	Ligeramente heterogénea	Homogénea	Muy homogénea
Tamaño de las estructuras	Acículas delgadas	Acículas más visibles	Grueso, acículas coalescidas
Austenita retenida	Moderada	Baja	Mínima
Microestructura predominante	Bainita + algo de austenita	Bainita más completa	Bainita completa
Porcentaje de fases	68.09% Austenita retenida 31.91% Bainita inferior	62.07% Austenita retenida 37.93% Bainita inferior	52.93% Austenita retenida 47.07% Bainita inferior

5.3 Ensayo de impacto

Bajo la norma ASTM E23 para el ensayo de impacto Charpy se realizó la prueba a las probetas base y las de tratamiento a 300 y 350°C.

Se obtuvieron los resultados descritos en la siguiente tabla:

Tabla 5. Energía absorbida por las probetas con y sin tratamiento térmico a diferentes tiempos.

PROBETA	ENERGÍA ABSORBIDA (Joules)
MATERIAL BASE	
1	6
AUSTEMPERIZADO A 300°C	
30 minutos	13
60 minutos	16
90 minutos	12
AUSTEMPERIZADO A 350°C	
30 minutos	18
60 minutos	16
90 minutos	26

Además de evaluar la cantidad de energía antes de fracturarse, con el ensayo Charpy es posible analizar el comportamiento de dicha fractura mediante observación de las probetas al término de la prueba. Durante la experimentación, una de las partes de la probeta 300°C/60 minutos se extravió, por lo cual esta característica se analizó con una sola mitad. De manera general se observaron superficies regulares en ambas partes de las probetas, lo que propone una fractura frágil.

5.4 Ensayo de dureza Rockwell

Se aplicó el ensayo de dureza Rockwell tipo C primero a dos probetas del acero base, sin ningún tratamiento, únicamente maquinado. Se utilizó el equipo DURÓMETRO ROCKWELL, obteniendo los resultados descritos a continuación.

Las probetas que no fueron sometidas al tratamiento térmico presentan una estructura mayormente ferrítica con precipitados finos de carburos debidos a las ferroaleaciones, lo cual brinda la dureza que muestran los resultados de la tabla 7.

Tabla 6. Dureza HRC en material base

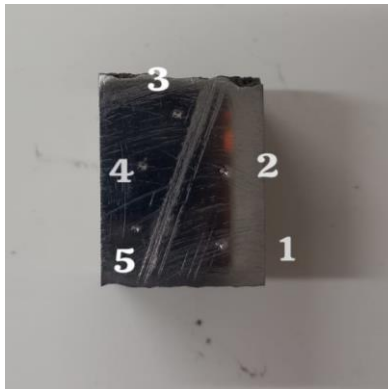


Figura 44 Puntos de prueba de dureza en la probeta de material base. Fuente propia

PUNTO	DUREZA HRC
1	21.7
2	29.8
3	28.7
4	29.4
5	32.0

Los resultados se obtuvieron a partir de los puntos de prueba mostrados en la figura 44, correspondiente a la primera probeta del material base.

Tabla 7. Dureza HRC de la segunda probeta de material base

PUNTO	DUREZA HRC
1	24.1
2	26.0
3	23.8
4	25.1
5	27.6



Figura 45 Puntos de prueba de dureza en segunda probeta de material base. Fuente propia

En la segunda probeta se realizó la prueba en distintos puntos, como se aprecia en la figura 45.

A continuación, se presentan los resultados del ensayo aplicado a las probetas sometidas a los tratamientos térmicos. En primer lugar, las de austenitizado a 950°C y austemperizado a 300°C por 30, 60 y 90 minutos, respectivamente. En la figura 46 se observa la probeta de 30 minutos.

Tabla 8. Dureza HRC de la probeta de 30 minutos a 300°C

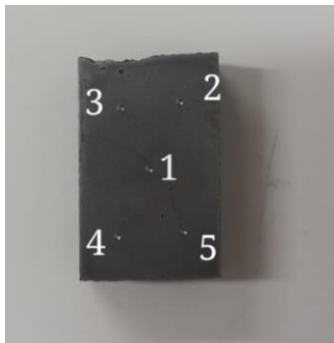


Figura 46 Puntos de prueba de dureza en la probeta de 30 minutos a 300°C. Fuente propia

PUNTO	DUREZA HRC
1	33.3
2	37.3
3	36.7
4	36.1
5	37.1

Se observa notablemente un amento en la dureza del material. El primer tiempo de mantenimiento permitió la formación inicial de bainita inferior, presente en un 38.74% y la presencia de austenita retenida en un 61.24%. Dicha transformación parcial de la austenita en bainita, favorece propiedades como la dureza.

La probeta de 60 minutos y los puntos de prueba se observan en la figura 47.

Tabla 9. Dureza HRC de la probeta de 60 minutos a 300°C

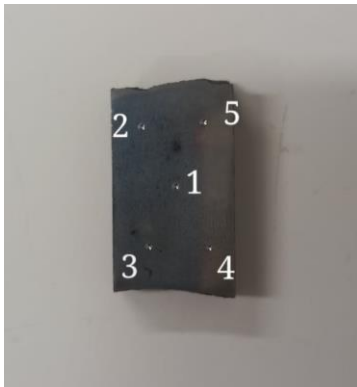


Figura 47 Puntos de prueba de dureza en la probeta de 60 minutos a 300°C. Fuente propia

PUNTO	DUREZA HRC
1	32.9
2	31.8
3	31.9
4	33.6
5	29.4

Al tiempo de mantenimiento de 60 minutos, la proporción de las fases presentes es de 75.73% austenita retenida y 24.27% bainita inferior, lo que sugiere un refinamiento estructural de las acículas bainíticas, disminuyendo la dureza del material, pero aumentando su ductilidad.

La figura 48 presenta los puntos de prueba de la probeta correspondiente al mayor tiempo de mantenimiento en el austemperizado a 300°C.

Tabla 10. Dureza HRC de la probeta de 90 minutos a 300°C



Figura 48 Puntos de prueba de dureza en la probeta de 90 minutos a 300°C. Fuente propia

PUNTO	DUREZA HRC
1	30.6
2	32.6
3	33.3
4	33.0
5	34.0

Tras la prolongación del mantenimiento, a los 90 minutos, se ha propiciado una transformación avanzada de austenita en bainita, en una proporción de 51.65% y 48.35%, respectivamente. La homogeneidad de las fases indica estabilidad estructural, lo cual se observa en su propiedad de dureza.

A continuación, se presentan los resultados del Austemperizado a 350°C con diferentes tiempos de mantenimiento. La figura 49 corresponde a la probeta de 30 minutos, con los diferentes puntos donde se realizó en ensayo.

Tabla 11. Dureza HRC de la probeta de 30 minutos a 350°C



Figura 49 Puntos de prueba de dureza en la probeta de 30 minutos a 350°C. Fuente propia

PUNTO	DUREZA HRC
1	31.7
2	32.9
3	33.4
4	33.3
5	32.2

Con el cambio de variables, nuevamente se presenta en mayor cantidad la fase austenita, en un 68.09%, mientras que el 31.91% se ha transformado en bainita inferior. Estos valores favorecen la ductilidad del material y su resistencia mecánica.

Los resultados siguientes, obtenidos de un tiempo mayor de mantenimiento, reflejan una mayor transformación de austenita. El crecimiento de la estructura bainítica se refleja en la dureza del material.

Tabla 12. Dureza HRC de la probeta de 60 minutos a 350°C



Figura 50 Puntos de prueba de dureza en la probeta de 60 minutos a 350°C. Fuente propia

PUNTO	DUREZA HRC
1	33.4
2	34.1
3	34.3
4	33.2
5	32.5

Finalmente se presentan los resultados del ensayo de dureza en la probeta de 90 minutos, mostrada en la figura 51.

Tabla 13. Dureza HRC de la probeta de 90 minutos a 350°C

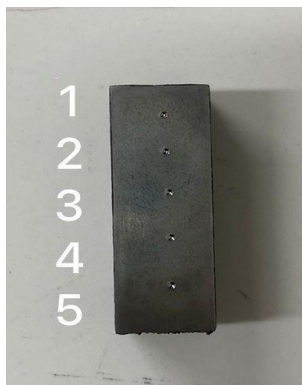


Figura 51 Puntos de prueba de dureza en la probeta de 90 minutos a 350°C. Fuente propia

PUNTO	DUREZA HRC
1	35.1
2	35.8
3	34.6
4	35.2
5	33.8

Posterior a 90 minutos de austemperizado, la distribución de fases es casi homogénea, la presencia de ustenita representa el 52.93% de la estructura, logrando acículas bainíticas bien definidas, que brindan estabilidad estructural y condiciones ideales que requieran alta resistencia.

Para visualizar mejor el comportamiento de esta propiedad mecánica, se obtuvieron los promedios de los puntos de cada probeta y así obtener un valor de dureza por

cada tiempo de tratamiento, de ambas temperaturas, para poder compararse en un gráfico como el que se muestra a continuación.

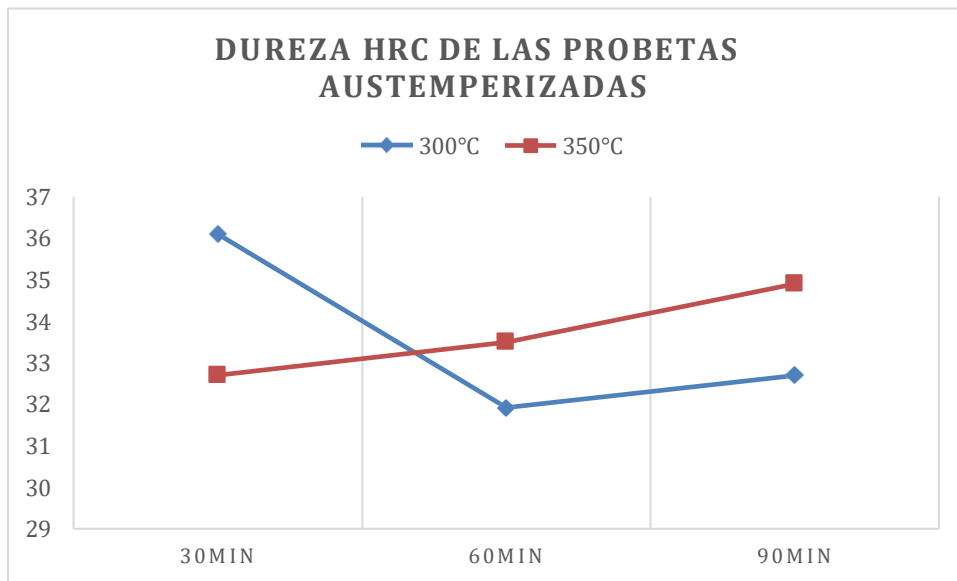


Figura 52 Gráfico de durezas Rockwell C de las probetas austemperizadas. Fuente propia

En la figura 51 se observa un comportamiento interesante de las probetas austemperizadas a 300°C, pues el valor de la dureza disminuye casi 4 unidades con un mantenimiento de 60 minutos, para después incrementarse en el caso de un mantenimiento de 90 minutos. En el austemperizado a 350°C el incremento del valor de dureza es proporcional al aumento del tiempo de mantenimiento.

5.5 Ensayo de desgaste

La prueba de desgaste se realizó bajo la norma ASTM G77. En el ensayo se registró la siguiente información, para posteriormente obtener los resultados:

Condiciones de lubricación, velocidad (rpm), carga (N) y distancia (m) recorrida por el anillo. En el cálculo del volumen de la cicatriz o huella resultante en la probeta, se consideran las siguientes variables, aplicables a la ecuación.

$$V = \frac{D^2 t}{8} \left[2 \operatorname{sen}^{-1} \frac{b}{D} - \operatorname{sen} \left(2 \operatorname{sen}^{-1} \frac{b}{D} \right) \right]$$

V= volumen de la cicatriz

D= diámetro del anillo (mm)

d= profundidad de la cicatriz

b= porcentaje de anchura de la cicatriz

t= anchura de la probeta (mm)

Se utilizó la vía seca y una velocidad de 300 rpm para todas las pruebas, las cargas fueron variables y así mismo la distancia a la cual se obtuvo un resultado favorable. Para tales condiciones, los resultados son los siguientes:

Probetas con temperatura de tratamiento de 300°C

- 30 minutos de tratamiento

$$V = 12.880518 \text{mm}^3$$

- 60 minutos

$$V = 9.043191 \text{mm}^3$$

- 90 minutos

$$V = 8.381207mm^3$$

Probetas con temperatura de tratamiento de 350°C

- 30 minutos

$$V = 1.832183mm^3$$

- 60 minutos

$$V = 7.155885mm^3$$

- 90 minutos

$$V = 10.470052mm^3$$

Tabla 14. Volumen de huellas por ensayo de desgaste

Temperatura de tratamiento	Tiempo de tratamiento (minutos)	Volumen perdido (mm^3)
300°C	30	12.880
	60	9.043
	90	8.381
350°C	30	1.832
	60	7.155
	90	10.470

CONCLUSIONES

El presente trabajo se enfocó en determinar el efecto que tiene el tratamiento térmico de austemperizado en un acero avanzado de alta resistencia tanto en las fases microestructurales como en las propiedades mecánicas de dureza, impacto y desgaste, los hallazgos se enlistan a continuación:

- A bajas temperaturas de austemperizado el desgaste del material es mayor conforme aumenta el tiempo de tratamiento térmico
- La energía absorbida al momento del impacto obtiene sus mejores valores con el austemperizado a 350° alcanzando su valor máximo a 90 minutos (26 J) debido a la formación de bainita superior
- Los valores más altos de dureza (37.1 HRC) son alcanzados a bajos tiempos y temperaturas de austemperizado
- La mayor formación de Bainita inferior se da a bajas temperaturas y es menor conforme el tiempo de tratamiento térmico disminuye
- El material base sin tratamiento térmico presento los valores más bajos de dureza, tenacidad y resistencia al desgaste.

REFERENCIAS

- [1] Abellán López, D. (2017). Desarrollo de nuevas barreras deformables para ensayo de vehículos en distintas configuraciones de choque.
- [2] Ramírez, M. E., & Brandaleze, E. (2020). Estudio del Comportamiento Termomecánico de Aceros Especiales Sometidos a Velocidades de Enfriamiento Elevadas para Lograr Ultra Alta Resistencia. *AJEA (Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN)*, (5).
- [3] Salas Reyes, A. E., Acevedo Sánchez, F. D., Altamirano Guerrero, G., Chávez Alcalá, J. F., Mercado Lemus, V. H., & Ruíz Tamayo, A. G. (2020). Acondicionamiento microestructural de un acero AHSS de fase compleja microaleado con boro tratado vía Q&P.
- [4] JORGE, I. M. G. (2019). Análisis de la soldabilidad en aceros martensíticos M1300 por medio de GMAW robotizado para componentes estructurales de alta resistencia de carrocerías.
- [5] Altamirano, G. (2021) Diseño de Aceros Avanzados Aplicados en la Industria Automotriz mediante Técnicas de Optimización Numérica e Inteligencia Artificial. Instituto Tecnológico de Saltillo, Estado de México.
- [6] Pérez Aroca, V. (2021). *Influencia de los microaleantes en las transformaciones de un acero de fase compleja endurecible en prensa utilizado en automoción* (Master's thesis).
- [7] Cárdenas, J. (2019). Lecturas para Ingeniería: Superaleaciones. Universidad Nacional Autónoma de México, Tecnología de Materiales, Estado de México.
- [8] Ashok, K. (2022) Advance High-Strength Steels for Automotive Applications: Arc and Laser Welding Process, Properties and Challenges.
- [9] Valdez Morales, J. E. (2024). *Análisis comparativo entre los aceros de alta resistencia y el acero grado 60 utilizando el código ACI 318.19 para el diseño de edificios de concreto armado en el Perú*. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- [10] Majji, R. (2019). *Development of innovative manufacturing technology: Chain-die forming for ultra-high strength steels* (Master's thesis, Western Sydney University). Western Sydney University Research Portal. <https://researchers.westernsydney.edu.au/en/studentTheses/development-of-innovative-manufacturing-technology-chain-die-form>
- [11] Campbell, J. (2015). *Complete casting handbook: metal casting processes, metallurgy, techniques and design*. Butterworth-Heinemann.
- [12] Choundiye, Y. (2022). Introduction of Sand Casting Process-An Overview. International Research Journal of Engineering and Technology, volumen 9. DOI: <https://www.irjet.net/>
- [13] Venkatesh, R. (2022). Experimental Investigation on Sand Casting Process and Optimizing Process Parameters, Journal of Engineering and Technology, volumen 6.
- [14] Urbano, G. (2021). Procesos de conformación de Aleaciones, Capítulo 1: Moldeo, Páginas 73-78 Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

- [15] Álvarez, J. (2019). Conformados; Fundición. Capítulo 3: Procedimientos; Moldeo. Instituto Politécnico Nacional.
- [16] Urbano, G. (2021) Procesos de Conformación de Aleaciones, Capítulo 3: Métodos de fundición y colada, Páginas 60-68. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- [17] Zhang, K, (2017). Applications of New High Fluidity Zinc Die Cast Alloy. Die Casting Engineer.
- [18] Fuentealba González, J. A. (2021). *Recuperación de piezas de acero aleado mediante tratamientos térmicos*. Universidad Técnica Federico Santa María. Recuperado de <http://repositorio.usm.cl/entities/tesis/0df36558-850f-4e4d-b503-bcf1da7324ba>
- [19] Guzmán Bustos, M. (2017). *Efecto de los elementos aleantes en aceros y fundiciones*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [20] Cabello Hernández, D. A. (2018). Estudio del efecto de los aleantes en la corrosión localizada para tres aceros inoxidables superausteníticos modificados. *Universidad de Concepción*.
- [21] Orozco, A. (2021). Clasificación AISI-SAE de los aceros. Recuperado de https://www.academia.edu/8537175/CLASIFICACION_AISI_SAE_DE_LOS_ACEROS
- [22] J. M., Zambrano-Castro, D. B., Zambrano-Pinargote, M., & Zevallos-Cobeña, J. G. (2023). Clasificación de los aceros según la norma SAE (Society of Automotive Engineers). <https://doi.org/10.56048/MQR20225.7.2.2023.130-147>
- [23] *Taboada Legaza, M. C. (2018). Aceros avanzados de alta resistencia de matriz bainítica: Estudio de la transformación de fase y de las relaciones entre procesamiento, microestructura y propiedades mecánicas. Universidad de Navarra. Doi:*<https://dadun.unav.edu/handle/10171/55810>
- [24] Parra Rodríguez, Y. (2020). Estudio de la recuperación elástica en aceros avanzados de alta resistencia de doble fase. Universidad Nacional de Colombia. Doi:<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/78491>
- [25] Huaman Gaspar, J. C. (2023). Soldabilidad del acero avanzado de alta resistencia (AHSS) del tipo martensítico de doble fase por el proceso TIG. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Doi: <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/8227>
- [26] Ocaña Ruiz, H. (2023). Diseño de tratamiento térmico de temple y particionado para desarrollo de aceros avanzados de alta resistencia (AHSS). Universidad Nacional Autónoma de México. <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000841495>
- [27] Sarmiento Viracachá, D. R. (2022). Evaluación del efecto de tratamientos térmicos de envejecido en aceros inoxidables C+B+N. Repositorio Escuela de Ingeniería.
- [28] Ocaña Ruiz, H. (2023). Diseño de tratamiento térmico de temple y particionado para desarrollo de aceros avanzados de alta resistencia (AHSS). Universidad Nacional Autónoma de México. de <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000841495>
- [29] Montiel Campoy, R. (2023). Determinación de los parámetros empleados en los tratamientos térmicos convencionales para los aceros SAE 1018 y 1045. Universidad Nacional Autónoma de México. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/3642302>

[30] Pompilla Yabar, A.,(2024). Comparative analysis between high-strength steels and Grade 60 steel using ACI 318.19 code for reinforced concrete building design in Peru [*Undergraduate thesis*, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. UNSAAC