



**Universidad de Moa**  
**“Dr. Antonio Núñez Jiménez”**  
**Facultad de metalurgia y electromecánica**  
**Departamento de metalurgia-química**

# **Evaluación del efecto de los tratamientos térmicos de temple, revenido y criogenización en la microestructura y dureza del acero Hadfield**

**Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Metalúrgico**

**Autor: João Nogueira Ferreira Neto**

**Moa, 2019**

**“Año 61 de la Revolución”**



**Universidad de Moa**  
**“Dr. Antonio Núñez Jiménez”**  
**Facultad de metalurgia y electromecánica**  
**Departamento de metalurgia-química**

# **Evaluación del efecto de los tratamientos térmicos de temple, revenido y criogenización en la microestructura y dureza del acero Hadfield**

**Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Metalúrgico**

**Autor:** João Nogueira Ferreira Neto

**Tutores:** Ms.C. Marlo Leyva Tarafa

Ms.C. Lisandra Poll Legrá

**Moa, 2019**

## **RESUMEN**

En este documento se presentan los resultados de un estudio experimental realizado en probetas de acero al manganeso Hadfield, en las cuales se buscó establecer la influencia del tratamiento térmico convencional y el tratamiento térmico por temple con criogenia y revenido, en la microestructura y dureza del material. El proceso térmico se llevó a cabo a temperatura de 1 050°C para el temple en tiempo de exposición de 1 hora y posterior enfriamiento en agua, el revenido a 650°C en tiempo de exposición de 30 minutos y posterior enfriamiento al aire, mientras que el tratamiento criogénico se realizó a -183°C, usando oxígeno líquido en tiempo de exposición de 2 horas. Mediante el microscopio óptico se cuantificaron las fases microestructurales obtenidas en cada proceso térmico, las cuales fueron de 73,23 % de austenita; 15,48 % de perlita + martensita y 11,29 % de cementita para el tratamiento térmico por temple con criogenia y revenido. Para el tratamiento térmico por temple y revenido fue de 72,77 % de austenita; 16,94 % de perlita y 10,29 % cementita. Mediante ensayos de dureza y microdureza, se determinó para las probetas tratadas por temple con criogenia y revenido, cuantías de 29,1 HRC y 285 HV, respectivamente. Mientras que para las probetas tratadas por temple y revenido la dureza fue de 20 HRC y la microdureza de 224,8 HV.

Palabras clave: criogenia, tratamiento térmico, microestructura, dureza.

## SUMMARY

This document presents the results of an experimental study carried out on Hadfield manganese steel test tubes, which sought to establish the influence of conventional thermal treatment and thermal treatment by tempering with cryogenics and tempering, in the microstructure and hardness of the material. The thermal process was carried out at a temperature of 1 050 ° C for tempering at 1 hour exposure time and subsequent cooling in water, tempering at 650 ° C at 30 minute exposure time and subsequent air cooling, while cryogenic treatment was carried out at -183 ° C, using liquid oxygen at 2 hour exposure time. By means of the optical microscope, the microstructural phases obtained in each thermal process were quantified, which were 73.23% of austenite; 15.48% perlite + martensite and 11.29% cementite for thermal treatment by quenching with cryogenics and tempering. For the heat treatment by quenching and tempering it was 72.77% austenite; 16.94% pearlite and 10.29% cementite. Through tests of hardness and microhardness, it was determined for the samples treated by quenching with cryogenics and tempering, amounts of 29.1 HRC and 285 HV, respectively. While for the specimens treated by tempering and tempering, the hardness was 20 HRC and the microhardness was 224.8 HV.

Keywords: cryogenics, heat treatment, microstructure, hardness.

# Índice

INTRODUCCIÓN.....	1
<b>CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.....</b>	<b>4</b>
1.1. Introducción.....	4
1.2. Análisis bibliográfico. Investigaciones precedentes.....	4
1.3. Aceros.....	7
1.3.1. Microconstituyentes de los aceros según el diagrama hierro-carbono.....	8
1.4. Acero al manganeso (hadfield).....	11
Microestructura.....	12
Influencia del manganeso y el carbono.....	13
1.5. Tratamiento térmico.....	14
1.5.1. Temple.....	14
1.5.2. Revenido.....	15
1.5.3. Criogenia.....	15
1.6. Dureza.....	16
1.6.1. Ensayo de dureza Rockwell.....	16
1.6.2. Ensayo de dureza Brinell.....	17
1.6.3. Ensayo de dureza Vickers.....	18
1.7. Análisis metalográfico.....	18
1.8. Conclusiones del capítulo I.....	20
<b>CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>21</b>
2.1. Introducción.....	21
2.2. Metodología para el desarrollo del proyecto.....	21
2.3. Diseño de experimento.....	22
2.4. Proceso de colada de la aleación.....	22
2.5. Análisis Químico.....	23
2.5. Preparación metalográfica de las muestras.....	24
Pulido de probetas.....	25
Secado de la probeta.....	26
2.6. Pre - análisis metalográfico.....	27
2.7. Tratamientos térmicos de temple y revenido.....	28
2.8. Tratamiento criogénico.....	29
2.9. Análisis Metalográfico.....	30
2.9.1. Ensayo de microdureza Vickers.....	31
2.9.2. Ensayo de dureza Rockwell.....	31

2.10. Conclusiones del capítulo II .....	33
<b>CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS</b> .....	34
3.1. Introducción.....	34
3.2. Análisis de la composición química obtenida .....	34
3.3. Análisis metalográfico.....	36
3.4. Dureza.....	43
3.4. Microdureza.....	47
3.5. Valoración económica.....	49
3.6. Conclusiones del capítulo III .....	52
<b>CONCLUSIONES GENERALES</b> .....	53
Referencias.....	55

## INTRODUCCIÓN

El acero constituye el material más importante en el desarrollo industrial actual, debido al amplio significado en casi todos los campos de la ingeniería y en la economía a nivel mundial. Su sentido es amplio tanto en la industria minera como en la construcción de maquinarias. A pesar de esto, muchas veces por la incorrecta fabricación, operación o mantenimiento tienden a variar algunas de sus propiedades a punto de modificar su comportamiento cuando son expuestos a determinadas operaciones, por lo cual es de gran importancia hacer un análisis cuantitativo y cualitativo de los factores que influyen en respectivos cambios.

El estudio de la metalografía permite establecer una relación entre la composición, estructura y propiedades de los metales y sus aleaciones, de modo que permite conocer cómo se comportan bajo todas las condiciones posibles que se puedan encontrar en cualquier máquina o estructura sin afectar su vida útil. El estudio de los materiales tiene gran importancia, puesto que permite predecir el comportamiento del material favoreciendo a los ingenieros, científicos y diseñadores a realizar diseños apropiados para sus máquinas y agilizar procesos de mantenimiento y predicción de fallas. Con el avance tecnológico se desarrollaron diversos ensayos y análisis que permiten detectar ciertas imperfecciones superficiales y a nivel microestructural que afectan las propiedades mecánicas de los aceros, así como diversos tratamientos con el propósito de mejorar estas propiedades mecánicas dependiendo de los requerimientos que exigen en sus campos de aplicación.

Algunos autores (Loaiza Tapiero & Ruiz Murillo, 2017); (Calmet, 2009); (Montañez, 2017) han investigado el tema de la criogenia y otros tratamientos térmicos como proceso influenciable en las características de algunas aleaciones. Sin embargo, pocos han incidido en las características del acero Hadfield bajo el efecto de los tratamientos térmicos de temple, revenido y criogenizado, cuando se somete a ensayos de dureza, microdureza y análisis microestructural. Por esta razón, es poco conocido los efectos que se producen.

Aún está en etapa de consolidación la tecnología de la criogenización, por lo que surge la necesidad de conocer que sucede en las distintas propiedades mecánicas del material cuando se somete a temperaturas de criogenización y hasta incluso potencializar el uso de dicha tecnología si se demuestra mejoramiento sustancial de las propiedades con respecto a los tratamientos térmicos convencionales.

Estas cuestiones llevan a la siguiente **situación problemática**: en la industria del níquel se utiliza el acero Hadfield en varias áreas y labores, como en las trituradoras de rocas, en molinos, bombas para la manipulación de arena y grava, cubos y dientes de placas, entre otros. Se tiene evidencia de la ocurrencia de roturas y averías en componentes confeccionados del acero antes mencionado, lo que implican pérdidas desde el punto de vista técnico-material, medioambiental y financiero que afectan directamente a la producción en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. Con el paso de los años se han desarrollado diferentes técnicas de manejo de los tratamientos térmicos como lo es el temple, revenido y criogenización, permitiendo modificar la microestructura y propiedades mecánicas de los aceros.

Por tanto, se plantea el siguiente **problema**: insuficiente conocimiento para el procedimiento de tratamientos térmicos tanto convencional como criogénico al acero al manganeso producido en la Empresa Mecánica del Níquel, para conseguir mejoras estructurales en los materiales en cuanto a sus propiedades mecánicas.

### **Objeto de estudio**

Acero al manganeso bajo tratamientos térmicos.

### **Campo de acción**

Ensayos no destructivos de dureza y microdureza del acero al manganeso bajo el tratamiento térmico.

### **Hipótesis**

Si se realiza un procedimiento de tratamiento térmico de temple, criogenizado y revenido al acero al manganeso, es posible transformar las propiedades físicas y microestructurales para influir en la dureza y microdureza del mismo.

### **Objetivo general**

Evaluar el efecto de los tratamientos térmicos de temple, revenido y criogenizado mediante los ensayos de dureza y microdureza en el acero al manganeso.

### **Objetivos específicos**

- 1- Analizar cuál de los tratamientos térmicos aplicados presentó mejores resultados en los ensayos de dureza y microdureza en el acero al manganeso.



- 2- Estudiar el cambio microestructural obtenido antes y después de realizados los tratamientos térmicos temple, revenido y criogenizado en el acero al manganeso.

### **Tareas de investigación**

1. Establecimiento del estado del arte relacionado con el tratamiento térmico del acero al manganeso.
2. Descripción del tratamiento térmico por temple, criogenizado y revenido.
3. Fundamentación de los resultados obtenidos a partir del cambio de la microestructura del material sometido a los tratamientos térmicos.
4. Evaluación técnica-económica y medio ambiental del tratamiento térmico.

## **CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.**

### **1.1. Introducción**

El acero al manganeso (Hadfield) es un material muy requerido en el campo industrial, con el cual se busca mejorar algunas de sus propiedades para ampliar su aplicación. Este se subdivide en varios grupos dependiendo del contenido de manganeso y carbono como elementos principales, por esto hoy en día se busca hacer mejoras a este material con contenidos bajos de manganeso con el fin de reducir los costos, ya que el costo de este material depende de la cantidad de manganeso, y para lograr este fin se ha optado por aplicar técnicas de tratamientos térmicos.

El **objetivo** de este capítulo es analizar los estudios precedentes acerca de los diferentes tratamientos térmicos y ensayos no destructivos realizados al material.

### **1.2. Análisis bibliográfico. Investigaciones precedentes**

(Loaiza Tapiero & Ruiz Murillo, 2017), en su trabajo titulado “Efecto del tratamiento criogénico en la resistencia al impacto y la microestructura del acero A572”, donde estableció la secuencia de tratamientos del siguiente modo: Las probetas fueron calentadas a temperatura inter - crítica del temple 770 °C durante 20 min de exposición, seguido de un enfriamiento en agua, posteriormente se realizó el tratamiento criogénico profundo donde se introdujeron las probetas a temperaturas de ebullición del nitrógeno -196 °C por periodos de tiempo de 12 y 24 horas, y para complementar el proceso se realizaron revenidos a temperatura de 400 °C durante 10 min de exposición seguido de un enfriamiento al aire.

Los resultados indican que la dureza del material tratado con criogenia a 24 horas aumenta ligeramente con respecto a la probeta tratada a 12 horas y el material sin tratar. Sin embargo, cuando las probetas se sometieron a ensayos de impacto Charpy, no se observó variación de la energía absorbida necesaria para su deformación en las probetas con criogenia en comparación con el material sin tratar, pues en la microestructura del material, los granos de martensita revenida se refinan y aparecen precipitados de manganeso, sin embargo, esto no influye en la variación de las propiedades mecánicas, exceptuando en la dureza.

(Calmet, 2009) en su trabajo “Aplicación de la criogenia en el tratamiento térmico de aceros para trabajo en frío: K100 (AISI D3)”; busca estudiar los efectos de los tratamientos

criogénicos comparados con los tratamientos térmicos convencionales aplicado en el acero de herramienta para trabajo en frío. Los respectivos tratamientos térmicos, ambos inician con recocido de distensión a temperatura de 500 °C durante 30 minutos y enfriado al aire, 1 hora después se realizó precalentamientos en las probetas a 500 °C durante 20 minutos, posteriormente las probetas fueron sometidas a temperaturas de temple: 940 °C y 980 °C por 20 minutos para cada caso. A continuación, se realizó el baño isotérmico en solución salina a temperatura de 170 °C con exposición de 20 minutos y enfriado al aire. Luego las probetas fueron expuestas a 1 hora en temperaturas de -80 °C (tratamiento sub-cero) y -193 °C (tratamiento criogénico) y revenidas a 200 °C y enfriadas al ambiente. En el análisis metalográfico por microscopía óptica se observó una matriz martensítica revenida, con carburos precipitados. A través de difracción de rayos X se demostró que en las probetas con tratamiento de temple con criogenia a -193 °C se obtuvo menor contenido de austenita residual y se observaron pequeños incrementos en el contenido de martensita en comparación con los tratamientos térmicos convencionales. A partir de ensayos de dureza, se probó que a mayores contenidos de martensita, mayor es la dureza del material. A través del ensayo de resistencia al desgaste abrasivo se obtuvo mejores resultados en las probetas sin revenido final, puesto que las probetas con solo temple y criogenia se encuentran con elevadas concentraciones de tensiones lo que le confiere mayor dureza al material.

(Montañez, 2017) *et al*; desarrolló el informe de investigación titulado “Evaluación del efecto de los tratamientos térmicos de temple, revenido y criogenización en aceros hadfield grado F, mediante los ensayos de desgaste abrasivo, dureza y microdureza”, donde al material se le realiza temple a temperatura de 1 050 °C con exposición de 1 hora y enfriado en agua, revenido a 800 °C con exposición de 2 horas, enfriado al aire y criogenia a -196 °C en nitrógeno líquido con exposición de 72 horas, siendo después llevado a temperatura ambiente por convección natural. A partir de ensayos de desgaste abrasivo se probó que las probetas con criogenia fueron más resistentes al desgaste en comparación con las de tratamiento térmico convencional. A través del análisis por microscopia electrónica de barrido (SEM), observó en las probetas con criogenia la transformación de fase austenita a martensita la cual presentó una matriz más homogénea que origina mayor dureza al material en comparación con los T.T (convencionales).

(Corena, 2013), en su estudio de título: “Influencia del tratamiento térmico criogénico en las propiedades mecánicas de resistencia al desgaste y microdureza de un acero para

herramientas THYRODUR 2510”, donde se basa en la relación existente entre el tratamiento criogénico y los tiempos de exposición. Para la presente investigación fueron establecidos diferentes tiempos de exposición a temperaturas criogénicas como 24; 48; 72; 96; 120 horas respectivamente. Después de realizado el tratamiento se visualizó una posible transformación de la austenita residual a martensita, así como una ligera disminución de tensión residual y un mejoramiento de la matriz martensítica, aumentando la dureza y la resistencia al desgaste del material. Se obtuvieron valores más altos de dureza y resistencia al desgaste por abrasión en la probeta expuesta 96 horas debido a que a esta temperatura se estabiliza la transformación de la austenita en comparación con las probetas expuestas a 120 horas.

(Prieto, 2015) en la investigación, “Estudio del efecto de tratamientos térmicos de criogenia sobre el comportamiento tribológico y la tenacidad a la fractura del acero AISI 420 con bajo contenido de carbono”, se utilizó el método de microscopía óptica, difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido. Además, se realizaron ensayos de dureza, de desgaste y de mecánica de fractura. A través del método de microscopía óptica se caracterizó la microestructura del acero en estado de entrega, el cual estaba compuesto por una matriz ferrítica con carburos primarios precipitados. El proceso térmico comienza con pre - calentado a temperatura de 830 °C sostenido en 10 minutos seguido de temple a temperatura de 1030 °C sostenido en 10 min, enfriados en aceite. Luego se realizó el proceso de criogenia profunda a temperatura de -196,6 °C en nitrógeno líquido sostenido entre 1 y 2 horas complementado con revenido a 410 °C con exposición de 10 min y enfriando dentro del horno.

A través de la microscopía electrónica de barrido (SEM), se observó que, a temperaturas criogénicas, ocurrió el cambio de fase de ferrítica a martensítica de estructura acicular y carburos globulares precipitados. La magnitud de esos cambios está relacionada con la temperatura de enfriamiento criogénico, el tiempo de exposición y velocidades de enfriamiento aplicadas. Además se constató la relación sinérgica entre la disminución del tamaño de los carburos, distribución espacial y la reducción de su fracción en volumen, incrementando de manera significativa y simultánea la dureza, la resistencia al desgaste y la tenacidad a la fractura del material, sin modificar su resistencia a la corrosión.

El fenómeno de refinamiento del tamaño de los carburos se asocia a una disminución en el efecto concentrador de tensiones en los alrededores de los carburos, así como el

deslizamiento unidireccional en las inmediaciones, lo cual disminuye el fisuramiento superficial y la consecuente delaminación evitando el desgaste del material. Por otro lado, la reducción de la fracción en volumen de carburos disminuye la formación y coalescencia de micro cavidades y la probabilidad de ocurrencia de fractura por clivaje, mejorando sustancialmente la tenacidad a la fractura.

(Gómez, 2017) *et al*, realizó el estudio “Influencia del tratamiento térmico sub-cero en la resistencia a la corrosión, la dureza y la microestructura de la aleación de aluminio 2024-03”. El proceso térmico empieza con recocido a temperaturas de 430° C, con tiempo de exposición de 1 hora y enfriado en el interior del horno, con el fin de homogenizar el material y eliminar cualquier efecto generado por tratamientos térmicos anteriores. Posteriormente se trataron las probetas a temperaturas de -70 a -90 °C en tiempo de exposición variables de 30, 60 y 180 minutos a temperaturas bajo cero en hielo seco, al cual se le adiciona periódicamente alcohol isopropílico con el fin de mantener la temperatura constante aproximadamente a -80 °C. Terminado el proceso térmico se evaluó su efecto a la corrosión, el cual se desarrolló mediante ensayos en cámara salina con tiempo de exposición de tres semanas, donde se demostró que las muestras que presentaron mayor pérdida de masa fueron las tratadas térmicamente por sub-cero, a un tiempo de exposición de 1 hora. En cuanto a su dureza, se evidenció que no hubo variación significativa en las muestras con tratamiento térmico sub-cero en comparación con las probetas no tratadas.

### **1.3. Aceros**

(Kudrín) son aleaciones de hierro y carbono aptas para ser deformadas en frío y en caliente, cuyo porcentaje de carbono está comprendido entre 0,10 – 2,14 %. Como regla en su composición deben entrar elementos tanto metálicos como no metálicos tales como el Mn, Si, S, P. Este se produce por vía alto horno cuya materia prima es el mineral de hierro y coque, y para el horno eléctrico a partir de chatarra de hierro. Normalmente son usados para la construcción, estructuras, piezas mecánicas, herramientas y piezas especiales de maquinaria. Para algunos casos especiales se mejoran sus propiedades químicas, físicas y mecánicas agregándoles otros componentes como son el, Cr, Ni, Cu, Mo, W, V, Al, Ti, o realizando tratamientos térmicos, físicos y químicos.

Se clasifican generalmente en:

- Acero al carbono

- Aceros aleados
- Aceros estructurales
- Aceros inoxidables
- Aceros de herramienta

### 1.3.1. Microconstituyentes de los aceros según el diagrama hierro-carbono

Plantea (Hernandez M. M., 2013), que en la aleación hierro – carbono existen varios constituyentes estructurales, o clases de cristales, con composiciones y características propias, las que aparecen en el diagrama de estado (figura 1.1).

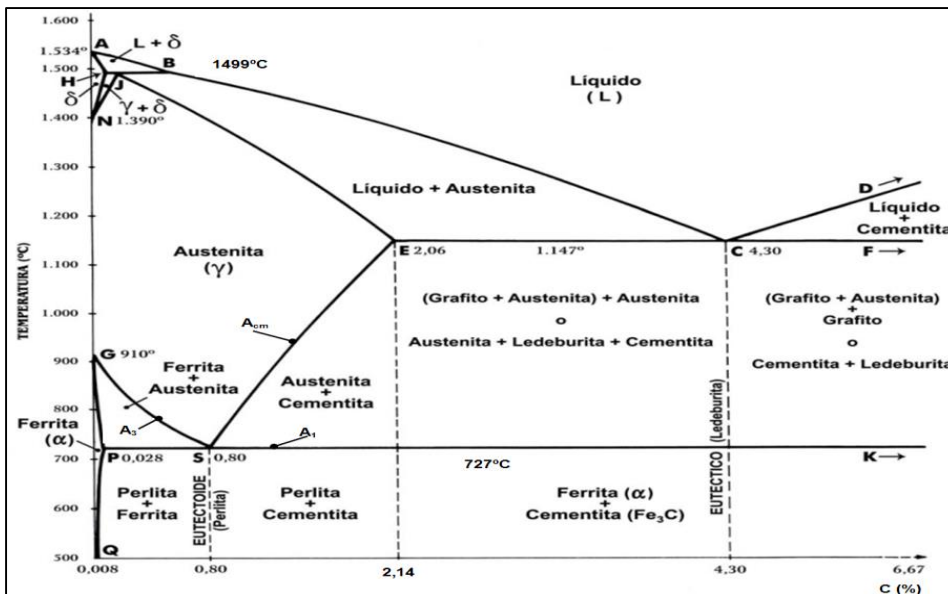


Figura 1.1. Diagrama de fases Fe – C.

Este diagrama representa gráficamente las transformaciones de fases o el estado de una aleación a través de los constituyentes que existen a cualquier temperatura y para cualquier contenido de carbono.

#### Ferrita

(Gulíáev, 1977) es un constituyente estructural consistente en una solución sólida de carbono en hierro en la etapa alfa debido a que cristaliza en el sistema cúbico centrado en el cuerpo y le confiere al acero propiedades como ductilidad, magneticidad y plasticidad. La solubilidad del carbono en hierro en la etapa alfa es insignificante, solo es de 0.025 % a 727 °C por lo que se considera hierro casi puro. Su cantidad en el acero no supera el 0.8 %. (Gulíáev, 1977)

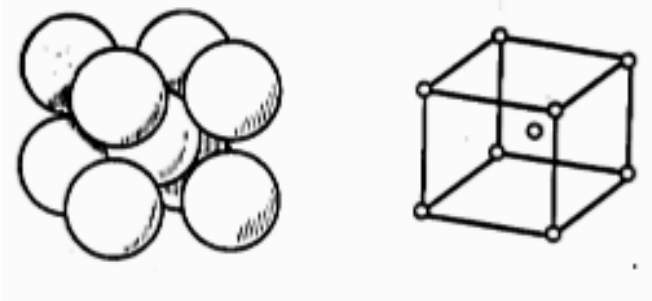


Figura 1.2. Red cristalina cúbica centrada en el cuerpo de la fase ferrita del acero.

### Cementita

(Guliáev, 1977) es un compuesto químico metaestable de carbón y hierro, que otorga propiedad de elevada dureza y fragilidad a los aceros. A temperaturas normales entra en la estructura del acero debido a la poca solubilidad de carbono en hierro alfa, generando fases de alto contenido de carbón o de otros tipos de carburos, esta tiende a formar soluciones sólidas de sustitución, sustituyendo los átomos de carbono por el nitrógeno y oxígeno, y los átomos de hierro por los metales como manganeso, cromo, volfrámio.

Tiene una temperatura de fusión de 1250 °C, es magnética hasta los 217 °C, cristaliza en un sistema ortorrómbico y no experimenta transformaciones alotrópicas.

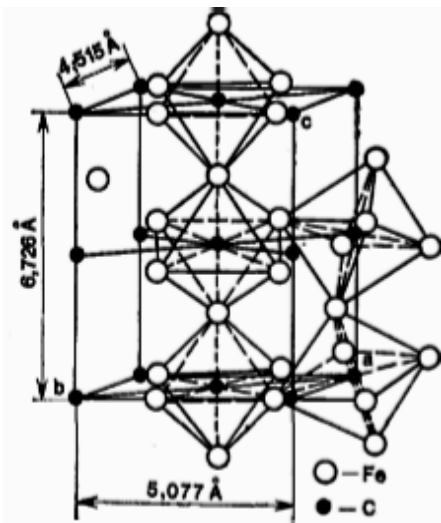


Figura 1.3. Estructura cristalina de la cementita.

### Perlita

(Guliáev, 1977) es una mezcla de ferrita y cementita que se forman simultáneamente mediante un enfriamiento lento por debajo de los 720° C, su composición es de 0,8 % C y 99,2 % Fe y causa fragilidad en el acero. Su nombre se debe a las arrugaciones que

adquiere cuando se ilumina, parecida a las perlas. Tiene estructura laminar, donde la distancias entre láminas dependen de la velocidad de enfriamiento, de modo que a mayor velocidad menor es la distancia interlaminar y mayor es la dureza

### **Austenita**

(Guliáev, 1977) es una solución sólida de carbono en hierro en la etapa gamma cuya máxima solubilidad de carbono es 2 % a elevadas temperaturas, esta cristaliza en la red cúbica centrada en las caras (b.c.c.), y se presenta en los aceros como constituyente estructural a temperaturas superiores a  $Ac_1$ . Por encima de  $Ac_3$ , los aceros comunes son completamente austeníticos, estructura alcanzada a través de la temperatura del temple. A partir de ella cuando el enfriamiento es suficiente rápido para impedir la difusión del carbono, se forma la estructura martensítica. Esta estructura también se encuentra en los aceros aleados o hipereutectoides, a temperatura ambiente siempre y cuando no alcanzan a transformación completamente a martensita durante el temple, en este caso se le denomina austenita retenida. También se puede encontrar a temperatura ambiente en aceros denominados austeníticos, como son los indeformables de alto Mn 12 % y aceros inoxidable de alto níquel. Es paramagnética, resistente al desgaste, dúctil (blanda), tenaz siendo el constituyente más denso de los aceros.

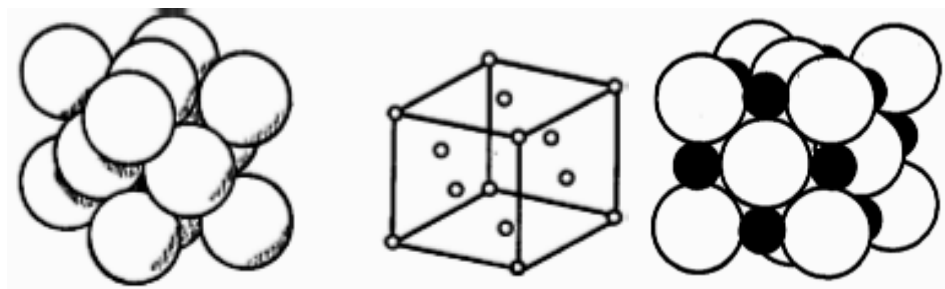


Figura 1.4. Red cristalina cúbica centrada en las caras de la fase austenita del acero.

### **Martensita**

(Avner) es una solución sólida sobresaturada de carbono en hierro alfa ( $Fe\alpha$ ). Bajo enfriamientos rápidos, lentos o moderados los átomos de carbón se difunden hacia fuera de la estructura de austenita, mientras que los átomos de hierro se mueven ligeramente para formar la red cúbica centrada en el cuerpo (b.c.c), debido al enfriamiento rápido (temple), el tiempo es insuficiente para que el átomo de carbón se difunda totalmente, los átomos de hierro no llegan a formar una red cúbica centrada en el cuerpo (b.c.c), ya que el carbono se



queda atrapado en la solución. Esta estructura se presenta en forma de agujas siendo el constituyente más duro después de la cementita.

(Guliáev, 1977) en la transformación austenito-martensítica ocurre la inserción del átomo de carbono, el cual produce una deformación que conlleva a la restructuración de la red cristalina que va desde la red cúbica centrada en las caras (b.c.c.c.) de la austenita a la red tetragonal centrada en el cuerpo (b.c.c.), de la martensita, sin que varíe la concentración de las fases que reaccionan.

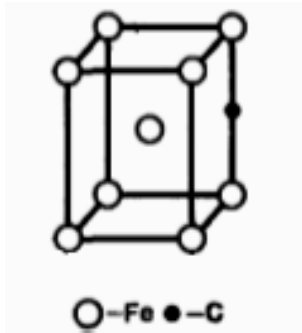


Figura 1.5. Estructura cristalina de la martensita.

#### 1.4. Acero al manganeso (hadfield)

Según (Higuera, 2007) *et al*, esta aleación fue desarrollada por el metalúrgico británico Sir Robert Abbott Hadfield en 1882, por lo que fue denominado acero hadfield. Estos aceros tienen una composición nominal de 1,2 %C y 12 a 13 %Mn como elementos esenciales.

Tabla 2.1. Composición química del acero Hadfield según la norma GOST. 2176-77

Marca de la aleación	Elemento, (%)							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	P	S
Ac 1,10 Mn13	0,90 – 1,30	0,30 - 1,00	11,0 – 14,0	≤ 1,00	≤ 1,00	≤ 0,30	0,12	0,05

Es clasificado como acero austenítico por el alto porcentaje de manganeso, capaz de estabilizar la fase austenita a temperatura ambiente. Este material tiene la capacidad de endurecerse cuando es sometido a impactos, por lo que se usa mayormente para fabricar dientes de excavadoras, bola de molinos, martillo triturador de árido para la construcción, líneas de ferrocarril, entre otros elementos.

(Handbook, 1990), plantea que estos aceros están caracterizados por sus propiedades mecánicas como son: alta resistencia a la tracción, compresión, ductilidad, excelente resistencia al desgaste y son extremadamente tenaces siendo el único que combina alta resistencia y ductilidad. Usualmente tienen esfuerzos de fluencia de 345 a 415 MPa pero, presentan ciertas propiedades que tienden a restringir su uso, por ser no magnéticos, baja resistencia a la corrosión, difíciles de maquinar o que deben resistir deformación plástica cuando son sometidos a altos esfuerzos durante el servicio, por la gran capacidad de endurecerse por deformación.

### **Microestructura**

Los aceros austeníticos al manganeso tienen microestructuras que son extremadamente sensibles al tamaño de la sección. Estos aceros son metaestables con solución sólida de carbono, manganeso y silicio en hierro gamma ( $\gamma$ ). Por lo tanto, el desarrollo de una microestructura simple de austenita depende de la rapidez y efectividad del temple en agua durante el tratamiento térmico.

(Petrov Y., 2005) su microestructura es caracterizada por una matriz austenítica con carburos precipitados y pequeñas colonias de perlita resultado del rechazo del carbono por parte de la austenita durante el enfriamiento, en las cuales la transformación martensítica de endurecimiento ha sido suprimida por una combinación de alto contenido de manganeso y carbono, y la precipitación de carburos por alta velocidad de enfriamiento desde temperaturas de austenización.

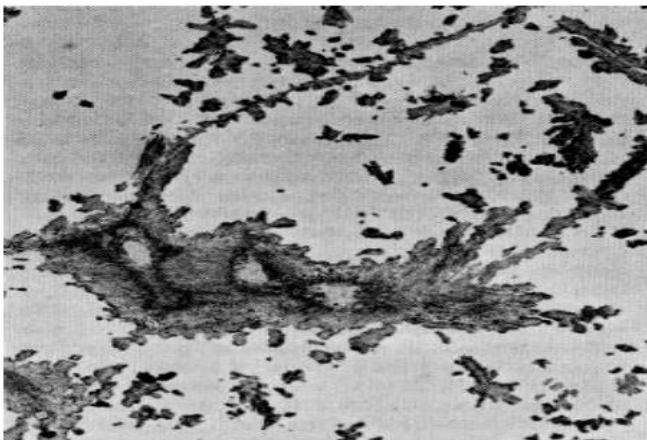
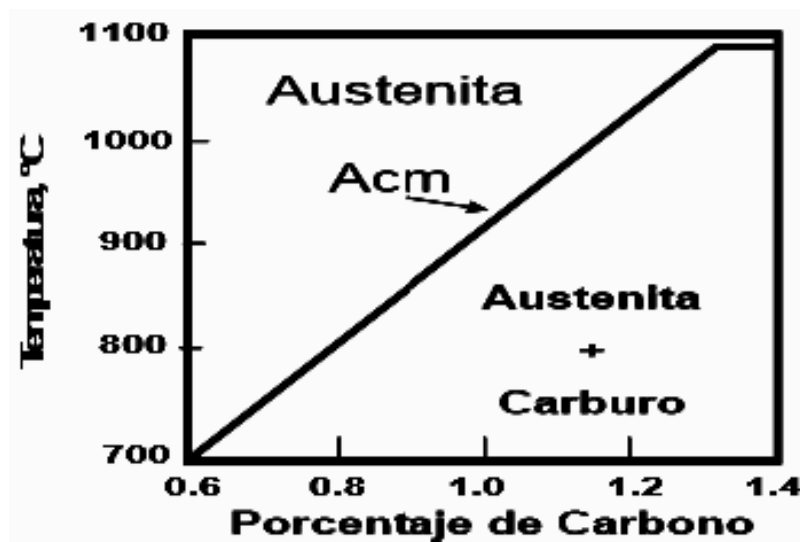


Figura 2.1. Microestructura acero hadfield grado A, atacada con picral 4%. 500X. Fuente: (Handbook, 1990).

## Influencia del manganeso y el carbono

(Handbook, 1990) el manganeso contribuye significativamente a la dureza y a la resistencia del acero de la misma manera, pero con menos intensidad, que el carbono; su efectividad es directamente proporcional al contenido de carbono y es el principal desulfurante al combinarse con el azufre en forma de  $(FeMn)S$  y  $MnS.FeO$ , su acción sobre el azufre minimiza el contenido de  $FeS$ , que es el causante de la fragilidad en caliente, esto mejora las características de conformación en caliente y contribuye a mejorar el acabado superficial del producto. Los aceros con más de un 12 % Mn son austeníticos, este disminuye las velocidades críticas de enfriamiento del temple, así como la temperatura de formación de la perlita y también su contenido de carbono incrementa la solubilidad del carbono en la austenita favorece la formación de carburos y endurece la ferrita, reduciendo un poco su plasticidad, la solubilidad del Mn en la austenita es ilimitada y en la ferrita se disuelve e hasta un 17 %.

El aumento en el porcentaje de carbono dificulta cada vez más la obtención de austenita saturada en carbono, por tanto, se van a presentar carburos en los límites de grano lo cual producirá reducción en la resistencia a la tensión y disminución en la ductilidad del material. Sin embargo, con el incremento en el porcentaje de carbono se aumenta la resistencia al desgaste del acero austenítico al manganeso. Si se disminuye simultáneamente el porcentaje de carbono y el de manganeso a rangos entre 0,53 %C y 8,3 %Mn o 0,62 %C y 8 %Mn el acero se endurece debido a la formación de martensita.



**Figura 2.2.** Solubilidad del carbono en el acero hadfield con 13 % de Mn con un contenido de carbono entre 0.6 y 1.4 % de C. (Handbook, 1990)

## **1.5. Tratamiento térmico**

(Pérez, 2004) es un proceso tecnológico mediante el cual, a través de etapas de calentamiento, mantenimiento y un posterior enfriamiento en un medio adecuado y a velocidades convenientes, se le confiere a los metales y aleaciones propiedades físico-mecánicas en la forma más económica.

### **1.5.1. Temple**

(Avner) es un proceso térmico en el cual, un material al ser calentado y enfriado a una velocidad controlada determinada, varía las características mecánicas, como la dureza y resistencia; físicas, modificando el magnetismo remanente y la resistencia eléctrica; y químicas, mejorando su comportamiento en los procesos de recocido y frente a la acción de ciertos ácidos. El acero debe ser calentado por encima de la temperatura crítica inferior, unos 727 °C, para que la perlita se disuelva en austenita. La temperatura de austenización debe ser superior a la temperatura de transformación total de la ferrita en austenita y depende de la composición del acero.

Cuando esta solución sólida de hierro y carbono se enfría repentinamente, la estructura cristalina se transforma de forma rápida y el carbono queda incluido dentro de la red deformándola y endureciéndola, y transformándose en martensita. Esta microestructura es muy dura, frágil y tiene mayor resistencia a la tracción que el acero perlítico. Cuanto mayor sea el contenido de carbono mayor dureza adquiere. Después del temple siempre se suele hacer un revenido de la pieza porque el acero queda muy inestable y para darle mayor ductilidad y tenacidad.

El temple se divide en los siguientes pasos:

- Calentamiento controlado en temperatura entre 750 °C y 1300 °C dependiendo del material base, rampa de calentamiento y tiempo de mantenimiento a temperatura máxima. Ajustando estos tres puntos de control se pueden conseguir las condiciones idóneas previo al temple disolviendo los elementos aleantes de manera correcta y obteniendo una estructura austenítica deseada.
- Permanencia: el material se somete a una temperatura constante durante cierto tiempo, con objetivo de expandir la temperatura en todas las zonas y homogenizar el material.

- Enfriamiento controlado de la zona a templar: Es muy importante controlar el medio de temple (agua, agua + polímero, aceite...), caudal, presión y la tipología de sistema de ducha utilizado. Con un correcto ajuste del medio de enfriamiento se consigue la transición estructural de austenita a martensita, mejorando notablemente la dureza de la zona templada.

### **1.5.2. Revenido**

(Avner) este tratamiento térmico consiste en calentar el acero a menor temperatura que la del punto crítico inferior  $A_{C1}$ , sobre un amplio intervalo de temperaturas de 120 °C a 675 °C, seguido de un enfriamiento lento en el agua o en aire. Esta operación es complementaria del temple y se usa para mejorar los efectos del mismo, de modo a reducir las tensiones residuales, reducir la dureza y mejorando la tenacidad, ductilidad, resistencia a la fatiga y plasticidad del material. Cuanto mayor sea la cantidad de martensita en el acero templado mayor es la dureza y la fragilidad del material. Aplicando el revenido, conforme se incrementa la temperatura disminuye dureza y aumenta la tenacidad del material.

### **1.5.3. Criogenia**

(Prieto, 2015) es un tipo particular de tratamiento térmico, cuyo término se deriva del griego, que significa “kryos - frío” y “geneia - generación”. Este consiste en someter los materiales a etapas de enfriamiento a temperaturas muy por debajo de la temperatura ambiente ( $T_0$ ), y en prolongados períodos de tiempo seguido de un calentamiento hasta la temperatura ambiente o por medio de convección natural, con el objetivo de modificar la microestructura debido a la transformación de fase austenita-martensita, modular la precipitación de partículas de segunda fase, precipitando carburos finos, además de aliviar las tensiones residuales o completar las transformaciones martensíticas; lo cual se traduce en cambios en propiedades mecánicas como la dureza, tenacidad, resistencia al desgaste, resistencia a la fatiga, y el aumento de la estabilidad dimensional de los materiales.

Usualmente estos tratamientos se aplican como complemento de los tratamientos térmicos tradicionales, con el propósito de asegurar la transformación completa o la mayor cantidad posible de austenita residual transformándola en martensita.

Dentro de este tipo de tratamientos térmicos, pueden encontrarse distintas clases, dependiendo fundamentalmente de las temperaturas a las que se realizan los mismos, entre las que pueden destacarse los tratamientos de criogenia profunda, cuando se usan oxígeno,

nitrógeno o helio en estado líquido como refrigerantes, con los que se alcanzan temperaturas de  $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectivamente, o tratamientos de criogenia superficiales cuando se utilizan principalmente espuma de dióxido de carbono o hielo seco como medio refrigerante y las temperaturas se encuentran en el rango de los  $-40$  a  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Actualmente, el procesamiento criogénico se utiliza en la industria metalmecánica, aeroespacial, biomédica, musical y deportiva, aplicándose tanto sobre aleaciones ferrosas, como en aleaciones de cobre, aluminio e incluso plásticos y materiales compuestos. Los usuarios más habituales son aquellos que se dedican a la fabricación de matrices, punzones, trituradoras, rodamientos, cigüeñales, pistones y blocks de motor. Estos tratamientos se recomiendan en aquellos casos en los que se requieren piezas con gran estabilidad dimensional y elevada resistencia al desgaste.

## **1.6. Dureza**

Según (Callister, 2007), la dureza es la propiedad mecánica que expresa la resistencia de un material a la deformación plástica bajo la acción directa de cargas determinadas. La dureza de los materiales se mide a través de técnicas **cualitativas** y **cuantitativas** que permiten determinar su comportamiento a la deformación plástica localizada. El método cualitativo más antiguo se denomina escala de Mohs, la cual ordena de forma arbitraria la dureza de los materiales, según la capacidad de un mineral rayar a otro más blando, los valores de esta escala se encuentran en el rango de 1-10, desde el extremo blando (talco), hasta el más duro el diamante. Las técnicas cuantitativas se basan en ensayos mecánicos no destructivos, los cuales se desarrollan en equipos mecánicos automatizados denominados durómetros, o microdurómetros para el caso de determinar microdureza. Estos consisten en forzar un penetrador sobre la superficie del material a ensayar, en condiciones controladas de carga y de su velocidad de aplicación a fin de dejar una huella midiéndose el tamaño o profundidad, lo cual se relaciona con el número de dureza del material. Cuanto más blando es el material mayor y más profunda es la huella, y menor es el número de dureza.

### **1.6.1. Ensayo de dureza Rockwell**

Según (Callister, 2007), este ensayo constituye el método para determinar el número de dureza de los materiales, aplicando una determinada carga sobre el penetrador hacia la superficie del material, a partir de la diferencia de profundidad de penetración que resulta al

aplicar primero una carga inicial pequeña y después la carga mayor, se halla la dureza. Por medio de una escala de dureza se pueden utilizar diferentes combinaciones de penetrador y cargas, lo cual permite ensayar virtualmente cualquier metal o aleación. Para medir la dureza de materiales duros se utilizan como penetradores un diamante en forma de cono de  $120^\circ$  de punta redondeada con un radio de 0,2 - 0,01 mm, y para materiales blandos se utilizan bolas esféricas de acero endurecido que tienen diámetros de 1/16, 1/8, 1/4, 1/2 pulgadas.

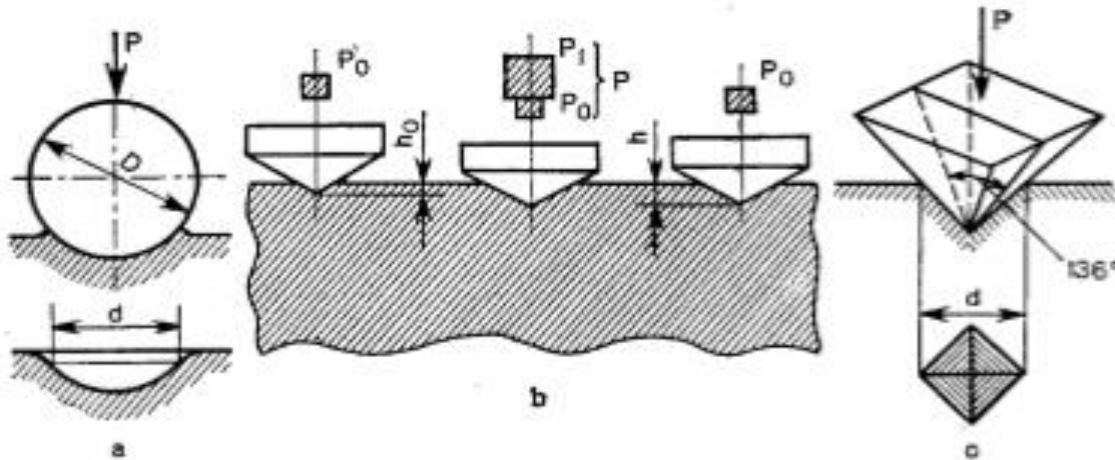


Figura 1.6 Indentador de dureza de los diferentes ensayos.

Con respecto a la magnitud de las cargas los ensayos se clasifican en:

- Rockwell: La carga menor (preliminar), es de 10 kgf mientras las mayores son de 60, 100 y 150 kgf.
- Rockwell superficial: La carga menor (preliminar), es de 3 kgf mientras la mayor puede ser 15, 30 o 45 kgf.

### 1.6.2. Ensayo de dureza Brinell

Según (Callister, 2007), este método consiste en forzar un penetrador esférico de acero endurecido o de carburo de tungsteno con diámetro de 10,00 mm, las cargas están comprendidas entre 500 y 3000 kgf y son aplicadas de manera constante durante periodos de tiempo entre 10 - 30 s, resultando una huella en la superficie del material a ensayar. El número de dureza se mide en función de la magnitud de la carga aplicada, así como del diámetro de la huella resultante. De esa manera se divide la carga por el área de la superficie

esférica de la huella. En otras técnicas menos usuales el diámetro medido es convertido a un número HB aproximado usando una escala.

### **1.6.3. Ensayo de dureza Vickers**

Según (Callister, 2007), para este ensayo se emplea un penetrador de diamante muy pequeño de geometría piramidal de base cuadrada, cuyas caras laterales forman un ángulo de  $136^\circ$ , este es forzado sobre la superficie de la probeta a ensayar, aplicando cargas comprendidas entre 1 y 1000 gf. La técnica Vickers también es considerada como ensayo de microdureza debido la magnitud de la carga y al tamaño del indentador, además se puede medir la dureza de las fases correspondientes a cada microestructura a partir de pequeñas regiones seleccionadas en la superficie de la probeta. Una vez aplicada la carga, por medio de un microscopio se observa impresión cuadrada resultante, se mide las diagonales de la impresión y esta medida es convertida en un número de dureza.

### **1.7. Análisis metalográfico**

(Loaiza Tapiero & Ruiz Murillo, 2017) es el estudio microscópico de las características estructurales de un metal o aleación. El mismo se realiza para determinar las fases y su distribución, tamaño de grano, defectos e inclusiones que tienen efecto en las propiedades mecánicas del material. Este estudio es un procedimiento investigativo que busca relacionar la microestructura y sus fases con las propiedades del material.

Este estudio tiene un procedimiento de preparación y examinación determinado, en base a estándares como la norma ASTM E3:

- Toma y corte de muestras: La muestra se obtiene del material primitivo a analizar, se debe cortar un trozo de material que permita su manipulación y su colocación en las máquinas utilizadas para el análisis. Se corta con equipos como cortadoras metalográficas, que sirven para cortar el material sin que se caliente y se modifique su estructura.
- Encapsulado: El material se encapsula en un material químicamente inerte respecto al material que se analiza, esto para permitir la facilidad en la manipulación y en el montaje del material.
- Desbaste: Este proceso se realiza para quitar imperfecciones como picos y rebabas producto de la fabricación o el corte de la muestra, y también para dejar uniforme la superficie a analizar. Se realiza con esmeriles, lijas abrasivas de grano grueso y agua.



- Desbaste fino y pulido: Con lijas más finas se van borrando las rayas producidas por el desbaste grueso, y se pule la probeta con paños y alúmina en una pulidora metalográfica para tener una superficie pulida con brillo espejo.
- Ataque Químico: Este paso permite revelar la microestructura del metal, el tamaño de grano y las fases presentes en la muestra. El mecanismo de ataque utiliza un reactivo hecho con ácidos disueltos en alcohol, se expone la superficie brillante de la muestra y este pigmenta la superficie de las fases presentes en el material.

## 1.8. Conclusiones del capítulo I

- ❖ En la búsqueda bibliográfica se pudo establecer que el proceso de tratamiento térmico por temple, revenido y criogenización, permiten mejorar ciertas propiedades mecánicas en los metales y sus aleaciones, debido los cambios que ocurren en la microestructura del material cuando son expuestos a altas o muy bajas temperaturas del medio en que se encuentra.
- ❖ Se pudo constatar que durante el proceso térmico, debido al calentamiento, sostenimientos y enfriamientos moderados, los cristales que conforman las estructuras de los metales como son la ferrita, austenita y cementita, tienden a modificar su fases, de modo a afectar las propiedades físico-mecánicas de los materiales.
- ❖ El estudio metalográfico permite establecer la relación entre la composición química, fases de los cristales y su distribución, a cualquier temperatura y tiempo establecido.

## CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Introducción

El material utilizado en el transcurso de este trabajo de investigación fue acero austenítico al manganeso (hadfield), el cual es muy requerido fundamentalmente para fabricar estructuras de alta resistencia al desgaste y ductilidad, así como en maquinarias de alto rendimiento capaz de conservar su carácter mecánico cuando son sometidos a esfuerzos de cargas y impacto de manera continua.

A razón de esto, el presente capítulo tiene como **objetivo** establecer el método para la ejecución de los tratamientos térmicos de temple, revenido y criogenizado, ensayos no destructivos de dureza y microdureza además del estudio metalográfico del material.

### 2.2. Metodología para el desarrollo del proyecto.

Para la realización del presente proyecto, fueron establecidas ciertas etapas a seguir de manera consecutiva (figura 2.1), las cuales son las responsables de garantizar la fiabilidad de los resultados a obtener.



Figura 2.1. Metodología para la ejecución y desarrollo del proyecto.

### 2.3. Diseño de experimento

Para la realización del presente proyecto, se realizaron diferentes pruebas de laboratorio, mediante técnicas tales como el análisis metalográfico del material, sección de tratamientos térmicos, ensayos de dureza y microdureza, estableciendo cuantitativamente la variación de la dureza del material cuando se somete a tratamientos térmicos y cualitativamente a través de las micrografías obtenidas en el microscopio óptico.

(Loaiza Tapiero & Ruiz Murillo, 2017) en base a estudios anteriores se estableció la secuencia de tratamientos térmicos, puesto que el tratamiento de criogenia es un tratamiento térmico que sigue al tratamiento de temple como complemento de este proceso, seguido de un tratamiento de revenido.

Tabla 2.1. Diseño de experimentos para la realización del tratamiento térmico a las probetas

<b>Tratamientos térmicos</b>	<b>Cantidad de probetas</b>
Sin tartar	3
Criogenia	3
Temple – Revenido	3
Temple – Criogenia – Revenido	3

### 2.4. Proceso de colada de la aleación

El acero al manganeso de marca comercial Ac 1,10 Mn13 según la norma GOST 2176-77 de origen ruso, fue producido en la Empresa Mecánica del Níquel, y para el desarrollo de su producción se utilizó un horno de inducción con crisol de alta frecuencia, con capacidad de 1 toneladas, revestido con materiales refractarios con base de cuarzo, donde se introdujeron materias primas que garantizan la fiabilidad del proceso, y entre estas se destacan: la chatarra de acero, palanquillas, carbón antracita, retorno de fundición y ferroaleaciones.



Figura 2.2. Colado del acero.

## 2.5. Análisis Químico

Para comprobar se el material adquirido correspondiente a la norma GOST. 2176 -17, se realizó el estudio de la composición química, donde fue desarrollada en un espectrómetro de emisión óptica del tipo OBLF, marca Gs 1000-II, ubicado en el laboratorio de análisis químico de la Empresa Mecánica del Níquel (EMNi) de Moa “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche”.



Figura 2.3. Espectrómetro de emisión óptica.

Este equipo funciona estableciendo un arco eléctrico entre la muestra y el cátodo del instrumento en una atmósfera inerte de argón. La luz emitida por el arco es analizada por una serie de detectores ópticos y la señal obtenida permite identificar los elementos presentes en la muestra, según las bases de datos de calibración que se adquieren con el espectrómetro. Esta técnica permite obtener resultados muy rápidamente, pero requiere de muestras conductoras y de una correcta selección de las bases de datos contra las que se comparan los espectrogramas obtenidos.

Tabla 2.2. Composición química del acero al manganeso (hadfield).

Marca de la aleación	Elemento, (%)							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	P	S
Ac 1,10 Mn13	1,10	0,36	13,0				0,03	0,02

## 2.5. Preparación metalográfica de las muestras

Las investigaciones anteriores demuestran que las muestras deben de ser previamente procesadas (pulidas hasta obtener un brillo espejo en la superficie) para obtener resultados confiables en la observación microscópica. Con este fin, se realiza un conjunto de operaciones que permiten lograr la calidad superficial deseada.

### Corte de probetas

Se procedió al corte de las probetas en una cortadora de disco metalográfico con sistema de refrigeración, evitando el calentamiento con el objetivo de no generar cambios microestructurales en el material. Se fabricaron en total 9 probetas según los parámetros establecidos de los tratamientos térmicos, ensayo de dureza y microdureza.



Figura 2.4. Corte de probetas.

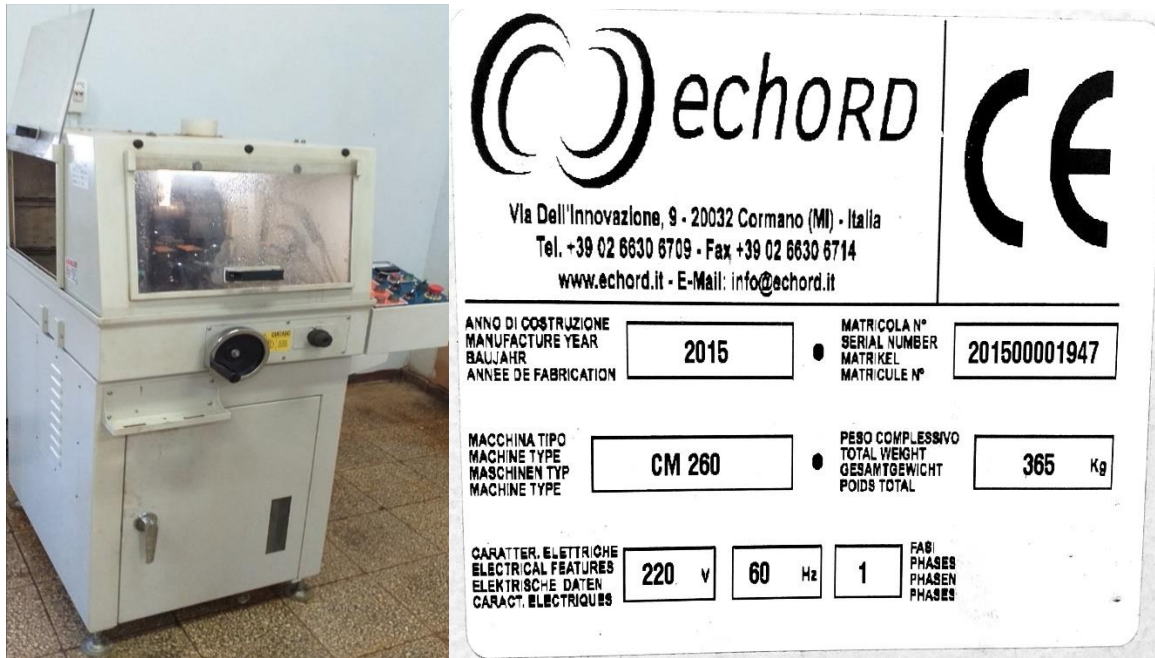


Figura 2.5. Cortadora metalográfica.

### Pulido de probetas

Se procede a la remoción de material bajo la norma ASTM E3-11, mediante una pulidora metalográfica *echo LAB*, de tipo PM 52 D. Se emplea un disco giratorio cubierto de lijas abrasivas contenida de alúmina, de diversas granulometrías, yendo de la más gruesa a la más fina, a partir de 180, 240, 600, 800 y 1200  $\mu\text{m}$  consecutivamente, a fin de obtener un pulido con brillo espejo.

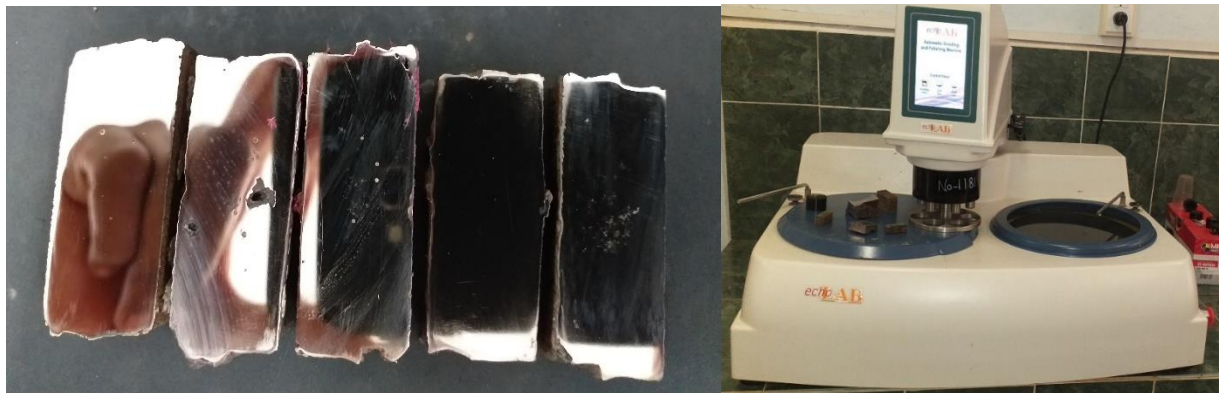


Figura 2.6. Pulidora de probetas metalográfica.

En la parte superior del disco se colocan las probetas de modo a alternar su sentido en 90°, para eliminar la capa de material distorsionado, y se debe tener en cuenta al aplicar la

fuerza, de manera no excesiva, para evitar introducir defectos como rayas, arranques de material, bordes redondeados o daños térmicos.

Para el acabado final del proceso, se utiliza un paño de fieltro grueso y se utiliza polvo de diamante como sustancia abrasiva. Una vez pulidas las probetas, se lavan con agua destilada, se secan con papel de filtro y finalmente se vuelven a lavar con etanol para evitar cualquier vestigio de grasa y pastas de pulir.

### **Ataque Químico**

Una vez logrado el brillo espejo en las probetas, se procedió a realizar el ataque químico con el objetivo de ilustrar las impresiones de las fases microestructurales, para lo cual se empleó Nital al 3% durante un tiempo de 15 segundos aproximadamente y posterior a esto se sumergió las probetas en agua.



Figura 2.7. Nital al 3 %.

### **Secado de la probeta**

El proceso de secado se realizó con el fin de minimizar la humedad y formación de óxidos que pudieran interferir en las tomas metalográficas.





Figura 2.8. Secado de probetas.

## 2.6. Pre - análisis metalográfico

Para la presente investigación, se realiza la metalografía del material a través de un microscopio óptico binocular, de marca echoLAB, empleando aumentos desde 100x, 200x; 400x; 500x y 1000x, como se muestra en la figura 2.9. El microscopio óptico está ubicado en el laboratorio de Materiales de la empresa “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche”, de Moa, está dotado de una cámara instalada mediante un hardware que refleja la imagen metalográfica en la pantalla de la computadora.

El examen microscópico aporta información sobre la constitución del material a estudiar, a través de determinar características tales como forma, tamaño y distribución de los granos, inclusiones, estructura metalográfica, además de sugerir los diversos procesos térmicos y mecánico por los que ha transitado el material analizado.

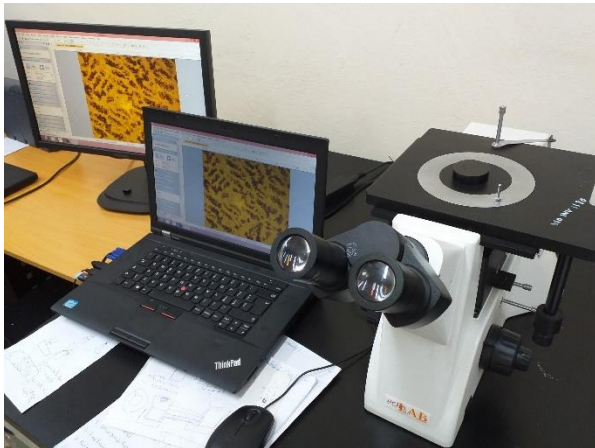


Figura 2.9. Equipo metalográfico.

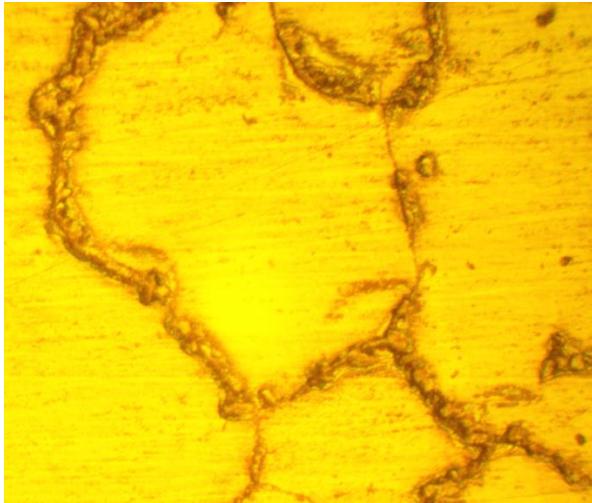


Figura 2.10. Muestra patrón del acero al manganeso (hadfield) atacado con Nital 3%, 400x.

## 2.7. Tratamientos térmicos de temple y revenido

Se realizaron tratamientos térmicos de temple y revenido en el horno eléctrico con los parámetros de temperatura y tiempo establecidos:

- Temple: 1 050 °C tiempo de sostenimiento de 1 hora, enfriado en agua.
- Revenido: 650 °C tiempo de sostenimiento de 30 minutos, enfriado al ambiente.



Figura 2.11. Horno eléctrico.

Después del calentamiento y sostenimiento de las probetas a la temperatura intercrítica del temple, durante 1 hora en el horno, se procede a retirar las probetas y depositarlas en un recipiente con agua a temperatura ambiente y realizar el enfriamiento súbito con agitación para que el proceso sea más efectivo.



Figura 2.12. Recipiente para el templado de las probetas.

## 2.8. Tratamiento criogénico

Para este proceso se utilizó un recipiente metálico con capacidad de 30 litros, donde fueron expuestas las probetas durante 2 horas en oxígeno líquido a temperatura de ebullición  $-183^{\circ}\text{C}$ .



Figura 2.13. Termo criogénico.

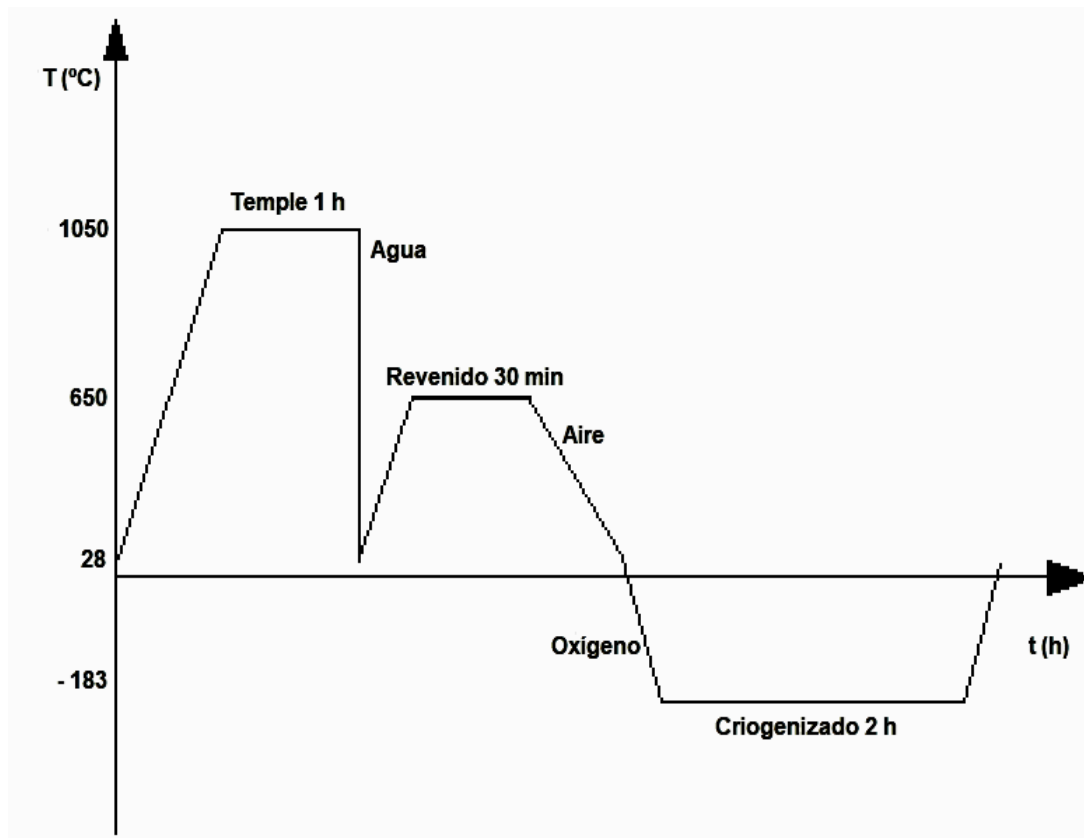


Figura 2.14. Representación de los tratamientos térmico realizados.

## 2.9. Análisis Metalográfico

Realizado los tratamientos de temple, revenido y criogenización se procedió a realizar las metalografías de cada una de las probetas, a fin de observar los cambios microestructurales ocurridos. Las tomas metalográficas fueron basadas en la Norma ASTM Standard: E112.

### 2.9.1. Ensayo de microdureza Vickers

Se tomaron datos de las probetas de acero al manganeso con y sin tratamiento térmico, a partir de la aplicación una carga de 4,9 gf sobre la superficie del material, en tiempo de indentación de 15 segundos, permitiendo tomar 3 impresiones por cada probeta.

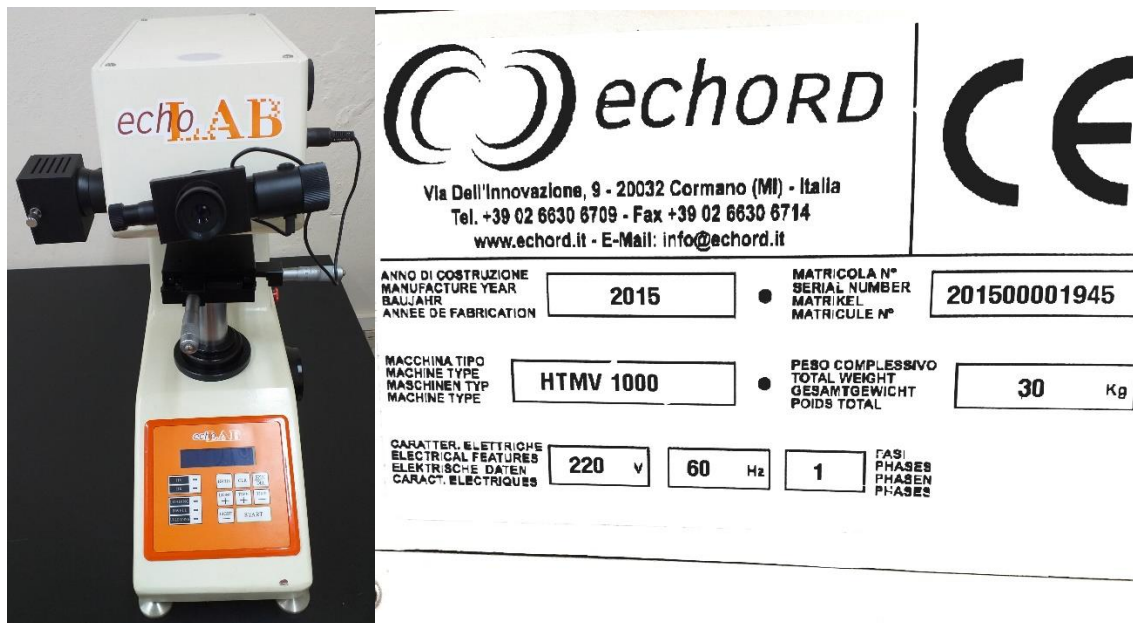


Figura 2.15. Microdurómetro Vickers y Knoop.

### 2.9.2. Ensayo de dureza Rockwell

Por medio del equipo mostrado en la figura 2.17, se realizó la prueba de dureza a las siguientes probetas, permitiendo medir la dureza en HRC y HV, dependiendo de la dureza del material; para este caso las mediciones se dan en HRC para materiales duros. El equipo cuenta con un indentador de diamante de forma piramidal de diámetro de 1/16 pulg, aplicando carga de 150 kgf en tiempo de 5 segundos. Las probetas fueron ensayadas en posición horizontal permitiendo realizar 3 indentaciones por probetas.

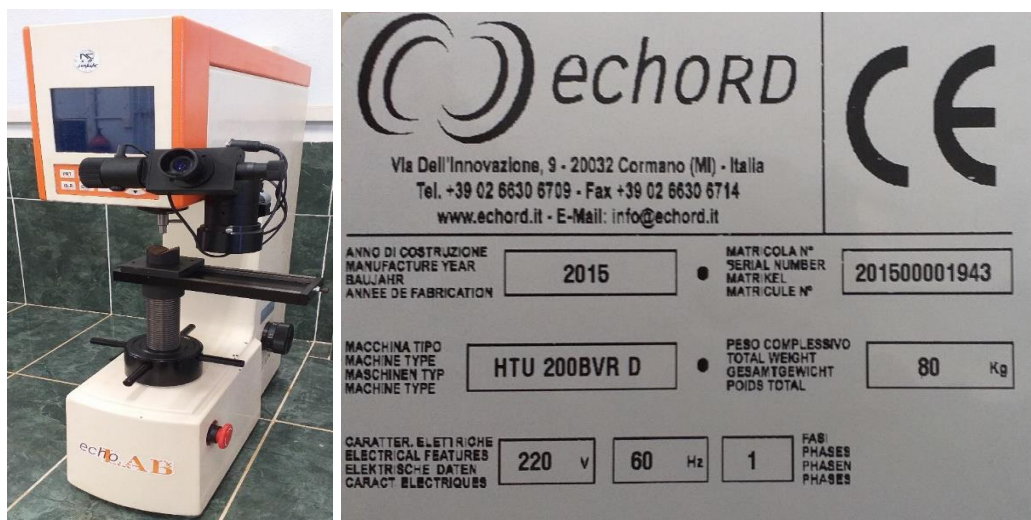


Figura 2.16. Durómetro HRC y HV.

## **2.10. Conclusiones del capítulo II**

- ❖ Se establecieron las técnicas experimentales relacionadas con el proceso de tratamiento térmico por temple, revenido y criogenización, así como la caracterización del material a investigar.
- ❖ Se fundamentaron las propiedades a investigar, donde se definieron los principales parámetros del proceso de tratamiento térmico, análisis microestructural y ensayos de dureza del material, además de la caracterización de cada equipamiento utilizado en el proceso.
- ❖ Se establecieron los regímenes de temperatura y sistemas para la ejecución del proceso térmico, así como las características del método de análisis óptico, además de los parámetros y magnitud de los ensayos de dureza.



## **CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

### **3.1. Introducción**

Las investigaciones precedentes demostraron que los materiales, sean tanto metálicos como no metálicos, sometidos a cambios térmicos del medio en que se encuentran, tienden a variar su comportamiento químico, físico-mecánico que pueden ampliar o restringir su aplicación.


Los metales y sus aleaciones necesitan de estructuras cristalinas mejoradas para evitar el deterioro del mismo cuando el objetivo es de soportar impacto, resistir al desgaste superficial, como en medios corrosivos, y para lograr este fin se optó por caracterizar el estado microestructural actual y posterior del material a ser estudiado cuando son sometidos a elevadas y muy bajas temperaturas, cuantificar mediante estudios microscópicos y cualificar a través de ensayos de dureza para evidenciar los cambios sustancial en el material.

### **3.2. Análisis de la composición química obtenida**

En la tabla 3.1 se reporta el promedio de dos mediciones de composición química en cada muestra. Las cantidades de los elementos que participan en la composición de la aleación se encuentran dentro del rango permisible por los estándares establecidos (NC-13-05-83), por lo que se confirma que la aleación ensayada es el acero al manganeso 1,10 Mn13 GOST 2176-77. Se puede observar que los elementos menos representativos en la aleación lo constituyen el Mg, Cr, Ni, Mo, Al, Cu; estos son considerados como elementos de aleación cuando su contenido en la aleación es considerable (elevado), en el material a ser estudiado aparecen en porcentaje muy reducidos por esta razón, son despreciables.



Tabla 3.1. Resultado del análisis químico material.

Alloy: Hadfield / Análisis fechado 29-Apr-19 10:01:06 AM Entrega: Tatiro Recibido: Mayde		 <p><b>EMPRESA MECANICA DEL NIQUEL</b>                  Cmdte: "Gustavo Machín Hoed de Beche"</p>				
<b>Matriz: FE Programa: FE5 Código: 0363-1 Horno: 1 Colada:1</b>						
	<b>Composición química, (%)</b>					
No	<b>FeH</b>	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>
1	29995	1,125	0,377	13,51	0,004	0,032
2	29956	1,089	0,352	13,70	0,004	0,019
<b>Promedio calculado desde 1;2</b>	<b>29976</b>	<b>1,107</b>	<b>0,364</b>	<b>13,60</b>	<b>0,004</b>	<b>0,026</b>
No	<b>Mg</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>	<b>Cu</b>	<b>Al</b>
1	≤ 0,001	0,023	0,084	≤ 0,001	0,232	0,028
2	≤ 0,001	0,023	0,084	≤ 0,001	0,227	0,023

### 3.3. Análisis metalográfico

A continuación, se presentan las micrografías de las probetas del material, obtenidas a través del microscopio óptico con capacidad de aumentos desde 100 hasta 1000x. permitiendo visualizar y cuantificar las fases de la microestructura.

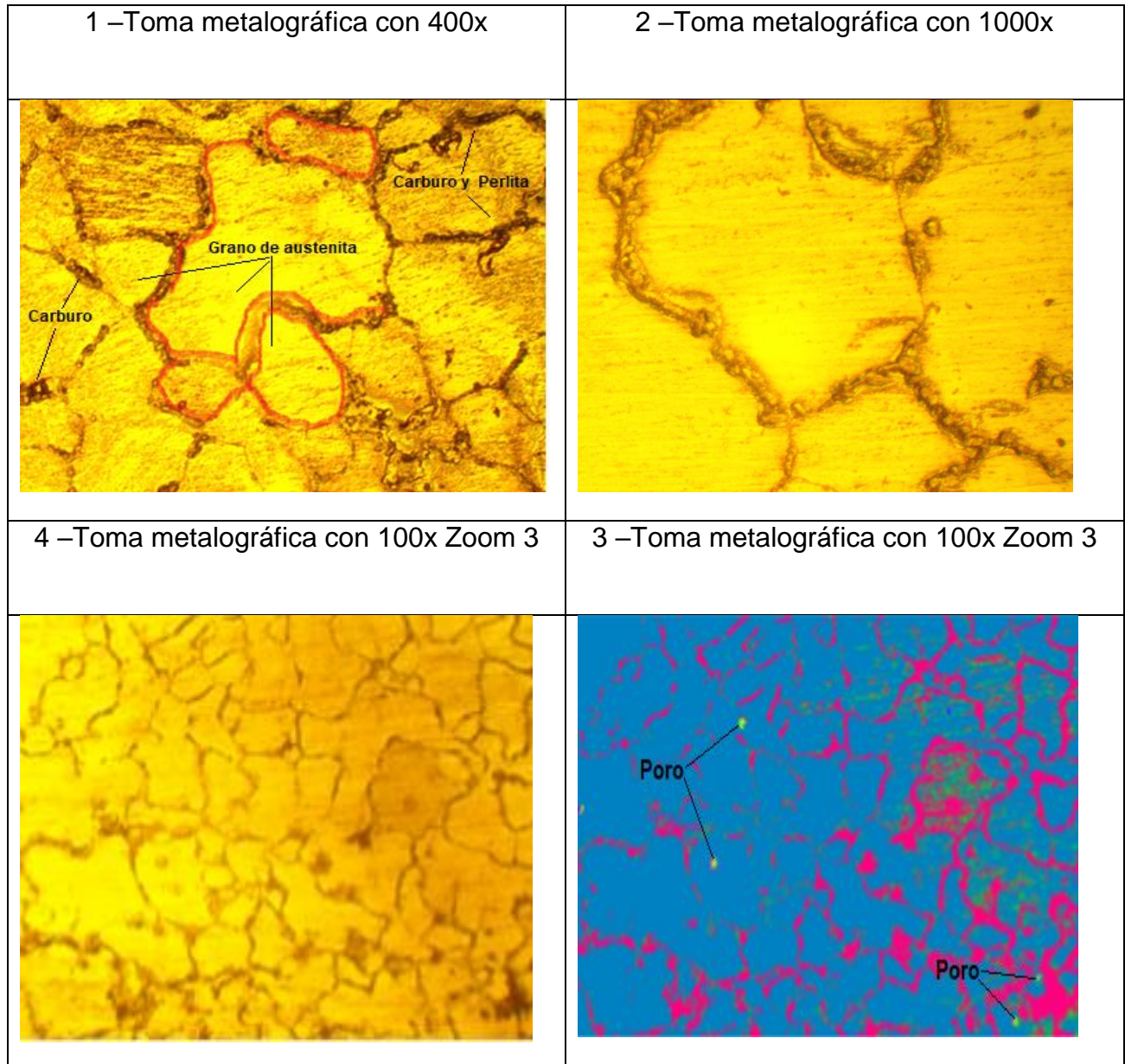


Figura 3.1. Microestructura del acero al manganeso sin tratamiento térmico, atacado con Nital 3%.

En la presente figura se presentan las tomas metalográficas de las probetas del material en bruto de colada. En la toma 1 se visualiza la microestructura, la cual es caracterizada por una matriz austenítica de grano grueso no homogéneo con la presencia de carburos masivos precipitados en el borde de los granos y en áreas interdendríticas dentro de los granos. También se presentan pequeñas colonias de perlita resultado del rechazo del carbono por parte de la austenita durante el enfriamiento, además de la presencia de poros producto de la colada debido al enfriamiento al ambiente durante la fundición del acero.

Tabla 3.2. Descripción microestructural del acero al manganeso, según la norma ASTM: E112.

Elemento	Área, ( $\mu\text{m}/\text{pixel}$ )	Área, (%)	Monograma
1- Austenita	649071	77,11	
2- Carburos	151992	17,3	
3- Perlitas y (inclusión)	40665	5,59	
<b>Tamaño promedio del grano Austen , (<math>\mu\text{m}/\text{pixel}</math>)</b>	<b>Área total, (<math>\mu\text{m}/\text{pixel}</math>)</b>	<b>Área total, (%)</b>	
8,42	841728	100	

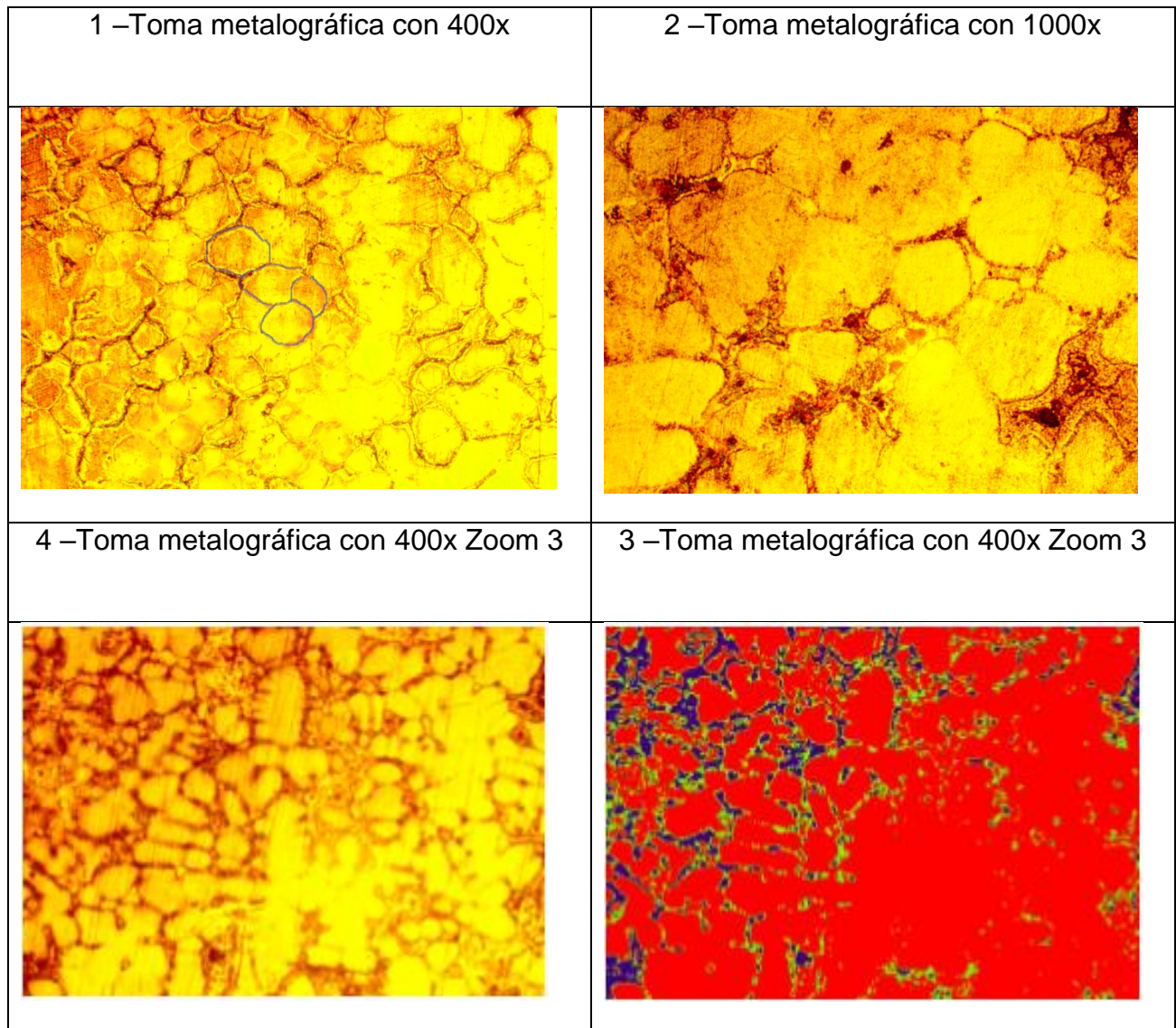


Figura 3.2. Microestructura del acero al manganeso con criogenizado, atacado con Nital 3%.

En la figura 3.2, se observa la microestructura del material sometido a temperaturas criogénicas, la cual provocó el desmenuzamiento del grano austenítico así como la disolución de los carburos en algunas áreas del borde del grano. Sin embargo, en algunas regiones se visualiza la precipitación de carburos gruesos en forma de glóbulos.

Tabla 3.3. Descripción microestructural del acero al manganeso, según la norma ASTM: E112.

Elemento	Área, ( $\mu\text{m}/\text{pixel}$ )	Área, (%)	Monograma
1- Austenita	649071	77,11	
2- Carburo + perlita	151992	18,06	
3- Carburo refinado	40665	4,830	
<b>Tamaño promedio del grano Austen , (<math>\mu\text{m}/\text{pixel}</math>)</b>	<b>Área total, (<math>\mu\text{m}/\text{pixel}</math>)</b>	<b>Área total, (%)</b>	
3.82	841728	100	



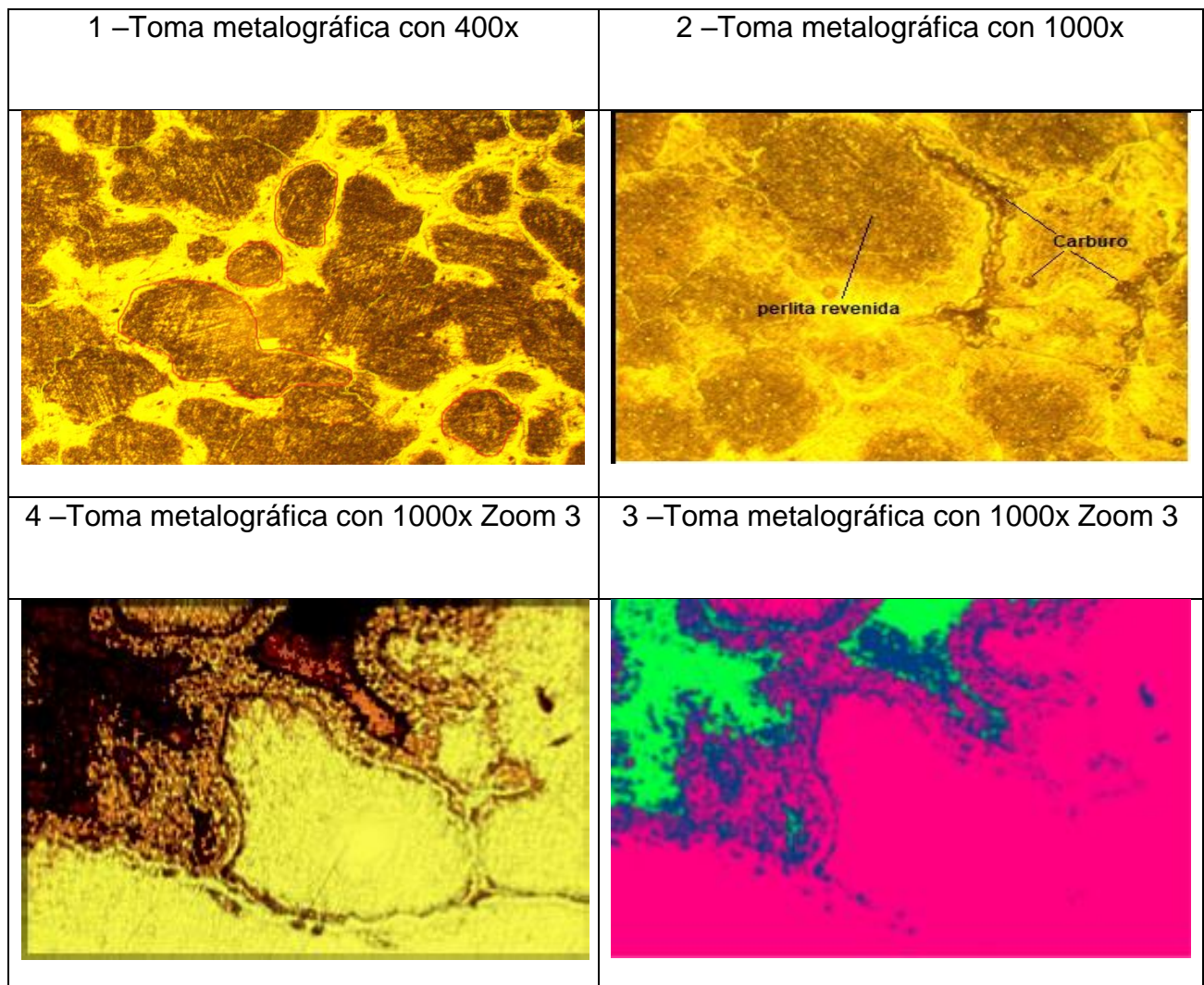


Figura 3.3. Microestructura del acero al manganeso con tratamiento térmico de T-R atacado con Nital 3%.

En la figura 3.3 se observa la microestructura obtenida de las probetas tratadas con temple, como se ve en la toma 1, donde se ilustra una matriz austenítica sobresaturada por la mezcla de perlita y carburos en el medio del grano austenítico, debido al enfriamiento brusco desde la temperatura de austenización 1050 °C. Después del revenido como se ve en la toma 2, aun se aprecian los carburos que no fueron disueltos y precipitan en el borde de los granos, esto debido la gran tendencia que tiene el Mn para la formación de estos carburos. Además se evidencia un posible refinamiento de los cristales de perlita en el medio de los granos de la austenita.

Tabla 3.4. Descripción microestructural del acero al manganeso, según la norma ASTM: E112.

Elemento	Área, ( $\mu\text{m}/\text{pixel}$ )	Área, (%)	Monograma
1- Austenita	612532	72,77	
2- Perlita	142595	16,94	
3- Carburo	86601	10,29	
<b>Tamaño promedio del grano Austen , (<math>\mu\text{m}/\text{pixel}</math>)</b>	<b>Área total, (<math>\mu\text{m}/\text{pixel}</math>)</b>	<b>Área total, (%)</b>	
0,62	841728	100	

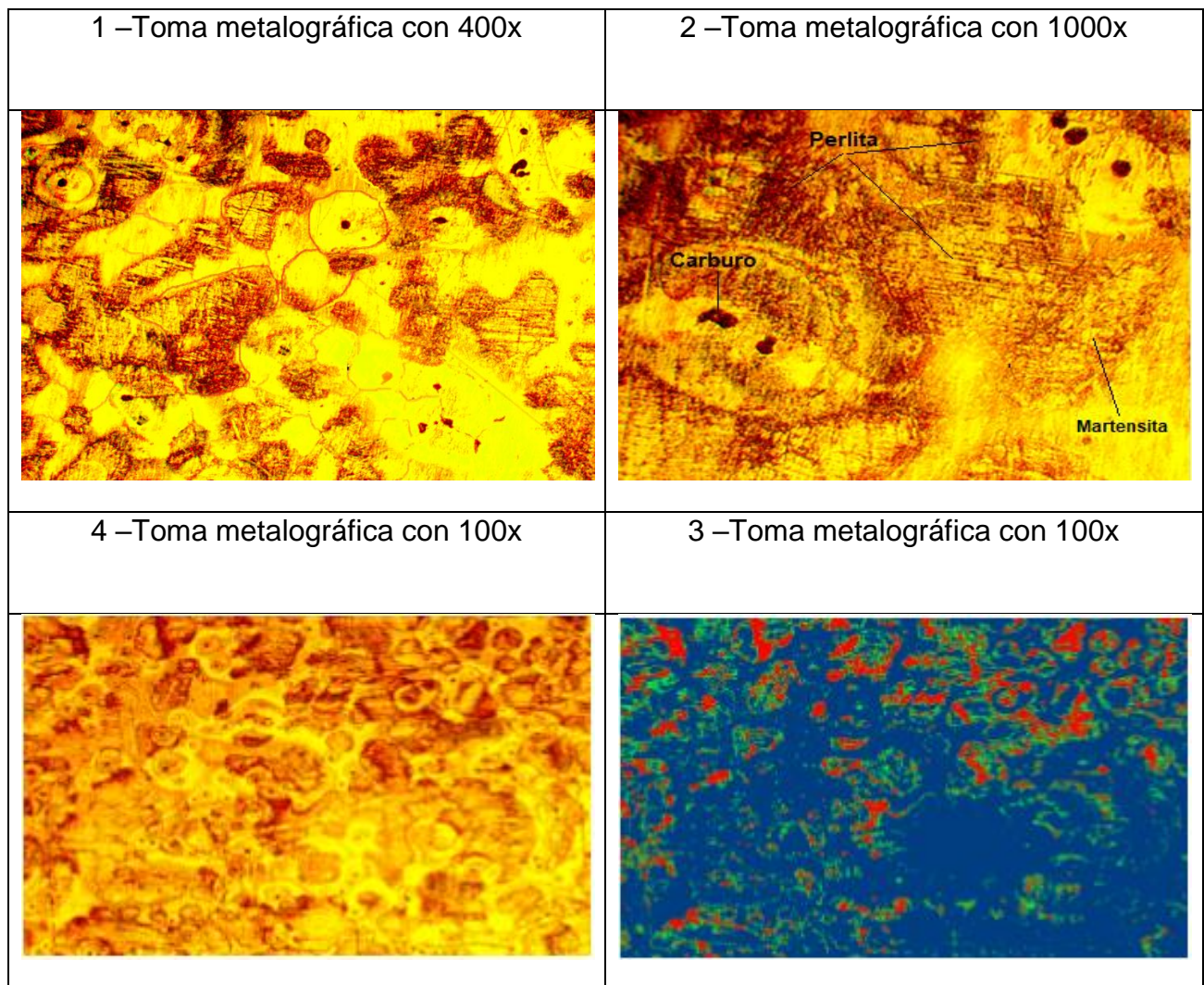


Figura 3.4. Microestructura del acero al manganeso con tratamiento térmico de T-C-R, atacado con Nital 3%.

La figura 3.4, ilustra la microestructura obtenida de las probetas con tratamiento térmico de temple con criogenia y revenido, la cual está caracterizada por una matriz austenítica sobresaturada por la mezcla de perlita y martensita en el área del grano austenítico, esto se debe a que, a muy bajas temperaturas, las colonias de perlita prosiguieron a una ligera transformación en capas de martensita. Además, se notan algunos puntos de carburos precipitados en el grano de austenita, debido la propiedad que tiene el Mn para estabilizarlos.



Tabla 3.5. Descripción microestructural del acero al manganeso, según la norma ASTM: E112.

Elemento	Área, ( $\mu\text{m}/\text{pixel}$ )	Área, (%)	Monograma
1- Austenita	641636	73,23	
2- Carburo	105023	15,48	
3- Perlita+Martensita	95069	11,29	
<b>Tamaño promedio del grano Austen , (<math>\mu\text{m}/\text{pixel}</math>)</b>	<b>Área total, (<math>\mu\text{m}/\text{pixel}</math>)</b>	<b>Área total, (%)</b>	
3,82	841728	100	

### 3.4. Dureza

Las 12 probetas fueron ensayadas en un durómetro de marca echORD HTU200BVR D, que cuenta de una escala de conversión permitiendo medir la dureza Rockwell (HRC) y Vickers (HV) al mismo tiempo de manera automática. El ensayo fue basado en la norma ASTM E 140 "Standard Hardness for Metals". A continuación, se presenta el valor de las durezas superficiales de cada probeta.

Tabla 3.6. Promedio de dureza (HRC) y (HV) de la probeta ensayada.

<b>PROBETA SIN TRATAMIENTO TÉRMICO</b>					
<b>Muestra</b>	<b>Identación</b>	<b>Dureza (HRC)</b>	<b>Promedio de dureza (HRC)</b>	<b>Promedio total de dureza (HRC)</b>	<b>Equivalencia en dureza (HV)</b>
<b>M1</b>	<b>1</b>	11,7	11,0	11	190
	<b>2</b>	10,3			
	<b>3</b>	11,0			
<b>M2</b>	<b>1</b>	11,2	13,3		
	<b>2</b>	10,5			
	<b>3</b>	12,6			
<b>M3</b>	<b>1</b>	12,1	10,7		
	<b>2</b>	9,00			
	<b>3</b>	11,0			

Tabla 3.7. Promedio de dureza (HRC) y (HV) de la probeta ensayada.

<b>PROBETA CON CRIOGENIA</b>					
<b>Muestra</b>	<b>Identación</b>	<b>Dureza (HRC)</b>	<b>Promedio de dureza (HRC)</b>	<b>Promedio total de dureza (HRC)</b>	<b>Equivalencia en dureza (HV)</b>
<b>M1</b>	<b>1</b>	13,0	13,2	13,3	197
	<b>2</b>	13,1			
	<b>3</b>	12,5			
<b>M2</b>	<b>1</b>	15,0	13,8		
	<b>2</b>	12,9			
	<b>3</b>	13,5			
<b>M3</b>	<b>1</b>	13,5	12,9		
	<b>2</b>	11,9			
	<b>3</b>	13,3			

Tabla 3.8. Promedio de dureza (HRC) y (HV) de la probeta ensayada.

<b>PROBETA CON TEMPLE - REVENIDO</b>					
<b>Muestra</b>	<b>Identación</b>	<b>Dureza (HRC)</b>	<b>Promedio de dureza (HRC)</b>	<b>Promedio total de dureza (HRC)</b>	<b>Equivalencia en dureza (HV)</b>
<b>M1</b>	<b>1</b>	23,3	20,2	20	223
	<b>2</b>	19,7			
	<b>3</b>	17,8			
<b>M2</b>	<b>1</b>	20,1	19,5		
	<b>2</b>	17,2			
	<b>3</b>	21,4			
<b>M3</b>	<b>1</b>	22,0	20,3		
	<b>2</b>	18,3			
	<b>3</b>	20,8			

Tabla 3.9. Promedio de dureza (HRC) y (HV) de la probeta ensayada.

<b>PROBETA CON TEMPLE - CRIOGENIA – REVENIDO</b>					
<b>Muestra</b>	<b>Identación</b>	<b>Dureza (HRC)</b>	<b>Promedio de dureza (HRC)</b>	<b>Promedio total de dureza (HRC)</b>	<b>Equivalencia en dureza (HV)</b>
<b>M1</b>	<b>1</b>	23,2	26,0	29,1	281
	<b>2</b>	28,6			
	<b>3</b>	26,4			
<b>M2</b>	<b>1</b>	33,7	33,8		
	<b>2</b>	31,1			
	<b>3</b>	36,7			
<b>M3</b>	<b>1</b>	29,8	27,5		
	<b>2</b>	27,3			
	<b>3</b>	25,5			

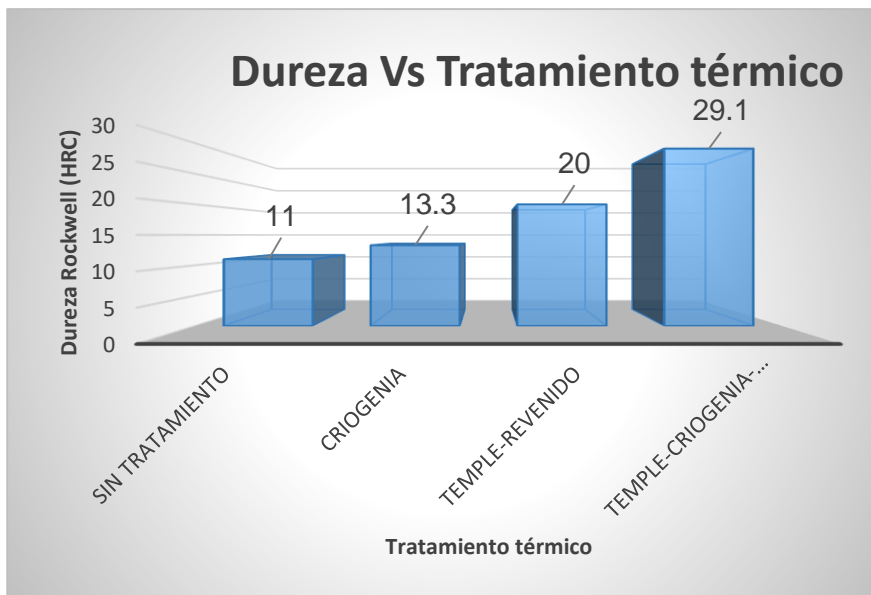


Figura 3.5. Promedio de dureza Rockwell (HRC).

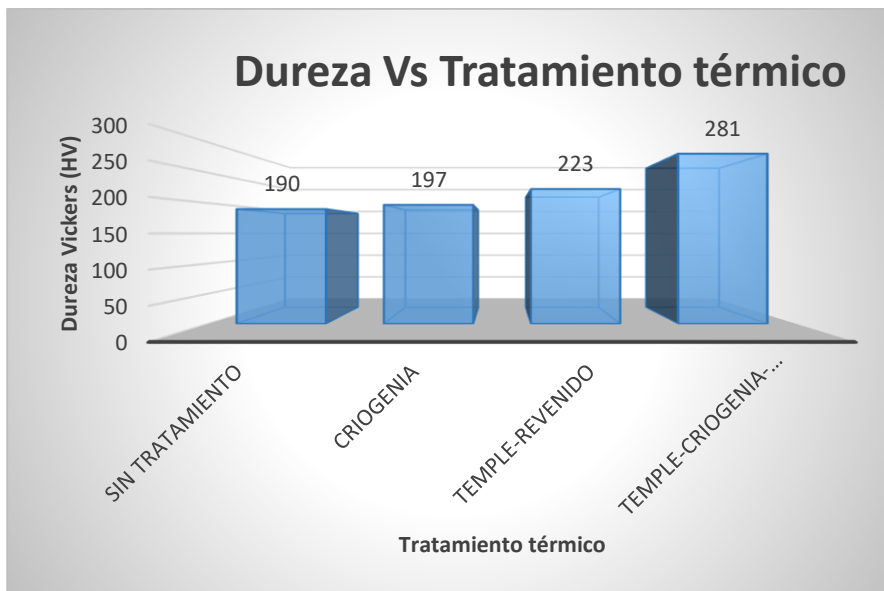


Figura 3.6. Promedio de dureza Vickers (HV).

Como se puede observar en los siguientes gráficos de las figuras 3.5 y 3.6, las probetas que más resistieron la penetración del indentador fueron las probetas con tratamiento de temple con criogenia y posterior revenido, con una dureza promedio de 29,1 HRC y 281HV en comparación con las probetas tratadas con temple y revenido que fue 20 HRC y 223 HV. El material tratado apenas con criogenizado incrementó su dureza de manera no significativa que fueron 13,3 HRC y 197 HV, en comparación con la probeta sin tratamiento térmico que

fue de 11 HRC y 190 HV. (Prieto, 2015) esto explica que para lograr endurecer el material con tratamiento térmico de criogenia primeramente se debe realizar el templeado del material de modo que el criogenizado solo es un complemento del temple.

### 3.4. Microdureza

En este ensayo se determinó la dureza de cada fase microestructural, mediante un equipo microdurómetro de marca echORD HTMV 1000, capaz de medir dureza Vickers y Koop, el mismo aporta un microscopio óptico que permite visualizar las fases que se desean ensayar, después de seleccionada el área de la fase se fuerza el indentador hacia la superficie del material, de modo a generar una huella que corresponde el valor de dureza de tal fase.

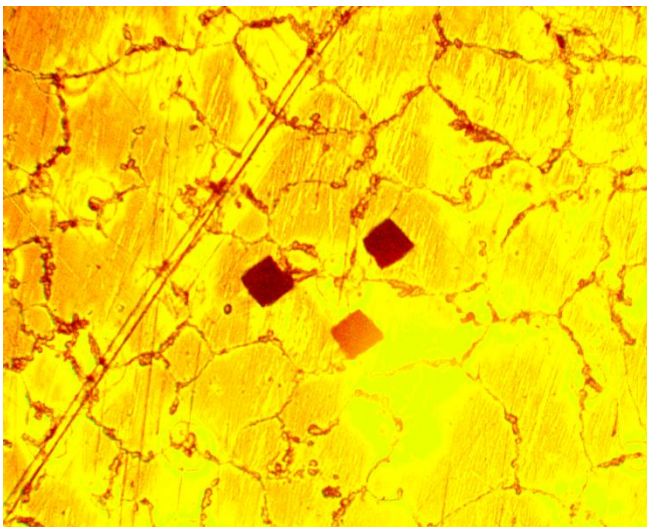


Figura 3.7 Huella de microdureza Vickers (HV).

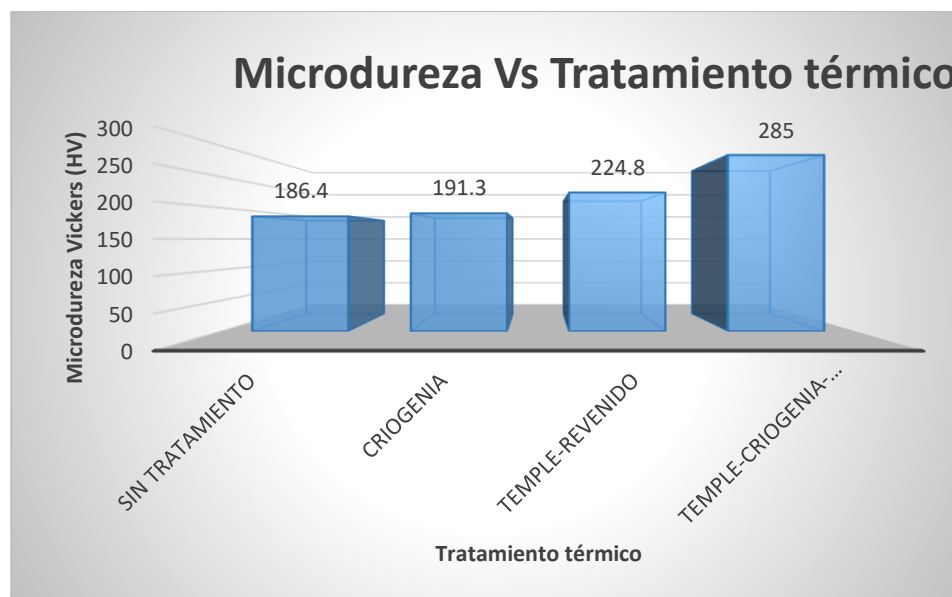


Figura 3.8. Promedio de microdureza Vickers (HV).

Tabla 3.10. Relación de dureza Vickers (HV) con las fases microestructurales.

Tratamientos térmicos	Fases microestructurales, (%)				Dureza promedio (HV)
	Zona (clara)	Zona (oscura)	Zona (clara-oscura)		
	Austenita	Carburo	Perlita	Martensita	
Sin Tratamientos térmicos	77,11	17,03	5,590		186,4
Criogenia	77,11	18,06	4,830		191,3
Temple - Revenido	72,77	10,29	16,94		224,8
Temple - Criogenia - Revenido	73,23	11,29	15,48		285,0

### 3.5. Valoración económica

En la evaluación de los distintos materiales aplicables en un proyecto, se debe tener en cuenta no solo el costo de adquisición, sino también el de mantenimiento, reparación eventualmente, el de recambio. La tabla 3.11 muestra los recoge la valoración económica del proceso.

Tabla 3.11. Costo del proceso para la obtención y de las probetas de acero al manganeso 1,10 Mn13.

Nº	Operación	Equipo	Tiempo en horas	Tarifa horaria en CUP	Importe en CUP
1	Fundición	Horno	0,1	3	0,3
2	Corte	Cortadora	0,25	4	1
3	Pulido	Pulidora	0,5	2	1
4	Encapsular	Encapsuladora	0,25	6	1,5
5	Observación	Microscopio	1	5	5
<b>Total</b>					<b>8,8</b>

Los costos operacionales u operativos serán la repercusión que tenga la inversión sobre los costos totales de la empresa, es decir, incremento de materias primas, de gastos de mano de obra o de gastos generales. Estos costos figuran en la cuenta de resultados del período y tienen un tratamiento financiero diferente al costo de adquisición de la inversión. En la tabla 3.12 se muestran los costos de mano de obra directa.

Tabla 3.12. Costos totales de la mano obra directa

<b>Mano de obra directa</b>	<b>CUP</b>
Salario mano de obra	8,8
Vacaciones 8,1 %	0,71
Salario complementario	9,5
Aporte a la seguridad social 12 %	1,12
Impuesto sobre la fuerza 5%	0,47
<b>Total</b>	<b>20,6</b>

Los costos estimados en la tabla 3.12 se relacionan con los costos directos, que incluyen la cantidad pagada por diseños, materiales, equipos, salarios directos, es preciso identificar todas las alternativas técnicas posibles, en función de las circunstancias materiales y de las tecnologías disponibles. Para obtener un costo total de la fundición de material en particular se deben incluir otros renglones. Estos materiales van a incrementar los costos de la producción del acero y serán considerados dentro del costo total de la producción y se consideran como costos adicionales. La tabla 3.13 muestra el costo por concepto de materiales directos.

Tabla 3.13. Costos de los materiales directo, en CUP.

<b>Nº</b>	<b>Materiales</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio material</b>	<b>Importe material</b>
1	Barra de acero.	2	0,07	0,42
2	Lija de 240	1	0,48	0,48
3	Lija de 1200	1	0,55	0,55
4	Lija de paño	1	0,3	0,3
5	Hoja de segueta	1	0,81	0,81
<b>Total</b>				<b>2,56</b>

Para determinar el costo de la energía eléctrica se tuvo en cuenta la tarifa de pago del MINEM a la UNE, tarifa A1, que es el pago en CUC, con una demanda contratada de 1500 kW, en los diferentes horarios (pico, normal y madrugada). La tarifa de pago de CUC 0,04 es la tarifa eléctrica establecida en horario normal. En la tabla 3.13 se muestran los costos por consumo de energía eléctrica.



Tabla 3.14. Costos del consumo de corriente eléctrica

Nº	Equipo	Horas de consumo eléctrico	Precio kW.h (CUP)	Importe kW.h (CUP)
1	Horno eléctrico	13,5	6.68	3,645
2	Cortadora	0,25	0,01	0,0025
3	Pulidora	0,5	0,02	0,01
4	Encapsuladora	0,25	0,01	0,0025
5	Microscopio	1	0,04	0,04
6	Durómetro	6,75	0,27	1,8225
<b>Total</b>				<b>5,5225</b>

Tabla 3.15. Costos totales de la operación para obtener las probetas de acero al manganeso 1,10 Mn13.

Costos totales	CUP
Mano de obra directa	20,6
Materiales directos	2,56
Energía eléctrica	5,5225
<b>Total</b>	<b>28,6425</b>

El costo total del proceso es de 28,6425 CUP, sin considerar los procesos térmicos realizado en la institución académica ISMMM.

### 3.6. Conclusiones del capítulo III

- ❖ Al determinar los elementos químicos de la aleación objeto de estudio se determinó que el acero al manganeso 1,10 Mn13 es de alto contenido de carbono, acero de tipo hipereutectoide y alto aleado al manganeso.
- ❖ Se determinó que para el tratamiento térmico por temple con criogenia y revenido ocurre la disolución de la fase carburo, colonias de perlita antes precipitadas en el borde y en áreas interdendríticas del grano austenítico, causando una sobresaturación en la matriz austenítica, la criogenia influye de tal modo a continuar la transformación de la fase austenita a martensita que no se completó con el temple. Además, la disminución del tamaño del grano austenítico y el revenido influye en la reorganización de los picos cristalinos, reduciendo las tensiones localizadas.
- ❖ Se comprobó mediante el análisis óptico microestructural que la temperatura del temple favorece la transformación de austenita a perlita, la temperatura criogénica favorece la transformación de austenita a martensita, y la temperatura del revenido no ocurre ninguna transformación, apenas reduce las tensiones residuales.
- ❖ Se pudo determinar a través de los ensayos no destructivos de dureza y microdureza, que las probetas tratadas solo con criogenia no tuvieron resultados significativos, las probetas tratadas por temple y revenido hubo una resistencia considerable a la indentación del penetrador y las probetas tratadas por temple, criogenia y revenido fueron las que más resistieron a la indentación del penetrador.

## CONCLUSIONES GENERALES

- ❖ Se determinó que el proceso de tratamiento térmico por temple con criogenia y revenido fue el más exitoso desde el punto de vista térmico y fisico-mecánico, debido a la transformación de la fase martensítica de endurecimiento.
- ❖ Mediante el microscopio óptico se cuantificaron las fases microestructurales obtenidas en cada proceso térmico, las cuales fueron 73,23 % de austenita; 15,48 % de perlita + martensita y 11,29 % de cementita, esto para el tratamiento térmico por temple con criogenia y revenido, y para el tratamiento térmico por temple y revenido fue de 72,77 % de austenita; 16,94 % de perlita y 10,29 % cementita.
- ❖ Mediante ensayos de dureza y microdureza, se determinó el promedio de dureza de cada probeta tratada, los cuales fueron 29,1 HRV con microdureza de 285 HV para las probetas tratadas por temple con criogenia y revenido, y 20 HRC con microdureza de 224,8 HV para las probetas tratadas por temple y revenido.

## RECOMENDACIONES

- ❖ Realizar el mismo procedimiento de tratamientos térmicos, pero con distintos medios de enfriamiento y tiempos de exposición a temperaturas criogénicas, para determinar si hay una mayor variación de la microestructura, dureza u otras propiedades mecánicas del material.
- ❖ Realizar otros tipos de ensayos mecánicos como de resistencia al desgaste, impacto, resistencia a la tracción–compresión y torsión, para continuar el hilo de investigación del comportamiento del acero al manganeso 1,10 Mn13 (GOST 2176-77) después del tratamiento criogénico.
- ❖ Realizar ensayos de impacto para comprobar si el acero de alto contenido de carbono y manganeso se endurece por acritud.

## References

- 1- (s.f.). en j. William d. callister, *introducción a la ciencia de los materiales*. editorial reverté, s.a.
- 2- Avner, s. h. (s.f.). *introducción a la metalúrgica física* (segunda ed.). (l. j. haen, trad.) interamericana de méxico, s.a. de c.v. recuperado el 28 de 03 de 2019
- 3- Calmet, g. l. (2009). *aplicación de la criogenia en l tratamiento térmico del aceros para trabajo en frio: k100 (aisid3)*. lima.
- 4- Corena, m. f. (2013). *influencia del tratamiento térmico criogénico en las propiedades mecánicas de resistencia al desgaste y microdureza de un acero para herramientas thyrodur 2510* . bogotá.
- eterter, s. e. (2333). *erger. fewfr*.
- 5- gómez, j. a. (2017). *influencia del tratamiento térmico subcero en la resistencia a la corrosion, la dureza y la microestructura de la aleación de aluminio 2024-o3*.
- 6- guliáev, a. (1977). *metalografía* (vol. 1). (i. a. garcía, trad.) moscú, moscú, russia: editorial mir, moscú. recuperado el 29 de 03 de 19
- 7- handbook, a. (1990). *properties and selection: irons, steels and high performance alloys*. (vol. volume 1.).
- 8- hernandez, m. a. (2013). *manual tecnico de mecánica y seguridad industrial*. madrid: cultural s.a.
- 9- hernandez, m. m. (2013). *manual tecnico de mecánica y seguridad industrial*. madrid:: cultural s.a.,.
- 10- higuera, o. f. (2007). *fundamentos teóricos de los aceros auténticos al manganeso (aceros hadfield)* .
- 11- kudrín, v. (s.f.). *metalurgia del acero*. (l. jibrikova, trad.) moscú: editorial mir moscú.
- 12- loaiza , d. t., & ruiz , f. m. (2017). *efecto del tratamiento criogenico en la resistencia al impacto y la microestructura de un acero a572*. tesis de ingenieria, universidad distrital francisco José de caldas facultad tecnológica , bogota - colombia.
- 13- montañez, n. a. (2017). *evaluación del efecto de los tratamientos térmicos de temple reveni i criogenización en los aceros halfield grado f, mediante los ensayos de desgste abrasivo, dureza y microdureza*. bogotá.

- 14- murillo, f. a. (2017). *efecto del tratamiento criogenico en la resistencia al impacto y la microestructura de un acero a572*. colombia.
- 15- pérez, f. m. (2004). *tecnología del tratamiento térmico*. (j. f. valdés, ed.) la habana, habana, cuba: félix varela. recuperado el 29 de 03 de 19
- 16- petrov y., g. v. (2005). *surface structure of stainless and hadfield steel after impact wear*.
- prieto, g. (2015). *estudio del efecto de tratamiento térmico de criogenia sobre el comportamiento tribológico y tenacidad a la fractura del acero aisi420*. bahía blanca