

**Analisis metalografico de probetas obtenidas a partir  
de un proceso de manufactura aditiva por soldadura  
por arco (WAAM)**

Presentado por.

**Omar Felipe Ramírez Martínez**  
**William Yesid Corrales Rojas**

En cumplimiento de los requerimientos para optar por el Título de  
**Ingeniero Mecánico**

Dirigida por:

**Jesús Manuel Gutiérrez Bernal PH. D**

Codirector:

**Williams Steve Hincapié Campos PH. D**

**FUNDACION UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES**

Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas  
Programa de Ingeniería Mecánica

Bogotá D.C, Colombia

2023





# LOS LIBERTADORES

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Las directivas de la Fundación Universitaria Los Libertadores, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores y a los resultados de su trabajo.

**Notas de aceptación**



---

---

---

---

---

---

**LOS LIBERTADORES**  
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bogotá D.C., 10 de febrero de 2023.



## Agradecimientos

*Queremos aprovechar estas líneas para agradecer a todas las personas que fueron parte en el desarrollo de este proyecto de grado.*

*Iniciando con la Fundación Universitaria Los Libertadores que nos ha formado de manera íntegra con la carrera que nos acompañará de aquí en adelante y a mis directores de proyecto que hacen parte de esta institución. Ingenieros Jesús Gutiérrez y Williams Hincapié, sin ustedes y sus virtudes, constancia y su paciencia este trabajo no hubiese sido posible.*

*Al ingeniero Jesús Gutiérrez por formar parte importante de esta historia, sus palabras fueron sabias, sus conocimientos rigurosos y precisos, a usted donde quiera que vaya, lo llevaremos con nosotros en el transitar profesional. Su semilla de conocimientos, germinó en el alma y el espíritu. Gracias por su paciencia, por compartir sus conocimientos de manera profesional e invaluable, por su dedicación perseverancia y tolerancia.*

*Ya que como lo dijo Epicteto; “Las cosas que dependen de nosotros son por naturaleza libres, nada puede detenerlas, ni obstaculizarlas; las que no dependen de nosotros son débiles, esclavas, dependientes, sujetas a mil obstáculos y a mil inconvenientes, y enteramente ajenas*

*Por último y no menos importante, queremos mencionar también a nuestras familias que nos han acompañado durante este tiempo y que han hecho que este recorrido resultara menos adverso, gracias por impulsar a nuestros sueños y esperanzas, les dedicamos a ustedes este logro, como una meta cumplida.*

*A todos muchas gracias.*

Omar Felipe Ramirez Martinez

William Yesid Corrales Rojas



# Contenido

<b>Análisis metalográfico de probetas obtenidas a partir de un proceso de manufactura aditiva por soldadura por arco (WAAM)</b> .....	1
Índice de Figuras .....	10
Índice de Tablas .....	12
Resumen: .....	13
Abstract: .....	14
<b>Capítulo 1</b> .....	15
<b>Introducción</b> .....	15
<b>Capítulo 2</b> .....	16
<b>Planteamiento del problema</b> .....	16
<b>2.1 Objetivos</b> .....	17
<b>2.1.1. Objetivo General</b> .....	17
<b>2.1.2. Objetivos Específicos</b> .....	18
<b>2.2 Justificación</b> .....	19
<b>2.3.1. Diseño metodológico</b> .....	20
<b>Capítulo 3</b> .....	22
<b>Marco Referencial</b> .....	22
<b>3.2. Conceptos de la Metalografía</b> .....	22
<b>3.2.1 Clasificación y Composición de los Aceros</b> .....	23
<b>3.2.2 Clasificación de los aceros</b> .....	23
<b>3.2.3 Principales Componentes de los aceros</b> .....	27
<b>3.2.4 Manufactura aditiva por soldadura por arco (WAAM)</b> .....	35
<b>3.2.4 Dureza Vickers (HV)</b> .....	36
<b>Capítulo 4</b> .....	38
<b>Alistamiento de las probetas para Análisis Metalográfico</b> .....	38
<b>Capítulo 5</b> .....	48
<b>Procedimiento de la toma de imágenes metalográficas y ensayo dureza</b> .....	48
<b>5.1 Toma de fotografías Metalográficas</b> .....	49
<b>5.2 Pruebas de microdureza</b> .....	51
<b>Capítulo 6</b> .....	54

<b>Resultados metalográficos y Ensayo microdureza.....</b>	<b>54</b>
<b>6.1 Análisis metalográfico.....</b>	<b>54</b>
<b>6.2 Ensayo microdureza.....</b>	<b>59</b>
<b>Capítulo 7.....</b>	<b>62</b>
<b>Análisis estadístico .....</b>	<b>62</b>
<b>7.1 Designación de variables .....</b>	<b>63</b>
<b>7.2 Desarrollo.....</b>	<b>68</b>
<b>Capítulo 8.....</b>	<b>70</b>
<b>Resultados.....</b>	<b>70</b>
<b>8.1. Resultados Metalográficos .....</b>	<b>70</b>
<b>8.2. Resultados Estadísticos .....</b>	<b>73</b>
<b>Capítulo 9.....</b>	<b>75</b>
<b>Conclusiones y Recomendaciones. ....</b>	<b>75</b>
<b>Capítulo 10 .....</b>	<b>77</b>

# Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama hierro-carbono.....	27
Figura 2. Microestructura de acero al carbono UNS G10400 liso.....	29
Figura 3. Microestructura de una placa de acero micro aleado laminado en bruto.....	29
Figura 4. Microestructura del acero UNS G10400 en estado esferoidizado.....	30
Figura 5. Microestructura del acero al carbono plano UNS G10150.....	31
Figura 6. Crecimiento y estructura de la perlita.....	32
Figura 7. Microestructura de acero de bajo contenido en aluminio tratado térmicamente que presenta bainita.....	33
Figura 8. Microestructura de acero de bajo contenido en aluminio templado en agua que presenta martensita en láminas.....	34
Figura 9. Microestructura de martensita templada que muestra pequeños carburos redondeados precipitados durante el tratamiento de templado.....	35
Figura 10. Indentador pirámide de diamante para ensayos Vickers (HV).....	37
Figura 11. Impronta piramidal de dureza Vickers.....	38
Figura 12. Imagen ilustrativa de sustracción para la obtención de las probetas.....	39
Figura 13. Cortadora metalográfica dentada enfriada por agua.....	39
Figura 14. Recipiente con sílice en gel, para probetas.....	40
Figura 15. Herramienta de corte con el eje guía en paralelo a la superficie de las probetas.....	42
Figura 16. Papel abrasivo utilizado para alistamiento de probetas.....	43
Figura 17. Desbaste de las probetas con papel abrasivo lubricado con agua.....	43
Figura 18. Pulidora metalográfica.....	44
Figura 19. Descripción ilustrativa de alistamiento de probetas con papel lija y paño fino.....	45
Figura 20. Paño metalográfico, para acabado superficial a brillo espejo.....	45
Figura 21. Dispensador de solución, con Alúmina.....	46
Figura 22. Probeta A, Cara lateral con acabado de papel abrasivo número: 1000.....	46
Figura 23. Probeta A, Cara frontal con acabado a brillo-espejo.....	47
Figura 24. Microscopio metalográfico Olympus Gx41.....	49
Figura 25. Interfaz Toup view.....	50
Figura 26. Probeta A, con ángulo y superficie recta, reflejando hacia el lente del microscopio Olympus GX41.....	51
Figura 27. Durómetro Future-Tech Fm.700.....	52
Figura 28. Carga del durómetro Future-Tech Fm-700.....	53
Figura 29. Probeta A, en durómetro, incidiendo en el cordón 4.....	53
Figura 30. Comportamiento de la microdureza entre límite superior e inferior, Probeta A Cara Lateral.....	64
Figura 31. Comportamiento de la microdureza entre límite superior e inferior, probeta A Cara Frontal.....	65
Figura 32. Comportamiento de la microdureza entre límite superior e inferior, Probeta B Cara Lateral.....	66
Figura 33. Comportamiento de la microdureza entre límite superior e inferior, Probeta B Cara Frontal.....	67



# Índice de Tablas

Tabla 1. Descripción metalográfica, del cordón 8 al 1, Cara Frontal. probetas A y B con aumento 10X en el microscopio. ....	55
Tabla 2. Descripción metalográfica, del cordón 8 al 1, Cara Lateral. Probetas A y B, con aumento 10X en el microscopio. ....	57
Tabla 3. Datos microdureza, Probeta A Cara lateral .....	60
Tabla 4. Datos microdureza, Probeta A Cara Frontal.....	60
Tabla 5. Datos microdureza, Probeta B Cara Lateral .....	61
Tabla 6. Datos microdureza, Probeta B Cara Frontal.....	61
Tabla 7. Tabla con valores, tomados probeta A, cara lateral .....	63
Tabla 8. Tabla con valores, tomados Probeta A, cara frontal.....	64
Tabla 9. Tabla con valores, tomados probeta B cara lateral .....	65
Tabla 10. Tabla con valores, tomados Probeta B, cara frontal. ....	66
Tabla 11. Anova Probeta A, entre cordones Frontales y Laterales .....	68
Tabla 12. Anova de la Probeta B, entre cordones Frontales y Laterales. ....	68
Tabla 13. Anova Entre cordones Frontales, Probetas A vs B.....	69
Tabla 14. Anova Entre cordones Laterales, Probetas A vs B. ....	69

## Resumen:

El siguiente documento presenta un análisis metalográfico de varios cordones de dos probetas obtenidas por manufactura aditiva por soldadura por arco (“wire arc additive manufacturing” WAAM) para la Fundación Universitaria Los Libertadores. Las muestras obtenidas por dicho proceso fueron sometidas a un proceso de preparación bajo la norma, práctica estándar para la preparación, limpieza y evaluación de la corrosión en pruebas de ensayo (“Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluation Corrosion Test Specimens” ASTM G1), siguiente a esto las probetas se dejaron con un acabado tipo brillo-espejo con la ayuda de un paño de fibras finas, por consiguiente, se procedió a realizar un ataque químico realizado con Nital al 3% para así revelar su estructura metalográfica. Resultante al ataque químico se hace el reconocimiento estructural utilizando un microscopio metalográfico (Olympus GX41) el cual nos brindó una gran información a la hora de estudiar cada cordón de soldadura permitiendo identificar su estructura metalográfica en cada una de las trayectorias que tuvo el cordón de soldadura; y por último se realizó una prueba de micro dureza mediante el micro durómetro Future-Tech FM-700 con una carga de 100G con un resultado en Vickers (HV) en cada uno de los cordones, y así poder hallar las diferencias de microestructura y dureza entre cada cordón de soldadura que estarán denotadas en las posteriores tablas.

**Palabras claves:** Metalografía, soldadura por arco, Manufactura aditiva, Lead well V20i, simulador.

## Abstract:

The following document presents a metallographic analysis of several strands of two specimens obtained by wire arc additive manufacturing (WAAM) for Foundation University the Liberators. The samples obtained by this process were subjected to a preparation process under the standard practice for the preparation, cleaning, and evaluation of corrosion test specimens (ASTM G1), after which the specimens were left with a gloss-mirror finish with the help of a cloth of fine fibers, then, a chemical attack was performed with 3% Nital to reveal its metallographic structure. As a result of the chemical attack, a structural recognition was made using a metallographic microscope (Olympus GX41) which provided us with great information when studying each weld bead, allowing us to identify its metallographic structure in each of the trajectories of the weld bead; Finally, a micro hardness test was carried out using the Future-Tech FM-700 micro hardness tester with a load of 100G with a result in Vickers (HV) in each of the beads, and thus being able to find the differences in microstructure and hardness between each weld bead, which will be shown in the following tables.

**Keywords:** Metallography, arc welding, additive manufacturing, Lead well V20i, simulator.

# Capítulo 1

## Introducción

De acuerdo con la metalografía y microestructura, asociación de ingenieros y científicos especializados en materiales (“association of materials-centric engineers and scientists” ASM), la metalografía es la disciplina científica que busca examinar y determinar las características de un metal o aleación a un nivel microscópico en una alta gama o niveles de implicaciones, así mismo también en esta disciplina se puede encontrar el examen de la estructura cristalina, optando por medios de difracción de rayos X o utilizando la herramientas más común en este tipo de casos como lo es; el microscopio óptico, que este a su vez utiliza aumentos que van desde (50 a 1000X) con la capacidad de mostrar características micro estructurales de  $0.2\mu\text{m}$  o más [1]. Sin lugar a duda el microscopio es el instrumento más usado en este trabajo, ya que gracias a esta herramienta podemos determinar las propiedades ópticas de las probetas, tales como: el tamaño de grano, forma y la distribución de las fases e inclusiones que tienen. Dando a conocer sobre las propiedades mecánicas del metal. Teniendo en cuenta estas definiciones para la metalografía podemos también encontrar que en la microestructura se revelará el tipo de tratamiento térmico o mecánico, que se utilizó durante el proceso de obtención del metal.

Durante el proceso de análisis metalográfico utilizamos una descripción cualitativa, en la cual fue de enfoque encontrar la microestructura ya que esta, nos ayuda a determinar los micro-constituyentes que componen nuestro metal tratado. Los principales constituyentes que podríamos encontrar son: ferrita, cementita, perlita, bainita, martensita y grafito [2]. Es de vital importancia preparar la superficie en la que se va a realizar este tipo de observación, se requiere que la probeta esté totalmente plana, lisa y pulida a brillo espejo, ya que el enfoque depende del estado de la superficie para la revelación metalográfica [3]. Durante este proceso investigativo encontramos que existe una herramienta que utiliza electrones para la revelación estructural, el cual se trata de la microscopía electrónica; para revelar la imagen de la estructura se obtiene a partir de las señales emitidas por la muestra y

se va formando a medida que el haz de electrones se desplaza sobre la superficie del metal, este realiza un recorrido línea por línea en forma rectangular; a diferencia de una imagen proyectada por el microscopio convencional, en el electrónico encontramos que este construye una imagen virtual a partir de las señales emitidas por la probeta [4]. Por último, se utilizó el ensayo de dureza Vickers, el cual utiliza un indentador tipo pirámide de diamante con una base cuadrada y con un ángulo de vértice de  $136^\circ$ , con la posibilidad de usar cargas hasta los 120 kgf; este tipo de ensayo es comúnmente utilizado en mapas de dureza para uniones soldadas [5]. Permite se ensaye de la mejor y e indicada forma, este trabajo investigativo.

Finalmente, teniendo en cuenta el estudio que se requiere para ejecutar un análisis metalográfico detallado y preciso, con ayuda de los espacios académicos, como lo es el laboratorio de ciencia de los materiales de la Fundación Universitaria Los Libertadores. De esta manera se busca llegar a resultados que aporten a la investigación, los cuales serán descritos más adelante del pos procesó de la manufactura aditiva por soldadura por arco (WAAM).

## **Capítulo 2**

### **Planteamiento del problema**

En la industria existen varios tipos de soldaduras de metales para diferentes áreas, trabajos, utilidades y/o usos. Sin embargo hoy en día, la manufactura aditiva por soldadura por arco WAAM, se usa para la industria debido a que este permite la fabricación de piezas 3D conformadas por cordones de soldadura, siendo que este utiliza metales de aporte convencionales lo cual reduce los costes de material, por lo tanto esto representa una gran ventaja; debido a su eficacia este proceso presenta gran interés en los diferentes sectores de la industria, como lo son la aeroespacial, naval, automoción, moldes, energía y construcción, ya que esté destaca por sus aplicaciones con materiales de alto valor añadido siendo esto una relación entre el material comprado y el final [6]. Adicional el aporte de arco tiene otras ventajas entre las cuales se destaca que no genera un gran impacto al medio ambiente debido

a una mínima generación de residuos y a su vez el empleo de hilo (aporte de alambre metálico) [7].

Debido al gran impacto que tiene la manufactura aditiva por soldadura WAAM en el campo industrial, el estudio metalográfico de estas deposiciones se tienen en cuenta, para que se realizasen mejoras en el proceso, dando mejores resultados a largo y corto plazo, dado que la metalografía ofrece un análisis detallado del tipo del tratamiento térmico, propiedades ópticas del metal, tales como lo son el tamaño de grano, forma y la distribución de las varias fases e inclusiones [2].

Teniendo en cuenta el uso de la manufactura aditiva por soldadura por arco WAAM, en el desarrollo de la industria, ahora en Colombia se tiene el problema de no conocer las características micro estructurales de este proceso, se determinará las propiedades metalográficas de cada cordón a lo largo de las trayectorias, siendo de vital importancia para determinar la confiabilidad del proceso, llevando consigo un estudio detallado y analítico.

Finalmente, con base en la información mencionada se formula la siguiente pregunta de investigación ¿Se mantendrán constantes las propiedades metalográficas a lo largo de cada uno de los cordones y al interior de los mismos en un proceso de construcción de piezas por tecnología WAAM?

## **2.1 Objetivos**

### **2.1.1. Objetivo General**

1. Analizar metalográficamente las diferencias entre la microestructura y las propiedades de probetas de 8 cordones obtenidos a partir de un proceso de manufactura aditiva por soldadura por arco WAAM.

### **2.1.2. Objetivos Específicos**

1. Determinar en cada uno de los cordones obtenidos por proceso de manufactura aditiva por soldadura por arco, WAAM, el tipo de microestructura.
2. Obtener valores de microdureza en cada cordón de las probetas obtenidas por manufactura aditiva por soldadura por arco, para formular un análisis estadístico, que permita entender la diferencia o igualdad entre cordones y probetas cortadas en diferente posición dentro de la misma muestra.
3. Determinar cualitativamente si es necesario realizar un tratamiento térmico adicional a la pieza obtenida por manufactura aditiva por soldadura por arco para posteriores etapas de remoción de material y obtención de la forma final.

## **2.2 Justificación**

En el campo de la metalografía siendo este el estudio de la estructura interna de los metales, sus aleaciones y composiciones de cada uno de ellos, relacionando esto con sus propiedades mecánicas; dicho estudio nos proporciona una gran información de cómo fue procesado el metal, como fue tratado y bajo qué parámetros de construcción.

El resultado de este estudio permite realizar las conclusiones necesarias ya sea para el campo industrial, investigativo, o controles de calidad para productos terminados con el proceso de manufactura aditiva por soldadura por arco WAAM.

La industria que usa productos metálicos como producto final, utiliza parámetros, ya sea bajo composición química, propiedades mecánicas, etc. Por tal motivo, estos productos deben cumplir ciertas especificaciones, por consecuencia es necesario controlar si los materiales cumplen con las especificaciones del fabricante, siendo la metalografía un buen método para este control.

Para conseguir el objetivo principal de este proyecto, se realiza un análisis metalográfico detallado de cada cordón de soldadura, determinando sus componentes estructurales y por otro lado determinando su dureza para un mayor análisis y obtener mejores resultados al concluir este proyecto.

Finalmente, este proyecto permite a futuros ingenieros investigar más de cerca este proceso de soldadura para unos óptimos resultados, en su producto final o quizá mejorar el procesado del metal y así, obtener resultados satisfactorios en las propiedades mecánicas de diversos elementos manufacturados, de la industria metalmeccánica.

## **2.3 Metodología**

Durante este proceso investigativo, se realizó una investigación descriptiva y explicativa, de acuerdo con Frank M [8], ya que consiste en llegar a conocer las situaciones, costumbres y actitudes predominantes a través de la descripción exacta de las actividades, objetos, procesos y personas. Su meta no se limita a la recolección de datos, sino a la predicción e identificación de las relaciones que existen entre dos o más variables, y por otro lado la investigación explicativa que nos ofrece un proceso de los estudios explicativos que pueden ocuparse tanto de la determinación de las causas (investigación post facto), como de los efectos (investigación experimental), mediante la prueba de hipótesis. Sus resultados y conclusiones constituyen el nivel más profundo de conocimientos [8]. Teniendo en cuenta el proceso investigativo, de este trabajo se pretende describir el Análisis metalográfico de muestras obtenidas de un simulador de manufactura aditiva por soldadura por arco WAAM.

Se busca obtener a través del análisis estadístico, una conclusión de cómo fue ejecutado este proceso aditivo de WAAM, gracias a los datos que se obtendrán en la toma de durezas y el registro de las mismas en Vickers (HV) para dictaminar el proceso térmico al cual deberían someterse las probetas luego de este proceso y a su vez concluir como fue ejecutado.

### **2.3.1. Diseño metodológico**

En nuestro diseño metodológico utilizado para el cumplimiento de los objetivos planteados consta de las siguientes etapas:

Etapa 1: Fundamentación teórica de conceptos y normas aplicables para el análisis metalográfico de muestras obtenidas a partir de un simulador de manufactura aditiva por soldadura de arco WAAM.

Etapa 2: Alistamiento de las probetas para llevarlas a brillo espejo y así poder realizar ataque químico para la revelación de su microestructura metalográfica, esta etapa consiste en las siguientes actividades:

1. Corte de probetas a partir de la misma muestra, en **similitud simétrica** a un corte en “L” como resultado de ataque perpendicular.
2. Secado de probetas y mantenimiento de las mismas sin humedad, ni óxidos.
3. Preparación de las probetas para la práctica metalográfica realizando un desbaste con materiales abrasivos.
4. Dar un acabado con un pulido fino que le proporcione un brillo tipo espejo.
5. Ataque químico con ácido nítrico o Nital.

Etapa 3: Se realiza el procedimiento de la toma de imágenes metalográficas con el microscopio Olympus GX41, siguiendo una serie de pasos descritos a continuación:

1. Selección de lente de acuerdo a la necesidad o según criterio (10 y 20X).
2. Captura de imágenes digitales con el software ToupView
3. Elegir la escala de colores y contraste para el análisis de los gránulos y/o cristales de las imágenes observadas en el microscopio.
4. Se capturan y guardan, las imágenes de cada cordón de soldadura
5. Se eligen secciones de las tomas metalográficas para su análisis, con un aumento adicional entre (60 y 70%) a cada una de estas.
6. Identificación de fase micro estructural en cada uno de los cordones.

Etapa 4: Realizar pruebas de dureza mediante el Future-Tech FM-700 micro hardness tester, en cada cordón de soldadura que conforma las probetas obtenidas del proceso de WAAM, utilizando los siguientes pasos:

1. Toma de datos lateral y frontal
2. Realizar una tabla de datos descriptiva de cada cordón de soldadura

Etapa 5: Descripción de los resultados obtenidos a través de la microscopia de las muestras producidas en un simulador de manufactura aditiva por soldadura por arco WAAM y discusión de los datos obtenidos de la micro dureza

Etapa 6: Realizar un análisis estadístico para ver la continuidad de las características físicas y de criticidad de los cordones gracias al registro de durezas, describiendo cambios o igualdades.

## **Capítulo 3**

### **Marco Referencial**

En este capítulo se describe la fundamentación teórica indispensable, para el entendimiento del presente proyecto, partiendo desde un entendimiento base a uno detallado para un análisis metalográfico para las probetas A y B, obtenidas por manufactura aditiva por soldadura por arco WAAM.

#### **3.2. Conceptos de la Metalografía**

Durante el proceso de análisis metalográfico se evidencia el constante uso de diferentes conceptos e intervenciones que a su vez permiten el desarrollo del proyecto, dando así un entendimiento claro de los resultados obtenidos.

### **3.2.1 Clasificación y Composición de los Aceros**

Siendo el acero una aleación entre hierro y carbono, tiene una proporción entre 0,008 y 2% de carbono, permite añadir otros elementos para mejorar sus propiedades tanto mecánicas como físicas. Entre las propiedades del acero y su comportamiento de este a diferentes temperaturas dependen principalmente de la cantidad de carbono y su distribución. Antes de aplicar cualquier tratamiento térmico, la mayoría de los aceros están compuestos de tres elementos: ferrita, perlita, cementita. Entre mayor sea el contenido de carbono, menor es la cantidad de ferrita y mayor la perlita, cuando el acero está en un 0,8% de carbono está compuesto principalmente por perlita[3].

### **3.2.2 Clasificación de los aceros**

La norma SAE (Society of Automotive Engineers) clasifica los aceros de la siguiente manera:

- Aceros al carbono
- Aceros de media aleación
- Aceros aleados
- Aceros Inoxidables
- Aceros de alta resistencia
- Aceros para herramientas

## Aceros al carbón

Este tipo de aceros poseen una cantidad múltiple entre los cuales mayormente se encuentra: carbono (**C**) en un 90%, menos de 1,65% de manganeso (**Mn**) y 0,6% de silicio(**Si**).

En esta clasificación encontramos que se pueden diferenciar entre los siguientes grupos:

- Aceros de muy bajo % de **C** desde SAE 1005 a 1015, los cuales son mayormente usados en piezas que estarán sometidas en con conformado en frio.  
Los Aceros no Calmados son utilizados para embutidos profundos, ya que este tiene buenas cualidades de deformación y terminación superficial, a diferencia de los Aceros Calmados que son utilizados a procesos de forjado o algún tipo de tratamiento térmico, estos son adecuados para la soldadura y Brazing (soldadura fuerte). Son aceros susceptibles al crecimiento de grano, rugosidad superficial y fragilidad si después del conformado en frio este se calienta por encima de los 600°C [9].
- Aceros de bajo % de **C** desde SAE 1016 a 1030 los cuales tiene mayor dureza y resistencia, pero tienen una menor capacidad de deformación, estos usualmente son llamados aceros de cementación. Estos aceros en un proceso de temple dependen del % de **C** y **Mn**, ya que siendo mayores los porcentajes de **C** tiende a tener mayor templabilidad en el núcleo y siendo mayor en **Mn** se endurecen principalmente en el núcleo y en la capa[9].
- Aceros de medio % de **C** desde SAE 1035 a 1053 estos son usados mayormente donde se necesitan mayores propiedades mecánicas y con mayor frecuencia llevan tratamiento térmico de endurecimiento, ya que se utilizan en una gran variedad de piezas que están sometidas a cargas dinámicas, como lo son los ejes y árboles de transmisión [9].
- Aceros de alto % de carbono desde SAE 1055 a 1095 son mayormente utilizados en aplicaciones donde se requiera aumentar la resistencia al desgaste y obtener niveles altos en la dureza [9].

## **Aceros de media aleación**

Son aceros al manganeso(**Mn**), principalmente constituidos de este donde el porcentaje de **Mn** varía entre 1,20 y 1,65, según el porcentaje de carbono (**C**)

## **Aceros Aleados**

Se considera un acero aleado cuando un elemento supera entre uno o más de los siguientes límites o porcentajes:

- 1,65% **Mn**
- 0,60% **Si**
- 0,60% **Cu**
- Cuando se tiene un porcentaje explícito de: Cromo (**Cr**), Níquel (**Ni**), Molibdeno (**Mo**), Aluminio (**Al**), Cobalto (**Co**), Niobio (**Nb**), Titanio (**Ti**), Cobre (**Cu**), Tungsteno (**W**), Vanadio (**V**) o Zirconio (**Zr**).

Estos aceros se usan principalmente cuando se espera obtener que el producto final obtenga desarrollar al máximo sus propiedades mecánicas para así tener un mínimo de distorsión y fisuración. Usualmente este tipo de aceros para un mejor uso se utilizan tratados térmicamente, ya que una de sus características principales es su templabilidad pudiéndose temprar todos en aceite[9].

## **Aceros Inoxidables**

Estos aceros se dividen en grupos, los cuales son:

- Austeníticos: los cuales no son templeables ni duros, también poseen una alta capacidad de deformarse plásticamente.

- **Martensíticos:** Estos son templables, además si se pretende aumentar su dureza se debe elevar el % de **Cr**
- **Ferríticos:** en este grupo se encuentran aceros con bajo porcentaje de **C** y alto en **Cr** (10-27%) dado que por esto pueden mantener la estructura Ferrítica en altas temperaturas [9].

## **Aceros de Alta Resistencia**

Son aceros de bajo % de **C** y son aleados con: **V**, **Nb**, nitrógeno (**N**), **Ti** en un porcentaje aproximadamente 0,03% para cada uno, de esta manera precipitando cabonitruros de **V**, **Nb** y **Ti** ya que esto a su vez eleva el límite elástico un (30 a 50%). Este tipo de acero es de buena soldabilidad también de ser tenaces y no permiten tratamiento térmico [9].

## **Aceros para Herramientas**

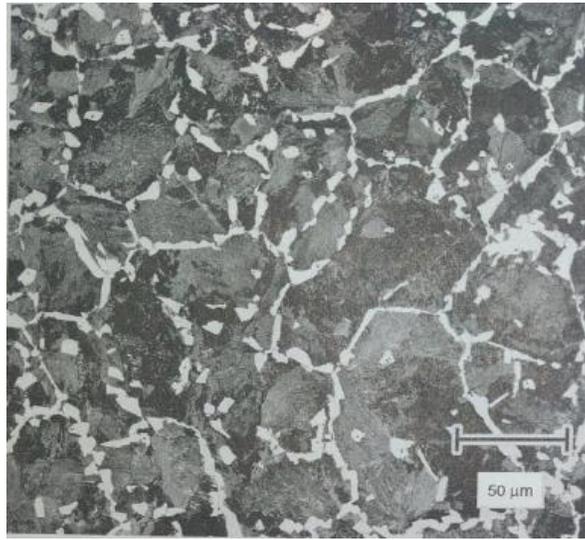
Son aceros que están denominados por letras, las cuales los hace diferenciar por su contenido o tratamiento térmico.

- **W:** Son templables en agua. Este tipo de acero no contiene elementos aleantes y contienen un alto porcentaje de carbono (0,75 a 1,0%).
- **O:** Estos son para trabajo en frío, ya que si la temperatura aumenta su dureza va a disminuir.
- **A:** Son templados al aire, no se pueden templar en aceite dado que se pueden fisurar,
- **D:** Son de alta aleación. Este posee altos porcentajes de **C** para formar carburos de **Cr** entre (1,10 – 1,80%)
- **H:** Trabajo en caliente
- **T:** A base Tungsteno
- **M:** A base de molibdeno
- **S:** Estos aceros son para herramientas que trabajan al choque [9].



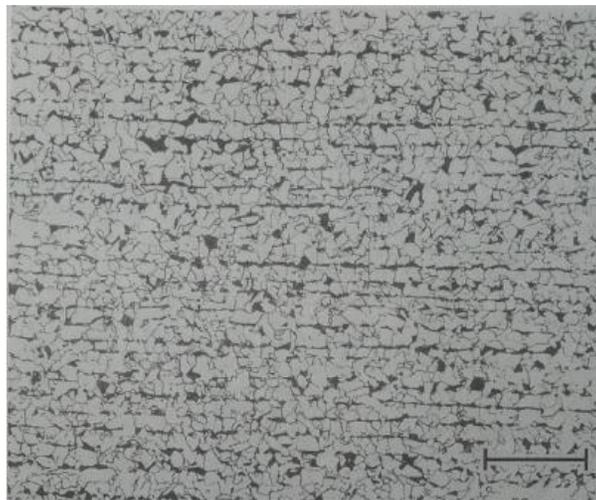
- **Austenita:** La fase de austenita es una estructura cristalina de alta temperatura que generalmente existe a temperaturas superiores de aproximadamente 720°C [11]. Solo puede aparecer austenita en temperatura ambiente, es deformable como el hierro gamma, presenta poca dureza, gran resistencia al desgaste, es magnética y es el compuesto más denso de los aceros. Este componente puede disolver hasta 1,8% de Carbono y su red cristalográfica es cubica centrada en las caras (c.c.c), con unos parámetros de red de:  $a = 3,67 \text{ \AA}$  y  $d = 2,52 \text{ \AA}$  [3].
- **Ferrita:** Es un componente que se encuentra en la mayoría de los aceros de carbono, planos, laminados y recocidos con un contenido de carbono inferior al 0,77%, la ferrita se considera una fase porque consiste en una sola componente. En el **diagrama Hierro carbono** figura 1., hay un campo donde existe 100% de hierro alfa (**Ferrita**) en el extremo izquierdo del diagrama por debajo de los 910°C (1670°F). La ferrita es prácticamente hierro puro, ya que cuenta con un contenido de carbono inferior al 0,005% a temperatura ambiente, en la figura 2. Se enseña un ejemplo de esta fase que muestra granos de ferrita proeutectoide equiaxiales que perfilan los límites de grano de la austenita, la matriz es perlita (constituyente de grabado oscuro) [1]. La ferrita está presente en los aceros hipoeutectoides como componente y mezclada con cementita formando la perlita. Si el acero contiene muy poco carbono su estructura estará formada de 100% en granos de ferrita la cual será revelada fácilmente en el microscopio [11]. Los granos en algunas ocasiones son equiaxiales como lo muestra la figura 3. Que muestra granos de ferrita equiaxial con bandas.

*Figura 2. Microestructura de acero al carbono UNS G10400 liso*



Fuente: Adaptado de [1].

*Figura 3. Microestructura de una placa de acero micro aleado laminado en bruto*

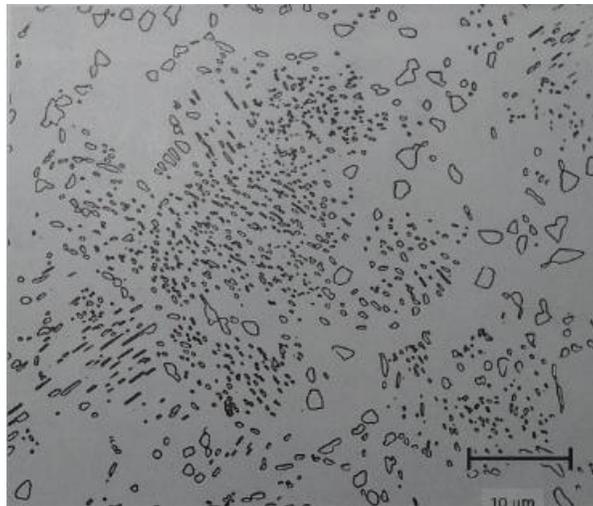


Fuente: Adaptado de [1].

- **Cementita:** Este componente aparece comúnmente en fundiciones y aceros, este carburo tiene como fórmula (**Fe<sub>3</sub>C**), con red cristalina ortorrómbica, este constituyente en bajas temperaturas se comporta como ferromagnético y

pierde esta propiedad a 212°C [1]. Este se presenta en forma reticular, laminar y globular [3], en la figura 4. Se observa un ejemplo de cementita en un acero donde la cementita (carburos) aparece como partículas redondeadas.

Figura 4. Microestructura del acero UNS G10400 en estado esferoidizado.

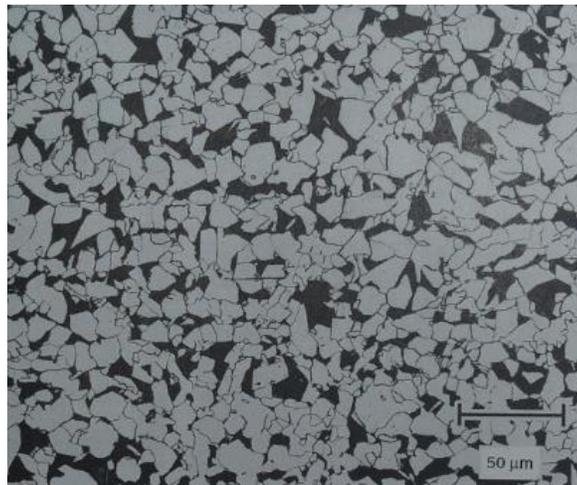


Fuente: Adaptado de [1].

- **Perlita:** Es un constituyente común en los aceros al carbono y de baja aleación y consiste en dos fases, ferrita y cementita. Las fases de ferrita y cementita forman una morfología laminar similar a la de las plaquetas. La perlita comúnmente aparece oscura en las pruebas de microestructura esto debido a la luz que refracta del microscopio [1]. En la figura 5. se observan islas oscuras las cuales su componente es perlita, que muestra granos de

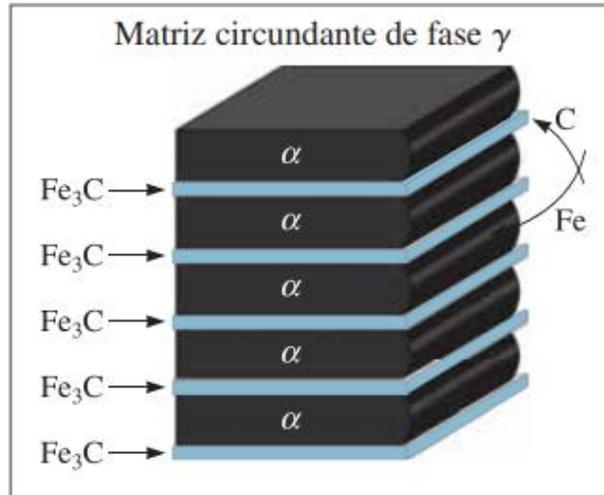
ferrita equiaxial con islas de perlita. Esta se presenta en forma de forma laminar, globular y reticular. Este componente presenta más resistencia y dureza que la ferrita, pero este a su vez es más blanda y maleable que la cementita [3]. En la figura 6. se muestra el crecimiento de la perlita bajo la matriz de fase ( $\gamma$ ) gama.

Figura 5. Microestructura del acero al carbono plano UNS G10150



Fuente: Adaptado de [1].

Figura 6. Crecimiento y estructura de la perlita



Fuente: Adaptado de [11]

- **Bainita:** Este componente consta de dos fases: ferrita y cementita. La aparición de bainita figura 7. Que se forma a velocidades más rápidas que la perlita. La bainita puede tener morfologías muy diferentes, entre los cuales se denomina: bainita superior y bainita inferior. La bainita, se ve fácilmente a gran escala de aumento en un microscopio [1]. Esta se obtiene en una transformación isotérmica de la austenita cuando la temperatura de enfriamiento esta entre 250 a 500°C. En la Bainita superior se encuentra en forma arborescente formada entre 500 y 580°C, esta a su vez está compuesta por una matriz ferrítica y la Bainita inferior es formada entre 250 a 400°C esta tiene una forma de grano similar a la martensita, formada por agujas alargadas de ferrita que contienen delgadas placas de carburos [3].

Figura 7. Microestructura de acero de bajo contenido en aluminio tratado térmicamente que presenta bainita.

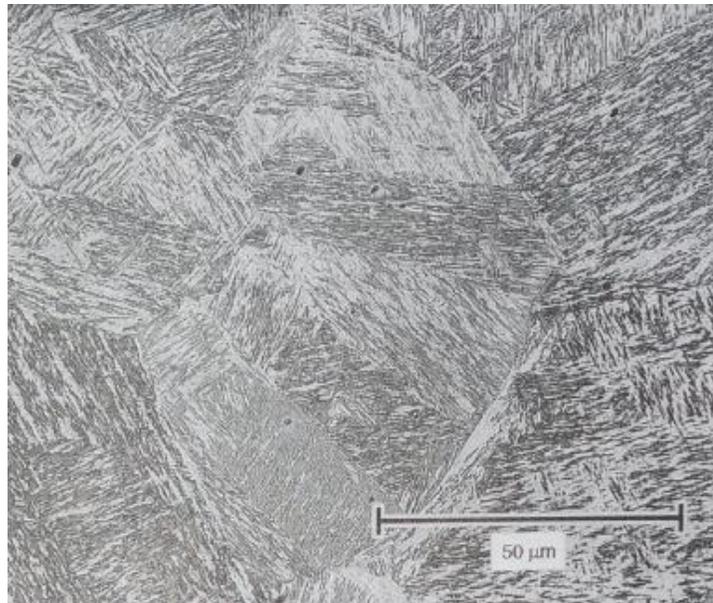


Fuente: Adaptado de [1].

- **Martensita:** Este componente se forma por un enfriamiento rápido (temple) de carbono o aceros de baja aleación a partir de la fase de austenita de alta temperatura. La martensita en esencia es una ferrita que está sobresaturada con carbono, esto significa que el carbono se disuelve en la ferrita mucho más allá de su límite de solubilidad a temperatura ambiente del 0,005% de C y por lo tanto el constituyente, ya no se va considerar ferrita debido al carbono sobresaturado. La martensita es un componente con una alta dureza, el temple de este se debe emplear entre 420 y 650 C, para permitir que parte del carbono se precipite como una fase de carburo siendo generalmente cementita. En la figura 8. muestra el ejemplo de martensita que se encuentra en aceros de bajo carbono, aproximadamente 0,6% de C. La martensita templada se puede observar en la Figura 9., en este tipo de micrografía los carburos (Cementita) aparecen como pequeñas partículas de grabado negro. En algunas ocasiones es difícil distinguir entre martensita templada y bainita, debido a su similitud metalográfica [1]. Su microestructura por lo general se presenta en forma de agujas cruzadas, sus átomos de hierro se encuentran en

los vértices y sus átomos de carbono se encuentran en las caras de las aristas, dando así una red cristalina tetragonal [3].

Figura 8. Microestructura de acero de bajo contenido en aluminio templado en agua que presenta martensita en láminas



Fuente: Adaptado de [1].

Figura 9. Microestructura de martensita templada que muestra pequeños carburos redondeados precipitados durante el tratamiento de templado



Fuente: Adaptado de [1].

### **3.2.4 Manufactura aditiva por soldadura por arco (WAAM)**

Para el entendimiento de la manufactura aditiva por soldadura por arco WAAM es necesario empezar por la manufactura aditiva la cual consiste en un método de producción digitalizada diseña y/o fabrica objetos previamente modelados en *software* de diseño asistido por computador **CAD** (*Computer-Aided Design*) y que mediante la deposición de capa por capa de material se logra conformar un objeto tridimensional. Posteriormente, el diseño CAD realizado previamente, se pasa a un *software* de fabricación asistida por computadora **CAM** (*Computer-Aided Manufacturing*). La unión de estas dos disciplinas conforma una tecnología denominada: diseño y manufactura asistida por computador **CAD/CAM** que ha permitido usar nuevas tecnologías en los computadores para mejorar el diseño, la

fabricación y desarrollo de los productos, ya que por medio de esta tecnología las piezas complejas, moldes, troqueles y prototipos son realizadas con mayor rapidez, precisión y menor costo [12]. Para la elaboración de un simulador de manufactura aditiva se requiere del diseño de la máquina virtual la cual va a trabajar con un código de Lenguaje de Mercado Extensible (“Extensible Markup Language” XML) el cual es un lenguaje de similar al Lenguaje de Marcas de Hipertexto (“Hyper Text Markup Language” HTML) y su desarrollo principal es compartir datos a través de diferentes sistemas, este código contiene toda la información insertada en el *software* optado para el simulador, como lo son los parámetros de la máquina, color, imágenes, orientación de los ejes entre otros [13].

Durante la ejecución de este proceso se utilizaron materiales metálicos, siendo de tal manera que se puede clasificar en el grupo de deposición directa de energía **DED**, el cual está basado en una fuente de energía concentrada, en un sustrato y en un flujo de material el cual intercepta en un punto focal común, por lo general en presencia de un gas protector. En este proceso se funde el material de aporte por acción de la concentración de energía y por consecuencia de las trayectorias programadas de la máquina esta genera alimentación de capa por capa formado un objeto 3D [14].

La tecnología WAAM busca como finalidad el poder alargar la vida útil de componentes sometidos a desgaste abrasivo a través de un tipo de recubrimiento. El proceso WAAM consiste fundamentalmente en una fuente de potencia, un sistema automático de alimentación de hilo (alambre de aporte metálico), un sistema robótico controlado mediante ordenador o máquina y algunos accesorios, como el sistema del gas de protección [14].

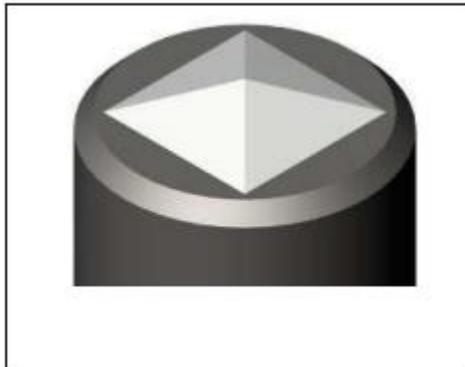
### **3.2.4 Dureza Vickers (HV)**

Se define dureza como una propiedad en la capa superficial de un material para resistir la deformación elástica, plástica y destrucción, esto se realiza con un esfuerzo de contacto, que es inferido por otro cuerpo más duro, el cual no sufre

deformaciones, estos cuerpos son comúnmente conocidos como: indentador o penetrador, y este tiene determinadas formas y dimensiones [15].

El ensayo de dureza Vickers consta de un indentador el cual es compuesto por una pirámide de diamante, con superficie de base cuadrada el cual forma un ángulo de  $\alpha = 136^\circ$  figura 10. Este ejerce una fuerza determinada en la probeta que va a desde de los 10g, y esta se calcula a partir de la medida de las diagonales y la fuerza aplicada [16].

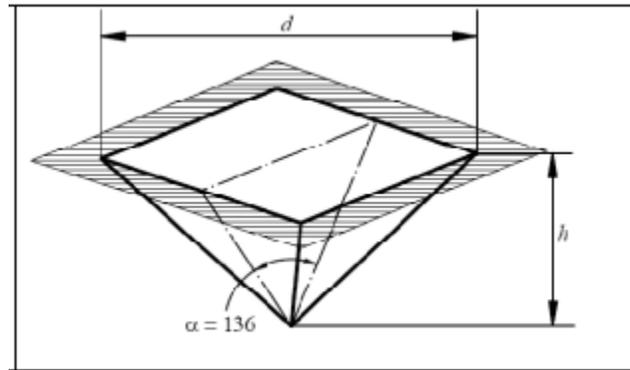
Figura 10. Indentador pirámide de diamante para ensayos Vickers (HV)



Fuente: Adaptado [15].

Algunas de las ventajas de este ensayo, son las improntas que resultan ser bien perfiladas y esto permite una mejor medición ya que esta es geoméricamente semejante figura 11. Esto permite que la dureza sea constante para un mismo material, independientemente de la carga. Este método es igual de efectivo para materiales blandos y duros, sobre todo para ensayos de probetas delgadas [15].

Figura 11. Impronta piramidal de dureza Vickers.



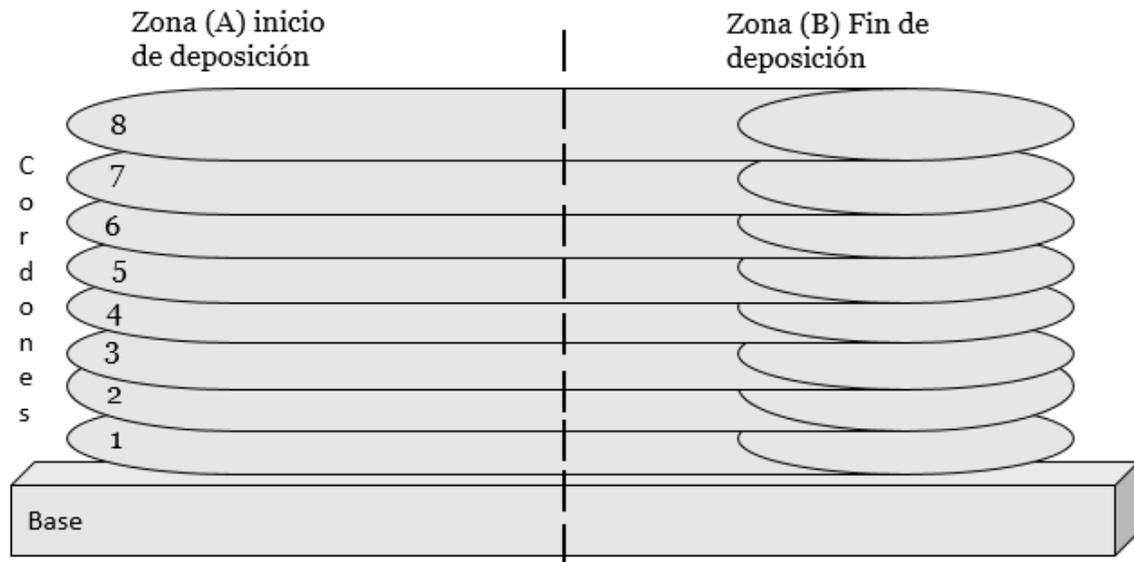
Fuente: Adaptado de [15].

## Capítulo 4

### Alistamiento de las probetas para Análisis Metalográfico

En este capítulo se darán a conocer los pasos utilizados para alistar las probetas resultantes del proceso de manufactura aditiva por soldadura por arco WAAM las cuales fueron extraídas de una misma muestra como se observa en la figura 12, para llevarlas a brillo espejo y luego realizar ataque químico para la revelación de su microestructura metalográfica, mediante una serie de actividades manuales, más ayudas electromecánicas, gracias a procesos tales como: cortantes, de arranque de viruta, abrasivos y exposición química.

Figura 12. Imagen ilustrativa de sustracción para la obtención de las probetas.



Fuente: Autor

## 4.1 Descripción de los procesos y el tipo de elementos mecánicos que intervienen en ellos.

Proceso de corte mediante un ataque perpendicular a los cordones depositados en placa base, quedando como resultado unas probetas en forma de “L”, con una máquina de corte con sierra circular dentada enfriada por agua e impulsada por motor eléctrico, Figura 13.

Figura 13. Cortadora metalográfica dentada enfriada por agua.



Fuente: Autor.

Proceso de secado de probetas mediante toallas de papel y mantenimiento de las estas mismas sin humedad a través de sílice en gel figura 14. Conocido como: desecante. Este nos permitió almacenar las probetas para protegerlas de condiciones ambientales y óxidos.

Ya que el gel de sílice funciona por adsorción de manera superficial. Además de eficaz y útil, es relativamente conveniente a nivel económico, lo que lo convierte en una buena opción para los laboratorios. Además, es un agente que podemos volver a regenerar a través de calentamiento, por lo cual su utilidad es mayor. El gel de sílice, en su composición, suele contener unos gránulos de sales de cobalto, lo que hace que podamos observar a simple vista el grado de hidratación que posee el gel, pues será de coloración azulada cuando se encuentre en forma anhidra y de coloración rosácea cuando, en cambio, se encuentre hidratado [17].

Figura 14. Recipiente con sílice en gel, para probetas.



Fuente: Autor.

El proceso de mecanizado por arranque de viruta fue utilizado para rectificar las caras, gracias a una planeadora conocida como bailarina, la cual va montada en el

husillo de una fresadora, para dar claridad en la figura 15. Es ilustrativa donde se muestran las partes de la fresadora en acción.

En el proceso de fresado se tiene en cuenta unos parámetros como son: la posición de ataque de la herramienta de corte respecto a la probetas, (recibe el nombre de alimentación de corte), El tiempo que le toma a la pieza de corte remover material del borde de la probeta, (la velocidad de corte), la velocidad a la que gira el husillo o rota en su propio eje, (se le conoce como velocidad de husillo), La velocidad en la que remueve material la herramienta de corte de la pieza, (se llama velocidad de avance), la profundidad en la que “socava material de la probeta”, la herramienta de corte en forma paralela a la misma probeta, (se le dice profundidad de corte axial) y cuando la profundidad de “socavado” es perpendicular a la probeta, (se le dice profundidad de corte radial).

Entendiendo lo anterior se establece, que fue una operación de fresado plano ya que las probetas en cuestión se fijaron en una prensa adaptada a la mesa de la fresadora, logrando así que cada una de las probetas durante la acción de remoción de material, estuviera expuesta la parte plana o es decir la cara a la cual se pretendía realizar el análisis. Cada probeta después de ser fijada en la prensa era atacada por la bailarina.

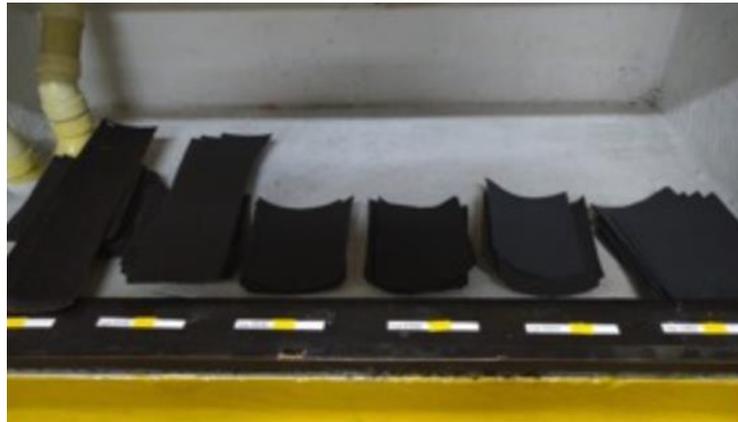
Figura 15. Herramienta de corte con el eje guía en paralelo a la superficie de las probetas.



Fuente: Autor.

Durante el desarrollo abrasivo manual, conocido como lijado con papel lija de agua, dando inicio desde el grano 60 a la de grano 2500 figura 16., realizando remoción de partículas de metal superficialmente en un sentido lineal alternando los ejes horizontales de la probeta, en movimiento de lado a lado. La figura 17, muestra ilustrativamente como se llevó a cabo este proceso, mientras la probeta se frota sobre el papel seleccionado y este a su vez recibe agua como lubricante para ejecutar la acción de remoción, para cada vez que se alternaba la probeta, se le realizaba un cambio de posición de  $90^\circ$  respecto a las marcas que el grano de la lija infligía sobre la cara plana a examinar, para borrar dichas líneas y generar un mejor acabado superficial.

Figura 16. Papel abrasivo utilizado para alistamiento de probetas.



Fuente: Autor.

Figura 17. Desbaste de las probetas con papel abrasivo lubricado con agua.



Fuente: Autor.

En el proceso abrasivo de acabado superficial fino, fue llevado a cabo mediante un paño para pulido metalográfico el cual es de un tejido con fibras texturizada esta

adherido a un disco metálico, y este es colocado en la pulidora metalográfica figura 18. Que es fijado gracias a atracción magnética. La pulidora impulsa cada disco gracias a motores independientes; los paños se humectan con agua por medio de unos ductos con reguladores de salida, también se agrega una levigación de alúmina preparada en un recipiente con dispensador, la cual es una disolución de óxido de aluminio en polvo con agua destilada, para obtener un mejor acabado y dar un aspecto de espejo. Se hace girar el paño a unas velocidades de 400 a 500 revoluciones y se ejecuta el pulido fino como se muestra ilustrativamente en la figura 19. en el lado (b) [18].

Figura 18. Pulidora metalográfica.



Fuente: Autor.

Figura 19. Descripción ilustrativa de alistamiento de probetas con papel lija y paño fino.

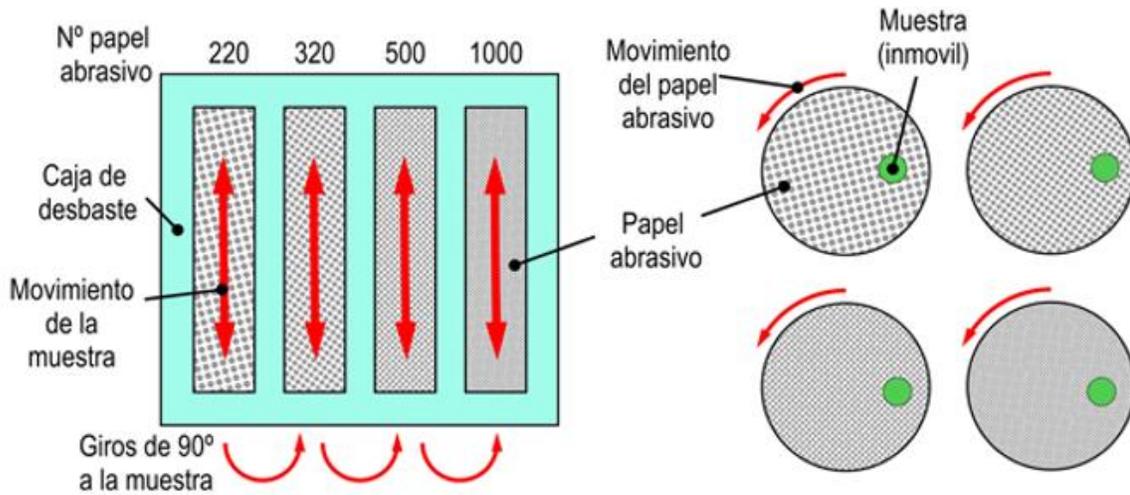


Figura (a)

Figura (b)

Fuente: Adaptado de [15].

Durante este procedimiento de pulido superficial y acabado a tipo brillo-espejo, fue realizado tanto en las partes Frontales y así como en las laterales, de ambas probetas, con un paño metalográfico figura 20, en el cual se depositaba paulatinamente durante el pulido alúmina con el dispensador de solución figura 21. Y lubricándose con agua.

Figura 20. Paño metalográfico, para acabado superficial a brillo espejo



Fuente: Autor

Figura 21. Dispensador de solución, con Alúmina.

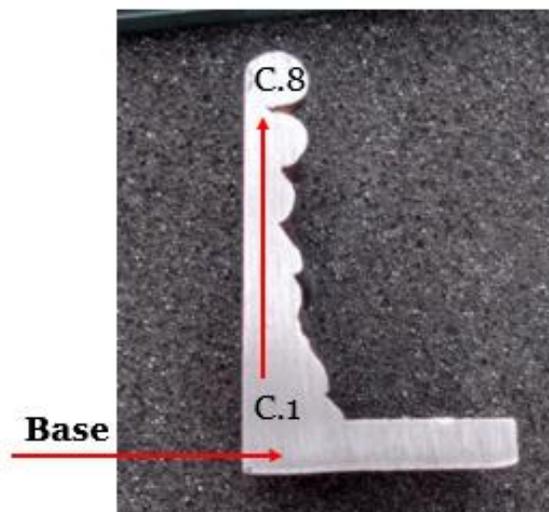


Fuente: Autor.

Los cordones se referencian partiendo de la base, siendo el cordón 1 el primer material aportado desde la superficie plana (base), y siendo el cordón 8 el ultimo material aportado, se muestra en la figura 22, y en la figura 23 vista frontal terminado tipo espejo.

C.#: Cordón y numero de fila.

Figura 22. Probeta A, Cara lateral con acabado de papel abrasivo número: 1000.



Fuente: Autor.

Figura 23. Probeta A, Cara frontal con acabado a brillo-espejo.



Fuente: Autor.

El ataque químico o electrolítico que se empleó tras los procedimientos de esmerilado y pulido buscando mejorar el contraste en las superficies, logrando así visualizar la microestructura, ya que ejerce una influencia controlada sobre la superficie permitiendo que los lentes del objeto óptico, en este caso el microscopio revele los límites de grano, fases o superficies del grano, eligiendo filtros ópticos en él. A fin de determinar las características estructurales verdaderas de la probeta, es necesario que los diferentes constituyentes estructurales, queden delineados con precisión y claridad. Esto se logra sometiendo a la pieza a la acción química de un reactivo, llamado Nital en nuestro caso, que está en unas condiciones cuidadosamente controladas para tenerlo concentrado al 3% de ácido nítrico disuelto en alcohol, durante un tiempo aproximado de 10 segundos.

El ataque químico requiere la inmersión de una muestra preparada, normalmente esmerilada (para visualizar la macro estructura) o con pulido fino (para visualizar la microestructura), en un fluido de ataque (reactivo).

El ataque para visualizar la macro estructura permite estudiar la superficie de la muestra a ojo o con lupa (ampliable hasta 25 aumentos). Mientras que el ataque para visualizar la microestructura permite la inspección microscópica a aumentos de hasta 1.000 veces (microscopio óptico) o más (microscopio electrónico).

El ataque en disolución permite realizar ataques específicos en los límites de grano, superficie de los granos y fases [19].

## **Capítulo 5**

### **Procedimiento de la toma de imágenes metalográficas y ensayo dureza**

En este capítulo describe el proceso que se llevó a cabo para la toma de fotos metalográficas en cada una de las secciones de las probetas bajo los lentes del microscopio Olympus GX41 figura 24. Esta fue la herramienta más fundamental para el desarrollo de este proyecto, ya que por su gran aumento en sus lentes se pudo obtener unas óptimas imágenes metalográficas, en cada uno de los cordones y así poder realizar un análisis más detallado.

Los cordones se referencian partiendo de la base, siendo el cordón 1 el primer material aportado desde la superficie plana (base), y siendo el cordón 8 el ultimo material aportado.

Figura 24. Microscopio metalográfico Olympus Gx41.

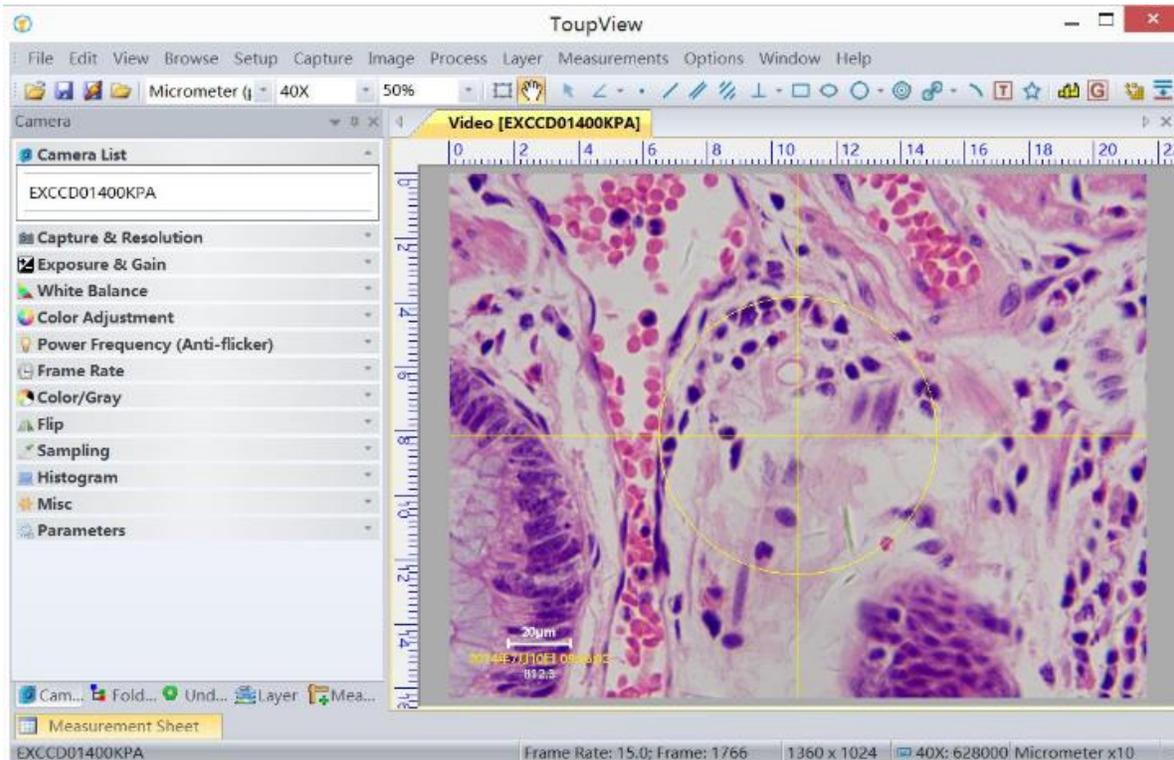


Fuente: Autor.

## 5.1 Toma de fotografías Metalográficas

Para el desarrollo durante la toma de las fotos seleccionamos dos probetas las cuales están nombradas: Probeta A y Probeta B. Durante este proceso fotográfico se utilizó el software Toupview figura 25., el cual nos permitió visualizar, y a su vez en tiempo real hacer una edición de contrastes de la imagen para obtener unas optimas fotografías metalográficas de las probetas obtenidas.

Figura 25. Interfaz Toup view.



Fuente: Adaptado de [20]

Este software nos permitió un óptimo desarrollo para nuestro proyecto, ya que su múltiple interfaz nos ofrecía una amplia edición de imagen y una gran variedad en los contrastes. Entre el diseño de interfaz encontramos:

- Los menús y las barras de herramientas bien organizados garantizan un funcionamiento rápido;
- El diseño único de 5 barras laterales -- Cámara, Carpetas, Deshacer/Rehacer, Capa, Medición se clasifican ordenadamente;
- Método de operación conveniente (menú contextual de doble clic o clic derecho) tanto como sea posible;
- Manual de ayuda detallado [20].

Para obtener una buena microscopía en los metales, es necesario tener en cuenta el haz luminoso que debe incidir sobre la superficie de la probeta a observar, esto se

debe hacer aproximadamente en un ángulo recto y reflejarse hacia el lente ocular como lo muestra la figura 26, esto debido a que los metales son opacos, y tener en cuenta esta técnica ayuda a observar mejor la microestructura, características del metal, el tamaño de grano y contenido de carbono [3].

Figura 26. Probeta A, con ángulo y superficie recta, reflejando hacia el lente del microscopio Olympus GX41



Fuente: Autor.

## 5.2 Pruebas de microdureza

Durante el proceso de ensayo de microdureza se utilizó un durómetro Future-Tech Fm-700 figura 27. Esta herramienta nos permitió encontrar la microdureza en los diferentes puntos de la probeta, permitiendo encontrar las diferencias entre cada cordón, y que el análisis estadístico sea más factible y detallado. Siendo esto vital para cumplir con el objetivo.

Figura 27. Durómetro Future-Tech Fm.700.



Fuente: Autor.

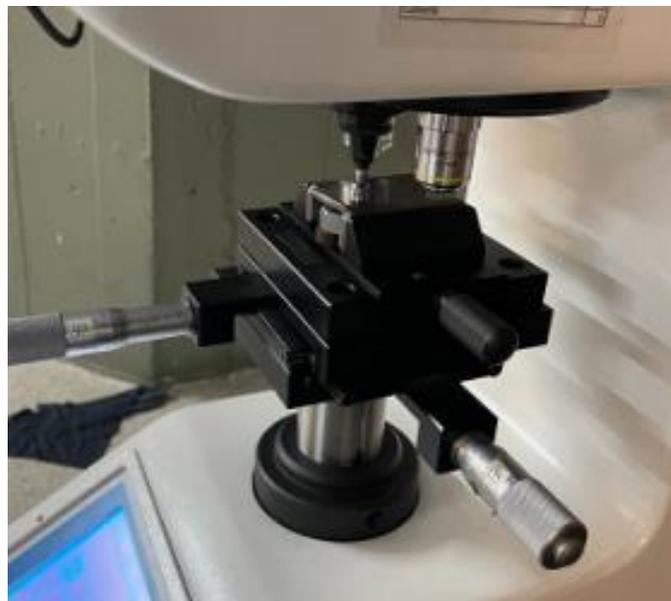
Para este ensayo utilizamos una carga de 100g figura 28., siendo esta la óptima para trabajar con nuestras probetas y facilitar el resultado en cada ensayo. De acuerdo con Calle y Henao, y como lo mencionaba anteriormente utilizar este ensayo de microdureza tiene grandes ventajas, ya que gracias a su indentador las improntas resultan bien perfiladas, permitiendo una mejor medición [15]. Es importante tener cuenta que la posición y que la superficie de la probeta esté totalmente plana a la hora de la ejecución del ensayo, como lo muestra la figura 29. Probeta A, con superficie y ángulo recto, en el durómetro Future-Tech Fm-700, incidiendo en el cordón 4. Los ensayos de microdureza fueron llevados a cabo en tres puntos de cada cordón, tanto lateral como frontal siendo estos tomados en los extremos y en la mitad de estos.

Figura 28. Carga del durómetro Future-Tech Fm-700



Fuente: Autor

Figura 29. Probeta A, en durómetro, incidiendo en el cordón 4.



Fuente: Autor.

# Capítulo 6

## Resultados metalográficos y Ensayo microdureza.

En este capítulo se describe la composición metalográfica capturada de los cordones y anexada en una tabla comparativa de apreciación para las probetas A y B.

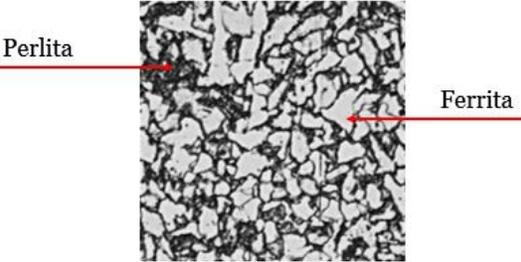
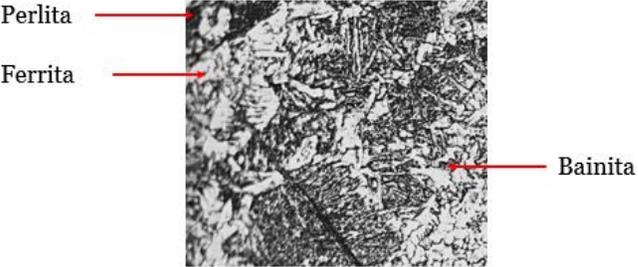
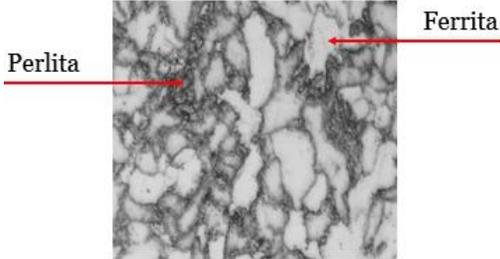
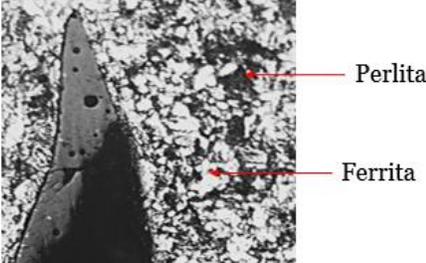
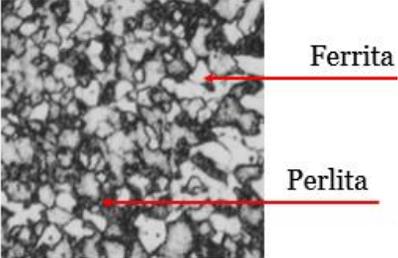
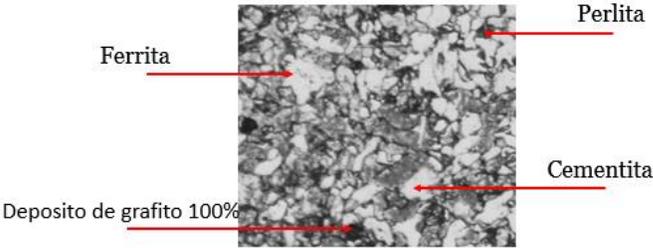
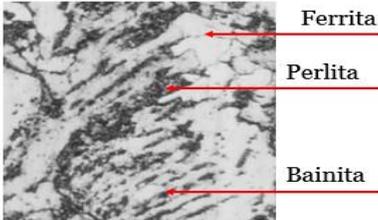
### 6.1 Análisis metalográfico

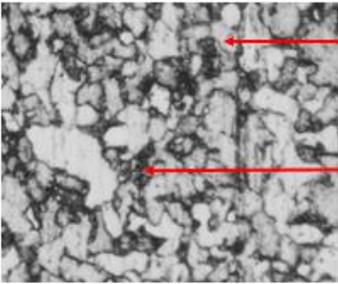
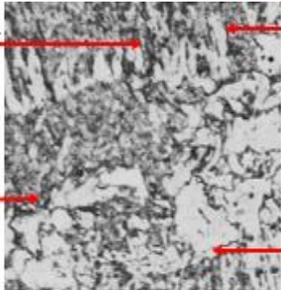
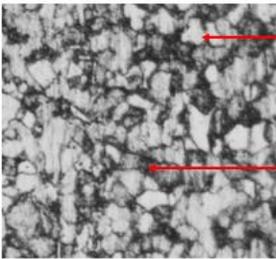
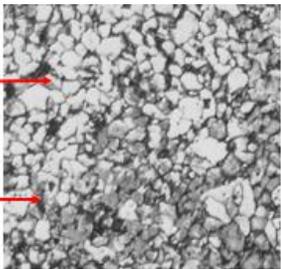
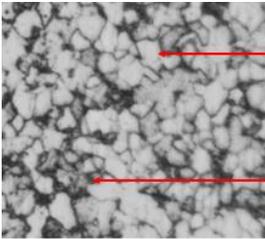
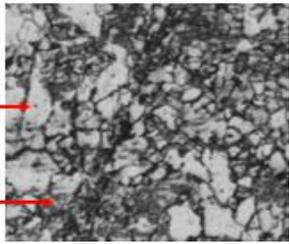
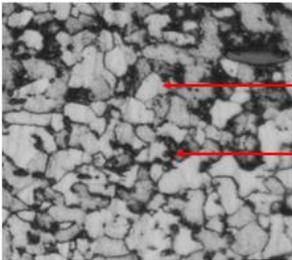
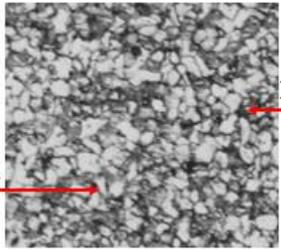
Durante el desarrollo de este proyecto encontramos una serie de fotografías, que como se explicaba en el anterior capítulo, fueron captadas por el microscopio Olympus GX41. Las imágenes a continuación describirán un análisis metalográfico, en el cual se encontró: Su composición y matriz metalográfica.

C#: Cordon y numero de fila.

Los cordones se referencian partiendo de la base, siendo el cordón 1 el primer material aportado desde la superficie plana (base), y siendo el cordón 8 el ultimo material aportado.

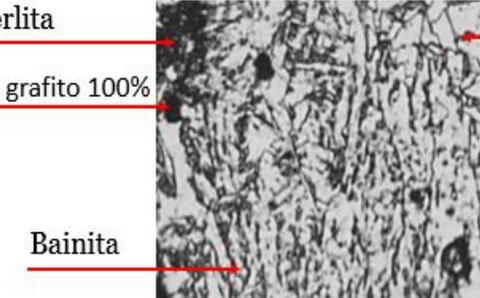
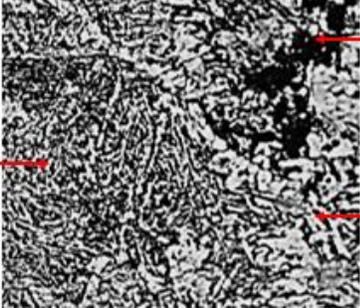
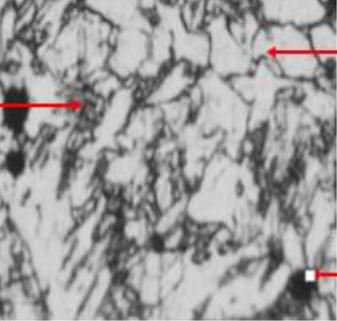
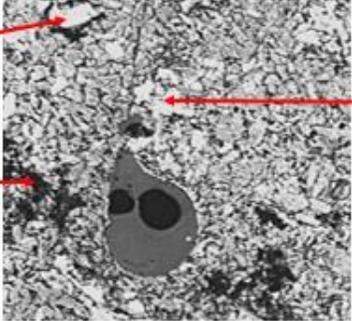
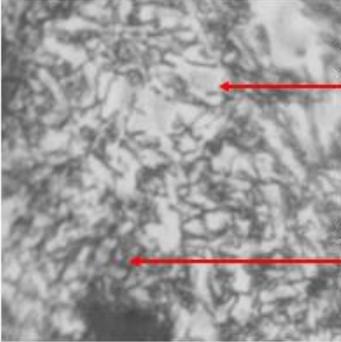
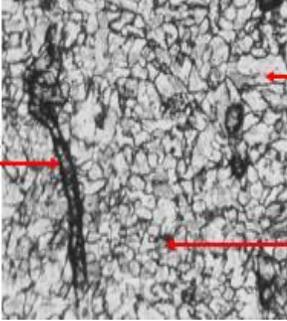
Tabla 1. Descripción metalográfica, del cordón 8 al 1, Cara Frontal. probetas A y B con aumento 10X en el microscopio.

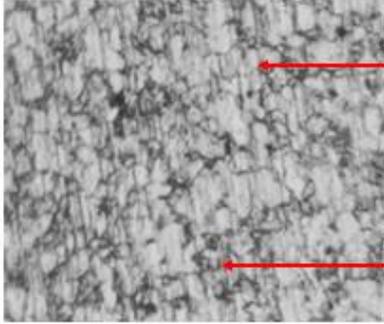
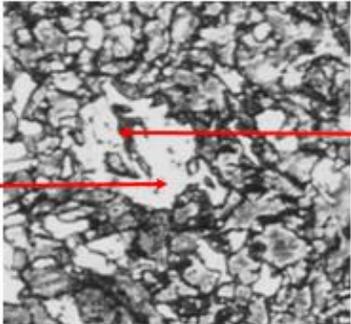
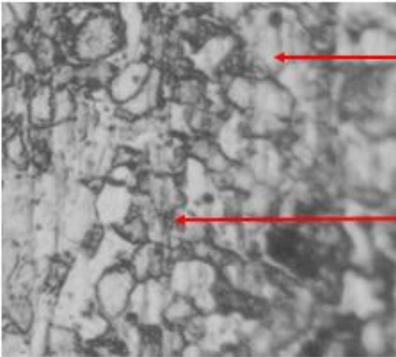
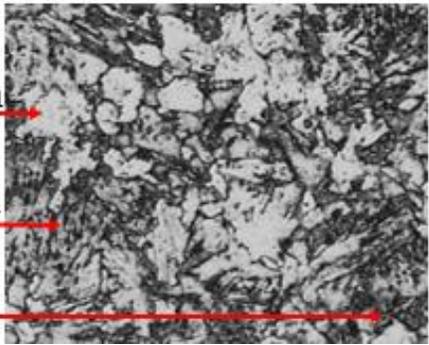
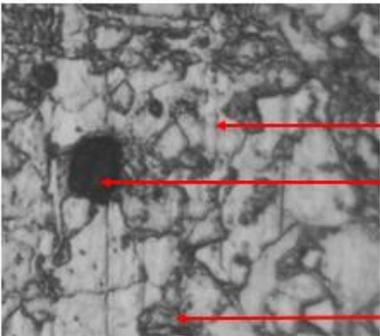
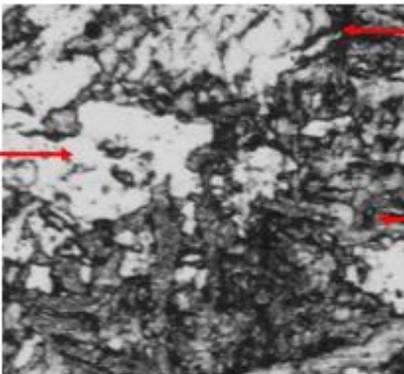
Probeta A	Probeta B
<p style="text-align: center;">C.8</p>  <p style="text-align: center;">Matriz Ferrito-perlítica</p>	<p style="text-align: center;">C.8</p>  <p style="text-align: center;">Matriz Bainítica</p>
<p style="text-align: center;">C.7</p>  <p style="text-align: center;">Matriz Ferrito-perlítica</p>	<p style="text-align: center;">C.7</p>  <p style="text-align: center;">Matriz Perlítica</p>
<p style="text-align: center;">C.6</p>  <p style="text-align: center;">Matriz Ferrito-perlítica</p>	<p style="text-align: center;">C.6</p>  <p style="text-align: center;">Matriz Perlítica</p>
<p style="text-align: center;">C.5</p>  <p style="text-align: center;">Matriz Bainítica</p>	<p style="text-align: center;">C.5</p>  <p style="text-align: center;">Matriz Bainítica</p>

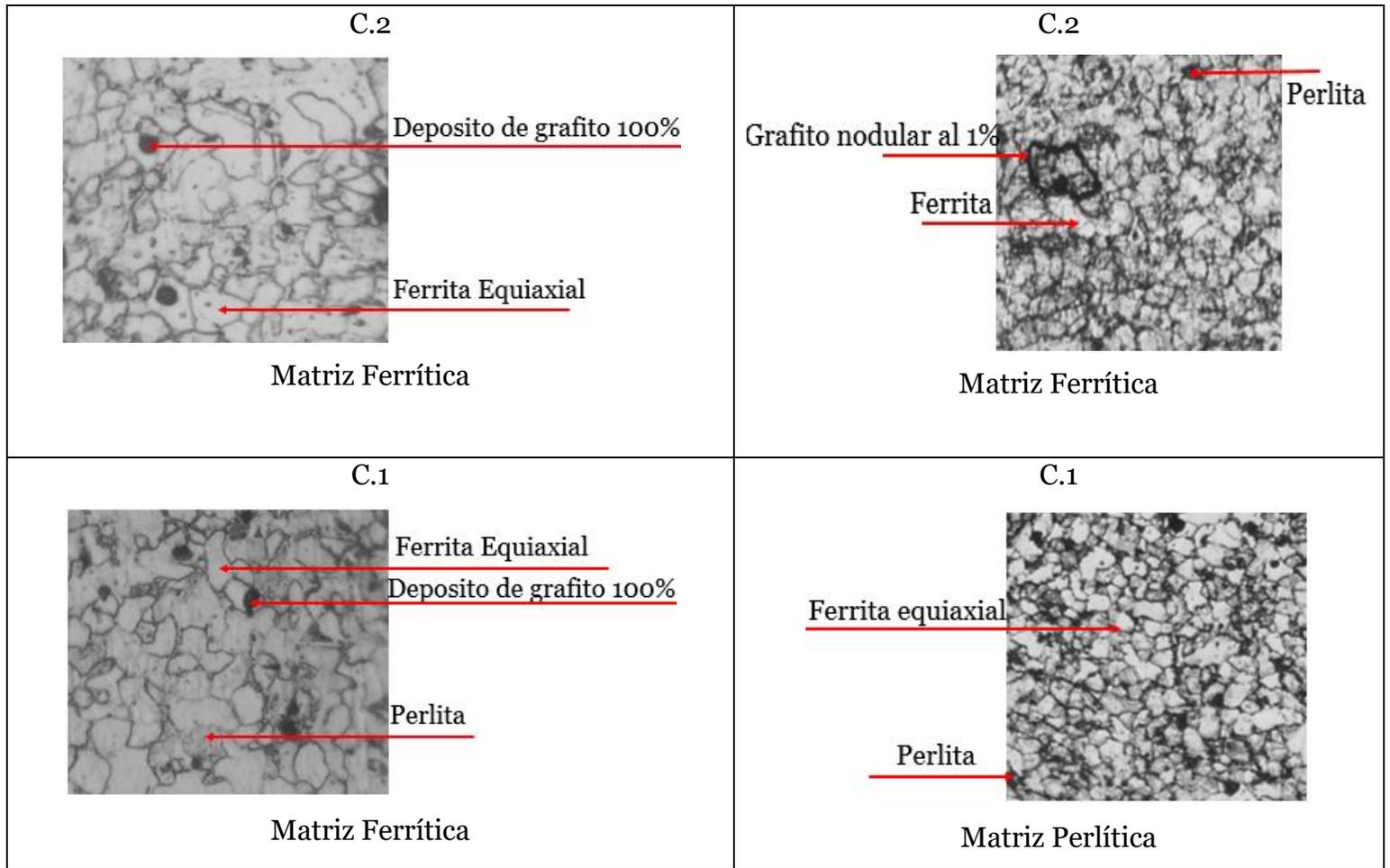
<p style="text-align: center;">C.4</p>  <p style="text-align: center;">Matriz Ferrítica</p>	<p style="text-align: center;">C.4</p>  <p style="text-align: center;">Matriz Perlítica</p>
<p style="text-align: center;">C.3</p>  <p style="text-align: center;">Matriz Ferrítica</p>	<p style="text-align: center;">C.3</p>  <p style="text-align: center;">Matriz Ferrítica</p>
<p style="text-align: center;">C.2</p>  <p style="text-align: center;">Matriz Ferrítica</p>	<p style="text-align: center;">C.2</p>  <p style="text-align: center;">Matriz Perlítica</p>
<p style="text-align: center;">C.1</p>  <p style="text-align: center;">Matriz Ferrítica</p>	<p style="text-align: center;">C.1</p>  <p style="text-align: center;">Matriz Perlítica</p>

Fuente: Autor

Tabla 2. Descripción metalográfica, del cordón 8 al 1, Cara Lateral. Probetas A y B, con aumento 10X en el microscopio.

<p>Probeta A</p>	<p>Probeta B</p>
<p style="text-align: center;">C.8</p>  <p style="text-align: center;">Matriz Bainítica</p>	<p style="text-align: center;">C.8</p>  <p style="text-align: center;">Matriz Bainítica</p>
<p style="text-align: center;">C.7</p>  <p style="text-align: center;">Matriz Ferrítica</p>	<p style="text-align: center;">C.7</p>  <p style="text-align: center;">Matriz Perlítica</p>
<p style="text-align: center;">C.6</p>  <p style="text-align: center;">Matriz Ferrítica</p>	<p style="text-align: center;">C.6</p>  <p style="text-align: center;">Matriz Perlítica</p>

<p style="text-align: center;">C.5</p>  <p style="text-align: center;">Matriz Ferrítica</p>	<p style="text-align: center;">C.5</p>  <p style="text-align: center;">Matriz Perlítica</p>
<p style="text-align: center;">C.4</p>  <p style="text-align: center;">Matriz Ferrítica</p>	<p style="text-align: center;">C.4</p>  <p style="text-align: center;">Matriz Bainítica</p>
<p style="text-align: center;">C.3</p>  <p style="text-align: center;">Matriz Perlítica</p>	<p style="text-align: center;">C.3</p>  <p style="text-align: center;">Matriz Perlítica</p>



Fuente: Autor.

## 6.2 Ensayo microdureza

En el desarrollo de este proyecto se realizó una serie de ensayos de microdureza, el cual fue llevado a cabo con el durómetro: Future-Tech Fm.700. Durante este proceso fueron realizados 3 ensayos de microdureza, tanto en la parte frontal figura 23., como en la parte lateral figura 22, siendo estos tomados en los extremos y en la mitad de cada cordón, permitiendo realizar una tabla de datos, para consiguiente realizar un análisis estadístico más detallado.

Tabla 3. Datos microdureza, Probeta A Cara lateral

<b>Ensayo Cordón, Probeta A, Cara Lateral</b>	<b>Microdureza (HV)</b>	<b>Microdureza (HV)</b>	<b>Microdureza (HV)</b>
1	155,1	150,3	141,2
2	134,1	121,9	127,7
3	148,6	138,5	131,7
4	133,1	140,3	153,8
5	144,5	164	150,4
6	166,8	160	158,8
7	158,5	133,8	150,1
8	138,8	157,9	152,9

Fuente: Autor

Tabla 4. Datos microdureza, Probeta A Cara Frontal

<b>Ensayo Cordón, Probeta A, Cara Frontal</b>	<b>Microdureza (HV)</b>	<b>Microdureza (HV)</b>	<b>Microdureza (HV)</b>
1	120,4	122,7	113,6
2	129,9	149,9	143,5
3	157,8	145,7	148,6
4	144,2	148,7	154
5	151,1	149,8	161,2
6	152,7	163,7	161,2
7	149,6	155,3	159,7
8	167,6	174,8	165,6

Fuente: Autor

Tabla 5. Datos microdureza, Probeta B Cara Lateral

<b>Ensayo Cordón, Probeta B, Cara Lateral</b>	<b>Microdureza (HV)</b>	<b>Microdureza (HV)</b>	<b>Microdureza (HV)</b>
1	134,0	122,3	129,4
2	150,5	144,6	143,0
3	147,1	154,6	167,3
4	173,6	175,1	173,8
5	184,4	178,5	173,3
6	173,4	176,5	168,8
7	143,7	148,8	157,3
8	148,3	156,4	168,3

Fuente Autor

Tabla 6. Datos microdureza, Probeta B Cara Frontal

<b>Ensayo Cordón Probeta B, Cara Frontal</b>	<b>Microdureza (HV)</b>	<b>Microdureza (HV)</b>	<b>Microdureza (HV)</b>
1	152,2	149,5	151,6
2	145,7	157,8	150,9
3	157,0	146,6	159,3
4	163,9	156,3	169,3
5	161,4	169,2	159,1
6	162,2	176,1	177,8
7	167,1	166,1	159,9
8	177,1	172,7	179,0

Fuente: Autor

Las tablas anteriores, tabla 3, 4, 5 y 6, estas representan los 3 valores obtenidos de microdureza en cada probeta y para cada cara respectivamente, en cada uno de los 8 cordones.

## Capítulo 7

### Análisis estadístico

El desarrollo de este capítulo es para dar cumplimiento con el objetivo de este proyecto, debido a esto es necesario realizar un análisis estadístico a través de una serie de tablas de Anova (Análisis de varianza de dos factores con varias muestras por grupo), entre otros datos como: el promedio, la desviación estándar (D.E), índice de confiabilidad (I.C), límite superior e inferior y grafica de variación entre cordones.

Para entender el contenido de las tablas ANOVA (Análisis de varianza de dos factores con varias muestras por grupo), de acuerdo con Dagnino, el ANOVA, es un conjunto de técnicas estadísticas de gran utilidad y ductilidad. Es útil cuando hay más de dos grupos que necesitan ser comparados, cuando hay mediciones repetidas en más de dos ocasiones, cuando los sujetos pueden variar en una o más características que afectan el resultado y se necesita ajustar su efecto o cuando se desea analizar simultáneamente el efecto de dos o más tratamientos diferentes [21].

El análisis de varianza nos permite ver que si el valor F es menor al valor crítico para F entre cordones tienen la misma dureza, en el caso de que el valor F es mayor al valor crítico para F entre cordones la dureza es diferente entre muestra, más si en columnas si el valor de F es mayor al valor crítico de F si es mayor son diferentes, pero si el valor de F es menor al valor crítico de F las durezas son estadísticamente iguales a lo largo de los cordones.

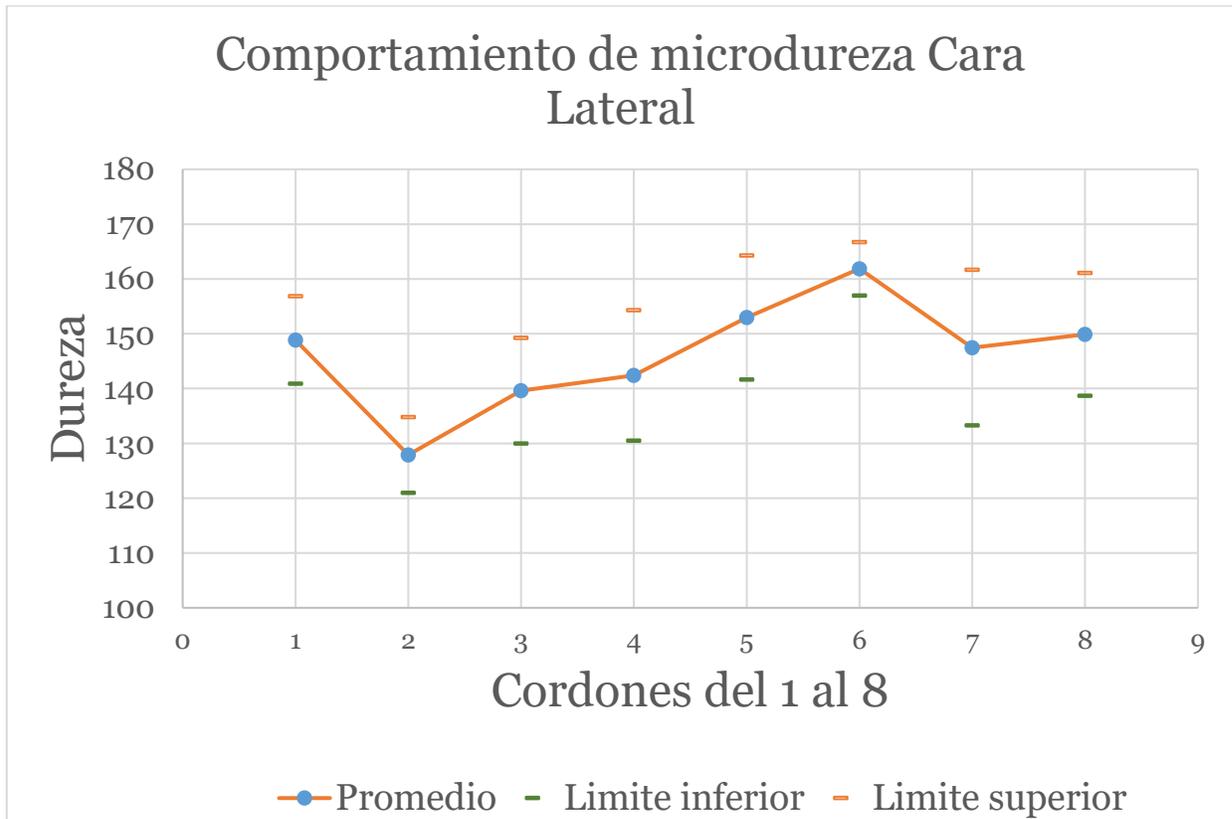
## 7.1 Designación de variables

Tabla 7. Tabla con valores, tomados probeta A, cara lateral

<b>Ensayo Probeta A, Cordón Lateral</b>	<b>Promedio microdureza (HV)</b>	<b>Desviación Estándar</b>	<b>Índice de Confiabilidad</b>	<b>Límite inferior (HV)</b>	<b>Límite superior (HV)</b>
1	148,87	7,06	7,99	140,88	156,86
2	127,90	6,10	6,91	120,99	134,81
3	139,60	8,50	9,62	129,98	149,22
4	142,40	10,51	11,89	130,51	154,29
5	152,97	10,00	11,32	141,65	164,28
6	161,87	4,31	4,88	156,98	166,75
7	147,47	12,56	14,21	133,26	161,68
8	149,87	9,90	11,21	138,66	161,07

Fuente: Autor

Figura 30. Comportamiento de la microdureza entre límite superior e inferior, Probeta A Cara Lateral.



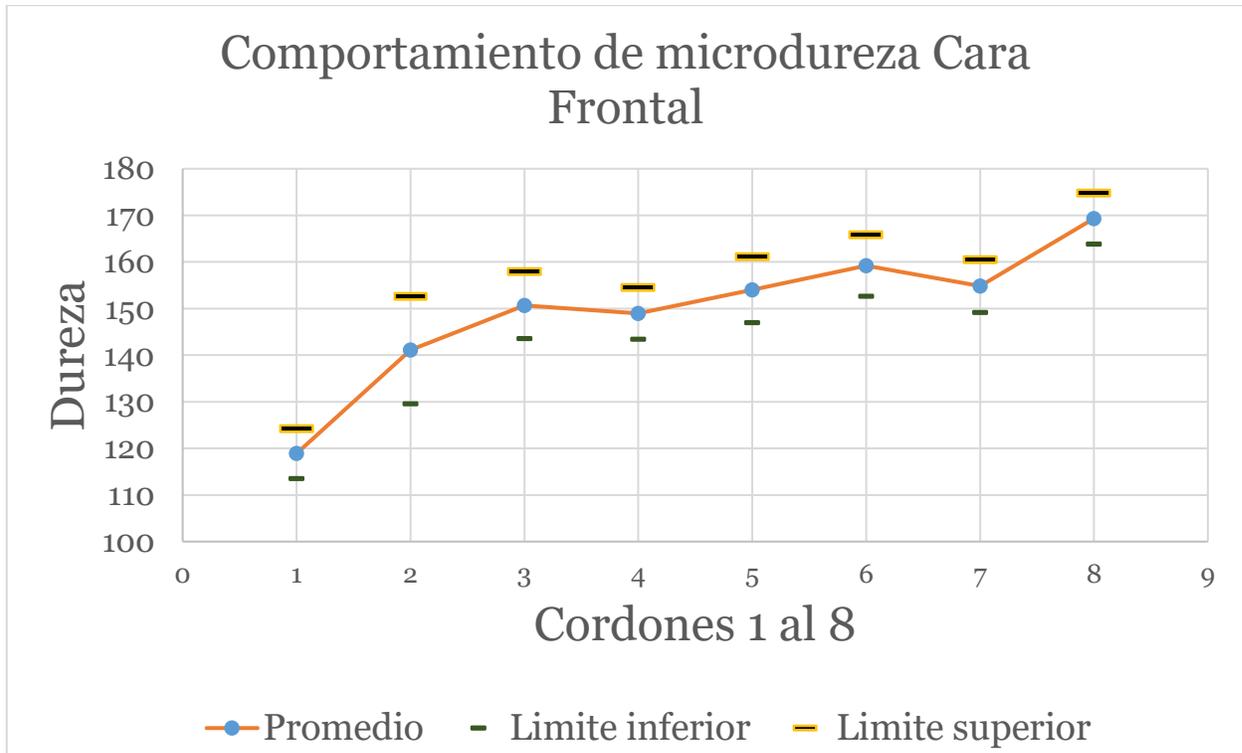
Fuente: Autor.

Tabla 8. Tabla con valores, tomados Probeta A, cara frontal

Ensayo Probeta A, Cordon Frontal	Promedio microdureza (HV)	Desviación Estándar	Índice de Confiabilidad	Límite inferior (HV)	Límite superior (HV)
1	118,90	4,73	5,35	113,55	124,25
2	141,10	10,21	11,56	129,54	152,66
3	150,70	6,32	7,15	143,55	157,85
4	148,97	4,91	5,55	143,42	154,52
5	154,03	6,24	7,06	146,97	161,09
6	159,20	5,77	6,53	152,67	165,73
7	154,87	5,06	5,73	149,14	160,60
8	169,33	4,84	5,48	163,86	174,81

Fuente: Autor.

Figura 31. Comportamiento de la microdureza entre límite superior e inferior, probeta A Cara Frontal.



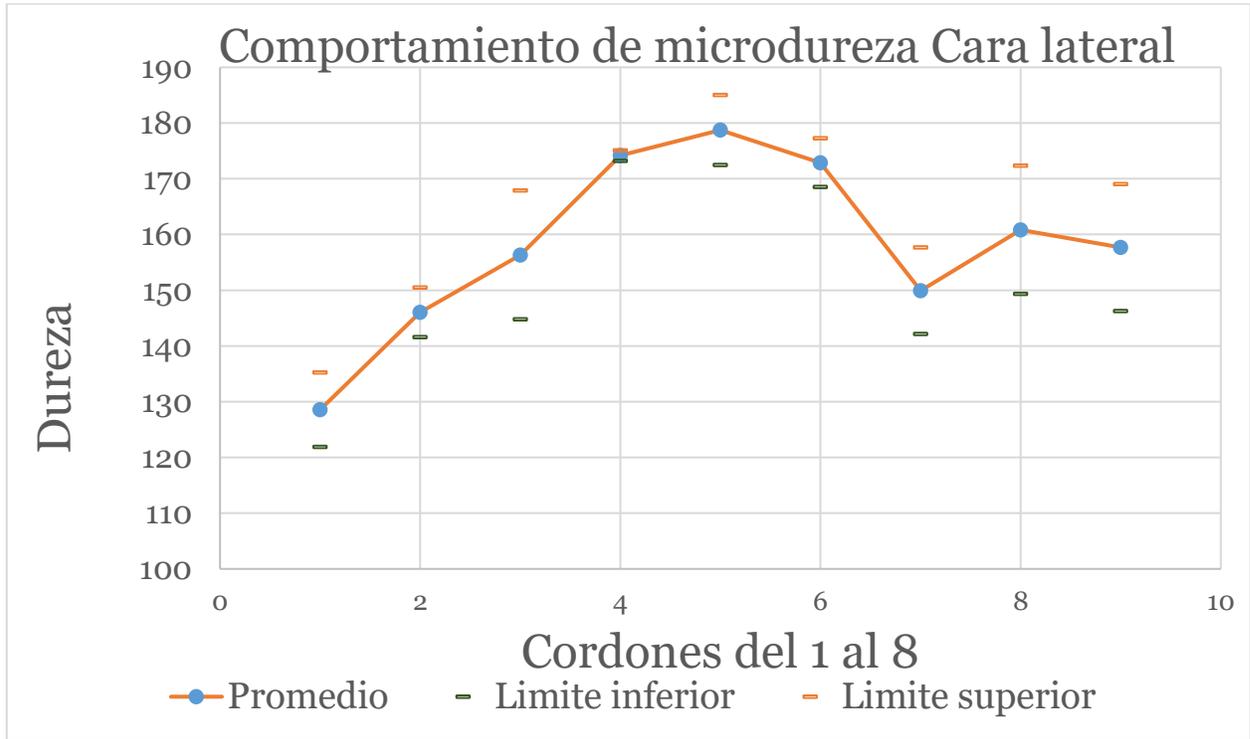
Fuente: Autor

Tabla 9. Tabla con valores, tomados probeta B cara lateral

Ensayo Probeta B Cordón Lateral	Promedio microdureza (HV)	Desviación Estándar	Índice de Confiabilidad	Límite inferior (HV)	Límite superior (HV)
1	128,57	5,89	6,67	121,90	135,24
2	146,03	3,95	4,47	141,56	150,50
3	156,33	10,21	11,55	144,78	167,89
4	174,17	0,81	0,92	173,25	175,09
5	178,73	5,55	6,28	172,45	185,02
6	172,90	3,87	4,38	168,52	177,28
7	149,93	6,87	7,77	142,16	157,71
8	157,67	10,06	11,38	146,28	169,05

Fuente: Autor.

Figura 32. Comportamiento de la microdureza entre límite superior e inferior, Probeta B Cara Lateral.



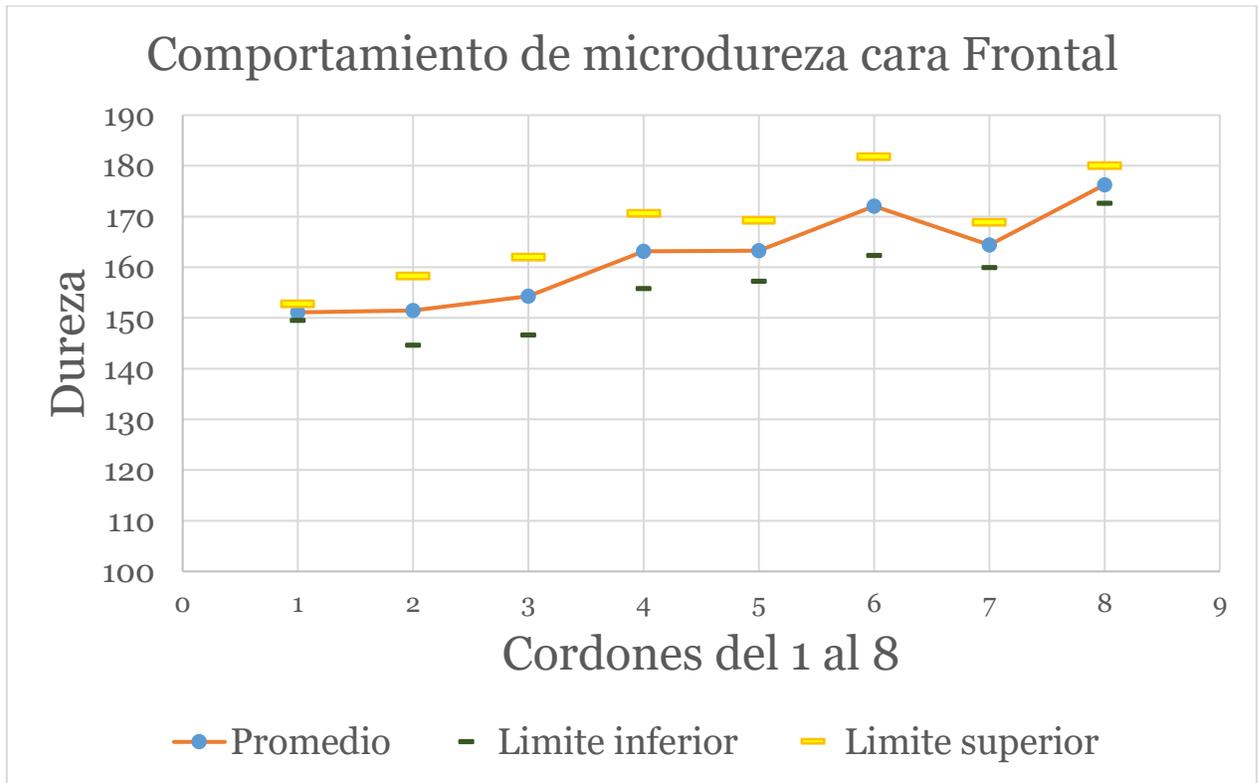
Fuente: Autor.

Tabla 10 Tabla con valores, tomados Probeta B, cara frontal.

Ensayo Probeta B, Cordon Frontal	Promedio microdureza (HV)	Desviación Estándar	Índice de Confiabilidad	Límite inferior	Límite superior
1	151,10	1,42	1,60	149,50	152,70
2	151,47	6,07	6,87	144,60	158,34
3	154,30	6,77	7,66	146,64	161,96
4	163,17	6,53	7,39	155,78	170,56
5	163,23	5,29	5,99	157,24	169,22
6	172,03	8,56	9,68	162,35	181,72
7	164,37	3,90	4,41	159,95	168,78
8	176,27	3,23	3,66	172,61	179,92

Fuente Autor

Figura 33. Comportamiento de la microdureza entre límite superior e inferior, Probeta B Cara Frontal.



Fuente: Autor.

## 7.2 Desarrollo

Tabla 11. Anova Probeta A, entre cordones Frontales y Laterales

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Muestra	4361,65	7	623,09	10,43	9,52E-07	2,31
Columnas	128,38	1	128,38	2,15	1,52E-01	4,15
Interacción	2392,42	7	341,77	5,72	2,38E-04	2,31
Dentro del grupo	1912,4	32	59,76			
Total	8794,8	47				

Fuente: Autor

Tabla 12. Anova de la Probeta B, entre cordones Frontales y Laterales.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Muestra	5778,05	7	825,44	21,87	1,6256E-10	2,31
Columnas	187,23	1	187,23	4,96	3,31E-02	4,15
Interacción	1999,30	7	285,61	7,57	2,1853E-05	2,31
Dentro del grupo	1207,51	32	37,73			
Total	9172,09	47				

Fuente Autor

Tabla 13. Anova Entre cordones Frontales, Probetas A vs B.

<b>ANÁLISIS DE VARIANZA</b>						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Muestra	5652,41	7,00	807,49	23,06	8,25E-11	2,31
Columnas	1819,17	1,00	1819,17	51,94	3,48E-08	4,15
Interacción	786,64	7,00	112,38	3,21	1,09E-02	2,31
Dentro del grupo	1120,71	32,00	35,02			
Total	9378,93	47,00				

Fuente: Autor

Tabla 14. Anova Entre cordones Laterales, Probetas A vs B.

<b>ANÁLISIS DE VARIANZA</b>						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Muestra	6030,51	7,00	861,50	15,26	1,37E-08	2,31
Columnas	2352,00	1,00	2352,00	41,67	2,92E-07	4,15
Interacción	2926,10	7,00	418,01	7,41	2,66E-05	2,31
Dentro del grupo	1806,08	32,00	56,44			
Total	13114,69	47,00				

Fuente: Autor

# Capítulo 8

## Resultados

Este trabajo de grado se planteó para el análisis metalográfico de unas probetas obtenidas a través de un proceso de manufactura aditiva por arco WAAM. Encontrando como resultado las diversas estructuras metalográficas, que nos permiten entender el proceso en el que fueron elaboradas dichas probetas, ejecutando como resultado las comparaciones metalográficas y análisis estadístico entre cordones de las Probetas obtenidas de dicho proceso aditivo (Probetas A y B).

### 8.1. Resultados Metalográficos

En la Tabla 1, se encuentra el estudio metalográfico que obtuvimos para las probetas A y B. El cual nos permitió analizar dichas probetas, designando cada fase encontrada en los cordones que la componen.

En las probetas A y B encontramos concentraciones de: ferrita, perlita, bainita, martensita y grafito, en los cordones del 8 al 1, con diferente matriz, la cual es la estructura que conforma los granos en cada uno de estos.

Partiendo del cordón 8 al 1, en la probeta A se obtuvo lo siguiente:

- Cordón 8: En la cara lateral se encuentra compuestos de ferrita, perlita, y un mayor compuesto de bainita, por lo que se designa, como matriz bainítica en esta parte del cordón. En la cara frontal solo se encuentra presencia de ferrita y perlita, con una matriz mixta ferrito-perlítica.
- Cordón 7: En la cara frontal y lateral se encuentran compuestos de perlita y ferrita, con una matriz ferrito-perlítica en la cara frontal, y una matriz ferrítica en la cara lateral. En el cordón lateral se encuentran algunos depósitos de grafito al 100%.

- Cordón 6: Tanto en la cara frontal y lateral, encontramos compuestos de perlita y ferrita, con una matriz mixta ferrito-perlítica en la cara frontal, y una matriz ferrítica en la cara lateral.
- Cordón 5: En la cara frontal encontramos componentes de ferrita, perlita y bainita, siendo esta última de mayor concentración, la matriz será bainítica. La cara lateral se encuentra en presencia de ferrita y perlita, y con una matriz ferrítica.
- Cordón 4: En este cordón encontramos componentes de ferrita, ferrita equiaxial y perlita, en ambas caras, con una matriz mixta ferrito-perlítica.
- Cordón 3: Tanto en la cara frontal y lateral se encuentra componentes de ferrita, ferrita equiaxial y perlita, con depósitos de grafito al 100% en el cordón lateral y una matriz ferrítica.
- Cordón 2: En la cara frontal encontramos componentes de ferrita equiaxial y perlita, con una matriz mixta ferrítica. La cara lateral se encuentra con el componente de Ferrita-equiaxial y con una matriz ferrítica.
- Cordón 1: En la cara frontal encontramos componentes de Ferrita equiaxial y Perlita, con una matriz mixta ferrítica. En la cara lateral se encuentra con componentes de ferrita-equiaxial, perlita y depósitos de grafito al 100%, con una matriz ferrítica.

Partiendo del cordón 8 al 1, en la probeta B se obtuvo lo siguiente:

- Cordón 8: En la cara lateral se encuentra compuestos de ferrita, perlita y de bainita, pero la forma ovoide de esta tiende a ser algo aguda, por lo que se designa, como matriz bainítica en esta parte del cordón. En la cara frontal, se encuentra presencia de ferrita, perlita y bainita, y al igual que la cara lateral se encuentra con una matriz bainítica.
- Cordón 7: En la cara frontal y lateral se encuentran compuestos de perlita y ferrita, con una matriz perlítica en ambas y con inclusión de austenita retenida en la cara frontal e inclusión de grafito al 100%.

- Cordon 6: En la cara frontal se encuentra ferrita, perlita y cementita con algunos depósitos de grafito al 100%. En la cara lateral, encontramos compuestos de perlita y ferrita, con deformaciones de hierro carbono, ambos comparten una matriz perlítica.
- Cordon 5: En la cara lateral se encuentra componentes de ferrita, perlita, con una matriz perlítica. En la cara frontal se encuentra en presencia de bainita, ferrita y con una matriz mixta de martensita y bainita, por su forma de aristas aún no tan agudas.
- Cordon 4: En este cordón encontramos componentes en la cara frontal de ferrita, bainita, perlita y martensita templada con una matriz bainítica. En su cara lateral se encuentra presencia de ferrita, perlita y bainita con una matriz perlítica debido a su mayor concentración de esta en su forma.
- Cordon 3: En la cara frontal se encuentra componentes de ferrita, ferrita equiaxial y perlita, con depósitos de grafito al 90%, en el cordón lateral se encuentra ferrita, perlita y bainita, comparten una matriz perlítica.
- Cordon 2: En la cara lateral se encuentra componentes de ferrita, perlita e inclusiones de grafito nodular al 1%, con una matriz ferrítica. En la cara frontal se encuentra con componentes de ferrita y perlita, con una matriz perlítica.
- Cordon 1: En la cara frontal se encuentra componentes de ferrita equiaxial y perlita, con una matriz mixta ferrito-perlítica. En la cara lateral se encuentra con componentes de ferrita-equiaxial, perlita, ferrita y depósitos de grafito al 100%, con una matriz ferrítica.

## 8.2. Resultados Estadísticos

Partiendo de la tabla 7, esta representa los valores designados de promedio, límite superior e inferior, desviación estándar y índice de confiabilidad, de la probeta A de la cara lateral en cada uno de los 8 cordones, esto permitió realizar la figura 30, en la cual se observa el comportamiento de la microdureza, usando el límite superior e inferior y el promedio hallado, en el cual está dado el cambio de microdureza en cada cordón, por esta razón se define que existe heterogeneidad entre cada cordón.

Siguiendo con la tabla 8, esta representa los valores designados de promedio, límite superior e inferior, desviación estándar y índice de confiabilidad, de la probeta A de la cara frontal en cada uno de los 8 cordones, esto permitió realizar la figura 31, en la cual se observa el comportamiento de la microdureza, usando el límite superior e inferior y el promedio hallado, en el cual está dado el cambio de microdureza en cada cordón, por esta razón se define que también existe heterogeneidad entre cordones en la cara frontal.

Continuado con la probeta B, tabla 9, esta representa los valores designados de promedio, límite superior e inferior, desviación estándar y índice de confiabilidad, de la probeta B de la cara lateral en cada uno de los 8 cordones, esto permitió realizar la figura 32 en la cual se observa el comportamiento de la microdureza, usando el límite superior e inferior y el promedio hallado, en el cual está dado el cambio de microdureza en cada cordón, por esta razón se define que existe heterogeneidad entre cada cordón y diferencia en aumento a la microdureza con respecto a la probeta A.

Siguiendo con la tabla 10 de la probeta B, esta representa los valores designados de promedio, límite superior e inferior, desviación estándar y índice de confiabilidad, de la probeta B de la cara frontal en cada uno de los 8 cordones, esto permitió realizar la figura 33, en esta se observa el comportamiento de la microdureza, la cual es más elevada con respecto a la probeta A en su cara frontal, e igualmente usando el límite superior e inferior y el promedio hallado, en el cual está dado el cambio de microdureza en cada cordón, por esta razón se define que también existe heterogeneidad entre cordones y con tendencia en aumento de la microdureza.

Continuando con las tablas ANOVA, por el factor estadístico encontramos variaciones entre los cordones debido al valor F y valor crítico de F, ya que la probabilidad de estas tablas describe si los resultados son concluyentes. Además, en la designación de muestras, estas tienen 7 grados de libertad lo cual representa las intersecciones de los 8 cordones en ambas probetas (A y B).

En la tabla 11. Anova probeta A, entre cordones frontales y laterales, encontramos en la designación de muestras que el valor F es mayor que el valor crítico de F, lo cual nos dice que entre los cordones existen diferencias entre sí, con una probabilidad concluyente y en la designación de columnas el valor F es menor al valor crítico para F, lo cual representa que las durezas obtenidas para cada cordón son iguales entre sí.

En la tabla 12 Anova probeta B, entre cordones frontales y laterales, encontramos en la designación de muestras que el valor F es mayor que el valor crítico de F, lo cual nos dice que entre los cordones existen diferencias entre sí, con una probabilidad concluyente en esta parte. En la designación de columnas el valor F y el valor crítico de F tienden a ser iguales por lo tanto quiere decir que para cada cordón las durezas tienden a ser iguales entre sí.

En la tabla 13. Anova entre cordones frontales probetas A vs B, se encontró en la designación de muestras que el valor de F es mayor que el valor crítico de F, lo cual se refiere que entre los cordones A y B frontales, tienden a ser diferentes, estadísticamente hablando. En la designación de columnas el valor F es mayor al valor crítico F, lo cual dice que ambas probetas (A y B cara frontal) tienen diferencias significativas en las durezas.

En la tabla 14. Anova entre cordones Laterales probetas A vs B, se encontró en la designación de muestras que el valor de F es mayor que el valor crítico de F, lo cual se refiere que entre los cordones A y B Laterales, tienden a ser diferentes, estadísticamente hablando. En la designación de columnas el valor F es mayor al valor crítico F, lo cual dice que ambas probetas (A y B cara lateral) tienen diferencias significativas en las durezas.

## **Capítulo 9**

# **Conclusiones y Recomendaciones.**

Durante el desarrollo del proyecto y después de la consecución de resultados se encontraron las siguientes conclusiones:

- Se determinaron e identificaron las fases metalográficas, en las probetas obtenidas por manufactura aditiva por soldadura por arco WAAM. Después de realizar un análisis estadístico con base a las microdurezas medidas, se encontró que existen diferencias significativas entre cada cordón y entre probetas dentro de la misma muestra.
- Se observó a través de la tabla 1 y la tabla 2, la descripción metalográfica de los cordones del 1 al 8 entre caras (frontal y lateral), permitiendo diferenciar los componentes y las fases, en cada una de estas. Esto permitió establecer que desde la pieza A inicia el proceso de adición de material y en la pieza B termina el mismo para cada uno de los cordones que las componen.
- Se determina que en el cordón número 5 y 8 existe un cambio de componentes en las dos probetas A y B. Esto se debe a causa de una pausa en el proceso aditivo, permitiendo que las probetas tengan su incremento de temperatura y un enfriamiento más prolongado con la temperatura ambiente, dado que en

el análisis metalográfico se observan estos cambios respecto a los demás cordones.

- Se comprobó que a través del análisis estadístico existen diferencias en microdureza desde el cordón 1 hasta el cordón número 8, lo que muestra que el proceso WAAM es heterogéneo entre cordones a las condiciones estudiadas. Por otra parte, se encontró que existe homogeneidad a lo largo del mismo cordón de cada probeta.
- Al analizar las probetas estudiadas y los resultados encontrados existe un lado de mayor disipación de calor, lo que explica las diferencias entre probetas y cordones de la misma muestra. Es así que en caso que se requiera realizar un trabajo de manufactura sustractiva, se debería realizar un tratamiento térmico de normalizado para dar uniformidad a la pieza y poder remover el material de exceso, sin daños excesivos a la herramienta y el equipo usado.

## **Recomendaciones**

Para dar una continuidad de grano y/o componentes metalográficos, se recomienda que, durante el proceso de adición, este sea continuo y exista un enfriamiento controlado para generar mejores características y propiedades mecánicas.

## Capítulo 10

### Referencias

- [1] American Society for Metals, *ASTM Metals Handbook Ninth Edition*, 9th ed. 1985.
- [2] Federación de enseñanza de Andalucía, “METALOGRAFÍA INTRODUCCIÓN,” 2011.
- [3] C. F. GUZMAN ORNELAS, “ANÁLISIS DE ACEROS POR MICROSCOPIA ÓPTICA,” INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA, Mexico, 2013.
- [4] Ipohorski Miguel and Bozzano Patricia B, “MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO,” *CIENCIA E INVESTIGACIÓN* , vol. Tomo 63, 2013.
- [5] E. H. Gabriel Calle, “Ensayo de dureza Vickers | SCI Control & Inspección”, [Online]. Available: <https://scisa.es/ensayo-dureza-vickers/>
- [6] “Fabricación aditiva en metales - WAAM | Lortek.” <https://www.lortek.es/es/ambitos-tecnologicos/fabricacion-aditiva-metales/waam>

- [7] B. Wu *et al.*, “A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement,” *J Manuf Process*, vol. 35, pp. 127–139, Oct. 2018, doi: 10.1016/J.JMAPRO.2018.08.001.
- [8] Morales Frank, “Conozca 3 tipos de investigacion.” Accessed: Jan. 19, 2023. [Online]. Available: [https://www.academia.edu/8101101/Conozca\\_3\\_tipos\\_de\\_investigacion](https://www.academia.edu/8101101/Conozca_3_tipos_de_investigacion)
- [9] Society of Automotive Engineer, “Clasificación de los Aceros.” <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn101.html>
- [10] Guevara Guillermo, “Diagrama Hierro Carbono,” 2013.
- [11] D. R. Askeland and W. J. Wright, “Ciencia e ingeniería de materiales 7ª edición.”
- [12] Carrasco Garcia Juan Carlos, “Tecnología avanzada del diseño y manufactura asistidos por computador-CAD/CAM,” vol. 4, Jun. 2006.
- [13] “Introducción a XML - XML: Extensible Markup Language | MDN.” [https://developer.mozilla.org/es/docs/Web/XML/XML\\_introduction](https://developer.mozilla.org/es/docs/Web/XML/XML_introduction)
- [14] Poveda Castillo Yeimy Caterine, “Desarrollo de un simulador de manufactura aditiva por soldadura por arco (WAAM) para el centro de mecanizado Leadwell V20i de la Fundación Universitaria Los Libertadores.”
- [15] Calle Gabriel and Henao Edison, “Dureza Vickers.”
- [16] “Ensayo de dureza Vickers: Vickers, ISO 6507, ASTM E92, ASTM E384 | ZwickRoell.” <https://www.zwickroell.com/es/sectores/metales/normas-para-metales/ensayo-de-dureza-vickers-iso-6507/>
- [17] “Agentes desecantes | La Guía de Química.” <https://quimica.laguia2000.com/acidos-y-bases/agentes-desecantes>
- [18] “Desbaste – Prácticas Metalograficas.” <http://www.derematerialia.com/practicas-metalograficas/desbaste/>
- [19] “Ataque metalográfico | Struers.com.” <https://www.struers.com/es-ES/Knowledge/Etching#etchingabout>
- [20] “ToupView.” <http://www.touptek.com/product/showproduct.php?lang=en&id=103>

[21] Dagnino Jorge, "ANÁLISIS DE VARIANZA," *Chil Anest*, 2014.