



UNIVERSIDAD LIBRE
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA MECÁNICA
TRABAJO DE GRADO



Autor del proyecto

Apellidos: Alarcón Roncancio

Nombres: Adriana Patricia

Código: 065141022

Cédula: 1074557998

Teléfono de contacto: 3138096026

Correo institucional: adrianap-alarconr@unilibre.edu.co

**INFLUENCIA DEL Nb Y Mo EN LA RESISTENCIA AL DESGASTE ABRASIVO
SEGÚN LA NORMA ASTM G65 EN FUNDICIONES DE HIERRO BLANCO.**

Director del proyecto

Nombres: Mauricio Alejandro

Apellidos: Sierra Cetina

Profesión: Ingeniero Mecánico

Correo institucional: mauricio.sierra@unilibre.edu.co

Adriana Patricia Alarcón Roncancio

Mauricio Alejandro Sierra Cetina

INFLUENCIA DEL Nb Y Mo EN LA RESISTENCIA AL DESGASTE ABRASIVO
SEGÚN LA NORMA ASTM G65 EN FUNDICIONES DE HIERRO BLANCO.

AUTOR: ADRIANA ALARCÓN RONCANCIO

UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C.

2019

INFLUENCIA DEL Nb Y Mo EN LA RESISTENCIA AL DESGASTE ABRASIVO
SEGÚN LA NORMA ASTM G65 EN FUNDICIONES DE HIERRO BLANCO.

AUTOR: ADRIANA ALARCÓN RONCANCIO

DIRECTOR:

MAURICIO ALEJANDRO SIERRA CETINA
MAESTRO EN CIENCIA DE LOS MATERIALES

CO-DIRECTOR:

ARNOLDO BEDOLLA JACUINDE
DORCTOR EN CIENCIA DE LOS MATERIALES
UNIVERSIDAD MICHOACANA SAN NICOLÁS DE HIDALGO
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN METALURGIA Y MATERIALES
MORELIA-MÉXICO

UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C.

2019

NOTA DE ACEPTACIÓN

FIRMA DEL TUTOR

FIRMA DEL JURADO

FIRMA DEL JURADO

DEDICATORIA

A Dios y a la Virgen María por sus bendiciones y su infinito amor siendo mi guía y fortaleza en este camino y el que falta por recorrer.

A mis padres, Victor Manuel Alarcón y Luz Marina Roncancio por brindarme amor, paciencia, apoyo incondicional y por todos sus esfuerzos y sacrificios, es un orgullo y un privilegio ser su hija.

A mis hermanas y sobrinos, por ser ejemplo a seguir, por sus consejos, motivación apoyo y alegría durante mi carrera profesional.

A mis abuelitos quienes me guían desde el cielo, por su apoyo y su amor el cual perdura en el corazón.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento.

Al Ingeniero Mauricio Sierra Cetina, por su colaboración, confianza y guía como director y amigo.

Al Doctor Arnoldo Bedolla Jacuinde, por llevar acabo el desarrollo de este proyecto, a su amplio conocimiento, experiencia y entusiasmo en este trabajo a la Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales de la Universidad de Michoacana San Nicolás de Hidalgo (UMICH) Morelia-México.

Al Ingeniero Simón Valdez Medina, por su apoyo, motivación, e impuso en este proceso.

A mis amigos por creer en mí y su incondicional apoyo.

RESUMEN

Siendo las fundiciones blancas materiales empleados en aplicaciones en las cuales la resistencia al desgaste debe ser su principal característica, es por esta razón que se buscan nuevas aleaciones que modifiquen esta propiedad, en este orden de ideas, la adición de elementos como el Mo y el Nb son una tecnología relativamente reciente que ha demostrado sus ventajas.

Varias referencias muestran combinaciones de estos elementos en proporciones de Nb menores al 0.5% y de Mo mayores al 3%, sin embargo, otros autores hablan de Nb 2% y Mn 1.3%, en este trabajo se fabricó una aleación con 2.5% C, y Nb, Mo cercanos al 1%. Para conseguir este objetivo se realizó una fundición blanca en tres etapas: balance de carga, simulación de proceso en ProCast y la fabricación del material. En cuanto a la caracterización microestructural se desarrolló mediante las técnicas de microscopía óptica convencional, SEM, DRX y la resistencia al desgaste abrasivo y al desgaste por deslizamiento, se evaluó mediante los ensayos Block-on-Ring según norma G77 y Dry sand/ rubber Wheel según norma G65.

Una vez realizado los ensayos y las pruebas se pudo observar un aumento en la dureza y en los valores de microdurezas de la matriz la cual proporciona un mejor soporte a los carburos que actúan frente a la remoción del material y de incrustaciones de partículas abrasivas. Este comportamiento se ve reflejado en una disminución de la pérdida de masa lo que es indicativo de un incremento de la resistencia al desgaste, efecto causado por la presencia de Nb y Mo. En los análisis se observa principalmente un comportamiento frágil por el desgarramiento y evidencia de flujo plástico causante de la menor pérdida de volumen que puede llegar a ser hasta del 15%.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	2
1.1 DESCRIPCIÓN	2
1.2 FORMULACIÓN.....	2
2. JUSTIFICACIÓN	3
3. OBJETIVOS.....	4
3.1 GENERAL.....	4
3.2 ESPECÍFICOS	4
4. MARCO REFERENCIAL	5
4.1 MARCO TEÓRICO.....	5
4.1.1 Fundiciones	5
4.1.2 Fundiciones Aleadas.....	6
4.1.3 Efecto de los Elementos de Aleación.....	7
4.1.4 Desgaste.....	8
4.2 MARCO CONCEPTUAL.....	9
4.3 ESTADO DEL ARTE	11
4.4 MARCO LEGAL Y NORMATIVO	15
5. DISEÑO METODOLÓGICO.....	16
5.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	16
5.1.2 Diseño de Experimentos	16
5.2.1 Realización de Balance de Carga.	18
5.2.2 Simulación del Proceso de Fundición	20
5.2.3 Fundición del Material.....	22
5.3 CORTE DE LAS BARRAS	24
5.4 ANÁLISIS QUÍMICO.....	25
5.5 REALIZACIÓN DE TRATAMIENTO TÉRMICO.....	25
5.6 METALOGRAFÍA.....	30
5.7 CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL	31
5.7.1 Microscopia Óptica Convencional.....	31
5.4.2 Microscopia Electrónica de Barrido	32

5.8 ENSAYO DE DUREZA ROCKWELL C.....	33
5.9 ENSAYO DE DESGASTE	34
5.9.1 Ensayo Dry Sand/Rubber Wheel 8 desgaste por abrasión	34
5.9.2 Desgaste por Deslizamiento	35
5.10 PERFILOMETRÍA.....	36
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS.	37
6.1 ANÁLISIS QUÍMICO.....	37
6.2 ANALISIS MICROESTRUCTURAL	37
6.2.1 Microscopia Óptica Convencional:.....	37
6.2.2 Microscopia Electrónica de Barrido	41
6.2.3 Difracción de Rayos X	49
6.3 DUREZA ROCKWELL C	51
6.4 ANÁLISI DE PERFILOMETRÍA.....	54
6.4.1 Desgaste por deslizamiento.....	54
6.4.2 Desgate abrasivo.....	60
7. CONCLUSIONES	72
8. RECOMENDACIONES	73
9. BIBLIOGRAFÍA.....	74
10. ANEXOS	78

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Esquemas de los cinco tipos de fundiciones: a) Fundición blanca. b) Fundición gris. C) Fundición maleables. d) Fundición dúctil. e) Fundición de grafito compacto.	5
Ilustración 2. Diagrama del Procedimiento.....	17
Ilustración 3. Elementos de Aleación.	20
Ilustración 4. Proceso de Llenado del Hierro Líquido.....	21
Ilustración 5. Proceso de Solidificación del Material.....	21
Ilustración 6. Proceso de Fundición.	23
Ilustración 7. Cortadora de metal, marca DEWALT modelo 28720-B3.	24
Ilustración 8. Rectificadora, marca EQUIPTOP modelo ESG-3AB18.....	24
Ilustración 9. Análisis Químico marca BRUKER modelo Q4 TASMAN.	25
Ilustración 10. Diagrama Evolución de Fases de Equilibrio Para la Fundición de Cr-V-Mo.	26
Ilustración 11. Diagrama de Transformación de Tiempo-Temperatura (TTT) Fundición Cr-V-Mo.	27
Ilustración 12. Diagrama Evolución de Fases de Equilibrio para la Fundición de Cr-V-Nb.	27
Ilustración 13. Diagrama de Transformación de Tiempo-Temperatura (TTT) Fundición Cr-V-Mo.	28
Ilustración 14. Horno Cámara marca CARBOLITE (1500°C).....	28
Ilustración 15. Probetas Tratadas Térmicamente Fundición de Cr-V-Mo y Cr-V-Nb.	29
Ilustración 16. Ciclo del Tratamiento Térmico de Desestabilización.	29
Ilustración 17. Elementos Para la Realización de Metalografía.....	30
Ilustración 18. Pulidora Metalográfica marca BUEHLER modelo metaserv 250.	31
Ilustración 19. Microscopio Óptico Convencional marca NIKON modelo EPIPHON 3000.	31
Ilustración 20. Microscopio Óptico Electrónico de Barrido Convencional marca JEOL modelo JSM-64000.	32
Ilustración 21. Equipo de Difracción de Rayos X marca BRUKER modelo D8 ADVANCE.	33
Ilustración 22. Impresión del Ensayo de Dureza Rockwell C (HRC) en el Material.	33
Ilustración 23. Durómetro para Medir Dureza Rockwell C (HRC) marca WILSON modelo 4JR.....	34
Ilustración 24. Máquina para Ensayos de Desgaste Abrasivo.....	35
Ilustración 25. Máquina para Ensayos de Desgaste por Deslizamiento con Geometría Block-on-Ring.....	36
Ilustración 26. Perfilómetro Óptico marca NANOVEA.....	36
Ilustración 27. Microestructura de Hierro Blanco Cr-V-Mo en Condición de Colada (a) 100X. (b) 200X. (c) 500X. (d) 1000X.....	38

Ilustración 28. Microestructura de Hierro Blanco Cr-V-Mo Tratado Térmicamente: (a) 100X. (b) 200X. (c) 500X. (d) 1000X.....	39
Ilustración 29. Microestructura de Hierro Blanco Cr-V-Nb en Condición de Colada (a) 100X. (b) 00X. (c) 500X. (d) 1000X.....	40
Ilustración 30. Microestructura de Hierro Blanco Cr-V-Nb Tratada Térmicamente (a) 100X. (b) 200X. (c) 500X. (d) 1000X.....	41
Ilustración 31. Microscopia Electrónica de Barrido del Hierro Blanco Cr-V-Mo en Condición de Colada: (a) 500X. (b) 1000X.....	42
Ilustración 32. Microscopia Electrónica de Barrido del Hierro Blanco Cr-V-Mo Tratado Térmicamente. (a) 500X. (b) 1000X.....	42
Ilustración 33. EDS del Hierro Blanco Cr-V-Mo.....	43
Ilustración 34. Mapeo Químico General del Hierro Blanco Cr-V-Mo. (a) Zona Analizada. (b) Mapeo.....	43
Ilustración 35. Mapeos Químicos del Hierro Blanco Cr-V-Mo.....	44
Ilustración 36. Mapeos Químicos del Hierro blanco Fe-C.....	45
Ilustración 37. Microscopia Electrónica de Barrido del Hierro Blanco Cr-V-Nb en Condición de Colada. (a) 500X. (b) 1000X.....	46
Ilustración 38. Microscopia Electrónica de Barrido del Hierro Blanco Cr-V-Nb Tratado Térmicamente. (a) 500X. (b) 1000X.....	46
Ilustración 39. EDS del Hierro Blanco Cr-V-Nb.....	47
Ilustración 40. Mapeo Químico General del Hierro Blanco Cr-V-Nb. (a) Zona Analizada. (b) Mapeo.....	48
Ilustración 41. Mapeos Químicos del Hierro Blanco Cr-V-Nb.....	48
Ilustración 42. Mapeo Químico del Hierro blanco C-Fe.....	49
Ilustración 43. Difractograma de la Muestra del Hierro Blanco Cr-V-Mo, se Observa en Condiciones de Colada y Tratada Térmicamente.....	50
Ilustración 44. Difractograma de la Muestra del Hierro Blanco Cr-V-Nb, se muestra en Condiciones de Colada y Tratada Térmicamente.....	51
Ilustración 45. Huella de Desgaste por Deslizamiento de la fundición Cr-V-Mo en Condición de Colada a una carga de 25N.....	55
Ilustración 46. Parámetros de Amplitud- Perfil de Rugosidad de la Huella de Desgaste por Deslizamiento de la función Cr –V- Mo en Condición de Colada a una carga de 25N.55	
Ilustración 47. Huella de Desgaste por Deslizamiento de la fundición Cr-V-Nb en Condición de Colada a una carga de 25N.....	56
Ilustración 48. Parámetros de Amplitud- Perfil de Rugosidad de la Huella de Desgaste por Deslizamiento de la función Cr –V- Nb en Condición de Colada a una carga de 25N.56	
Ilustración 49. Gráfica comparativa del desgaste por deslizamiento en las dos funciones con una misma carga de 25N.....	57
Ilustración 50. Huella de Desgaste por Deslizamiento de la fundición Cr-V-Mo en Condición de Colada a una carga de 103N.....	57
Ilustración 51. Parámetros de Amplitud- Perfil de Rugosidad de la Huella de Desgaste por Deslizamiento de la función Cr-V- Mo en Condición de Colada a una carga de 103N.58	
Ilustración 52. Huella de Desgaste por Deslizamiento de la fundición Cr-V-Nb en Condición de Colada a una carga de 103N.....	58

Ilustración 53. Parámetros de Amplitud- Perfil de Rugosidad de la Huella de Desgaste por Deslizamiento de la función Cr -V- Nb en Condición de Colada a una carga de 103N.	59
Ilustración 54. Gráfica comparativa del desgaste por deslizamiento en las dos funciones con una misma carga de 103N.	59
Ilustración 55. Huella de desgaste abrasivo aleación Cr-V-Mo a una carga de 58N.	60
Ilustración 56. Parámetros de Amplitud- Perfil de Rugosidad de la Huella de Desgaste abrasión de la función Cr -V- Mo en Condición de Colada a una carga de 58N.	61
Ilustración 57. Huella de desgaste abrasivo aleación Cr-V-Nb a una carga de 58N.....	61
Ilustración 58. Parámetros de Amplitud- Perfil de Rugosidad de la Huella de Desgaste abrasión de la función Cr -V- Nb en Condición de Colada a una carga de 58N.....	62
Ilustración 59. Gráfica comparativa del desgaste abrasivo en las dos funciones con una misma carga de 58N.....	63
Ilustración 60. Huella de desgaste abrasivo aleación Cr-V-Mo a una carga de 68N.	63
Ilustración 61. Parámetros de Amplitud- Perfil de Rugosidad de la Huella de Desgaste abrasión de la función Cr -V- Mo en Condición de Colada a una carga de 68N.	64
Ilustración 62. Huella de desgaste abrasivo aleación Cr-V-Nb a una carga de 68N.....	64
Ilustración 63. Parámetros de Amplitud- Perfil de Rugosidad de la Huella de Desgaste abrasión de la función Cr -V- Nb en Condición de Colada a una carga de 68N.....	65
Ilustración 64. Gráfica comparativa del desgaste abrasivo en las dos funciones con una misma carga de 68N.....	65
Ilustración 65. Huella de desgaste abrasivo aleación Cr-V-Mo a una carga de 84N.	66
Ilustración 66. Parámetros de Amplitud- Perfil de Rugosidad de la Huella de Desgaste abrasión de la función Cr -V- Mo en Condición de Colada a una carga de 84N.	66
Ilustración 67. Huella de desgaste abrasivo aleación Cr-V-Nb a una carga de 84N.....	67
Ilustración 68. Parámetros de Amplitud- Perfil de Rugosidad de la Huella de Desgaste abrasión de la función Cr -V- Nb en Condición de Colada a una carga de 84N.....	67
Ilustración 69. Gráfica comparativa del desgaste abrasivo en las dos funciones con una misma carga de 84N.....	68
Ilustración 70. Huella de desgaste abrasivo aleación Cr-V-Mo a una carga de 93N 68	68
Ilustración 71. Parámetros de Amplitud- Perfil de Rugosidad de la Huella de Desgaste abrasión de la función Cr -V- Nb en Condición de Colada a una carga de 93N.....	69
Ilustración 72. Huella de desgaste abrasivo aleación Cr-V-Nb a una carga de 93N.....	69
Ilustración 73. Parámetros de Amplitud- Perfil de Rugosidad de la Huella de Desgaste abrasión de la función Cr -V- Nb en Condición de Colada a una carga de 93N.....	70
Ilustración 74. Gráfica comparativa del desgaste abrasivo en las dos funciones con una misma carga de 93N.....	71

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición Química del Ferro-Vanadio.....	18
Tabla 2. Composición Química del Ferro-Molibdeno.....	18
Tabla 3. Composición Química del Sorel.....	18
Tabla 4. Balance de Carga Cr, V, Mo.....	19
Tabla 5. Balance de Carga Cr, V, Nb.....	19
Tabla 6. Resultado de Análisis Químico Fundición Cr-V-Mo.....	37
Tabla 7. Resultado de Análisis Químico Fundición Cr-V-Nb.....	37
Tabla 8. Dureza Rockwell C (HRC) Hierro Blanco en Condición de Colada Cr-V-Mo.....	51
Tabla 9. Resultado del Ensayo de Dureza Rockwell C (HRC) Hierro Blanco en Condición de Colada Cr-V-Mo.....	51
Tabla 10. Dureza Rockwell C (HRC) Hierro Blanco en Condición de Tratamiento Térmico Cr-V-Mo.....	52
Tabla 11. Resultado del Ensayo de Dureza Rockwell C (HRC) Hierro Blanco en Condición de Tratamiento Térmico Cr-V-Mo.....	52
Tabla 12. Dureza Rockwell C (HRC) Hierro Blanco en Condición de Colada Cr-V-Nb.....	52
Tabla 13. Resultado del Ensayo de Dureza Rockwell C (HRC) Hierro Blanco en Condiciones de Colada Cr-V-Nb.....	52
Tabla 14. Dureza Rockwell C (HRC) Hierro Blanco en Condición de Tratamiento Térmico Cr-V-Nb.....	53
Tabla 15. Resultado del Ensayo de Dureza Rockwell C (HRC) Hierro Blanco en Condición de Tratamiento Térmico Cr-V-Nb.....	53
Tabla 16. Resultados Desviación estándar del Ensayo de Dureza Rockwell C (HRC) Hierro Blanco en Condición de Colada y Tratamiento Térmico.....	53

LISTA DE ANEXOS

Anexo A.....	78
Anexo B.....	79

LISTA DE SIMBOLOS

Cr	Cromo.
Nb	Niobio.
Mo	Molibdeno.
C	Carbono.
V	Vanadio.
Fe	Hierro.
Fe-V	Ferrovandio.
Fe-Nb	Ferroniobio.
Fe-Mo	Ferromolibdeno.
VC	Carburo de Vanadio.
HRC	Dureza Rockwell C
α	Ferrita.
γ	Austenita.
Fe_3C	Cementita.
m	Metros.
Cm	Centímetros.
μm	Micras.
gr	Gramos.
N	Newton.
RPM	Revoluciones por Minuto.
s	Segundos.
M	Masa.
mm^3	Volumen.
%	Porcentaje.
°	Grados.
°C	Grados centígrados.

INTRODUCCIÓN

La fundición de hierro son aleaciones de hierro/carbono con un contenido de porcentaje del 2 al 5%, disperso y combinado bajo la forma de cementita, formada por dendritas de austenita transformadas a perlita en una matriz ledeburita, su matriz puede ser ferrítica o perlítica. Se caracteriza por la facilidad de ser vertida en moldes para la realización de piezas y su fragilidad a deformaciones plásticas.

Esta es implementada en cuerpos moledores, como la fabricación de martillos, trituradores y taladros de perforación entre otros, por su alta resistencia frente al desgaste abrasivo, con un gran volumen de carburos eutécticos en la formación de su microestructura aportando un alto nivel de dureza, debido a su condición bajo la cual es sometido y expuesto en ambiente de desgaste severo en la industria minera y petrolífera.

Este desgaste se presenta al entrar en contacto dos superficies que realizan una interacción entre partículas, provocando daños superficiales esta magnitud de daño se debe a las condiciones ambientales, la fuerza y velocidad ejercida por ambas, generando daño parcial o total del instrumento, este tipo de casos se presenta de maneras diferentes según la condición de operación.

En el presente trabajo se analizará la influencia del Nb y Mo en la resistencia al desgaste abrasivo según la norma ASTM G65 en fundiciones de hierro blanco.

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

1.1 DESCRIPCIÓN

El hierro blanco como aleación ferrosa tiene amplia gama de propiedades, siendo utilizada en la fabricación de cuerpos moledores y trituradores, respecto a su condición bajo la cual es sometido y expuesto en ambientes de desgaste severo, su uso requiere resistencia a este siendo un parámetro importante en su vida útil.

Con base en los antecedentes diferentes autores trabajan con la fundición de hierro en la fabricación y caracterización microestructural de una aleación para aplicaciones de desgaste el autor ^[1] realiza una composición de 5%Cr, 5%V, 3%C, 1,3%Mo, 1%Ti, 0,5%Si, 0,5%Mn, donde hace un tratamiento térmico y se obtiene presencia de carburos en la matriz que actuaron como escudo frente a las incrustaciones. El autor ^[5] fabrica una fundición de composición 2%Nb, 2%V, 2%Ti, 17%Cr, después de realizados los tratamientos térmicos se evidencia una mejora considerable frente a la abrasión, esto debido a la transformación de la matriz a autenítica a martensita.

Es por eso que se busca modificar en su composición la variación de las propiedades para cumplir con las necesidades de su servicio, por lo tanto, la presente investigación tiene previsto realizar la aleación Cr- V- Nb y Cr-V-Mo, con el fin de observar las diferentes reacciones y propiedades mecánicas que se pueden llegar a obtener de la fundición blanca aleada.

En función a lo ya mencionado no se sabe la influencia que tendrá en las propiedades mecánicas de dureza, desgaste y variación microestructural de la fundición blanca al adicionar los elementos de Nb y Mo.

1.2 FORMULACIÓN

¿Cómo influirá el Nb y Mo en la resistencia al desgaste abrasivo según la norma ASTM G65 en fundiciones de hierro blanco?

2. JUSTIFICACIÓN

La fabricación del hierro blanco con elementos de aleación se implementa comúnmente, en aplicaciones donde se requiere resistencia tanto al desgaste como a la abrasión por su aplicación en la industria.

En la actualidad, su uso permite la fabricación para equipos de movimiento de tierra, minería, molienda, materia prima, fabricar aceros y obtener fundiciones maleables, su importancia radica en lo significativo de su aporte al proceso productivo de los sectores industriales.^[1]

En esta fundición se encuentra el carbono combinado bajo la forma de cementita siendo esta la portadora de fragilidad al material, debido a esto se busca mejorar la resistencia frente a la abrasión y corrosión por medio del uso de elementos aleantes.

Se presenta el desgaste al entrar en contacto dos superficies que realizan una interacción entre partículas, provocando daños superficiales esta magnitud de daño se debe a las condiciones ambientales, la fuerza y velocidad ejercida por ambas, generando daño parcial o total del instrumento, este tipo de casos se presenta de maneras diferente según la condición de operación.

En base a las investigaciones realizadas en Departamento de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Libre Seccional Bogotá se desea continuar con esta línea investigativa teniendo presente el antecedente de autor ^[1], para llevar a cabo, el proyecto de la fabricación de un hierro blanco con elementos aleantes de cromo, vanadio, niobio y cromo, vanadio, y molibdeno, con el fin de obtener las propiedades mecánicas y su comportamiento en los diferentes ensayos a los cuales será sometido este material, con el fin de analizar la nueva composición y su influencia frente a la dureza, desgaste, corrosión y propiedades mecánicas.

3. OBJETIVOS

3.1 GENERAL

Evaluar la influencia del Nb y Mo en fundiciones del hierro blanco en la resistencia al desgaste abrasivo según la norma ASTM G65.

3.2 ESPECÍFICOS

- Obtener mediante el proceso de fundición, un hierro blanco con composición aproximada de 5%Cr, 5%V, 1%Nb y 5%Cr, 5%V, 1%Mo.
- Evaluar la influencia del Mo y Nb en los cambio microestructurales por medio de microscopia óptica convencional (MOC), microscopía electrónica de barrido (SEM) y Difracción de rayos X (XRD).
- Determinar el comportamiento mecánico en resistencia al desgaste por medio de Block- On-Ring (según la norma ASTM G77), ensayo de dureza y desgaste abrasivo de las aleaciones obtenidas (según norma ASTM G65).

4. MARCO REFERENCIAL

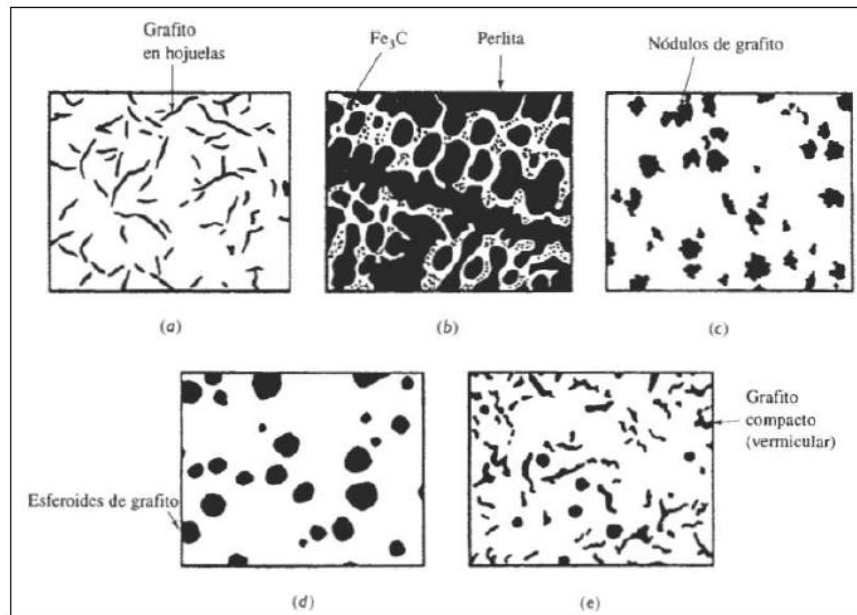
4.1 MARCO TEÓRICO

El marco teórico permite conocer y exponer conceptos guía para la comprensión y realización del proyecto.

4.1.1 Fundiciones: son aleaciones de hierro con un contenido de elementos carbono, silicio, manganeso, azufre y fósforo en porcentajes que se pueden variar. Se caracteriza por que adquiere una forma definitiva directamente por colada, es resistente a la corrosión, al desgaste y es maquinable, esta no puede ser sometida a deformación plástica, no es dúctil ni soldable.

4.1.1.1 Clasificación de las Fundiciones: se clasifican en cinco importantes hierros fundidos que son: fundición blanca, fundición gris, fundición nodular, fundición maleable y fundición aleada, a continuación se presenta en la figura las microestructuras pertenecientes a cada una de las fundiciones mencionadas anteriormente.

Ilustración 1. Esquemas de los cinco tipos de fundiciones: a) Fundición blanca. b) Fundición gris. c) Fundición maleables. d) Fundición dúctil. e) Fundición de grafito compacto.



Fuente: [2]

- **Fundición blanca:** se caracteriza por qué se puede encontrar combinado el carbono con el hierro, que oscila entre 1.8 y un 3.6%, el contenido de silicio esta entre 0.5 y 2%, manganeso esta entre 0.2 y 0.8%, un 0.18% de fosforo y un 0.1% de azufre. Presenta una estructura de perlita, cementita y ledeburita por medio de la cual se obtiene la propiedad de dureza pero a su vez fragilidad.
- **Fundición gris:** se caracteriza por que se encuentra el carbono en forma de escamas o láminas de grafito, con un contenido de variación entre 2.5 a 4.0 y 1.0 a 3.0% respectivamente, cuenta con una alta capacidad de templado, buena fluidez para el colado, y es fácil de mecanizar es quebradizo y de baja resistencia a la tracción.
- **Fundición nodular:** el contenido de carbono se presenta en formas de esferoides, se produce al tratar térmicamente la fundición blanca no aleada, se obtiene propiedades deseables como alta ductilidad, resistencia buena maquinada y fluidez por colada.
- **Fundición maleable:** se producen por medio de tratamiento térmico de la función blanca siendo este un tipo de hierro especial con un porcentaje de 2.5C, 1.5 Si. Durante el proceso de tratamiento se descompone la cementita y se produce nódulos y agrupamientos de grafito.
- **Fundición de grafito compacto:** en esta función la forma del grafito es intermedia entre grafito en hojuelas y esferoidal, con numerosas barras redondas. El grafito compacto permite resistencias mecánicas y ductilidades que exceden a la fundición gris.

4.1.2 Fundiciones Aleadas: Presentan un contenido de Ni, Cr, Mo, Cu, etc., los cuales mejoran las propiedades mecánicas de las fundiciones ordinarias o para agregar una propiedad especial.

4.1.2.1 Fundición Blanca Aleada: Las fundiciones blancas de alta aleación se requieren principalmente en aplicaciones resistentes a la abrasión, se caracteriza por el volumen de carburos eutécticos en su micro estructural y gracias a estos se tiene una elevada dureza en su uso requerido en la industria.

Todas las aleaciones blancas de alta aleación contienen cromo para prevenir la formación de grafito durante la solidificación y asegura la estabilidad de fase.

4.1.2.2 Clasificación de las Fundiciones Aleadas

Se clasifican en dos grupos.

- Fundiciones de baja media aleación: contiene cantidades de Ni, Cr, Mo y Cu inferiores al 5% poseen alta resistencia a la atracción.
- Funciones de alta aleación: son resistentes al desgaste, al calor y a la corrosión con una microestructura austenítica o ferrítica, en esta familia se suele agrupar las fundiciones muy resistentes.

4.1.3 Efecto de los Elementos de Aleación: Estos elementos varían o modifican las fundiciones y con ello la estructura y en sus respectivas matrices se ven alteradas las propiedades principalmente dureza y resistencia.

4.1.3.1 Influencia de los Elementos de Aleación

- Niobio (Nb): Es un elementos químico, de aspecto gris metálico, tiene una elevada dureza al tener puntos de ebullición y fusión (2750 K), que le brindan la característica de soportar altas temperaturas, también se utiliza en aleaciones con elevada dureza y resistencia. La adición de niobio incrementa la resistencia a la fluencia y a tracción de aceros al carbono.
- Molibdeno (Mo): Este aleante proporciona resistencia a la tracción, aumento de la templabilidad, así como la resistencia a la fluencia mecánica o deformación por desplazamiento del grano, resistencia a la matriz y elimina la fragilidad de revenido, este elemento es un gran formador de carburos y estabilizador de estos, retarda el ablandamiento de los aceros, durante el revenido.
- Vanadio (V): Es un metal dúctil que se emplea principalmente como un aleante, con el fin de mejorar las características de algunas aleaciones, es ampliamente usada en aceros y fundiciones de titanio. La presencia de carbono produce una matriz donde encontramos carburos los cuales dan un aumento significativo de la dureza del material.
- Cromo (Cr): Se estabiliza la cementita y evita la grafitización, su función dentro de la aleación es la formación de carburos de cromo provocando un aumentando la dureza de la matriz, con mejoramiento de templabilidad,

impide deformaciones en el temple, aumenta la resistencia y desgaste a abrasivo, proporciona inoxidabilidad, este elemento se disuelve en la ferrita.

- Silicio (Si): Es un aleante secundario, varía en un porcentaje de masa de 0.1 a 6%, se incrementa la dureza y mejora la templabilidad como aumento de la resistencia, proporciona gran poder desoxidante, eleva sensiblemente el límite elástico y la resistencia a la fatiga de los aceros sin reducir su tenacidad.

4.1.4 Desgaste

El desgaste es la pérdida de la estructura superficial de un material, es una de las formas más importantes de degradación que se da por la interacción del roce entre dos superficies ejercido por una acción mecánica o movimiento constante. Se obtiene la pérdida de material como las dimensiones y tolerancias, se debe principalmente a la deformación plástica, formación y prolongación de grietas y/o corrosión.

4.1.4.1 Desgaste Abrasivo

Es la pérdida de masa debido a la interacción entre partículas o asperezas duras que son forzadas contra una superficie que se desplazan a lo largo de ella, ocasionando un deterioro significativo en el material.

4.1.4.2. Mecanismos de Desgaste Abrasivo

- Mecanismo de micro corte: se produce corte de las capas superficiales generado por partículas de desgaste, sobrepasando el límite de rotura.
- Mecanismo de deformación plástica: generada rayado o raspado en la superficie, no genera partículas de desgaste.

4.2 MARCO CONCEPTUAL

Los siguientes son conceptos más importantes para la realización del proyecto.

- **Austenita:** Hierro y, FCC, con un contenido máximo de 2.11% de carbono en solución sólida.
- **Aleación:** Es la combinación de propiedades metálicas, que está compuesta de dos o más elementos metálicos, la mayor parte de estas se realiza en estado líquido para obtener un producto homogéneo.
- **Bainita:** Microestructura compuesta por placas (o agujas) de ferrita y partículas de cementita.
- **Caracterización:** hace referencias a las determinadas características de un material a partir de un estudio de sus propiedades químicas, físicas y estructurales.
- **Carbono:** es un no metal, elemento químico abundante en la corteza terrestre, los átomos de carbono pueden unirse y adoptar diferentes maneras, las más conocidas son: el grafito, el diamante y el carbono amorfo.
- **Carburo:** son compuestos de metal- carbono, que se forma a partir entre el carbono y un elemento.
- **Carga de tracción:** esta produce un alargamiento y una deformación lineal positiva en dirección de la carga aplicada.
- **Cementita:** se genera por efecto del exceso de carbono sobre el límite de solubilidad, aparece tras el enfriamiento de la aleación, es uno de los constituyentes de los aceros al carbono más duro.
- **Componente:** es un metal y/o un compuesto que forma parte de una aleación.
- **Deformación:** se genera por esfuerzo internos o fuerzas aplicadas ocasionando un cambio en el tamaño, peso o forma del cuerpo.
- **Deformación plástica:** efecto generado por una carga que al aplicarla altera permanentemente la estructura de un material.
- **Ductilidad:** es la deformación del material con capacidad permanente sin llegar a ruptura, al ser aplicada una fuerza.
- **Dureza:** Es una medida de la resistencia de un material frente a alteraciones físicas como la penetración, la abrasión y el rayado.
- **Ensayo de dureza:** es la penetración causada por un objeto puntiagudo en un material con el fin de obtener la resistencia que llega a soportar este. Los ensayos de dureza son Brinell, Rockwell, Knoop, y Vickers.
- **Fase:** es la representación entre diferentes estados de la materia, en función de variables es fundamental para comprender los diagramas de equilibrio.
- **Ferrita o hierro (alfa):** es una estructura cristalina del hierro, es uno de los constituyentes más blandos del acero.
- **Fundición:** proceso de fabricación de piezas, por medio de un molde o cavidad.

- **Metalografía:** Es el análisis de las características micro estructurales de un metal o aleación, identificando sus propiedades físicas, químicas y mecánicas que presente.
- **Microestructura:** se caracteriza por el número de fases y la proporción y distribución de estas que forman al material.
- **Molibdeno:** es un metal con baja solubilidad en agua, se identifica por el sexto punto de fusión que tiene, es un elemento químico empleado en aplicaciones de alta presión y alta temperatura.
- **Niobio:** es un metal de transición dúctil, blando y gris, elemento químico con una alta resistencia y es empleado en aleaciones.
- **Resistencia mecánica:** es la capacidad de un material que presenta resistencia frente a las fuerzas o esfuerzos aplicados en este.
- **Tenacidad:** es una medida de la capacidad de un material de absorber energía antes de la fractura, siendo esta una propiedad que indica la resistencia que puede tener el material.

4.3 ESTADO DEL ARTE

“Fabricación y caracterización microestructural de un hierro blanco aleado con Cr-V-Ti para aplicaciones de desgaste” del año 2018 (M. Amaya), se presenta un estudio de fabricación de una aleación realizada en tres etapas, balance de carga, simulación del proceso de fundición de ProCAST, proceso en horno de inducción, con una composición de 5%Cr, 5%V, 3%C, 1.3%Mo, 1%Ti, 0.5%Si, 0.5Mn, se lleva a cabo el tratamiento térmico de un precalentamiento a 815°C, austenización a 980°C con duración de 35 minutos y temple al aire. Los resultados obtenidos presentan una microestructura perlítica con matriz de martensita con austenita retenida, reforzada con carburos tipo M_7C_3 , la resistencia al desgaste abrasivo y al desgaste por deslizamiento se evaluó mediante los ensayos Block-on-RFing, dureza Vickers, los resultados evidenciaron que el material mejoró ante estos ensayos luego de realizado el proceso del tratamiento térmico, en el ensayo de desgaste por abrasión el material presenta un campo de deformación en su microestructura, y la presencia de los carburos en la matriz actuaron como escudo impidiendo incrustaciones de partículas abrasivas y la remoción del material. ^[1]

El trabajo de grado “El efecto de la adición de boro y el tiempo de austenización en la microestructura de la propiedades de dureza y tracción de hierro dúctiles” Realizado en el año 2015 (F Guerra, A Bedolla, I Mejia, J Zuno), demostró mediante resultados experimentales que con la adición del boro en la fundición da un aumento de volumen de grafito precipitado y una disminución en el contenido de carbono disuelto en la matriz, se presenta una disminución en la modularidad con la transformación de la austenita se detectó una inestabilidad en el volumen de martensita y austenita promoviendo valores de dureza con un elevado aumento de valores más altos a la resistencia y ductilidad para la aleación. ^[3]

“Influencia de los tratamientos térmicos en la microestructura con alto contenido de cromo” realizado en el año 2006 (I. Fernández-Pariente, F.J. Belzunce-Varela), es una de las investigaciones donde se obtuvo un hierro blanco con alto cromo con elevada dureza y resistencia al desgaste, para este se realiza un tratamiento térmico en diferentes fases (revenidos simples y dobles, por un lado, y temple más uno y dos revenidos, por otro). Los resultados obtenidos de proceso de austenización y temple seguido de dos revenidos, se obtiene una microestructura más óptima y estable, sin austenita retenida, con un aumento de dureza y resistencia frente al desgaste, con modificaciones de microdureza del hierro blanco en el transcurso del tratamiento térmico llevado a cabo. ^[4]

Elementos de aleación como titanio y vanadio en una fundición blanca, son añadidos principalmente para conseguir disminuir el tamaño de las láminas de grafito o para afinar su matriz; el niobio por su parte también contribuye al mejoramiento de la resistencia al desgaste del material. El artículo “Abrasive wear of V–Nb–Ti alloyed high-chromium white irons” publicado en mayo del año 2015 (A. Bedolla-Jacuinde, F.V. Guerra, I. Mejía, W. M. Rainforth), presentó la evaluación del efecto de 2% de V, 2% de Nb más 2% de Ti en un hierro blanco de Cr al 17%. Para el estudio se obtuvieron barras de hierro blanco no aleado (cuya microestructura consistía en una matriz de austenita) y aleado (microestructura compuesta de austenita, carburos eutécticos M_7C_3 y carburos primarios MC); las cuales fueron tratadas térmicamente a una temperatura de 900°C para desestabilizar la matriz austenítica; dando como resultado una matriz martensítica reforzada con carburos secundarios. Mediante la técnica de desgaste abrasivo se pudo evidenciar una mejora considerable en la resistencia a la abrasión de la fundición blanca tratada térmicamente en comparación con el material en condiciones de colada; esto debido a la transformación parcial de la matriz austenítica a martensítica y, al fortalecimiento de la misma por los carburos MC y la precipitación de carburos de cromo (M_7C_3).^[5]

La investigación “Effect of titanium on the as-cast microstructure of a 16%chromium white iron” del año 2005 (A. Bedolla-Jacuinde, R. Correa, J.G. Quezada, C. Maldonado), desarrollo un estudio sobre el efecto de la adición de titanio al 2% en peso, a un hierro blanco con alto cromo. Se realiza la obtención de seis aleaciones a diversas cantidades de peso en Ti, por medio de los resultados experimentales se demuestra que la adición hace que las partículas pequeñas de carburo de titanio se precipitaran dentro de la austenita ejecutando un esfuerzo en la matriz, este elemento de aleación proporciona un aumento a la dureza y resistencia al desgaste sin afectar la tenacidad, ya que el refuerzo de la matriz se compensó con una disminución en el volumen de carburos eutécticos.^[6]

La investigación determina el efecto del elemento del Vanadio a en una aleación, “Effects of vanadium Addition on, microstructure, Mechanical Properties and Wear Resistance of Ni-HARD 4, White Cast Iron” (Mohammadnehad, M.) del año 2013, se realiza una caracterización microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido y espectrometría de rayos X, se caracteriza la microestructural de las probetas, se obtiene como resultado aumentar la distribución de los carburos dentro de la matriz de la aleación, en comparación de la adición de cromo el cambio de estructura en una matriz martensítica a una matriz ferrítica, con un porcentaje óptimo de vanadio del 2% en y proporciona una aumento significativo de la dureza y resistencia frente al desgaste.^[7]

En la investigación “El desgaste y el comportamiento a la corrosión de alta Cr blanco fundido Aleaciones en medio corrosivos” de año 2015 (D. Sabre, H. Sallam, K. Zohdy), tiene como objetivo la relación Cr-C en el desgaste y la corrosión, se realizan tres aleación diferentes con composición químicas 3.5% de Na Cl, 0.5% MH se utilizaron para determinar la densidad de corriente de corrosión, se realiza la caracterización de la microestructura de las aleaciones por medio de microscopio óptico, microscopía electrónica de barrido y espectrometría de rayos X, se compone de una red de carburos en una matriz austenítica, la aleación fue más resistente a la corrosión y reveló la densidad de corrientes más baja. [8]

“Efecto de tungsteno en la microestructura y en el comportamiento de desgaste abrasivo de un hierro blanco de alto cromo” publicado el 17 de febrero 2017, (Cortes Carrillo, A. Belloda Jacuinde, I. Mejia, CM. Zepeda J), se analizaron adiciones de tungsteno de un peso de 10.3% se realizan 6 aleaciones de hierro en alto cromo con diferentes adiciones, se caracterizan por microscopía óptica y electrónica, espectrometría y difracción de rayos X, los resultados arrojaron un esfuerzo moderado en ambas fases y contribuyentes aun aumento en la dureza general de las aleaciones en la resistencia. [9]

En el artículo ‘Structural refinement of 15% Cr-2% Mo white irons’, realizado por (Adel Nofal- Reham Reda y colaboradores) y publicado (2010). Esta investigación tiene como objetivo estudiar el refinamiento estructural de los hierros blancos hipo e hipereutécticos con 15% de Cr-2% Mo mediante la solidificación dinámica y la aleación de Nb (1-2% de Nb). Se estudió el comportamiento de solidificación utilizando DSC. La investigación y el análisis de la microestructura se realizaron utilizando un analizador óptico de imágenes y un análisis SEM, EDX y XRD. Los mecanismos de refinamiento propuestos implicaron mejorar la nucleación y alterar el proceso de crecimiento de las fases primaria y eutéctica, ya sea mediante la fragmentación de la fase de crecimiento primaria en el caso de la solidificación dinámica o consumiendo el carbono disponible del líquido y, por lo tanto, la cantidad y el tamaño de M_7C_3 disminuyó en el caso de adición de Nb-aleación. Nb tiene mayor afinidad con el carbono durante la solidificación, mayor temperatura de formación que los constituyentes principales de la microestructura y forma carburo fino para que Nb logre el refinamiento de la microestructura. [10]

“Desgaste de las bolas de molinos empleados en la trituración de mineral laterítico” publicado (2007) y realizado por (Yobani Fernandez Ramirez). En el trabajo se realiza una investigación sobre la influencia que genera el desgaste abrasivo y la fricción de un par tribológico metal-metal sobre los cuerpos moledores que forman parte de los molinos, los cuales se utilizan para la molienda del mineral laterítico. A partir del análisis microestructural empleando técnicas de microscopía

óptica se determina el tamaño del grano de las muestras cortadas, para estudiar las capas deformadas, las que se forman por la deformación plástica en frío (acritud) y al mismo tiempo se realizan ensayos de dureza. En esta investigación se hizo un análisis del desgaste de las bolas en un molino rotatorio con el fin de determinar qué tipo de ecuación describe el desgaste de las mismas en una operación de molienda convencional. ^[11]

La investigación “Comportamiento de desgaste de una plasticidad inducida de alto Mn austenítico de acero microaleado con Nb” de año 2012 (Mejía A, Bedolla Jucuide A, Pablo JR.), el objeto de estudio es la resistencia y ductilidad de estas aleaciones en el comportamiento de desgaste de un acero austenítico TWIP Fe – Al-Mg y compáralo con un microaleado al Nb se evaluó en condiciones de deslizamiento en seco Pin-on-Ring y la resistencia al desgaste, caracterización por microscopía electrónica de barrido, espectroscopia, difracción de rayos X. Los resultados experimentales muestran que los aceros TWIP en ellos el desgaste tiene de aumentar la velocidad de deslizamiento, esto se le atribuya a una capa de óxido y la adición de Nb para el acero TWIP mejoro la resistencia al desgaste particularmente. ^[12]

El hierro a alto cromo es una aleación ferrosa con contenido de cromo que le brinda propiedades de resistencia al desgaste y tenacidad el siguiente estudio “Efecto del tratamiento térmico de desestabilización en el desgaste de hierro blanco de alto cromo” publicado el 9 de octubre del año 2009 (I. Morales, W. Hormaza, L Méndez), en esta investigación se realiza por medio de microscopía óptica, el efecto de la temperatura de desestabilización entre 900 °C y 1050 °C de una aleación Cr-Mo-C de un hierro blanco. Los resultados obtenidos experimentalmente no s indican que la resistencia a la abrasión mejoro al ser tratada térmicamente, por lo cual se óptimos el tamaño de los carburos secundarios y la dureza superficial del material. ^[13]

4.4 MARCO LEGAL Y NORMATIVO

ASTM E3 – 11	Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens.
ASTM E92 – 17	Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials.
ASTM G65 – 16	Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus.
ASTM G77 – 17	Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test.
ASTM A532 – 10	Standard Specification for Abrasion-Resistant Cast Irons.
NTC 1486	Documentación. Presentación De Tesis, Trabajos De Grado Y Otros Trabajos De Investigación.
NTC 5613	Referencias Bibliográficas, Contenido, Forma y Estructura

5. DISEÑO METODOLÓGICO

5.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

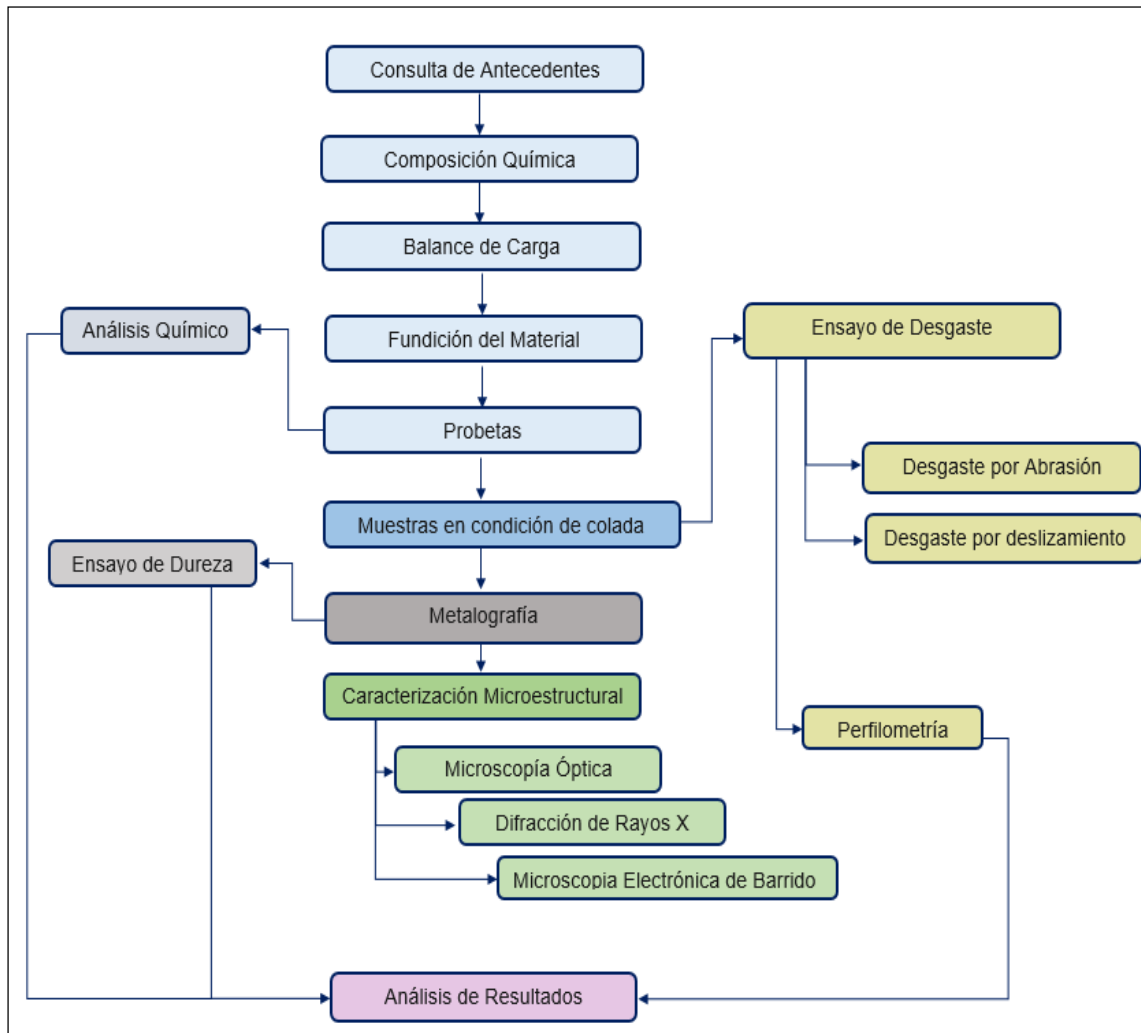
El tipo de investigación para este proyecto es cuantitativo, para analizar la influencia que tiene una variable independiente, en compañía de variables dependientes, en este caso, la adición de Niobio y Molibdeno ante la resistencia y desgaste de la aleación de 5%Cr, 5%V, 0.5%Nb y 5%Cr, 5%V, 1.3%Mo.

5.1.2 Diseño de Experimentos

Se analiza dos variables que son Nb y Mo, la influencia de estos elementos aleantes en la resistencia al desgaste abrasivo según la norma ASTM G65 en fundiciones de hierro blanco.

Mediante diagrama se da a conocer el proceso que se llevó a cabo para la fabricación de un hierro blanco con influencia del Nb y Mo para ser evaluado frente al desgaste abrasivo según la norma ASTM G65.

Ilustración 2. Diagrama del Procedimiento.



Fuente: Autor del proyecto.

5.2 FABRICACIÓN DEL MATERIAL

5.2.1 Realización de Balance de Carga.

Se trabajó con Cromo de alta pureza, Ferro-Vanadio, Ferro- Molibdeno y Sorel, en la realización de colada se tiene presente la composición de Cr 5%, V 5%, Mo 1.3% y se tiene en cuenta las pérdidas por oxidación del 10%.

Tabla 1. Composición Química del Ferro-Vanadio.

Elemento	Vanadio	Aluminio	Azufre	Fósforo	Carbón	Silicio
Peso en porcentaje	81.8	0.21	0.01	0.02	0.10	0.56

Fuente. Autor del proyecto.

Tabla 2. Composición Química del Ferro-Molibdeno.

Elemento	Molibdeno	carbono	Azufre	Silicio	Fósforo	Cobre
Peso en porcentaje	61.1	0.10	0.03	0.90	0.03	0.30

Fuente. Autor del proyecto.

Tabla 3. Composición Química del Sorel.

Elemento	Carbono	Fósforo	Azufre	Hierro	Manganeso	Silicio
Peso en porcentaje	3.9	0.007	0.005	95.82	0.008	0.168

Fuente. Autor del proyecto.

Tabla 4. Balance de Carga Cr, V, Mo.

Composición deseada Cr 5% V 5% Mo 1.3%				
Elementos de aleación	Cr	Fe-V	Fe-Mo	Sorel
Peso (gr)	125	155	33	2165
Composición teniendo presente la perdida por oxidación del 10%				
Elementos de aleación	Cr	Fe-V	Fe-Mo	Sorel
Peso (gr)	137,5	170,5	60,5	2165

Fuente. Autor del proyecto.

Se trabajó con Cromo de alta pureza, Ferro-Vanadio, Ferro- Niobio y Sorel, en la realización de colada se tiene presente la composición de Cr 5%, V 5%, Nb 0.5% y se tiene en cuenta las pérdidas por oxidación del 10%, se puede observar en la tabla 2 respectivamente.

Tabla 5. Balance de Carga Cr, V, Nb.

Composición deseada Cr 5% V 5% Nb 0.5%				
Elementos de aleación	Cr	Fe-V	Fe-Nb	Sorel
Peso (gr)	125	155	20	2200
composición teniendo presente la perdida por oxidación del 10%				
Elementos de aleación	Cr	Fe-V	Fe-Nb	Sorel
Peso (gr)	137,5	170,5	22	2200

Fuente. Autor del proyecto.

Ilustración 3. Elementos de Aleación.

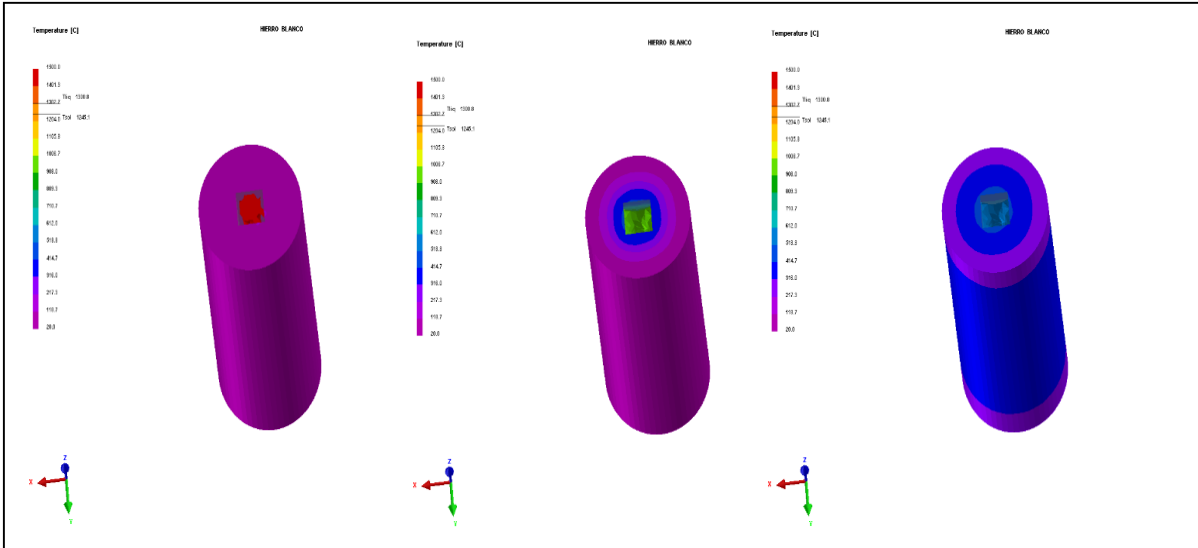


Fuente. Autor del proyecto.

5.2.2 Simulación del Proceso de Fundición

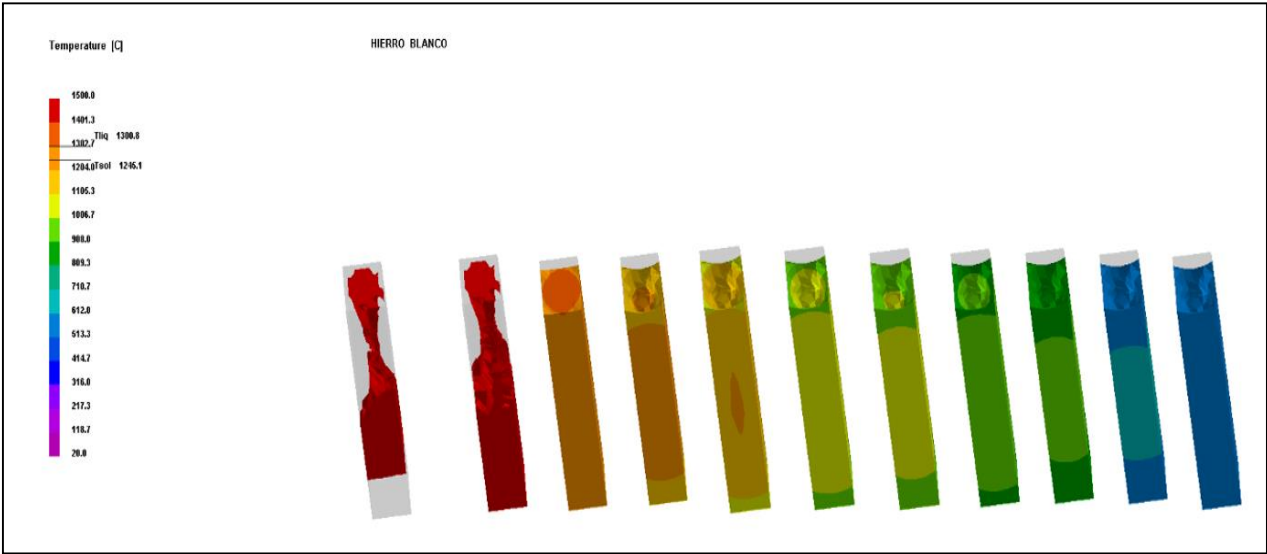
La simulación del proceso se lleva a cabo por medio del programa ProCast herramienta avanzada, para mejorar la calidad y rendimiento, con una tecnología de elementos finitos por el cual se puede predecir el llenado, solidificación y porosidad del material a fundir, por otra parte en la simulación se observación las respectivas deformaciones y tensiones residuales tras la solidificación. Por medio del Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales de la Universidad de Michoacana San Nicolás de Hidalgo (UMICH) Morelia-México, sé utiliza su licencia para el desarrollo de la simulación, obtenido los siguientes resultados.

Ilustración 4. Proceso de Llenado del Hierro Líquido.



Fuente: Autor del proyecto.

Ilustración 5. Proceso de Solidificación del Material.



Fuente: Autor del proyecto.

5.2.3 Fundición del Material

Para la realización de la fundición esta se da en un horno de inducción de capacidad de 30 kilogramos (Ubicado en las instalaciones del laboratorio de fundición del Instituto de Investigaciones en Metalurgia y Materiales, Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo, Morelia-México).

(a) se realiza la mezcla de la arena sílice que posee la formación de una molécula estable debido a la composición química de un átomo de sílice y dos átomos de oxígeno y se combina con la bentonita que es a base de arcilla.

(b) Para el procedimiento de los moldes se utiliza un cilindro y una barra cuadrada ubicada en el centro, se comienza a vaciar la arena en cantidades pequeñas y esta se va apisonando y finalmente extraer la barra, quedando un molde rectangular.

Se lleva al horno de cámara a una temperatura 100°C para extraer la humedad de la arena.

(c) El proceso de fundición se desarrolla en un horno de inducción con capacidad para 30 kilogramos con una potencia de 33 hp y a una temperatura de 1450°C.






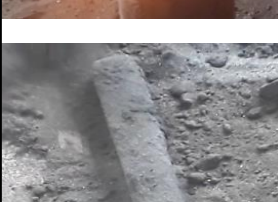
(d) Se agrega primero el soro una vez está en estado líquido se agrega V – Mo y finalmente el Cr puesto que este es el que más rápido en oxidarse, para la segunda fundición solo varía el Mo a Nb con sus respectivos porcentajes.

(e) Cuando los elementos ya se encuentran diluidos y mezclados a temperatura de 1450 °C se realiza el vaciado en el respectivo molde.

(f) Se espera la solidificación de la fundición de hierro y finalmente se extrae del molde obteniendo barras cuadrada de (3x35) cm de dimensión.

Se evidencia el proceso para la realización de la fundición.

Ilustración 6. Proceso de Fundición.

	(a) Preparación de la arena.
	(b) Realización de los respectivos moldes.
	(c) Proceso de fundido.
	(d) Adición de Cr-V-Mo Fundición 1. Adición de Cr-V-Nb Fundición 2.
	(e) Vaciado en los respectivos moldes.
	(f) Desmoldado.

Fuente. Autor del proyecto.

5.3 CORTE DE LAS BARRAS

Para el desarrollo de las probetas se utiliza maquina cortadora de metal, marca DEWALT modelo 28720-B3 (Ilustración 7), se implementa refrigerante en el corte para evitar el calentamiento del material.

Ilustración 7. Cortadora de metal, marca DEWALT modelo 28720-B3.



Fuente. Autor del Proyecto con Autorización del Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, UMICH.

Luego de cortado el material en probetas, se llevan a rectificar en el equipo marca EQUIPTOP modelo ESG-3AB18 (Ilustración 8).

Ilustración 8. Rectificadora, marca EQUIPTOP modelo ESG-3AB18.



Fuente. Autor del proyecto con autorización del Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, UMICH.

5.4 ANÁLISIS QUÍMICO

La realización del análisis permitirá determinar el porcentaje de elementos que garantizan la aleación de fundición, realizándose un comparativo con los porcentajes teóricos de esta, con el fin de certificar el material. La técnica a utilizar es la espectrometría de emisión atómica de chispa, que detecta la longitud de onda de cada elemento mediante sus electrones excitados a través de una chispa eléctrica de alto voltaje.

El análisis se lleva a cabo en el equipo marca BRUKER modelo Q4 TASMAN ubicado en Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales de la Universidad de Michoacana San Nicolás de Hidalgo (UMICH) Morelia-México.

Ilustración 9. Análisis Químico marca BRUKER modelo Q4 TASMAN.



Fuente. Autor del proyecto con autorización del Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, UMICH.

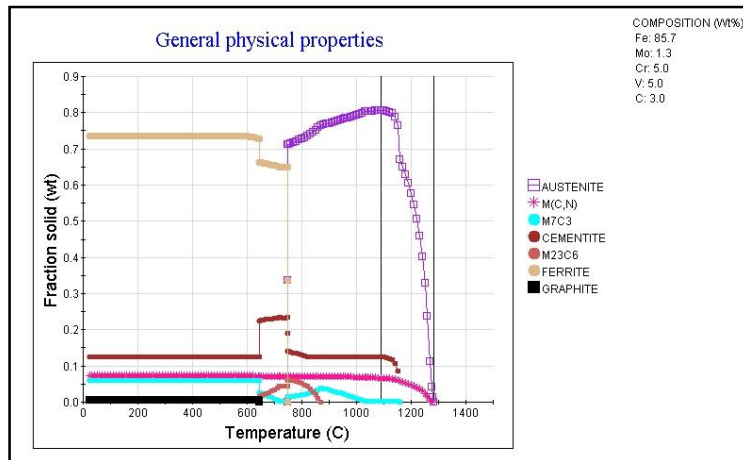
5.5 REALIZACIÓN DE TRATAMIENTO TÉRMICO.

Se realiza por medio del programa JMATRO Licencia del instituto de investigación en metalurgia y materiales, universidad de Michoacana San Nicolás de Hidalgo (UMICH) Morelia-México, gracias a esta tecnología se tiene claridad a que determinado tiempo y temperatura realizar en el tratamiento térmico.

El diagrama de fase de equilibrio es la representación entre diferentes estados de la materia, en función de variables, en este caso la temperatura. En la ilustración 10 se observa que a 1300 °C se inicia la formación de carburo primario MC (Molibdeno-carbono), y la formación de ausenita, a 1980 °C aparece el carburo tipo M_7C_3

(carburo de cromo) y la cementita, se tiene la formación de grafito a 650 °C, a 720°C se forma la ferrita, a 890 °C se forma el carburo tipo M₂₃C₆, estas son aproximaciones que se toman de la ilustración mencionada.

Ilustración 10. Diagrama Evolución de Fases de Equilibrio Para la Fundición de Cr-V-Mo.



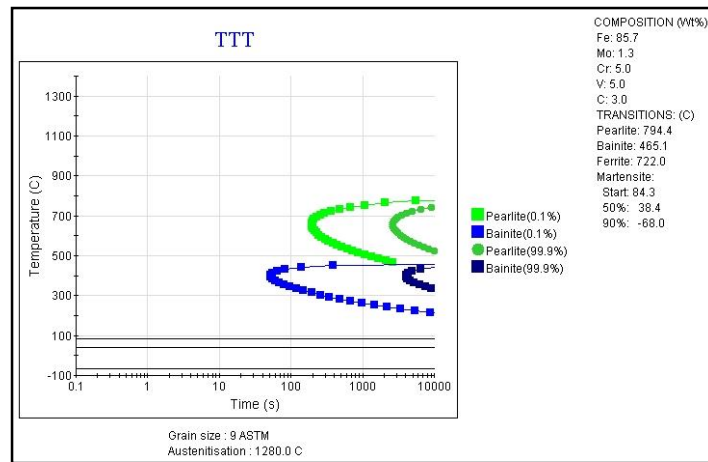
Fuente. Autor del proyecto.

Los diagramas de transformación isométrica TTT también conocidos como tiempo-temperatura- transformación son representaciones gráficas de la temperatura en función del tiempo, con el fin de conocer el inicio y fin de la transformación de la austenita en cada acero, siendo este importante para el diseño del tratamiento térmico y la interpretación de las microestructuras resultantes.

Estas son gráficas que representan el porcentaje de transformación siendo el eje vertical de temperatura y el eje horizontal de tiempo.

En la ilustración se observar que a velocidades de enfriamiento lento obtenemos una estructura perlítica.

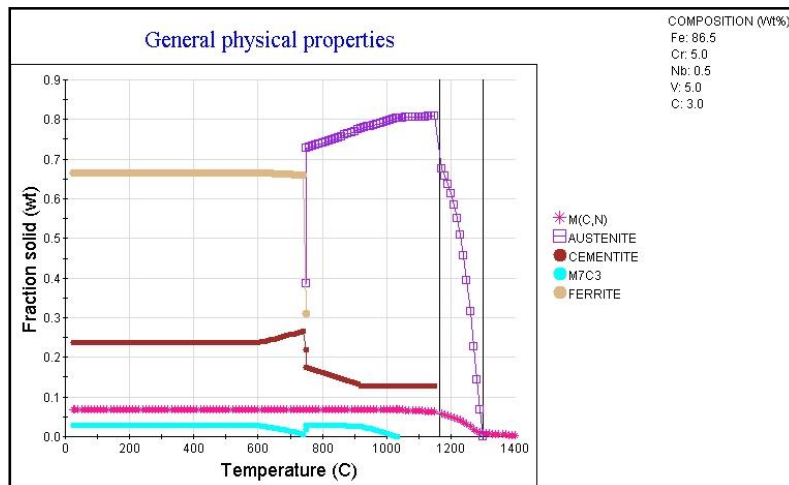
Ilustración 11. Diagrama de Trasformación de Tiempo-Temperatura (TTT) Fundición Cr-V-Mo.



Fuente. Autor del proyecto.

El diagrama de fase de equilibrio es la representación entre diferentes estados de la materia, en función de variables, en este caso la temperatura. En la ilustración 12 se observa que a 1400 °C se inicia la formación de carburo primario MC (Niobio-carbono), a 1300 °C comienza a formarse la ausentita, a 1010 °C aparece el carburo tipo M_7C_3 (carburo de cromo), a 1180°C se forma la cementita y a 720 °C se forma la ferrita, estas son aproximaciones que se toman de la ilustración mencionada.

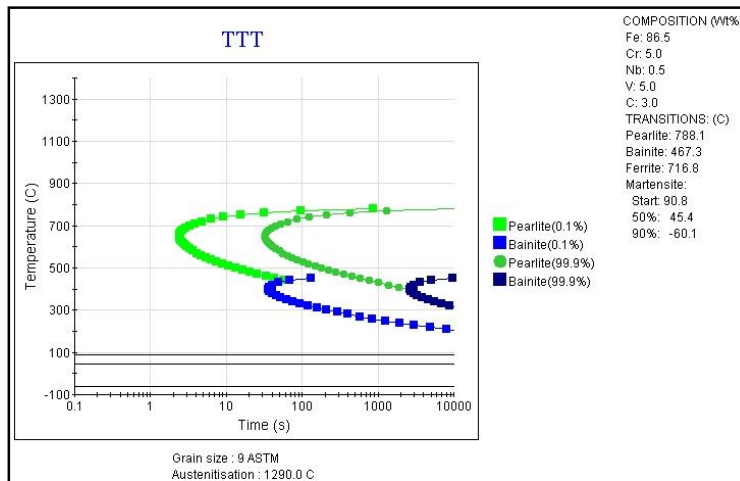
Ilustración 12. Diagrama Evolución de Fases de Equilibrio para la Fundición de Cr-V-Nb.



Fuente. Autor del proyecto.

Se puede observar que tenemos un retraso en la transformación perlítica debido a los elementos aleantes, puesto que son formadores de carburos, mientras que la transformación de la bainita se produce a una diferencia menor.

Ilustración 13. Diagrama de Transformación de Tiempo-Temperatura (TTT) Fundición Cr-V-Nb.



Fuente. Autor del proyecto.

Para la realización del tratamiento térmico se da en un horno de cámara marca CARBOLITE (1500°C), ubicado en Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales de la Universidad de Michoacana San Nicolás de Hidalgo (UMICH) Morelia-México.

Ilustración 14. Horno Cámara marca CARBOLITE (1500°C).



Fuente. Autor del proyecto con autorización del Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, UMICH.

Ilustración 15. Probetas Tratadas Térmicamente Fundición de Cr-V-Mo y Cr-V-Nb.



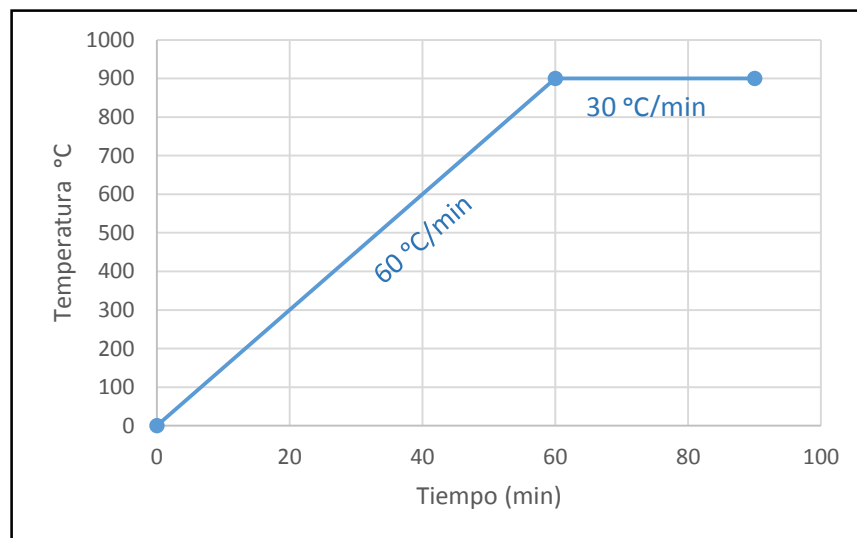
Fuente. Autor del proyecto con autorización del Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, UMICH.

Tratamiento de desestabilización

El tratamiento térmico de desestabilización hace referencia a la permanencia del material a temperaturas alrededor de los 1000°C, de modo que permita la precipitación de carburos en la matriz austenítica y se reduzca el contenido de aleantes en la misma. Esta austenita desestabilizada se transforma más fácilmente en martensita al momento del enfriamiento, mejorando las propiedades mecánicas de la matriz. Bajo ciertas condiciones termodinámicas, la transformación de la austenita se ve retrasada y se presentan regiones de austenita retenida a temperatura ambiente.^[1]

El material de estudio corresponde a las aleaciones de hierro blanco Cr-V-Mo y Cr-V-Nb a temperatura de 900 °C con un tiempo de permanencia de 30 minutos.

Ilustración 16. Ciclo del Tratamiento Térmico de Desestabilización.



Fuente. Autor del proyecto.

5.6 METALOGRAFÍA

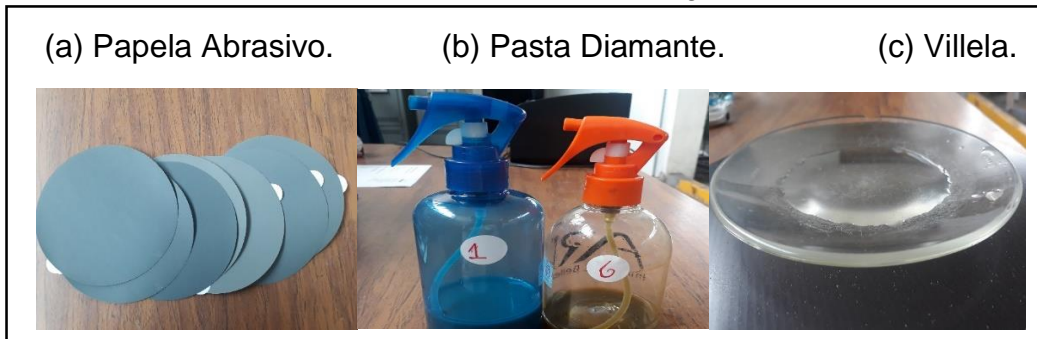
Desbaste: proceso de lijado desde el número 80, 100, 120, 150, 320, 400, 600, 1000, 1500, y 2000

Pulido: proceso de brillo espejo por medio de paño y pasta de diamante de 6 y 1 micra.

Ataque químico: se atacaran con vilela (Solución 5 ml HCl, 1g de ácido pícrico y 100 ml de etanol o metanol) con el objetivo de observar la fase presente en el hierro durante 3 segundos.

Ataque químico profundo: se atacan con vilela con una duración de 3 horas.

Ilustración 17. Elementos Para la Realización de Metalografía.



Fuente. Autor del proyecto con autorización del Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, UMICH.

Para realizar los pasos anteriormente mencionados se utiliza pulidora metalográfica marca BUEHLER modelo metaserv 250 del laboratorio ubicado en Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales de la Universidad de Michoacana San Nicolás de Hidalgo (UMICH) Morelia-México.

Ilustración 18. Pulidora Metalográfica marca BUEHLER modelo metaserv 250.



Fuente. Autor del proyecto con autorización del Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, UMICH.

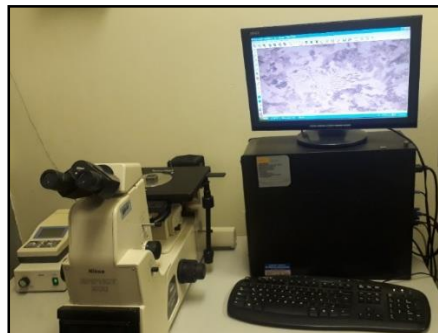
5.7 CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL

Se realizará la caracterización microestructura por medio de difracción de rayos X, microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido técnicas para la caracterización microestructural de las aleaciones realizadas, en las instalaciones Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales de la Universidad de Michoacana San Nicolás de Hidalgo (UMICH) Morelia-México

5.7.1 Microscopía Óptica Convencional.

Es un equipo basado en lentes ópticos el cual permite la observación a cientos de aumentos del material y los rasgos importantes de sus componentes, texturas, colores y tamaños he identificar las fases presentes en el material.

Ilustración 19. Microscopio Óptico Convencional marca NIKON modelo EPIPHON 3000.



Fuente. Autor del proyecto con autorización del Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, UMICH.

5.4.2 Microscopia Electrónica de Barrido

Es una técnica que utiliza la interacción de electrón-material donde Los electrones secundarios (contraste) emitidos desde la superficie se miden como señal y se convierten en una imagen óptica, con el fin de alcanzar un haz de electrones ininterrumpido, para formar una imagen, por medio de la cual se obtiene ilustraciones de alta resolución de la superficie de una muestra, identificando las respectivas fases y condiciones del material. ^[14]

Se lleva a cabo la microscopia electrónica de barrido, en las instalaciones del Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales de la Universidad de Michoacana San Nicolás de Hidalgo (UMICH) Morelia-México.

Ilustración 20. Microscopio Óptico Electrónico de Barrido Convencional marca JEOL modelo JSM-64000.



Fuente. Autor del Proyecto, con autorización del Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, UMICH.

5.7.3 Difracción de Rayos X

Se da por medio de la interacción un haz de rayos X como fuente de radiación con una dispersión coherente en el material debido a que tienen una longitud de onda es más corta con la relación a la luz, Obteniéndose así una resolución más alta, que ayuda a caracterizar y definir la estructura detallada del hierro blanco. ^[15]

Se lleva a cabo la realización de difracción de rayos X, en las instalaciones del Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales de la Universidad de Michoacana San Nicolás de Hidalgo (UMICH) Morelia-México

Ilustración 21. Equipo de Difracción de Rayos X marca BRUKER modelo D8 ADVANCE.



Fuente. Autor del Proyecto, con autorización del Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, UMICH.

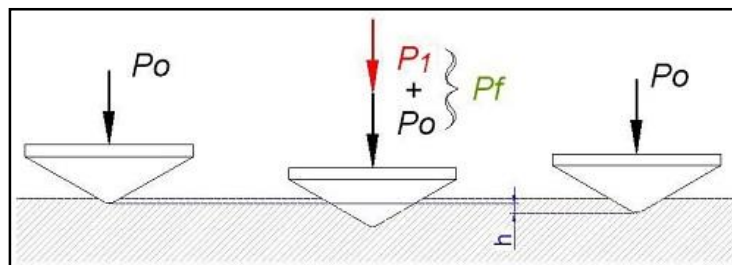
5.8 ENSAYO DE DUREZA ROCKWELL C

Se busca por medio del ensayo de dureza determinar la severidad del material, esta se obtiene por medio de la medición directa, es aplicable este modelo de ensayo a todo tipo de material, se base en la profundidad del penetrador dada por el indentador al material expuesto bajo la acción de una carga prefija.

Se mide en unidades convencionales y es considerado un ensayo no destructivo debido al tamaño de huella que deja en la superficie del material EDITAR

Se inicia con una carga de 10 kp la cual tiene como aplicación eliminar la influencia de la rugosidad en superficie de muestra, determinando así el punto de inicio de la medición en la penetración, para la aplicación de la carga final (p_1) se realiza de manera uniforme y exenta de vibraciones hasta llegar a su valor límite. ^[16]

Ilustración 22. Impresión del Ensayo de Dureza Rockwell C (HRC) en el Material.



Fuente. ^[17]

Se lleva a cabo el ensayo de dureza Rockwell C, en las instalaciones del Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales de la Universidad de Michoacana San Nicolás de Hidalgo (UMICH) Morelia-México

Parámetros según norma ASTM E92 – 17

Número de indentaciones: 7

Carga: 15 Kilogramos.

Tiempo: 15 segundos.

Ilustración 23. Durómetro para Medir Dureza Rockwell C (HRC) marca WILSON modelo 4JR.



Fuente. Autor del proyecto con autorización del Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, UMICH.

5.9 ENSAYO DE DESGASTE

El desgaste se da en la superficie del material con pérdida de masa, debido a la interacción con otra superficie estando sometidas a movimiento relativo.

5.9.1 Ensayo Dry Sand/Rubber Wheel 8 desgaste por abrasión: es el desprendimiento del material en una superficie al estar en contacto con otra, donde se presentan partículas duras que se deslizan sobre ésta, actuando como herramienta de corte, generando la pérdida de material en la otra superficie.

Se lleva a cabo el desgaste abrasivo, en las instalaciones del Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales de la Universidad de Michoacana San Nicolás de Hidalgo (UMICH) Morelia-México

Parámetros

Carga para las fundiciones: 68- 84N.

Granulometría Media: AFS 60/40 (partículas de sílice).

Velocidad aplicada: 500 RPM.

Tiempo: 6 minutos.

Ilustración 24. Máquina para Ensayos de Desgaste Abrasivo.



Fuente. Autor del proyecto con autorización del Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, UMICH.

5.9.2 Desgaste por Deslizamiento: es un repetido deslizamiento entre dos superficies donde una de ellas está en estado estacionario a una carga constante, en la norma ASTM G77, es el uso de la configuración anillo-bloque, donde el anillo de encuentra en rotación con una velocidad angular controlada, se genera la pérdida de material en la superficie debido a la fricción. ^[18]

Se lleva a cabo el desgaste por deslizamiento ensayo Block-on-Ring, en las instalaciones del Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales de la Universidad de Michoacana San Nicolás de Hidalgo (UMICH) Morelia-México

Ilustración 25. Máquina para Ensayos de Desgaste por Deslizamiento con Geometría Block-on-Ring.



Fuente. Autor del proyecto con autorización del Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, UMICH.

5.10 PERFILOMETRÍA

Es el análisis de la textura de una superficie donde se mide el perfil de una muestra, determinado la rugosidad y margen topográfica de esta.

La perfilometría produce un registro continuo de la pendiente longitudinal entre dos puntos obteniendo el desnivel de la superficie, proporcionando una imagen acerca del estado de la superficie, recopilada en el recorrido del láser sobre la huella de desgaste.

El análisis de la superficie por abrasión y por deslizamiento, se realizó en las instalaciones del Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales de la Universidad de Michoacana San Nicolás de Hidalgo (UMICH) Morelia-México

Ilustración 26. Perfilómetro Óptico marca NANOVEA.



Fuente. Autor del proyecto con autorización del Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, UMICH.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

6.1 ANÁLISIS QUÍMICO

En la realización del análisis químico se llevan una probeta de cada una de las fundiciones realizadas.

1. Muestra fundición Cr-V-Mo

Tabla 6. Resultado de Análisis Químico Fundición Cr-V-Mo.

Parámetros	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
Resultado (%)	2,975	0.012	0.013	0.005	0.031	5.201	1.392	0.034	0.016	0.100

Fuente. Autor del proyecto.

2. Muestra fundición Cr-V-Nb

Tabla 7. Resultado de Análisis Químico Fundición Cr-V-Nb.

Parámetros	C	Si	Mn	P	S	Cr	Nb	Ni	Cu	Al
Resultado (%)	3,172	0,014	0,016	0,004	0.050	5.101	0.438	0.011	0.016	0.100

Fuente. Autor del proyecto.

Por medio del ensayo de análisis químico se verifican los porcentajes mencionados en la realización del balance de carga, verificando que la fundición cumple con la composición deseada, se tiene una pequeña variación debido a la pérdida por oxidación que se ocasiona en el momento de realizar la fundición.

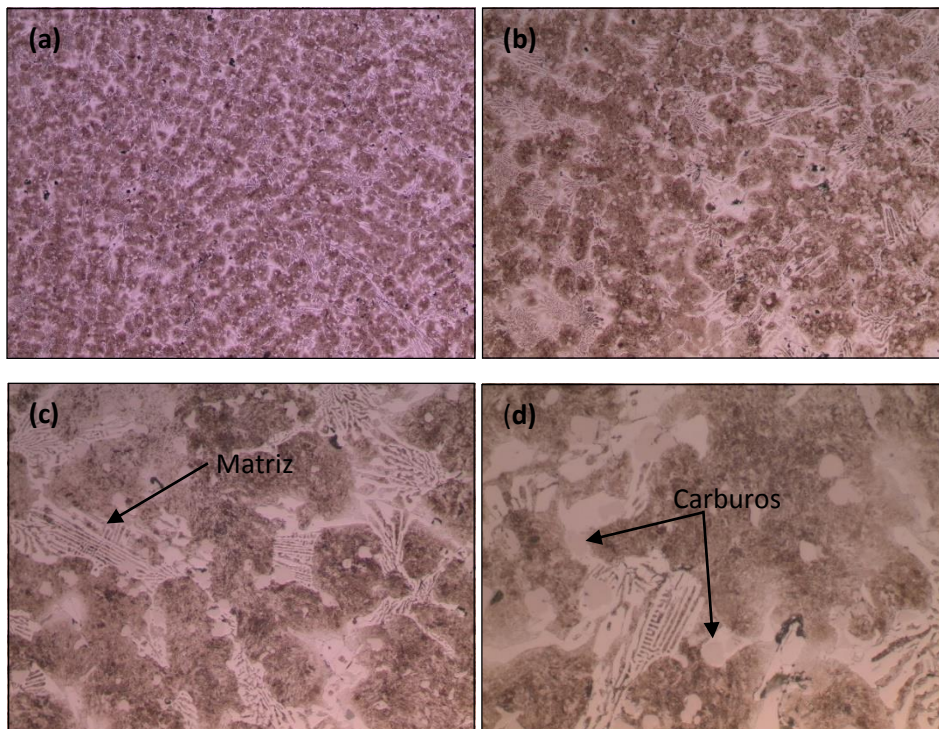
La certificación de este ensayo de puede ver en el anexo A.

6.2 ANALISIS MICROESTRUCTURAL

6.2.1 Microscopia Óptica Convencional: como se especificó en la sección 5.7.1 se lleva a cabo la observación de la microestructura de cada una de las aleaciones a diferentes magnificaciones.

6.2.1.1 Material en Condición de Colada Hierro blanco Cr-V-Mo: en la ilustración 27 se muestra la microestructura del hierro blanco Cr-V-Mo en condición de colada, donde se puede observar una configuración de capas o láminas de cementita y la presencia de carburos que probablemente se trate de M_3C y carburos de Molibdeno. La región blanca muestra cementita, rodeada de perlita por su estructura laminar de ferrita.

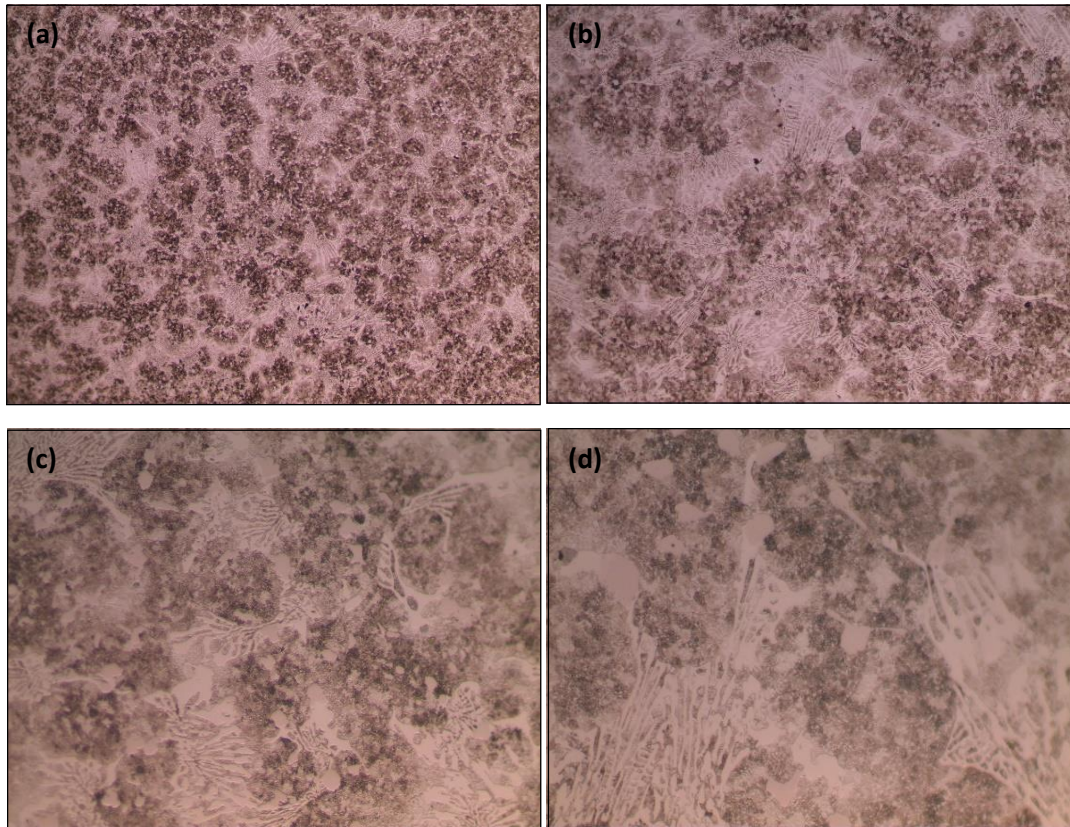
Ilustración 27. Microestructura de Hierro Blanco Cr-V-Mo en Condición de Colada (a) 100X. (b) 200X. (c) 500X. (d) 1000X.



Fuente. Autor del proyecto

6.2.1.2 Material Tratado Térmicamente Hierro Blanco Cr-V-Mo. El tratamiento térmico se llevó a cabo con el fin de realizar una desestabilización en la estructura del material, se aprecia en la ilustración 28 la precipitación de carburos secundarios y la distribución uniforme de ellos en la microestructura.

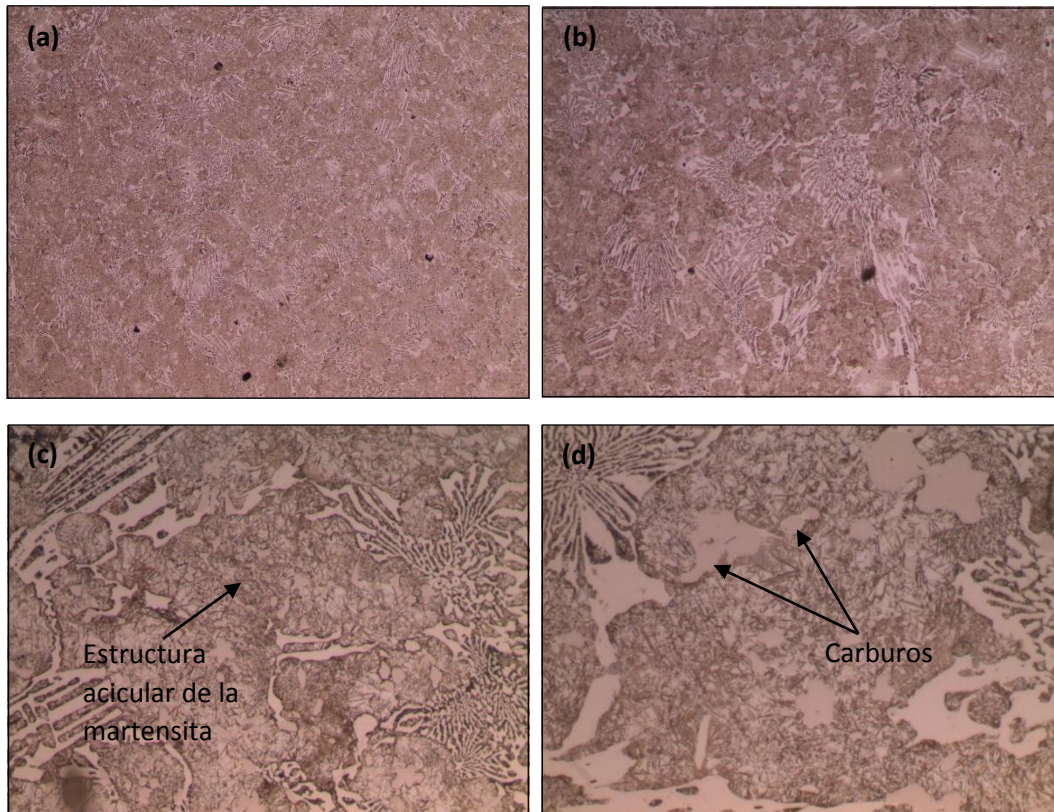
Ilustración 28. Microestructura de Hierro Blanco Cr-V-Mo Tratado Térmicamente: (a) 100X. (b) 200X. (c) 500X. (d) 1000X.



Fuente. Autor del proyecto

6.2.1.3. Material en condición de colada Hierro blanco Cr-V-Nb: en la ilustración 29 se muestra la microscopía del hierro blanco en condiciones de colada, donde se observa la estructura acicular de la martensita, al igual que la presencia de carburos que posiblemente sean M_3C y carburos de Niobio, en una matriz austenítica.

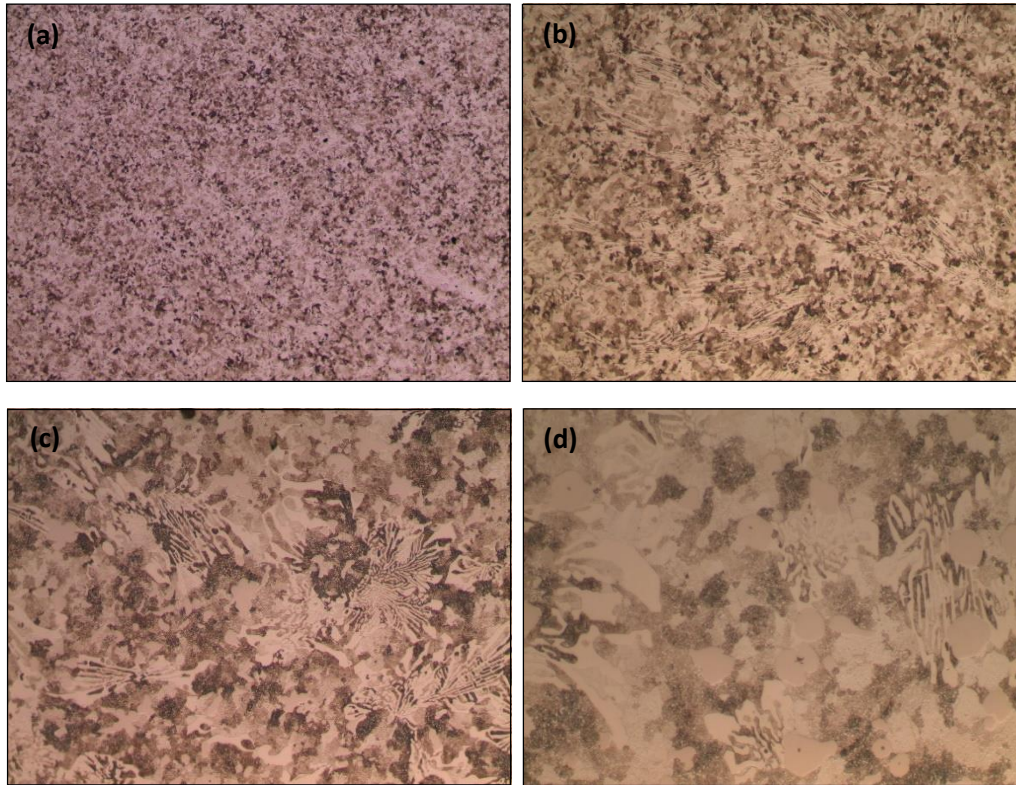
Ilustración 29. Microestructura de Hierro Blanco Cr-V-Nb en Condición de Colada (a) 100X. (b) 00X. (c) 500X. (d) 1000X.



Fuente. Autor del proyecto.

6.2.1.3. Material Tratado Térmicamente Hierro Blanco Cr-V-Nb: se llevó a cabo la realización del tratamiento térmico de desestabilización en el material, se puede observar la precipitación de partículas de carburos secundarios y la distribución uniforme de ellos en la microestructura.

Ilustración 30. Microestructura de Hierro Blanco Cr-V-Nb Tratada Térmicamente (a) 100X. (b) 200X. (c) 500X. (d) 1000X.



Fuente. Autor del proyecto

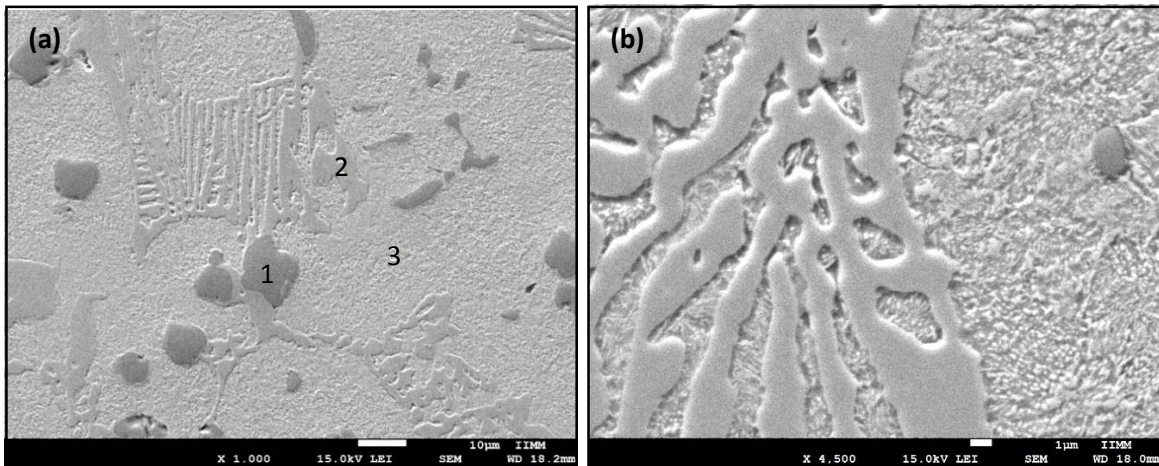
6.2.2 Microscopia Electrónica de Barrido: se realiza el estudio de microscopía electrónica de barrido a observar la fundición en magnificaciones mayores y con mapeo, conociendo la distribución de los elementos aleantes que componen a esta.

6.2.2.1 Material en Condición de Colada Hierro Blanco Cr-V-Mo: en la ilustración 31 se observa con mayor detalle los carburos de Vanadio, los carburos M_3C y se puede distinguir la matriz de cementita y perlítica. Generalmente la dureza de esta aleación se encuentra a 56.05 (HRC)

Se identifica en la Microscopia Electrónica de Barrido los respectivos carburos:

- 1: Carburo de Vanadio.
- 2: Carburo M_3C .
- 3: Matriz Cementita y Perlítica.

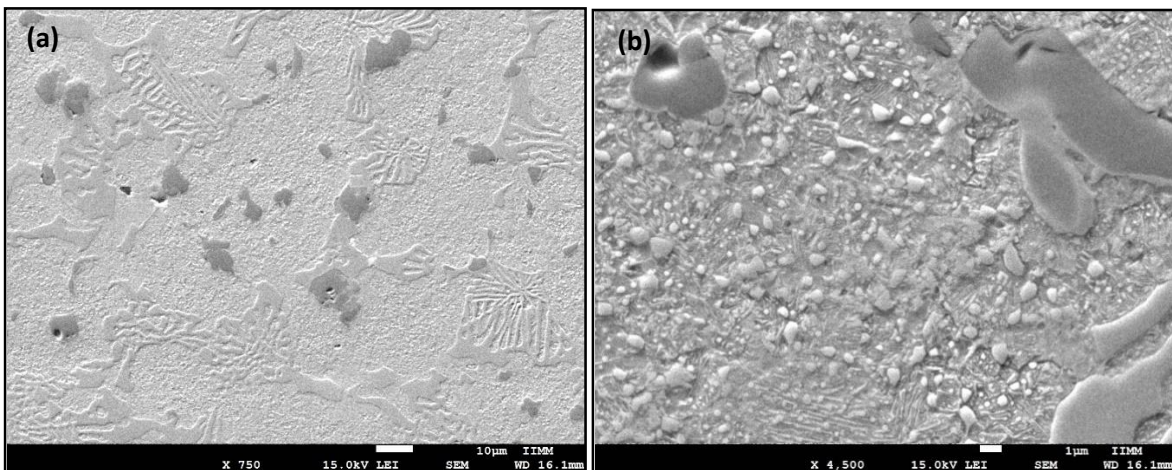
Ilustración 31. Microscopia Electrónica de Barrido del Hierro Blanco Cr-V-Mo en Condición de Colada: (a) 500X. (b) 1000X.



Fuente. Autor del proyecto

6.2.2.2 Material Tratado Térmicamente Hierro Blanco Cr-V-Mo. Se muestra en la ilustración 32 la presencia de carburo de Vanadio, carburo M_3C y la matriz cementita y perlítica, siendo este un acero proeutectoide, debido a distribución de la matriz que se observa en la fotomicrografía.

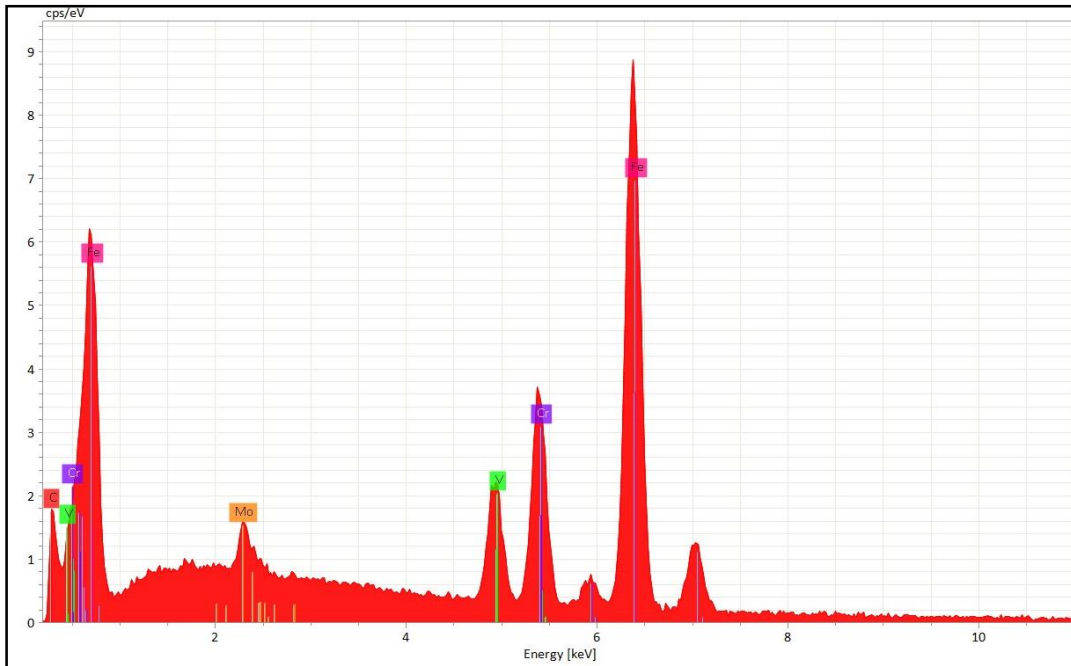
Ilustración 32. Microscopia Electrónica de Barrido del Hierro Blanco Cr-V-Mo Tratado Térmicamente. (a) 500X. (b) 1000X



Fuente. Autor del proyecto.

En la ilustración 33 se observa el espectro de EDS del material Cr-V-Mo, donde se corrobora la presencia de los contenidos (Fe, Cr, V, Mo, C), se visualizan en forma de picos de los elementos aleantes.

Ilustración 33. EDS del Hierro Blanco Cr-V-Mo.

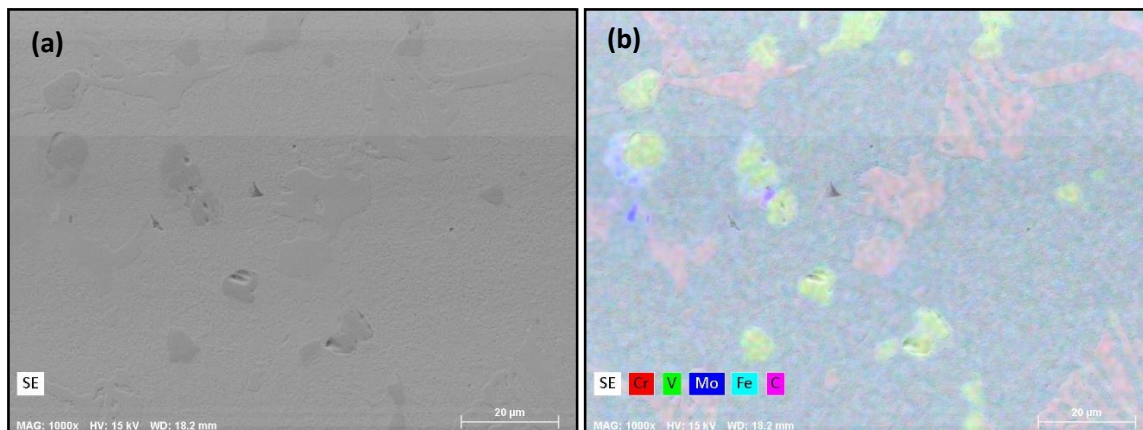


Fuente. Autor del proyecto.

Se realiza el mapeo químico de la aleación Cr-V-Mo para conocer la respectiva distribución de los elementos aleantes que componen a este hierro blanco.

Se muestra la zona analizada donde se reconoce los elementos aleantes que forman la aleación Cr, V, Mo, Fe y C.

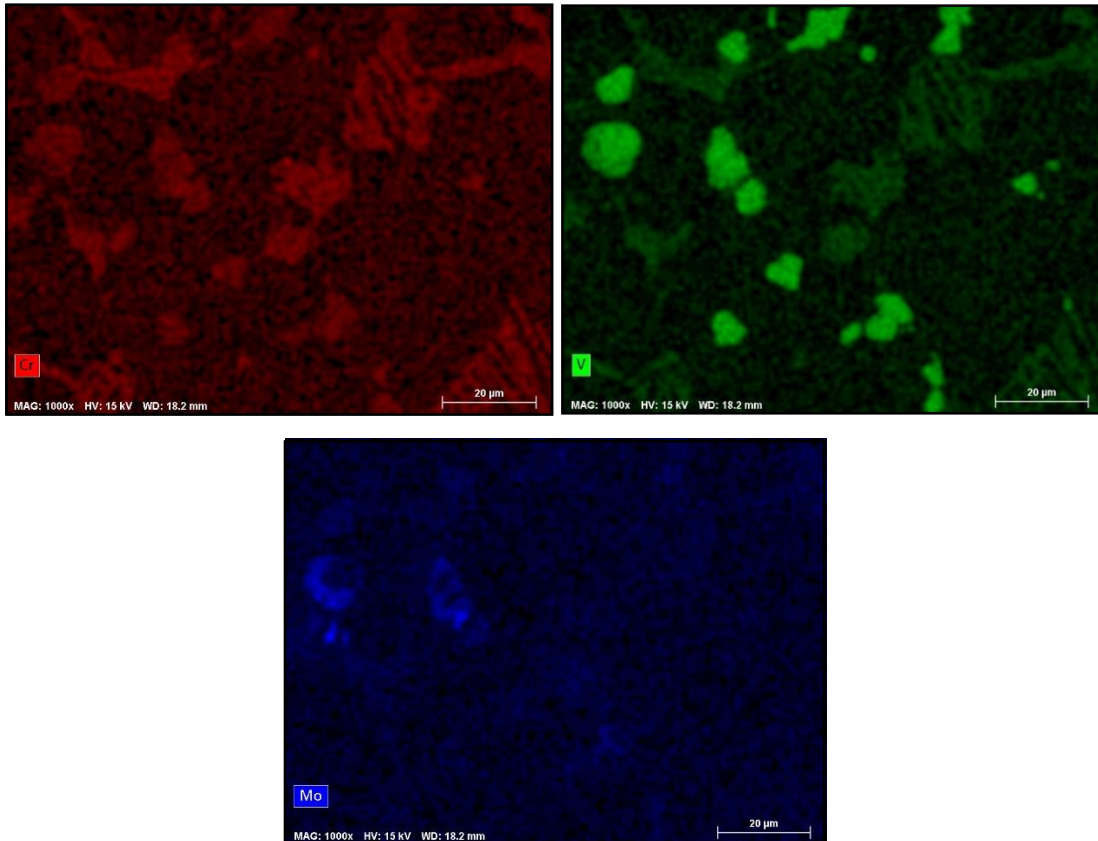
Ilustración 34. Mapeo Químico General del Hierro Blanco Cr-V-Mo. (a) Zona Analizada. (b) Mapeo.



Fuente. Autor del proyecto.

Se puede ver también en la ilustración 35 la presencia del Cr, V y Mo ubicada en la zona de los carburos.

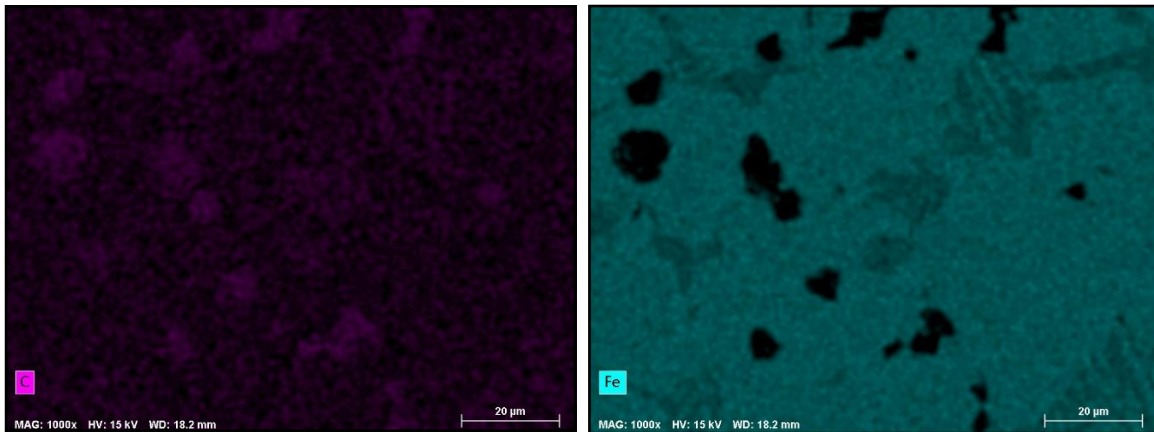
Ilustración 35. Mapeos Químicos del Hierro Blanco Cr-V-Mo.



Fuente. Autor del proyecto.

En la ilustración 36 se observa que el Fe y C se encuentran distribuidos de forma uniforme en la matriz.

Ilustración 36. Mapeos Químicos del Hierro blanco Fe-C.



Fuente. Autor del proyecto.

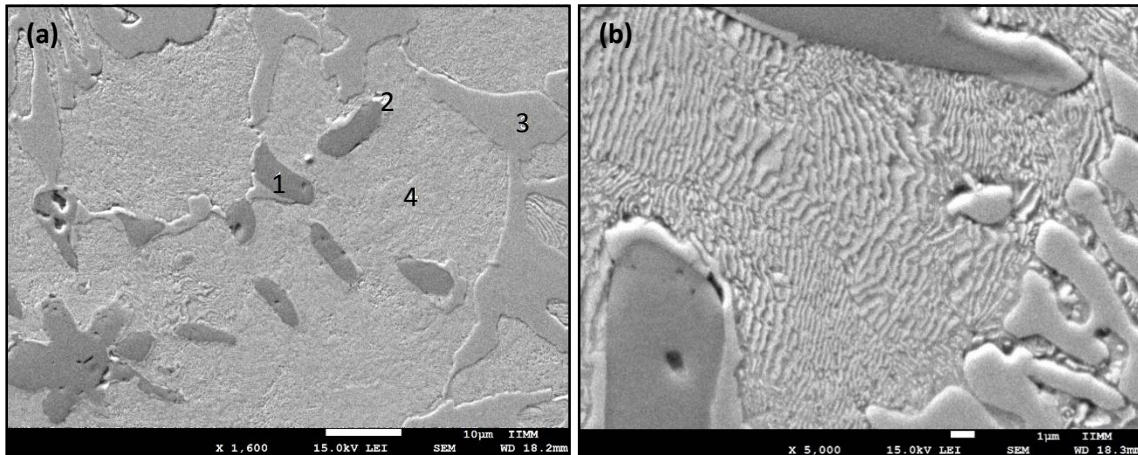
6.2.2.3 Material en Condición de Colada Hierro Blanco Cr-V-Nb:

Se puede observar en la ilustración 37 la presencia de carburos de Vanadio, Niobio y M_3C y se puede distinguir la matriz cementita y perlítica. Generalmente la dureza de esta se encuentra en 54.6 (HRC)

Se identifica en la Microscopía Electrónica de Barrido los respectivos carburos:

- 1: Carburo de Vanadio.
- 2: Carburo de Niobio.
- 3: Carburo de M_3C .
- 4: Matriz Cementita y Perlítica.

Ilustración 37. Microscopia Electrónica de Barrido del Hierro Blanco Cr-V-Nb en Condición de Colada. (a) 500X. (b) 1000X.



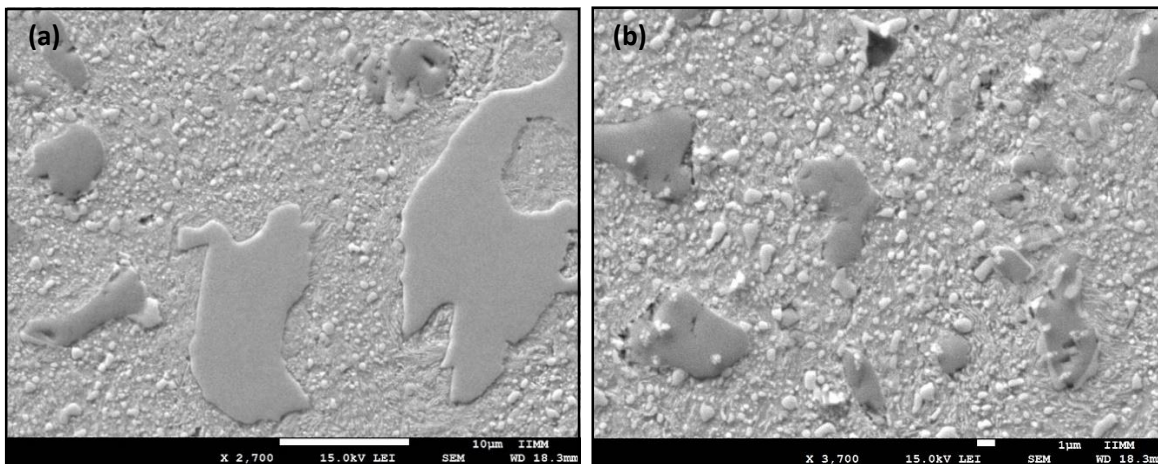
Fuente. Autor del proyecto.

6.2.2.4 Material Tratado Térmicamente Hierro Blanco Cr-V-Nb.

Se observa en la ilustración la presencia de carburos de vanadio, M_3C y la matriz, martensita revenida y matriz cementita.

Se Observa la Distribución de los carburos en pequeños granos distribuidos uniformemente en la matriz.

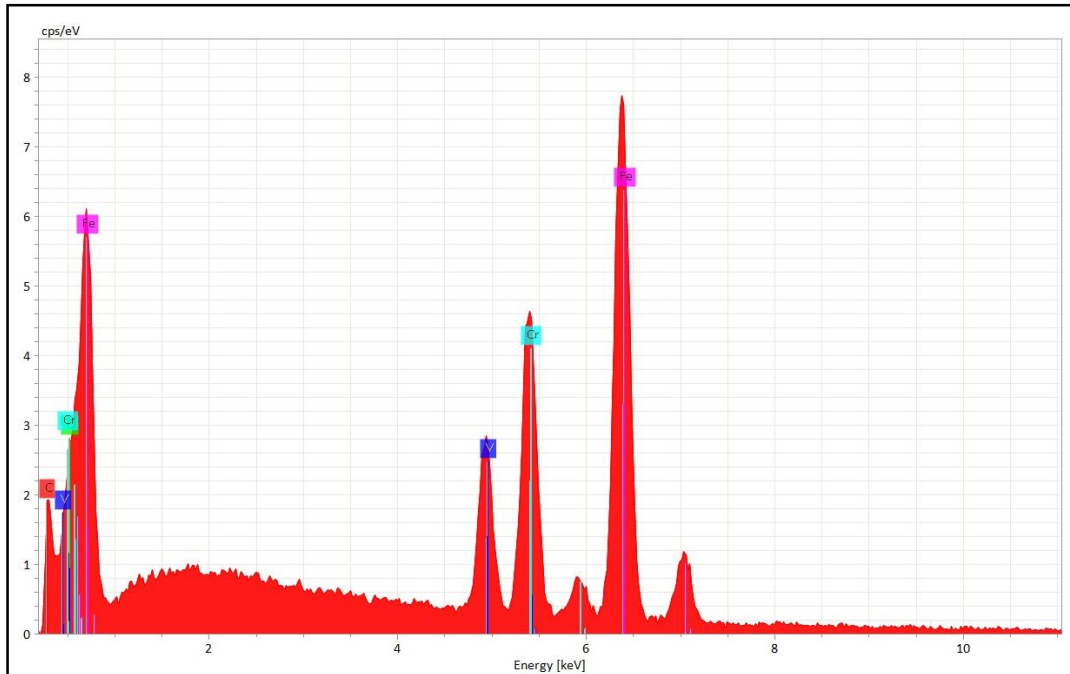
Ilustración 38. Microscopia Electrónica de Barrido del Hierro Blanco Cr-V-Nb Tratado Térmicamente. (a) 500X. (b) 1000X.



Fuente. Autor del proyecto.

En la ilustración 39 se observa el espectro de EDS del material Cr-V-Nb donde se corrobora la presencia de los contenidos (Fe, Cr, V, C), se visualizan en forma de picos los elementos aleantes.

Ilustración 39. EDS del Hierro Blanco Cr-V-Nb.

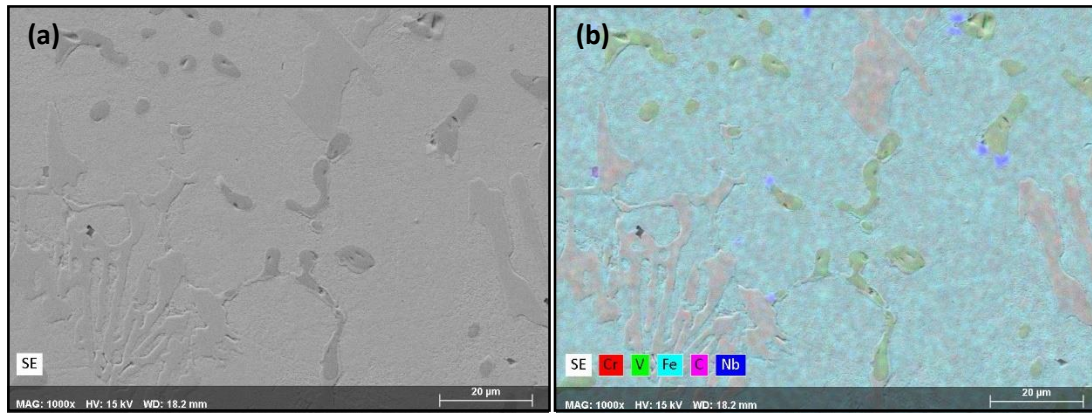


Fuente. Autor del proyecto.

Se realiza el mapeo químico de la aleación Cr-V-Nb para conocer la respectiva distribución de los elementos de aleación en la fundición del hierro blanco.

Se muestra la zona analizada donde se reconocen los elementos aleantes que componen la aleación Cr, V, Nb, Fe y C.

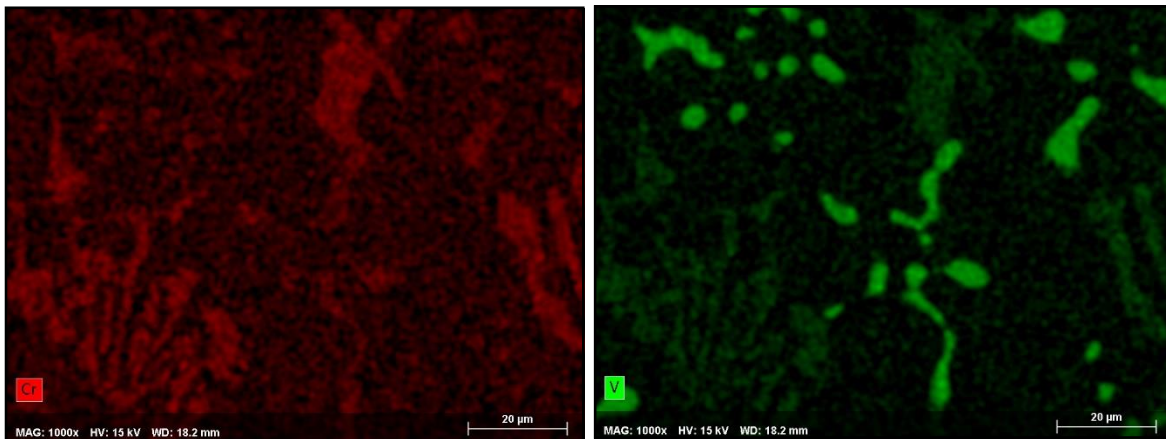
Ilustración 40. Mapeo Químico General del Hierro Blanco Cr-V-Nb. (a) Zona Analizada. (b) Mapeo.

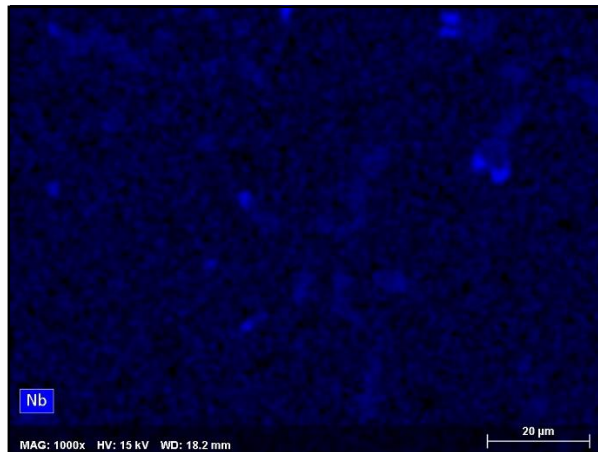


Fuente. Autor del proyecto.

En la ilustración 41 se puede visualizar la presencia del Cr, V y Nb ubicados en la zona de los carburos.

Ilustración 41. Mapeos Químicos del Hierro Blanco Cr-V-Nb.

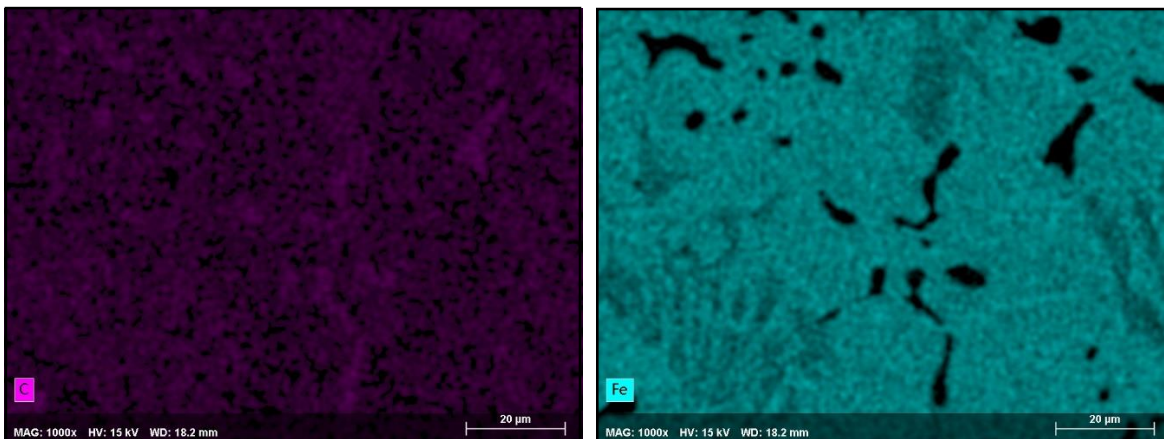




Fuente. Autor del proyecto.

En la ilustración 42 se puede visualizar la presencia de Fe y C ubicado en forma uniforme en la matriz.

Ilustración 42. Mapeo Químico del Hierro blanco C-Fe.



Fuente. Autor del proyecto.

6.2.3 Difracción de Rayos X

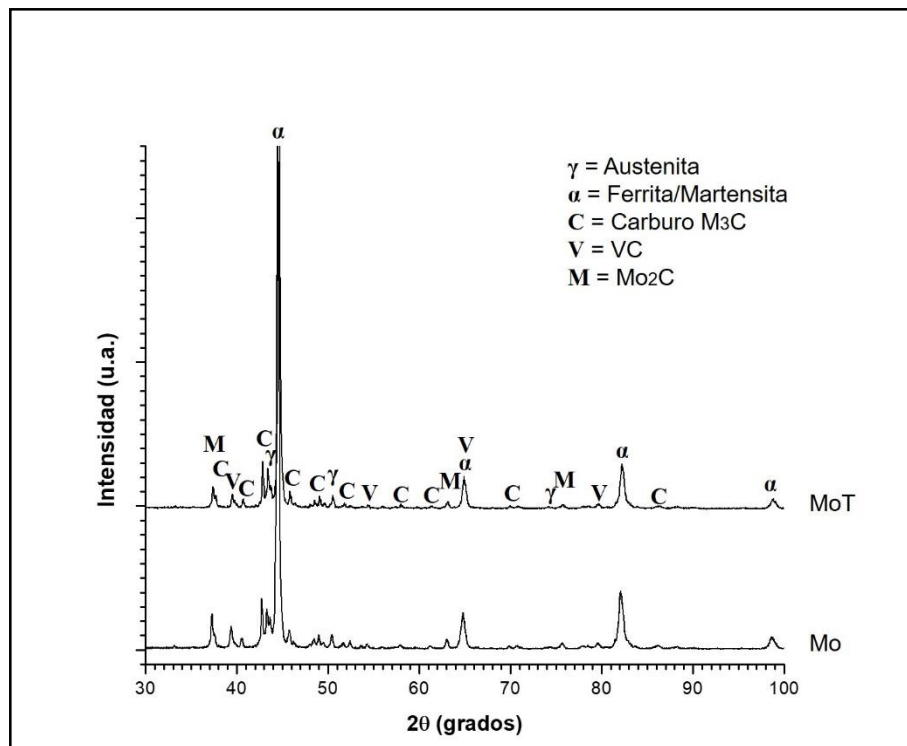
La implementación de DRX permite identificar las fases presentes en la fundición de hierro blanco, tanto en colada como tratada térmicamente para las dos aleaciones obtenidas.

En la ilustración 43 se puede apreciar los resultados de la fundición Cr-V-Mo en condición de colada y tratada térmicamente. En los respectivos picos característicos se muestra la gráfica Mo, se tiene la ferrita/martensita a un máximo pico y dos

pequeños picos con ángulo de difracción a (44.5° 65° 83°), en la gráfica MoT se encuentran los picos característicos ferrita/martensita a (44.5° 65° 83°), pico carburo VC a difracción 65° y pequeño pico en ángulo de difractograma a (39), la presencia de austenita en un pico pequeño en ángulo a (44) e identificación de picos de carburos M_3C que difractan a (41 43 35.5 46), Mo_2C (37 63).

El tratamiento térmico promovió la precipitación de los carburos en la matriz.

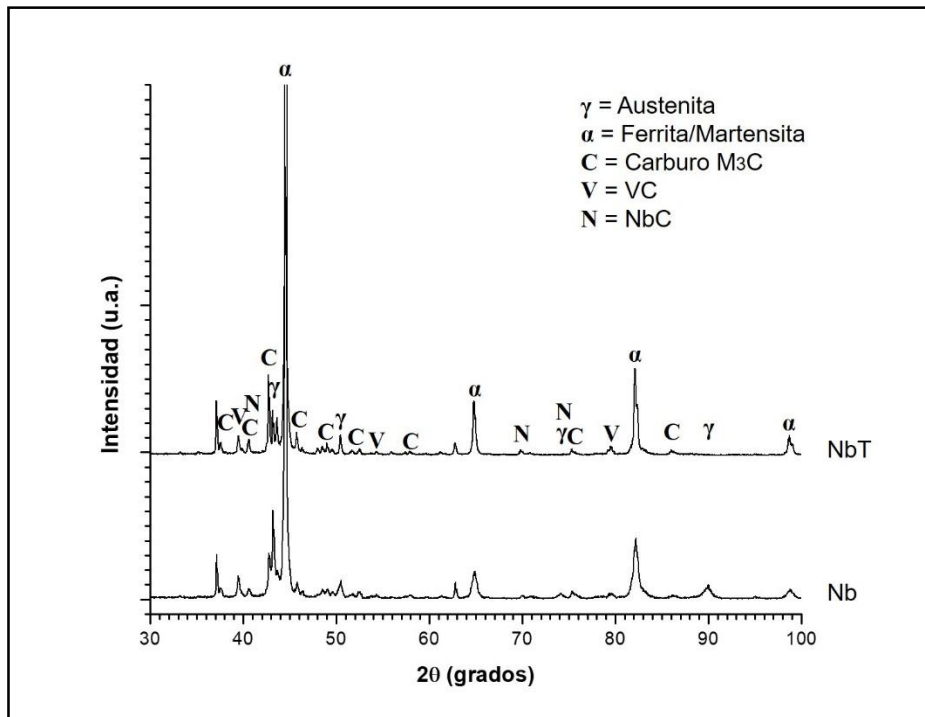
Ilustración 43. Difractograma de la Muestra del Hierro Blanco Cr-V-Mo, se Observa en Condiciones de Colada y Tratada Térmicamente.



Fuente. Autor del proyecto.

En la ilustración 44. Se puede observar los resultados de la fundición Cr-V-Nb en condición de colada y tratada térmicamente. En los respectivos picos característicos se visualiza en la gráfica del Nb la ferrita/martensita a un máximo pico y dos pequeños picos con ángulo de difracción a (44.5° 65° 82.5° 99°), en la gráfica NnT se encuentran los picos característicos ferrita/martensita a (44.5° 65° 82.5° 99°), pico carburo VC a difracción 39° y pequeño pico en ángulo de difractograma a (79), la presencia de austenita en un pico pequeño en ángulo a (43.2° 50.5°) e identificación de picos de carburo M_3C que difractan a (43 picos alto 41.7 46 NbC (41.7 75.5)).

Ilustración 44. Difractograma de la Muestra del Hierro Blanco Cr-V-Nb, se muestra en Condiciones de Colada y Tratada Térmicamente.



Fuente. Autor del proyecto.

6.3 DUREZA ROCKWELL C

Se realiza esta técnica con el fin de conocer la variación entre la dureza de la fundición en condición de colada y tratada térmicamente, con el fin de conocer su dureza frente al desgaste que tiene cuando es implementada en la industria.

Tabla 8. Dureza Rockwell C (HRC) Hierro Blanco en Condición de Colada Cr-V-Mo.

INDENTACIÓN No.	1	2	3	4	5	6	7
VALOR (HRC)	55	58	56,95	52,9	55,5	56	56,8

Fuente. Autor del proyecto.

Tabla 9. Resultado del Ensayo de Dureza Rockwell C (HRC) Hierro Blanco en Condición de Colada Cr-V-Mo.

TOTAL	280,25
PROMEDIO	56,05

Fuente. Autor del proyecto.

Tabla 10. Dureza Rockwell C (HRC) Hierro Blanco en Condición de Tratamiento Térmico Cr-V-Mo.

INDENTACIÓN No.	1	2	3	4	5	6	7
VALOR (HRC)	55	54,7	53,75	55,5	53,7	55	54

Fuente. Autor del proyecto.

Tabla 11. Resultado del Ensayo de Dureza Rockwell C (HRC) Hierro Blanco en Condición de Tratamiento Térmico Cr-V-Mo.

TOTAL	272,45
PROMEDIO	54,49

Fuente. Autor del proyecto.

La dureza del material Cr-V-Mo en condición de colada es alta pero se presenta un des aumentó el material tratado térmicamente afectando la propiedad de la dureza.

Tabla 12. Dureza Rockwell C (HRC) Hierro Blanco en Condición de Colada Cr-V-Nb.

INDENTACIÓN No.	1	2	3	4	5	6	7
VALOR (HRC)	54	50,7	51	61,8	55,9	51,1	61

Fuente. Autor del proyecto.

Tabla 13. Resultado del Ensayo de Dureza Rockwell C (HRC) Hierro Blanco en Condiciones de Colada Cr-V-Nb.

TOTAL	273
PROMEDIO	54,6

Fuente. Autor del proyecto.

Tabla 14. Dureza Rockwell C (HRC) Hierro Blanco en Condición de Tratamiento Térmico Cr-V-Nb.

INDENTACIÓN No.	1	2	3	4	5	6	7
VALOR (HRC)	48	48,8	47,1	47,1	46,7	46,8	47,2

Fuente. Autor del proyecto.

Tabla 15. Resultado del Ensayo de Dureza Rockwell C (HRC) Hierro Blanco en Condición de Tratamiento Térmico Cr-V-Nb.

TOTAL	6,6
PROMEDIO	47,4

Fuente. Autor del proyecto.

Desviación estándar para la dureza Rockwell C (HRC) Hierro blanco en condición de colada y tratamiento térmico para las dos fundiciones.

Tabla 16. Resultados Desviación estándar del Ensayo de Dureza Rockwell C (HRC) Hierro Blanco en Condición de Colada y Tratamiento Térmico.

Desviación estándar		
Cr-V-Mo	Colada	1,46
Cr-V-Mo	Tratamiento térmico	0,519
Cr-V-Nb	Colada	3,69
Cr-V-Nb	Tratamiento térmico	0,394

Fuente. Autor del proyecto.

Dentro de los datos tomados, se hizo en ambos casos frente al tratamiento térmico homogenización en las aleaciones.

Los cálculos se pueden ver en el anexo B.

La dureza del material Cr-V-Nb en condición de colada es alta, siendo esta comparada con el material tratado térmicamente se presenta una disminución significativa.

Se puede concluir que para las dos fundiciones realizadas, no es favorable el tratamiento térmico de desestabilización, puesto que en vez de precipitar la matriz para obtener un endurecimiento, está género un efecto contrario disminuyendo la dureza del material, es por esto que los siguientes ensayos se trabajan con el material en condición de colada.

6.4 ANÁLISI DE PERFILOMETRÍA

Se conoce por medio del estudio de perfilometría los parámetros de amplitud del perfil de rugosidad de las muestras, para la aplicación de esta técnica se consulta la norma ISO 4287 donde definen los parámetros implementados.

Parámetros de Amplitud

Rt: Altura total del perfil.

Rp: Altura máxima del pico del perfil.

Rv: Profundidad de valle de perfil máximo.

Rz: Altura máxima del perfil.

Ra: Desviación media aritmética del perfil evaluado.

Rq: Desviación media cuadrática del perfil evaluado.

Rsk: Asimetría del perfil evaluado.

Rku: Curtosis del perfil evaluado.

Rc: Altura media de los elementos del perfil.

Parámetros Funcionales

Rmr: Relación de materiales a una profundidad dada.

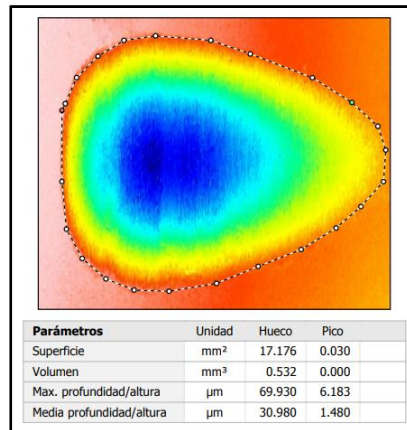
Rdc: Altura de la sección del perfil entre dos relaciones de materiales.

6.4.1 Desgaste por deslizamiento

Se lleva a cabo el ensayo de desgaste por deslizamiento (Block-on-Ring), para las dos fundiciones, se trabaja con carga de 25 y 103N, a un tiempo de 6684 s, en una distancia de 2000 m, con velocidad 0.293 m/s.

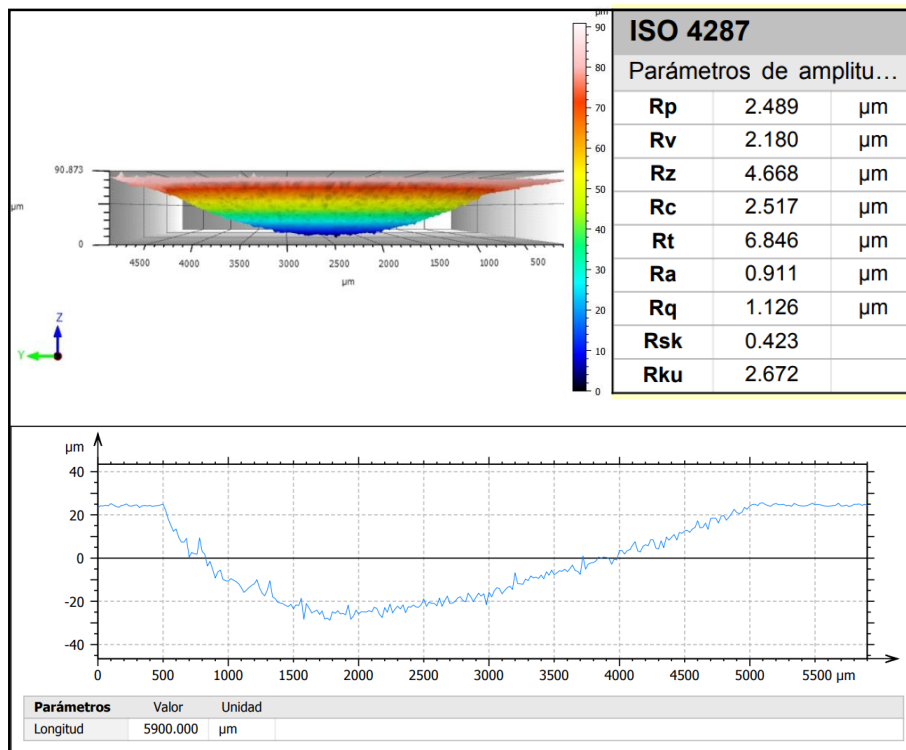
6.41.1 Muestra en condición de colada Cr-V-Mo:

Ilustración 45. Huella de Desgaste por Deslizamiento de la fundición Cr-V-Mo en Condición de Colada a una carga de 25N.



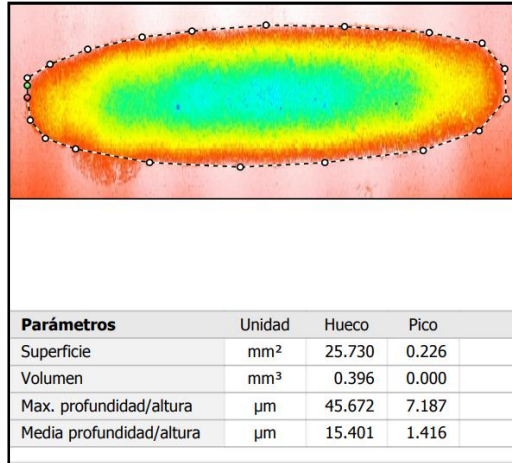
Fuente. Autor del proyecto.

Ilustración 46. Parámetros de Amplitud- Perfil de Rugosidad de la Huella de Desgaste por Deslizamiento de la función Cr –V- Mo en Condición de Colada a una carga de 25N.



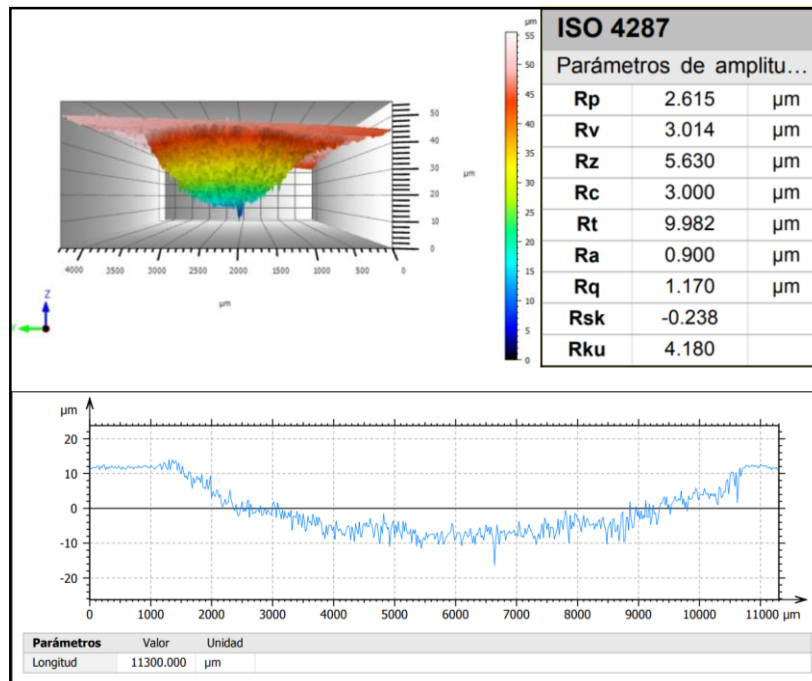
Fuente. Autor del proyecto.

Ilustración 47. Huella de Desgaste por Deslizamiento de la fundición Cr-V-Nb en Condición de Colada a una carga de 25N.



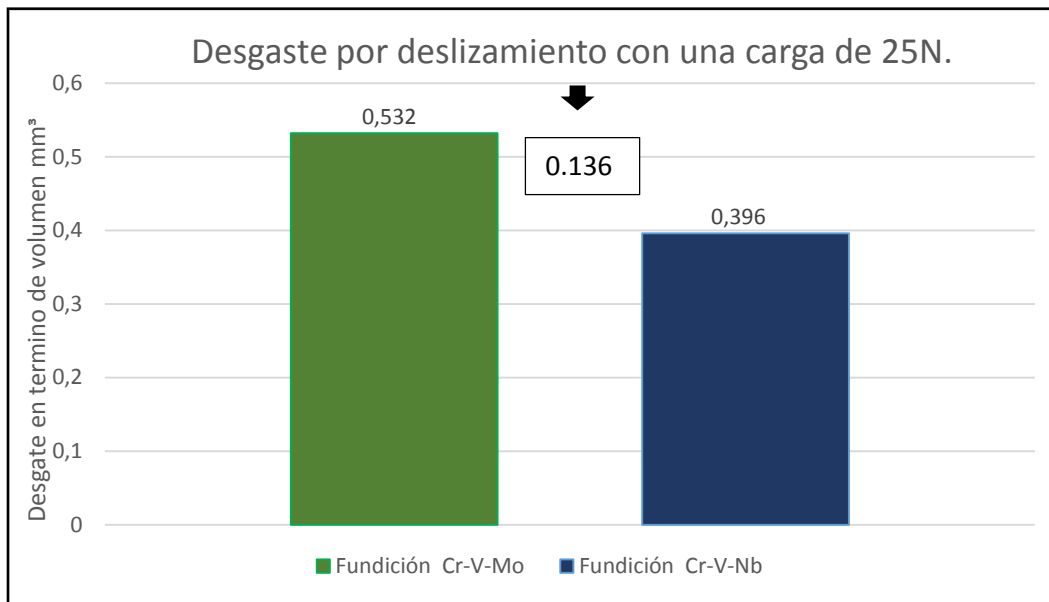
Fuente. Autor del proyecto.

Ilustración 48. Parámetros de Amplitud- Perfil de Rugosidad de la Huella de Desgaste por Deslizamiento de la función Cr –V- Nb en Condición de Colada a una carga de 25N.



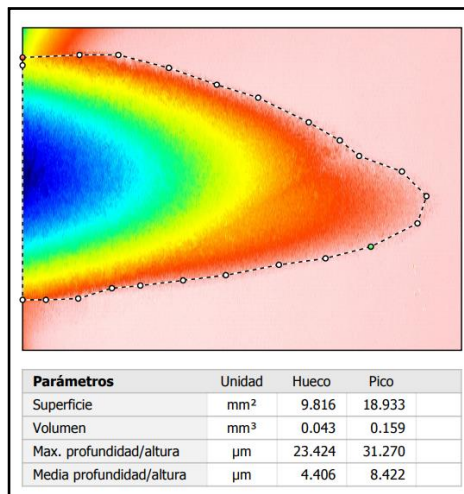
Fuente. Autor del proyecto.

Ilustración 49. Gráfica comparativa del desgaste por deslizamiento en las dos funciones con una misma carga de 25N.



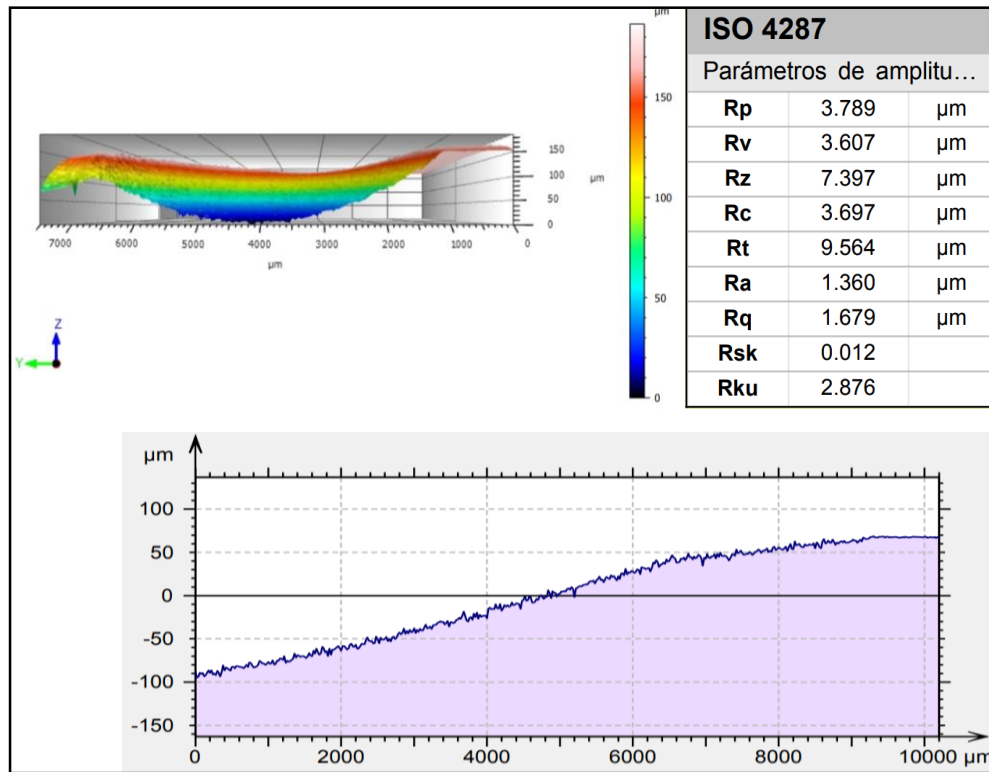
Fuente. Autor del proyecto.

Ilustración 50. Huella de Desgaste por Deslizamiento de la fundición Cr-V-Mo en Condición de Colada a una carga de 103N.



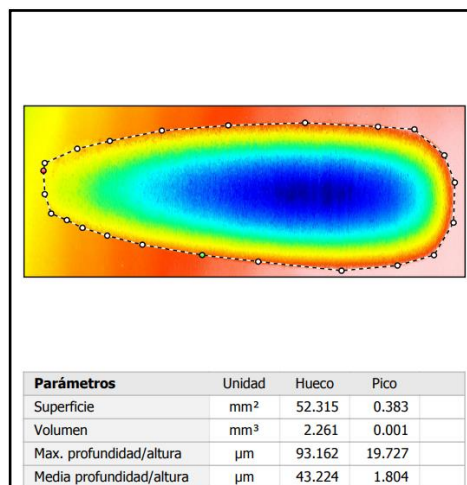
Fuente. Autor del proyecto.

Ilustración 51. Parámetros de Amplitud- Perfil de Rugosidad de la Huella de Desgaste por Deslizamiento de la función Cr-V- Mo en Condición de Colada a una carga de 103N.



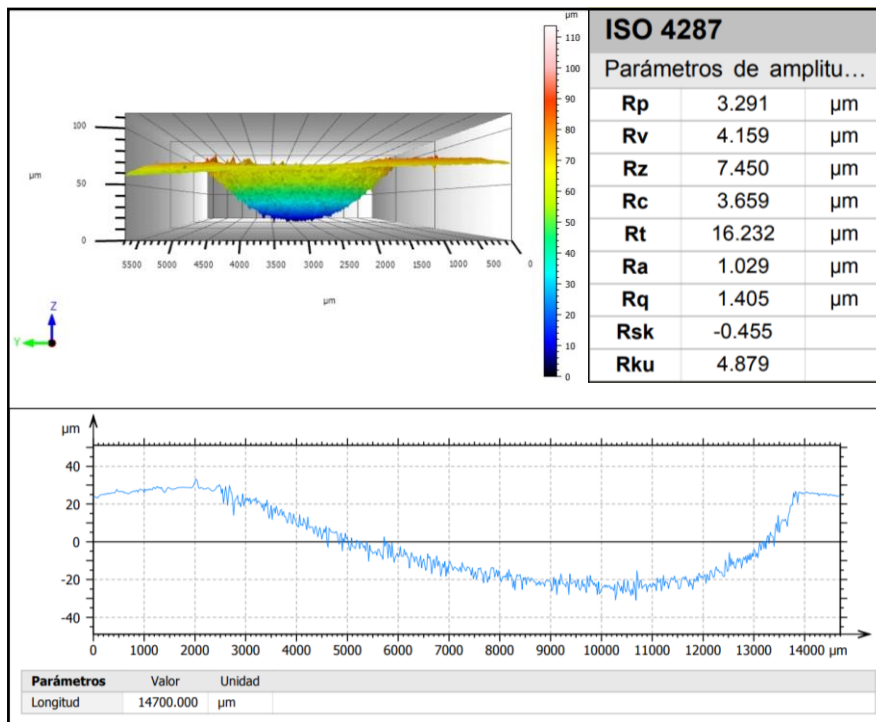
Fuente. Autor del proyecto.

Ilustración 52. Huella de Desgaste por Deslizamiento de la fundición Cr-V-Nb en Condición de Colada a una carga de 103N.



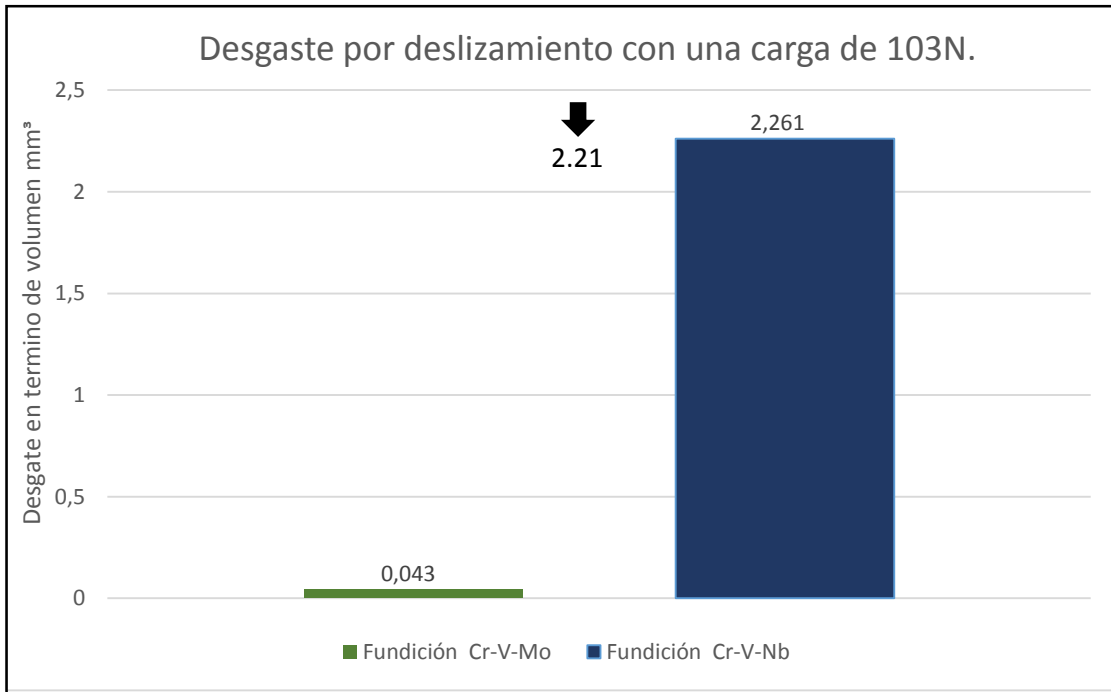
Fuente. Autor del proyecto.

Ilustración 53. Parámetros de Amplitud- Perfil de Rugosidad de la Huella de Desgaste por Deslizamiento de la función Cr -V- Nb en Condición de Colada a una carga de 103N.



Fuente. Autor del proyecto

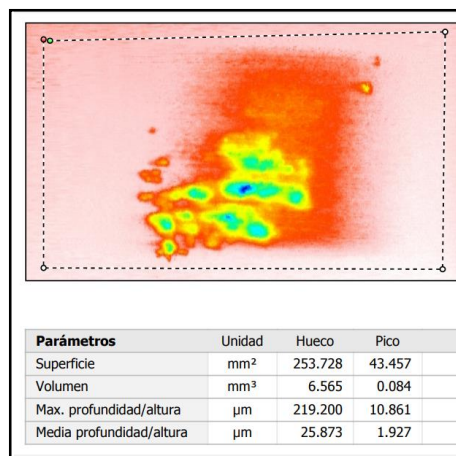
Ilustración 54. Gráfica comparativa del desgaste por deslizamiento en las dos funciones con una misma carga de 103N.



Fuente. Autor del proyecto.

6.4.2 Desgaste abrasivo

Ilustración 55. Huella de desgaste abrasivo aleación Cr-V-Mo a una carga de 58N.



Fuente. Autor del proyecto.

Ilustración 56. Parámetros de Amplitud- Perfil de Rugosidad de la Huella de Desgaste abrasión de la función Cr -V- Mo en Condición de Colada a una carga de 58N.

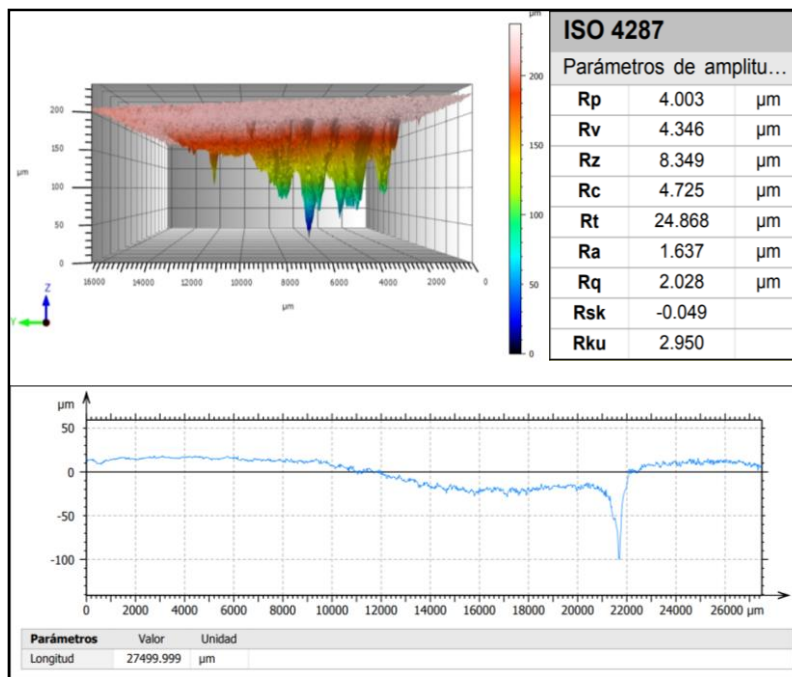
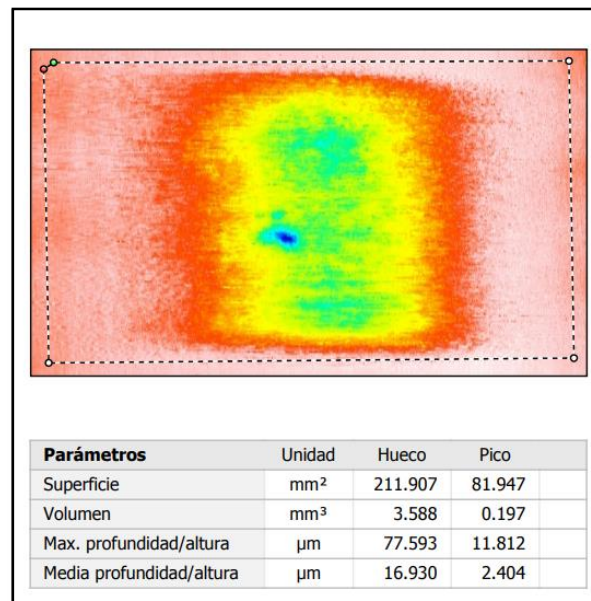
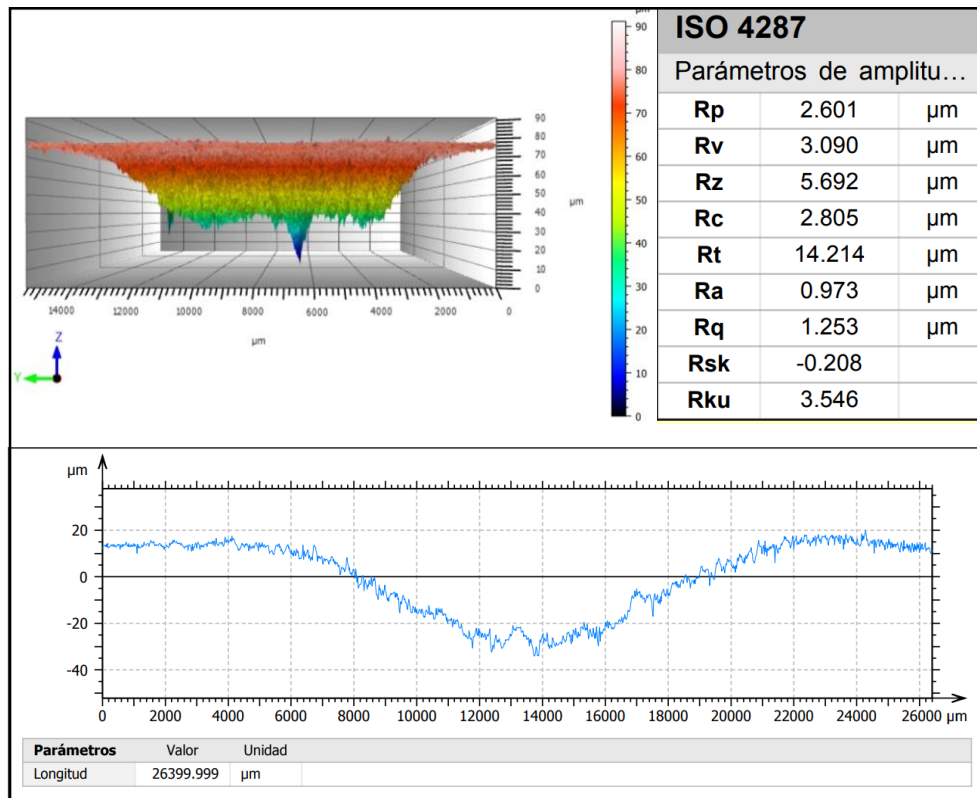


Ilustración 57. Huella de desgaste abrasivo aleación Cr-V-Nb a una carga de 58N.



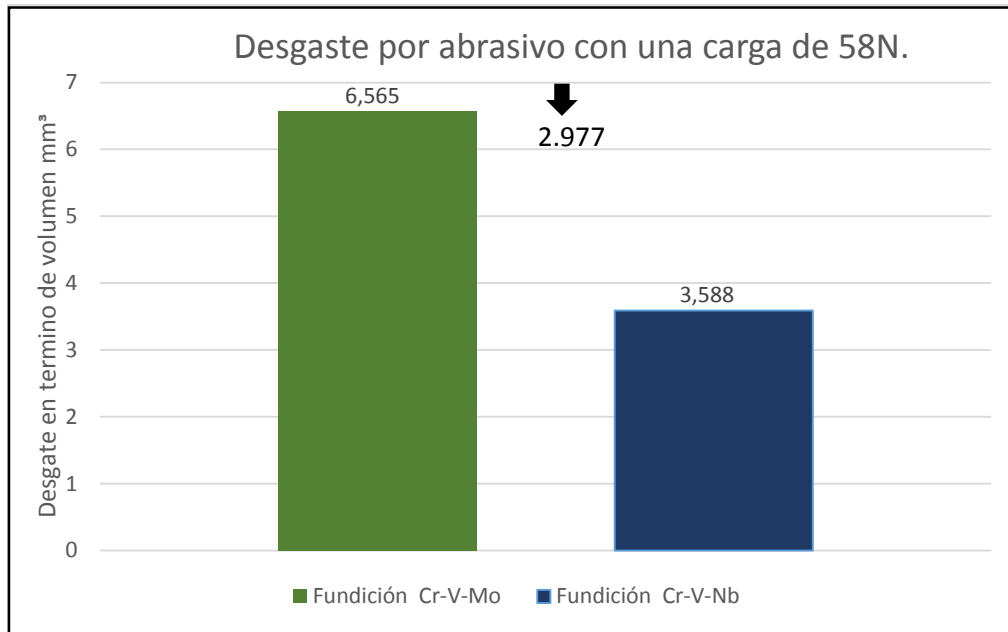
Fuente. Autor del proyecto.

Ilustración 58. Parámetros de Amplitud- Perfil de Rugosidad de la Huella de Desgaste abrasión de la función Cr -V- Nb en Condición de Colada a una carga de 58N.



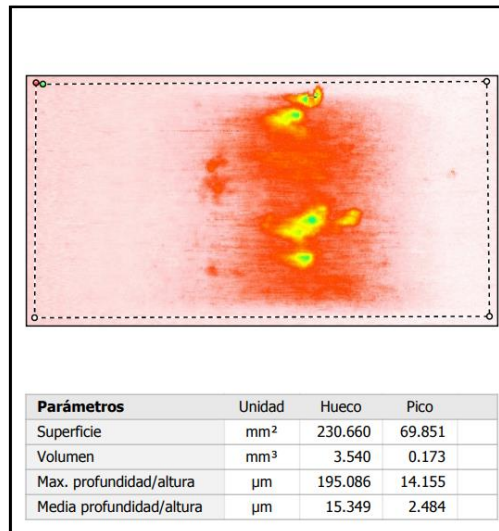
Fuente. Autor del proyecto.

Ilustración 59. Gráfica comparativa del desgaste abrasivo en las dos funciones con una misma carga de 58N.



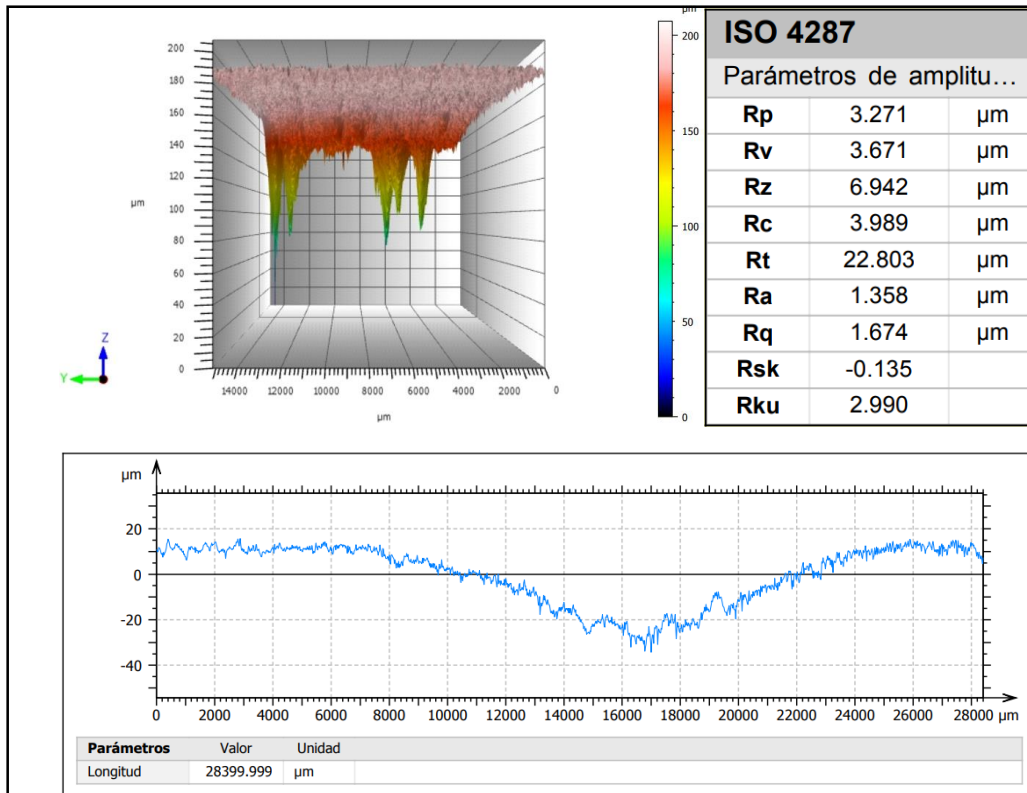
Fuente. Autor del proyecto.

Ilustración 60. Huella de desgaste abrasivo aleación Cr-V-Mo a una carga de 68N.



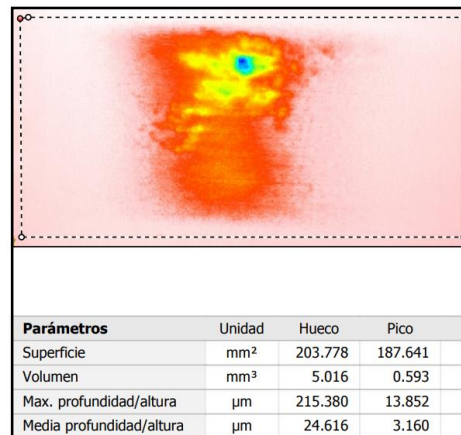
Fuente. Autor del proyecto.

Ilustración 61. Parámetros de Amplitud- Perfil de Rugosidad de la Huella de Desgaste abrasión de la función Cr -V- Mo en Condición de Colada a una carga de 68N.



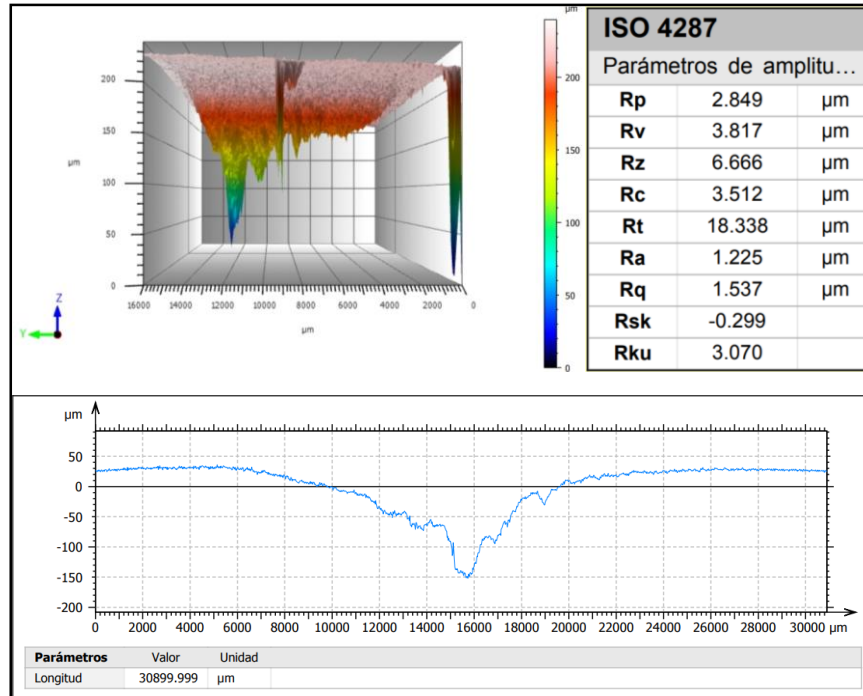
Fuente. Autor del proyecto.

Ilustración 62. Huella de desgaste abrasivo aleación Cr-V-Nb a una carga de 68N.



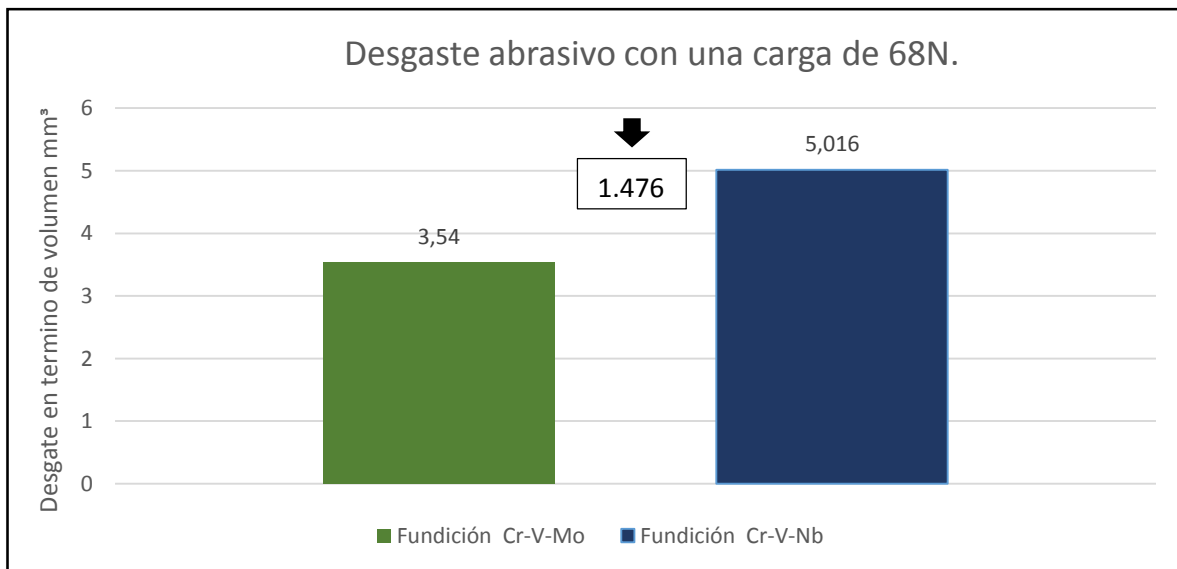
Fuente. Autor del proyecto.

Ilustración 63. Parámetros de Amplitud- Perfil de Rugosidad de la Huella de Desgaste abrasión de la función Cr -V- Nb en Condición de Colada a una carga de 68N.



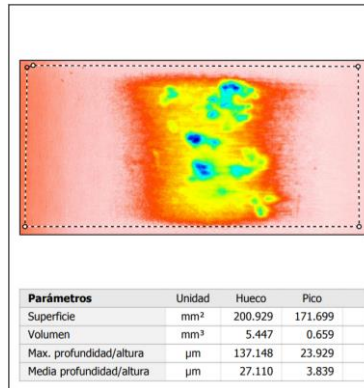
Fuente. Autor del proyecto.

Ilustración 64. Gráfica comparativa del desgaste abrasivo en las dos funciones con una misma carga de 68N.



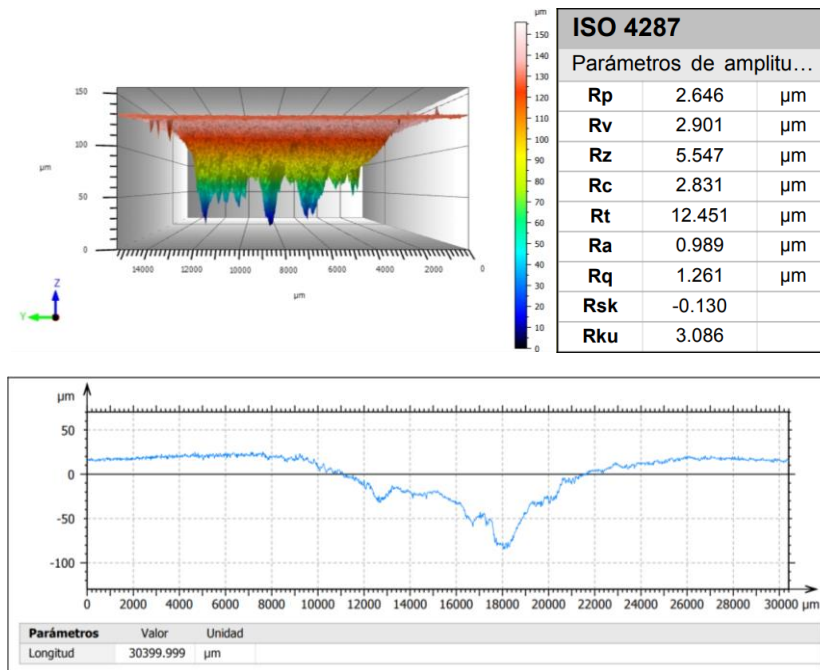
Fuente. Autor del proyecto.

Ilustración 65. Huella de desgaste abrasivo aleación Cr-V-Mo a una carga de 84N.



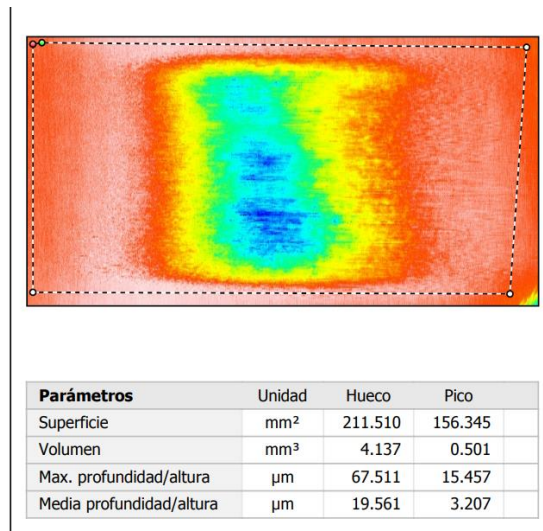
Fuente. Autor del proyecto.

Ilustración 66. Parámetros de Amplitud- Perfil de Rugosidad de la Huella de Desgaste abrasión de la función Cr -V- Mo en Condición de Colada a una carga de 84N.



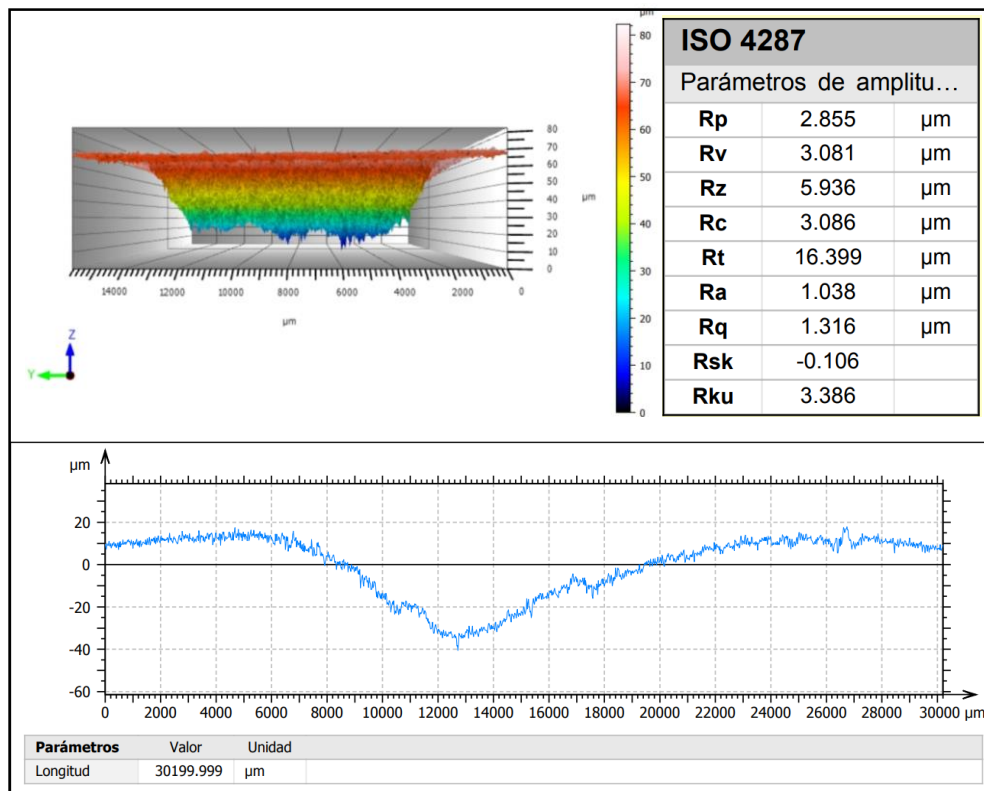
Fuente. Autor del proyecto.

Ilustración 67. Huella de desgaste abrasivo aleación Cr-V-Nb a una carga de 84N.



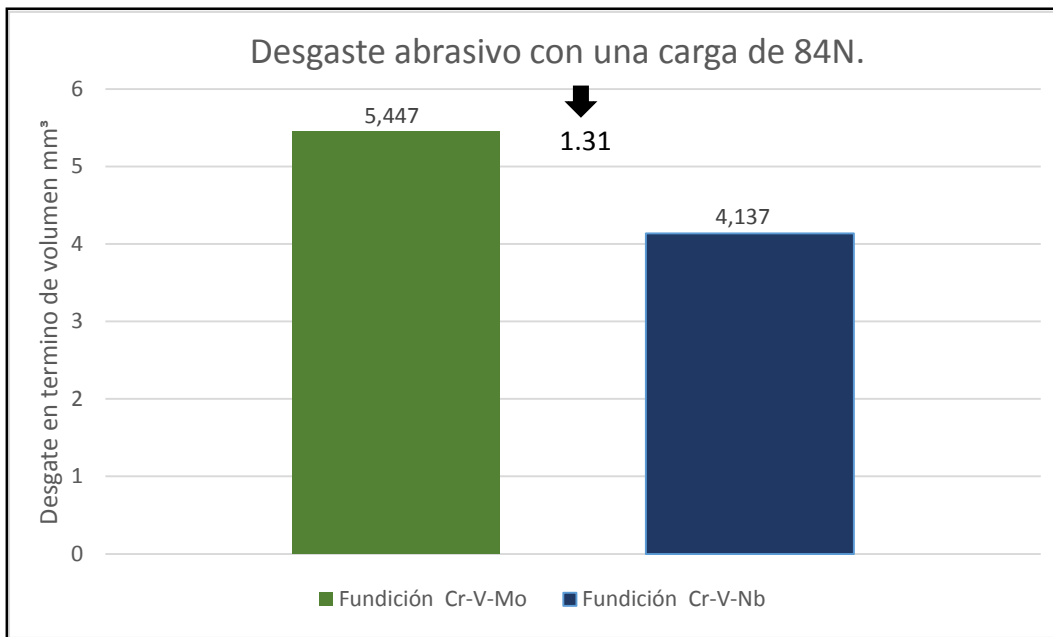
Fuente. Autor del proyecto.

Ilustración 68. Parámetros de Amplitud- Perfil de Rugosidad de la Huella de Desgaste abrasión de la función Cr -V- Nb en Condición de Colada a una carga de 84N.



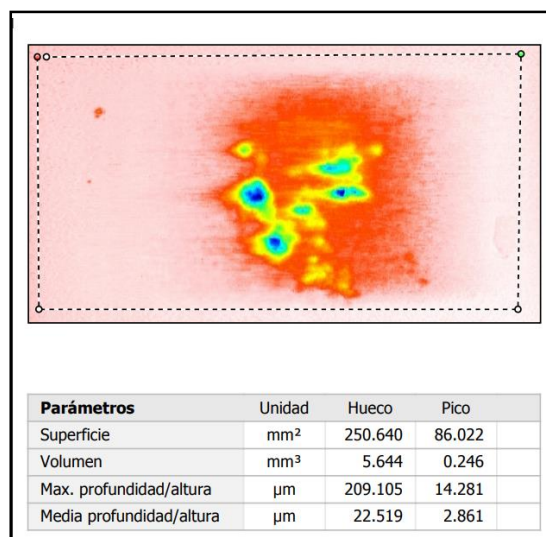
Fuente. Autor del proyecto.

Ilustración 69. Gráfica comparativa del desgaste abrasivo en las dos funciones con una misma carga de 84N.



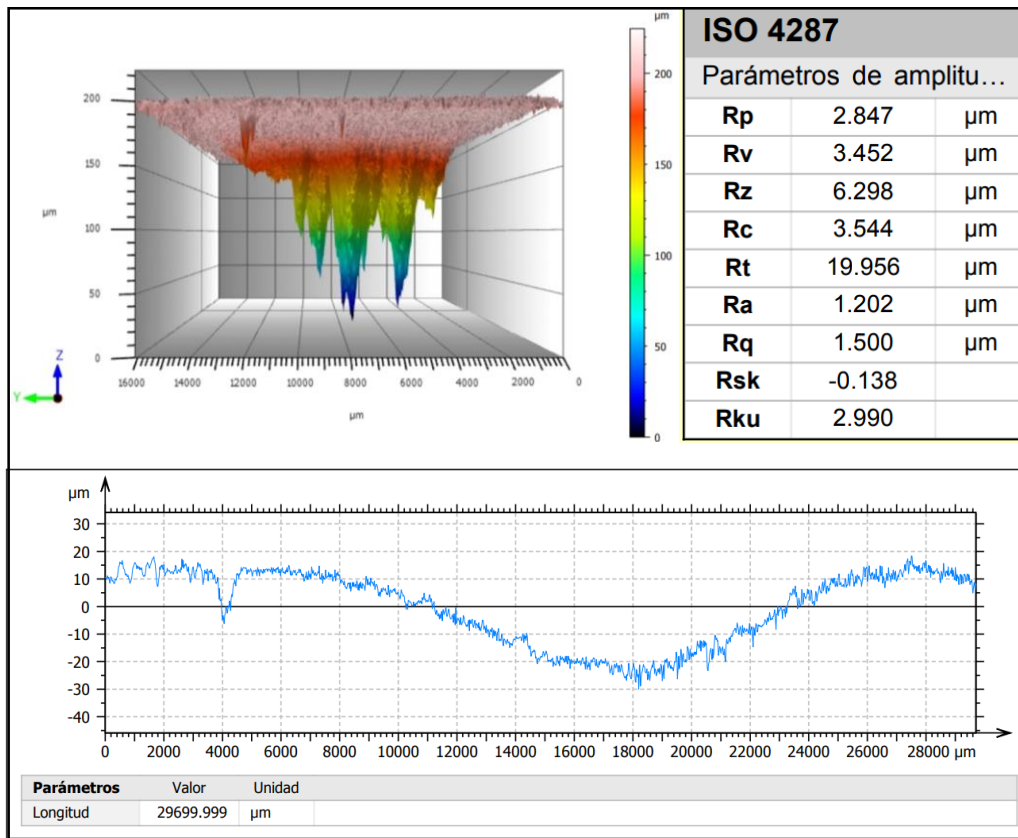
Fuente. Autor del proyecto.

Ilustración 70. Huella de desgaste abrasivo aleación Cr-V-Mo a una carga de 93N



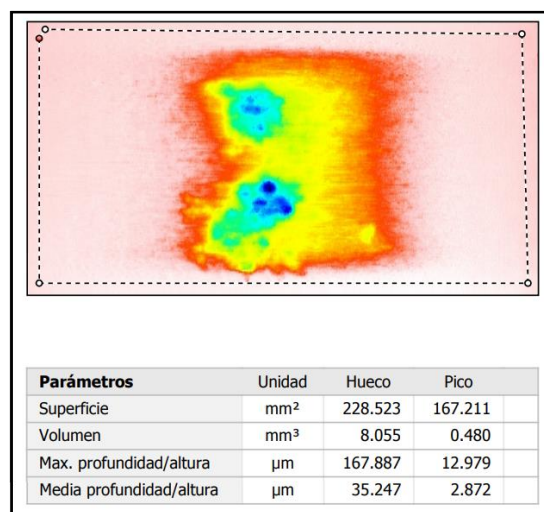
Fuente. Autor del proyecto.

Ilustración 71. Parámetros de Amplitud- Perfil de Rugosidad de la Huella de Desgaste abrasión de la función Cr -V- Nb en Condición de Colada a una carga de 93N.



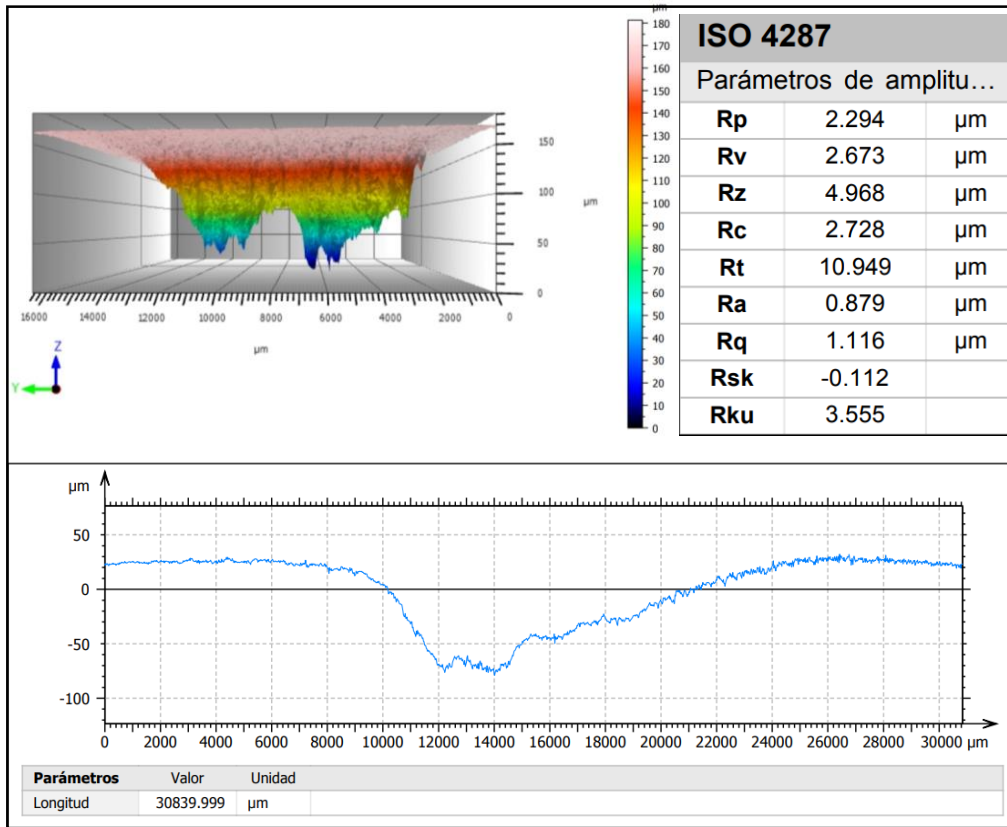
Fuente. Autor del proyecto.

Ilustración 72. Huella de desgaste abrasivo aleación Cr-V-Nb a una carga de 93N.



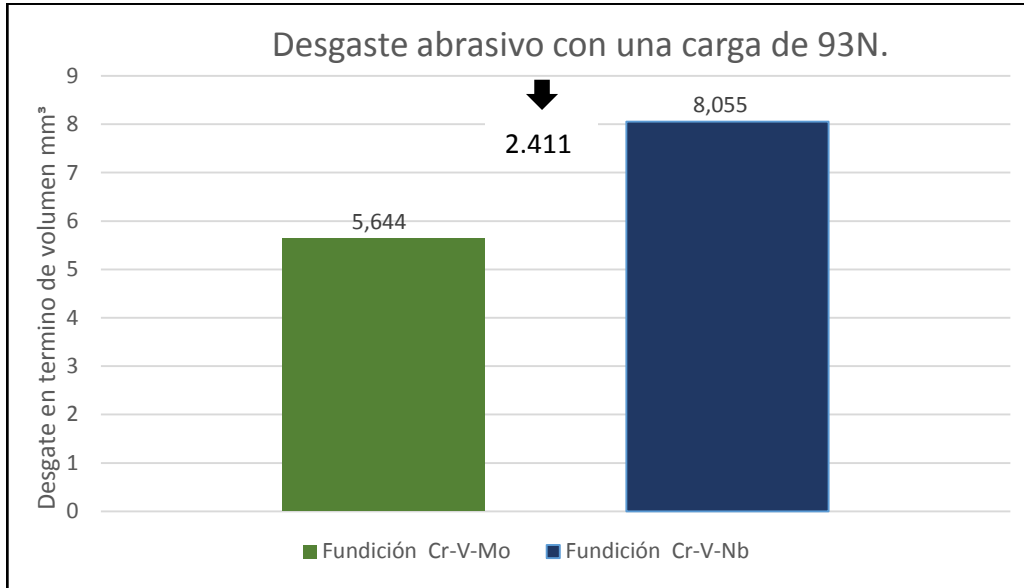
Fuente. Autor del proyecto.

Ilustración 73. Parámetros de Amplitud- Perfil de Rugosidad de la Huella de Desgaste abrasión de la función Cr -V- Nb en Condición de Colada a una carga de 93N.



Fuente. Autor del proyecto.

Ilustración 74. Gráfica comparativa del desgaste abrasivo en las dos funciones con una misma carga de 93N.



Fuente. Autor del proyecto.

7. CONCLUSIONES

- La fundición Cr-V-Mo en condición de colada presenta una microestructura de cementita rodeada de perlita, bajo el tratamiento térmico en la matriz se distribuye uniformemente los carburos secundarios, para la fundición Cr-V-Nb en condición de colada la microestructura que se obtiene es de apariencia acicular de la martensita y presencia de carburos M_3C y Niobio.
- En la difracción de rayos X obtenida para las dos fundiciones en condición de colada y tratada térmicamente se identificaron picos característicos del hierro la aparición de carburos y difracción en los ángulos típicos, se corrobora que hubo un efecto de distribución de los precipitados en la matriz
- En la resistencia al desgaste la presencia de los carburos actúan frente a la remoción del material, debido a la disminución de pérdida de masa, efecto causado por la presencia de Nb y Mo, se observa un comportamiento frágil debido al desgarramiento de la fundición Cr-V-Mo donde se substraen los carburos a mayores cargas en comparación con la fundición Cr-V-Nb se observa que los carburos quedan embebidos en la matriz.

8. RECOMENDACIONES

- Este trabajo de investigación, puede ser tomado para futuras propuestas o estudios complementarios para la evaluación de otros ensayos y propiedades distintos, los cuales aporten y contribuyan a la línea de materiales.
- Se recomienda que se utilicen las aleaciones en piezas que estén sometidas a una fuerza y velocidad.
- Realizar microscopia electrónica de barrido en las probetas de resultado de la prueba desgaste para verificar que mecanismo de desgaste actuó.
- Evaluar la influencia en otro tipo de tratamiento para determinar su efecto en las propiedades evaluadas en este trabajo.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Amaya Álvarez, “Fabricación y caracterización microestructural de un hierro blanco aleado con Cr-V-Ti para aplicaciones de desgaste”, pp. 1-84 2018.
- [2] D. R. Askeland, Ciencia e Ingeniería de los Materiales. International Thomson Editores, Vol. 3, Cap. 12, p. 349, 1998.
- [3] F. Guerra, A. Bedolla, I. Mejía, J. Zuno, “El efecto de la adición de boro y el tiempo de austenización en la microestructura en la propiedad de dureza y tracción del hierro dúctil”, 2015.
- [4] I. Fernández, F. Belzunce, “Influencia de los tratamientos térmicos en la microestructura con alto contenido de cromo”, 2016.
- [5] A. Bedolla, F. Guerra, I. Mejía, W. Rainforth, “Abrasive wear of V–Nb–Ti alloyed high-chromium white irons”, 2015.
- [6] A. Bedolla, R. Correa, J. Quezada, C. Maldonado, “Effect of titanium on the as-cast microstructure of a 16%chromium white iron”, 2005.
- [7] M. Mohommadnehad, “Effects of vanadium Addition on, microstructure, Mechanical PropertieS and Wear Resistance of Ni-HARD 4, White Cast Iron”, 2013.
- [8] D. Sabre, H. Sallam, K. Zohdy, “El desgaste y el comportamiento a la corrosión de alta Cr blanco fundido Aleaciones en medio corrosivos”, 2015.
- [9] E. Cortes, A. Bedolla, I. Mejía, “Efectos de tungsteno en la microestructura y en el comportamiento de desgaste abrasivo de un hierro blanco de alto cromo”, 2017
- [10] A. Nofal, R. Reham, “Structural refinement of 15% Cr-2% Mo white irons”, 2010.
- [11] Y. Fernandez, “Desgaste de las bolas de molinos emmpleados en la triturarion de mineral lateritico”, 2007.
- [12] I. Mejía A, Bedolla, J. Paolo, “Comportamiento de desgaste de una plasticidad inducida de alto Mn austenitico de acero microaleado con Nb”, 2012.
- [13] I. Morales, “Efecto del tratamiento térmico de desestabilización en el desgaste de hierros blancos de alto cromo”, 2009.
- [14] “Microscopia Electrónica de Barrido”. [Online]. Available : <https://www.pce-instruments.com/f/espanol/media/microscopio-info-tipo-construccion.pdf> [Accessed: 03-Mar-2019].
- [15] “Cristalografía de rayos X”. [Online]. Available: <https://www.sebbm.es/web/es/divulgacion/rincon-profesor-ciencias/articulos->

divulgacion-cientifica/314-cristalografia-de-rayos-x-de-macromoleculas [Accessed: 12-Mar-2019].

[16] “Ensayo de Dureza Rockwell C”. [Online]. Available:http://gomez2010.weebly.com/uploads/5/8/0/2/5802271/guia_dureza_rockwell_ing._luis_gomez_.pdf. [Accessed: 01-Feb-2019].

[17] “Ensayo de Dureza de los Materiales”. [Online]. Available: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn218.html> [Accessed: 12-Mar-2019].

[18] ASTM. (s.f.), ASTM g77-17 STANDARD Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test

[19] ASTM. (s.f.), ASTM E3 – 11 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens.

[20] ASTM. (s.f.), ASTM E92 – 17 Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials.

[21] ASTM. (s.f.), ASTM G65 – 16 Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus.

[22] ASTM. (s.f.), ASTM A532 – 10 Standard Specification for Abrasion-Resistant Cast Irons-

[23.] L. Choque Mendiguri, “Proceso para la fabricación de hierro blanco de alto Cromo aplicado a la industria del desgaste abrasivo”,2017.

[24] O. Flórez, R. Castaño, F. Higuera, “Comportamiento microestructural de una fundición blanca al alto cromo sometida a ciclos de tratamiento térmico”,2010.

[25] J. Coronado, A. Sinatora, “Abrasive wear study of white cast iron with different solidification rates”, 2009.

[26] E. Crespo, D. Aparicio, “Tratamientos térmicos de una fundición blanca”.2005.

[27] V. Heino, M. Kallio, K. Valtonen, “The role of microstructure in high stress abrasión of White cast irons”. 2007

[28] A. Bedolla, B. Hernández, L. Béjar, “Study on the M_7C_3 carbide nucleation during eutectic solidification of high-chromium white irons”, 2005.

[29] A. López, J.A. Ramos, J. Marín, “Hierros fundidos de baja aleación para fabricar piezas resistentes al desgaste”, 2010.

- [30] E. Rodríguez, T. Azaña, “Efecto de los tratamientos térmicos de recocido, temple, revenido y austempering sobre la dureza y microestructura de una fundición blanca hipoeutéctica”, 2016.
- [31] O.N. Dogan, J.A. “Hawk, Effect of carbide orientation on abrasion of high Cr white cast iron”, 1995.
- [32] M. Rodríguez P. Lorenzo, “Análisis Microestructural de revestimientos de fundiciones blancas hipoeutécticas con adiciones de Si y V”.
- [33] S. Brito- L. Mesek, “Análisis del efecto del contenido de molibdeno y vanadio en la resistencia a la abrasión de una fundición blanca Fe-23 Cr-3C”,2007.
- [34] L. Guillen – L. Margarita, “Hierros blancos de alto cromo”,2009.
- [35] C. Castillo, “Efecto de la adición de molibdeno y níquel en la fabricación de hierro dúctil austemperizado”, 2018.
- [36] R. Reda, A. Nofal, “Investigation of improving wear performance of hypereutectic 15%Cr-2%Mo white irons”, 2008.
- [37] M. Youping, L. Xiulan, “Effect of Ti-V-Nb-Mo addition on microstructure of high chromium cast iron”, 2012.
- [38] M. Filipovic, Z. Kamberovic, “Microstructure and mechanical properties of Fe–Cr–C-Nb white cast irons”, 2013.
- [39] S. Imurai, C. Thanachayanon , “Effects of Mo on microstructure of as-cast 28 wt.% Cr–2.6 wt.% C–(0–10) wt.% Mo irons”, 2014.
- [40] M. Maja, M. Maruma, “Effect of niobium on the solidification structure and properties of hypoeutectic high-chromium white cast iron”, 2016.
- [41] A. Nofal, R. Reda, “Structural refinement of 15% Cr-2% Mo white irons”, 2010.
- [42] C. Albino, D. Diaz, “Microstructure characterisation and mechanical properties of a functionally-graded NbC/high chromium white cast iron composite”, 2017.
- [43] L. Wenlian, “Influence of Niobium on Abrasion Resistance of High CE Gray Cast Irons”, 2011.

[44] I. Dugic, "Effect of Molybdenum Content, Pouring Temperature and Cooling Rate on the Casting Defects of High Chromium White Cast Iron", 2017.

[45] A. Bedolla "Niobium in Cast Irons", 2016.

[46] M. Hirose, "Abrasion Behavior of High Cr-V-Nb Cast Iron", 2010.

[47] NTC 1486 Documentación. Presentación de Tesis, Trabajos de Grado y Otros Trabajos de Investigación. (s.f.).

[48] Ntc 5613 Referencias Bibliograficas, Contenido, Forma y Estructura. (s.f.).

10. ANEXOS

Anexo A. Análisis Químico

7/05/2018 09:56:41 PM

QMatrix Analysis Results

Sample Identification										
SampleNo 1	MUESTRA					UMSNH				
	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %	Ni %	Cu %	Al %
⊖	2.975	0.012	0.013	0.005	0.031	5.201	1.392	0.034	0.016	0.100
σ	0.256	0.167	0.008	0.023	0.012	0.053	0.070	0.018	0.007	0.002
υ	7.543	22.24	1.326	10.46	1.44	0.439	4.773	1.192	3.850	5.732

	As %	B %	Bi %	Ce %	Co %	Mg %	N %	Nb %	Pb %	Sb %
⊖	0.006	<0.001	0.047	0.001	0.011	0.010	0.029	0.010	0.011	<0.01
σ	0.002		0.005	0.005	0.001	0.004	0.018	0.050	0.005	
υ	3.158		8.354	38.46	4.167	35.00	30.51	67.57	23.75	

7/05/2018 10:06:44 PI

QMatrix Analysis Results

Sample Identification										
SampleNo 2	MUESTRA					UMSNH				
	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %	Ni %	Cu %	Al %
⊖	3.172	0.014	0.016	0.004	0.050	5.101	0.010	0.011	0.016	0.100
σ	0.222	0.227	0.018	0.023	0.015	0.073	0.047	0.038	0.017	0.004
υ	7.433	23.26	1.566	10.46	1.56	0.554	5.673	1.435	3.120	5.236

	As %	B %	Bi %	Ce %	Co %	Mg %	N %	Nb %	Pb %	Sb %
⊖	0.006	<0.001	0.061	0.010	0.018	0.010	0.034	0.438	0.020	<0.01
σ	0.004		0.004	0.007	0.002	0.004	0.012	0.093	0.005	
υ	3.268		9.334	38.33	5.187	34.00	31.59	68.37	23.74	

Anexo B. Desviación Estándar

Ecuación de desviación estándar

$$DE = \sqrt{\frac{\sum |x - \mu|^2}{N}}$$

- Condición de colada Cr-V-Nb

Datos 54 – 51 – 55.9 – 51.1- 61

$$\mu = \frac{54+51+55.9+51.1+61}{5} = \frac{273}{5} = 54.6$$

$$|x - \mu|^2$$

$$|54 - 54.6|^2 = 0.36$$

$$|51 - 54.6|^2 = 12.96$$

$$|55.9 - 54.6|^2 = 1.96$$

$$|51.1 - 54.6|^2 = 12.25$$

$$|61 - 54.6|^2 = 40.96$$

$$\sqrt{\frac{0.36+12.96+1.96+12.25+40.96}{5}} = \sqrt{\frac{68.22}{5}} = 3.69$$

- Condición colada Cr-V-Mo

Datos 56.95 – 52.9 – 55.5 – 56- 56.8

$$\mu = \frac{56.95+52.9+55.5+56+56.8}{5} = \frac{278.15}{5} = 55.63$$

$$|x - \mu|^2$$

$$|56.95 - 55.63|^2 = 1.742$$

$$|52.9 - 55.63|^2 = 7.45$$

$$|55.5 - 55.63|^2 = 0.016$$

$$|56 - 55.63|^2 = 0.136$$

$$|56.8 - 55.63|^2 = 1.368$$

$$\sqrt{\frac{1.742+7.45+0.016+0.136+1.368}{5}} = \sqrt{\frac{10.714}{5}} = 1.46$$

- Condición tratamiento térmico Cr-V-Nb

Datos 48 – 47.1 – 47.1 – 46.8- 47.2

$$\mu = \frac{48+47.1+47.1+46.8+47.2}{5} = \frac{236.2}{5} = 47.24$$

$$|x - \mu|^2$$

$$|48 - 47.24|^2 = 0.57$$

$$|47.1 - 47.24|^2 = 0.019$$

$$|47.1 - 47.24|^2 = 0.019$$

$$|46.8 - 47.24|^2 = 0.16$$

$$|47.2 - 47.24|^2 = 0.0016$$

$$\sqrt{\frac{0.57+0.019+0.019+0.16+0.0016}{5}} = \sqrt{\frac{0.769}{5}} = 0.392$$

- Condición tratamiento térmico Cr-V-Mo

Datos 55 – 54.7 – 53.75 – 55- 54

$$\mu = \frac{55+54.7+53.75+55+54}{5} = \frac{272.45}{5} = 54.49$$

$$|x - \mu|^2$$

$$|55 - 54.49|^2 = 0.260$$

$$|54.7 - 54.49|^2 = 0.0441$$

$$|53.75 - 54.49|^2 = 0.547$$

$$|55 - 54.49|^2 = 0.260$$

$$|54 - 54.49|^2 = 0.240$$

$$\sqrt{\frac{0.260+0.0441+0.547+0.260+0.240}{5}} = \sqrt{\frac{1.351}{5}} = 0.519$$

