



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

ANÁLISIS DEL EFECTO DEL CONTENIDO DE MOLIBDENO Y VANADIO EN LA RESISTENCIA A LA ABRASIÓN DE UNA FUNDICIÓN BLANCA Fe-23Cr-3C

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

LUKAS MESEK SÁEZ BRITO

PROFESOR GUÍA
ALEJANDRO VARGAS USCATEGUI

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
RODRIGO PALMA HILLERNS
AQUILES SEPÚLVEDA OSSES

SANTIAGO DE CHILE
2017

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil Mecánico
POR: Lukas Mesek Sáez Brito
FECHA: 17/11/2017
PROFESOR GUÍA: Alejandro Vargas Uscategui

ANÁLISIS DEL EFECTO DEL CONTENIDO DE MOLIBDENO Y VANADIO EN LA RESISTENCIA A LA ABRASIÓN DE UNA FUNDICIÓN BLANCA Fe-23Cr-3C.

A lo largo de los años, se ha identificado que uno de los mecanismos de desgaste más común en la industria minera es el desgaste por abrasión, siendo evidente en los equipos como chancadores y bombas de pulpa mineral entre otros. Resulta entonces importante estudiar materiales que puedan ser aplicados en piezas de estos equipos con el objetivo de disminuir los costos asociados a su reparación o reemplazo, producidos por el desgaste masivo y efectos de corrosión.

El propósito de esta investigación fue analizar el efecto del contenido de molibdeno y vanadio en la microestructura y resistencia al desgaste abrasivo de cinco fundiciones blancas de alto cromo Fe-23Cr-3C. Se utilizaron cinco placas fundidas fabricadas según la norma ASTM A532 Clase II tipo D, modificadas con 1% Mo, 1,5% Mo, 3% Mo, 3% Mo - 1% V, y 3% Mo - 2% V. Estas placas se cortaron por electroerosión para obtener las probetas necesarias para estudiar la metalografía, las propiedades mecánicas y la resistencia al desgaste de cada una de ellas. Los materiales se caracterizaron mediante microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido, difracción de rayos X, ensayos de micro y macrodureza, ensayo de impacto Charpy y ensayos de desgaste según la norma G-65.

El análisis metalográfico reveló que la microestructura de las aleaciones está compuesta de estructuras aciculares y carburos hexagonales del tipo M_7C_3 comunes de esta clase de fundiciones. A través del análisis de difracción de rayos X se confirmó la presencia de carburos de cromo, molibdeno y vanadio del tipo M_7C_3 , y compuestos intermetálicos en una matriz auténica-martensítica. Los análisis de microdureza Vickers mostraron valores entre 700 y 1000 $Hv_{0,2}$, mientras que en la escala Rockwell C dichos valores estuvieron en el rango 58 a 62. El ensayo de impacto Charpy entregó un promedio de 0,9 [J] para todas las fundiciones. Los ensayos de desgaste abrasivo reportaron tasas de desgaste en el rango de 7.2 – 8.6 [mm^3/km].

Se concluyó que el adicionamiento de Mo provoca una disminución en la fracción volumétrica de carburos y en el tamaño de estos. Esta disminución produce una disminución en la dureza lo que a su vez afecta en forma negativa la resistencia al desgaste abrasivo. Además se concluyó que el adicionamiento de V provoca un aumento de los carburos de menor tamaño sin afectar la fracción volumétrica total de estos. Este aumento produce una leve mejora de la dureza, lo cual determina un mejor desempeño frente al desgaste abrasivo.

Finalmente se observó que la fundición con una adición de 3% de Mo y 1% de V presentó la menor tasa de desgaste (7.2 [mm^3/km]) producto de su microestructura compuesta de carburos pequeños ($< 2500 \mu m^2$) y su matriz martensítica. Por otra parte la fundición con una adición de 3% de Mo y 2% de V presentó la mayor tasa de desgaste (8.6 [mm^3/km]) producto de su mayor tamaño promedio de carburos ($> 10000 \mu m^2$) y su matriz austenítica, lo que también explica su menor dureza (700 $Hv_{0,2}$) en comparación a las otras fundiciones blancas.

Agradecimientos

En este proceso universitario que termina con este trabajo de investigación, quisiera agradecer en primer lugar a mis padres Roberto y Sandra, por su infinito apoyo durante toda esta etapa. A mi padre por enseñarme que con trabajo duro no existen imposibles y que la familia es siempre lo más importante. A mi madre por enseñarme que el cariño es lo más valioso que tenemos y que siempre debemos respetar y ayudar a quienes más lo necesitan.

A mi hermana Arantza por acompañarme siempre y a mi maravillosa familia, mis primos, mis tíos y mis abuelos que son ejemplo de vida para mí. A mi tata Félix por enseñarme que la música es el lenguaje universal y a mi tía María por enseñarme que el amor a la familia vale más que cualquier cosa en el mundo. A la señora Ester por cuidar de mí cuando era muy pequeño y entregarme todo su infinito cariño.

A mi maravillosa compañera de vida Valentina por apoyarme siempre, darme ánimo en los momentos difíciles y disfrutar junto a mí de los momentos alegres. Gracias por tu alegría, energía y empatía, hoy agradezco a la vida y a la universidad por haber cruzado nuestros caminos. Agradezco también a su familia, que ya considero mía, por abrirme las puertas de su casa y darme un hogar aquí en Santiago.

A mis amigos de plan común, los de la sección 8, por acompañarme en las clases, los partidos de fútbol y las fiestas que hicieron mi vida universitaria una alegría diaria. Especialmente al Fabi, Diego, Pato, Mati, Chico, Dios, Nico Oliva, Nico Rojas, Chenche, Jesús y Marcelo.

A los mecánicos que conocí en especialidad, por acompañarme en las noches de estudio y pizzas, en esos momentos complicados es donde se forjan las amistades. Especialmente al Joaco, Alvaro, Carpa, Seba H., Javier, Coke, Juaco, Massa, Seba A., Tomi y Vicente.

Al profesor Alejandro, por confiar en mí desde el primer momento y entregarme todas las herramientas para conseguir este objetivo, también por enseñarme la disciplina que requiere una investigación científica.

A los funcionarios y profesores del departamento de Mecánica, por su apoyo durante todos estos años. En particular a los profesores Rodrigo y Aquiles, por aceptar formar parte de mi comisión y ayudarme con sus correcciones y recomendaciones a lo largo de la investigación.

A Jose y Darío, por su invaluable ayuda durante este trabajo de investigación, sin ustedes no habría llegado hasta aquí. Gracias por su determinación y por su gran disponibilidad para compartir sus conocimientos.

A la Universidad de Chile, por ser mi alma máter y el club de mis amores. A la casa de estudios por enseñarme el valor de la pluralidad y el compañerismo. Al club por enseñarme que el valor real no está en el éxito, sino en el esfuerzo y el trabajo empleado para conseguirlo.

Finalmente, a cada una de las personas no mencionadas anteriormente que de alguna u otra forma me apoyaron y me entregaron su confianza. Espero seguir adelante con toda la energía que me han entregado. ¡Gracias a todos!

Tabla de contenido

1.	Introducción.....	1
1.1.	Antecedentes generales.....	2
1.1.1.	Fundición Blanca.....	2
1.2.	Motivación.....	2
1.3.	Objetivos y alcances.....	3
1.3.1.	Objetivo general.....	3
1.3.2.	Objetivos específicos.....	3
1.3.3.	Alcances.....	3
2.	Antecedentes.....	4
2.1.	Aceros de fundición blanca.....	5
2.1.1.	Características principales.....	5
2.1.2.	Microestructura y propiedades mecánicas.....	5
2.2.	Desgaste abrasivo.....	7
3.	Metodología experimental.....	9
3.1.	Procedimiento experimental.....	11
3.1.1.	Materiales.....	11
3.1.2.	Equipos utilizados.....	12
3.1.3.	Manufactura de fundiciones blancas.....	12
3.1.4.	Preparación de probetas.....	13
3.1.5.	Caracterización de aleaciones.....	13
3.1.6.	Evaluación de propiedades mecánicas.....	14
3.1.7.	Análisis de desgaste abrasivo.....	16
4.	Resultados y discusión.....	18
4.1.	Análisis microestructural.....	18
4.1.1.	Microscopía Óptica.....	18
4.1.2.	Microscopía Electrónica de Barrido.....	21
4.1.3.	Análisis de DRX.....	30
4.2.	Análisis de propiedades mecánicas.....	31
4.2.1.	Dureza.....	31
4.2.2.	Resistencia al impacto.....	34
4.3.	Análisis de resistencia al desgaste por abrasión.....	34
4.3.1.	Tasa de desgaste según norma ASTM G65.....	34
4.3.2.	Análisis de micromecanismos de desgaste.....	38
5.	Conclusiones y recomendaciones.....	41

5.1.	Conclusiones	41
5.2.	Recomendaciones	42
5.3.	Bibliografía	43
Anexo A.	Imágenes Microscopía Óptica	45
Anexo B.	Microscopía Electrónica de Barrido	52
Anexo C.	Mapas de composición elemental (EDS).....	59
Anexo D.	Mapas de composición global (SEM)	66
Anexo E.	Análisis puntual (EDS).....	71
Anexo F.	Fotografías de mecanismo de desgaste (SEM).....	89
Anexo G.	Datos microdureza Vickers	92
Anexo H.	Datos propiedades mecánicas y resistencia al desgaste.....	95

Índice de tablas

Tabla 2.1: Requerimientos químicos para fundiciones de acero resistentes a la abrasión	5
Tabla 3.1: Metodología – Etapa 1.	9
Tabla 3.2: Metodología – Etapa 2.	9
Tabla 3.3: Metodología – Etapa 3.	9
Tabla 3.4: Fundiciones blancas con diferentes porcentajes de Mo.	10
Tabla 3.5: Fundiciones blancas con diferentes porcentajes de V. (*Estimado)	10
Tabla 3.6: Composición química fundiciones a estudiar. (*Estimado).....	12
Tabla 3.7: Composición fundiciones blancas con diferentes porcentajes en peso de Mo y V. (*Estimado)	13
Tabla 4.1: Resumen valores totales promedio (5 muestras).....	35
Tabla E.1: Composición porcentual - Zona 1 – M.1	71
Tabla E.2: Composición porcentual - Zona 2 – M.1	72
Tabla E.3: Composición porcentual - Zona 3 – M.1	73
Tabla E.4: Composición porcentual - Zona 4 – M.1	74
Tabla E.5: Composición porcentual - Zona 1 – M.3	75
Tabla E.6: Composición porcentual - Zona 2 – M.3	76
Tabla E.7: Composición porcentual - Zona 3 – M.3	77
Tabla E.8: Composición porcentual - Zona 4 – M.3	78
Tabla E.9: Composición porcentual - Zona 5 – M.3	79
Tabla E.10: Composición porcentual - Zona 6 – M.3	80
Tabla E.11: Composición porcentual - Zona 1 – M.3 V.1	81
Tabla E.12: Composición porcentual - Zona 2 – M.3 V.1	82
Tabla E.13: Composición porcentual - Zona 3 – M.3 V.1	83
Tabla E.14: Composición porcentual - Zona 1 – M.3 V.2	84
Tabla E.15: Composición porcentual - Zona 2 – M.3 V.2	85
Tabla E.16: Composición porcentual - Zona 3 – M.3 V.2	86
Tabla E.17: Composición porcentual - Zona 4 – M.3 V.2	87
Tabla E.18: Composición porcentual - Zona 5 – M.3 V.2	88
Tabla G.1: Resultados ensayos de dureza Vickers M.1 (1.0% Mo).....	92
Tabla G.2: Resultados ensayos de dureza Vickers M.1.5 (1.5% Mo).....	92
Tabla G.3: Resultados ensayos de dureza Vickers M.3 (3.0% Mo).....	93
Tabla G.4: Resultados ensayos de dureza Vickers M.3-V.1 (3.0% Mo 1.0% V).	93
Tabla G.5: Resultados ensayos de dureza Vickers M.3-V.2 (3.0% Mo 2.0% V).	94
Tabla H.1: Resumen valores acumulativos promedio muestra M.1.....	95
Tabla H.2: Resumen valores acumulativos promedio muestra M.1.5.....	95
Tabla H.3: Resumen valores acumulativos promedio muestra M.3.....	95
Tabla H.4: Resumen valores acumulativos promedio muestra M.3 V.1.....	95
Tabla H.5: Resumen valores acumulativos promedio muestra M.3 V.2.....	96
Tabla H.6: Distribución porcentual de área de carburos.	96
Tabla H.7: Resultados ensayos de dureza Rockwell C.	96
Tabla H.8: Resultados ensayos de impacto Charpy.	97

Índice de figuras

Figura 2.1: Ejemplo microestructura fundiciones blancas [elaboración propia].....	4
Figura 2.2: Tasa de desgaste en fundiciones blancas con distintos contenidos de cromo [7].....	4
Figura 2.3: Diagrama explicativo del desgaste abrasivo [elaboración propia].....	7
Figura 2.4: Desgaste en chancador de cono [18].....	8
Figura 2.5: Impulsor de bomba de pulpa mineral [19].....	8
Figura 3.1: Diagrama de flujo de la metodología experimental.....	10
Figura 3.2: Diagrama de flujo del procedimiento experimental.....	11
Figura 3.3: Probetas (izquierda: metalografía corte transversal – Derecha: desgaste abrasivo) ...	13
Figura 3.4: Esquema indentación Vickers.....	15
Figura 3.5: Equipo para ensayos de desgaste (norma ASTM-G65).....	16
Figura 3.6: Arena de sílice utilizada en el ensayo de desgaste (norma ASTM-G65).....	16
Figura 4.1: Muestra M.1 – izquierda: 10x derecha: 100x.....	18
Figura 4.2: Muestra M.1.5 – izquierda: 10x derecha: 100x.....	18
Figura 4.3: Muestra M.3 – izquierda: 10x derecha: 100x.....	19
Figura 4.4: Muestra M.3 V.1 – izquierda: 10x derecha: 100x.....	19
Figura 4.5: Muestra M.3 V.2 – izquierda: 10x derecha: 100x.....	19
Figura 4.6: Distribución porcentual de área de carburos.....	20
Figura 4.7: Muestra M.1 – izquierda BSE: 50 μm derecha BSE: 30 μm	21
Figura 4.8: Muestra M.1.5 – izquierda BSE: 50 μm derecha BSE: 30 μm	21
Figura 4.9: Muestra M.3 – izquierda BSE: 50 μm derecha BSE: 10 μm	22
Figura 4.10: Muestra M.3 V.1 – izquierda BSE: 50 μm derecha BSE: 20 μm	22
Figura 4.11: Muestra M.3 V.2 – izquierda BSE: 50 μm derecha BSE: 10 μm	22
Figura 4.12: Mapa de composición elemental - Muestra M.1.....	23
Figura 4.13: Mapa de composición elemental - Muestra M.1.5.....	24
Figura 4.14: Mapa de composición elemental - Muestra M.3.....	25
Figura 4.15: Mapa de composición elemental - Muestra M.3 V.1.....	26
Figura 4.16: Mapa de composición elemental - Muestra M.3 V.2.....	27
Figura 4.17: Análisis puntual de composición carburo - Muestra M.1.....	28
Figura 4.18: Análisis puntual de composición matriz - Muestra M.1.....	28
Figura 4.19: Análisis puntual de composición carburo - Muestra M.3-V.1.....	29
Figura 4.20: Análisis puntual de composición matriz - Muestra M.3-V.2.....	29
Figura 4.21: Análisis puntual de composición fase Mo - Muestra M.3-V.2.....	30
Figura 4.22: Difractograma fundiciones blancas con fases indexadas.....	30
Figura 4.23: División por zonas de cada muestra (perfil transversal).....	31
Figura 4.24: Fotografía microindentación Dureza Vickers.....	31
Figura 4.25: Resultados ensayos de microdureza Vickers HV0.2.....	32
Figura 4.26: Resultados ensayos de microdureza Vickers HV2.0.....	32
Figura 4.27: Resultados ensayos de dureza Rockwell C.....	33
Figura 4.28: Microdureza Vickers / Fracción volumétrica de carburos.....	33
Figura 4.29: Resultados ensayos de impacto Charpy.....	34
Figura 4.30: Probetas de desgaste posterior al ensayo de desgaste por abrasión según norma ASTM G65.....	34
Figura 4.31: Pérdida de masa vs distancia de deslizamiento.....	36
Figura 4.32: Pérdida de volumen vs distancia de deslizamiento.....	36
Figura 4.33: Tasa de desgaste vs distancia de deslizamiento.....	36

Figura 4.34: Comparación de la tasa de desgaste y la fracción volumétrica de carburos para las cinco fundiciones blancas de estudio.....	37
Figura 4.35: Comparación de la tasa de desgaste y la dureza Vickers para las cinco fundiciones blancas de estudio.....	37
Figura 4.36: Muestra M.1 – izquierda: 50 μm derecha: 10 μm	38
Figura 4.37: Muestra M.1.5 – izquierda: 50 μm derecha: 10 μm	38
Figura 4.38: Muestra M.3– izquierda: 10 μm derecha: 10 μm	39
Figura 4.39: Muestra M.3 V.1 – izquierda: 50 μm derecha: 10 μm	39
Figura 4.40: Muestra M.3 V.2 – izquierda: 50 μm derecha: 10 μm	40

1. Introducción

A través de los años, se ha identificado que uno de los mecanismos de desgaste más común en la industria minera es el desgaste por abrasión, siendo evidente en los equipos como chancadores y bombas de pulpa mineral [1,2] entre otros. Resulta entonces importante estudiar materiales que puedan ser aplicados en piezas de estos equipos con el objetivo de disminuir los costos asociados a su reparación o reemplazo, producidos por el desgaste masivo (microarado y microfractura) y efectos de corrosión [2].

Las fundiciones blancas, principalmente las del tipo Fe-23Cr-3C, presentan excelentes propiedades mecánicas y de resistencia al desgaste abrasivo [3,4]. Las fundiciones blancas son aquellas aleaciones de hierro-carbono, en donde la totalidad del contenido de carbono se encuentra en forma de cementita (Fe_3C) [5]. Generalmente, a nivel industrial se agrupan de acuerdo a la norma ASTM A532 que las agrupa en dos denominaciones de acuerdo a su composición química y dureza [6]. Dichas denominaciones se refieren a la Clase I (Fundiciones al Cromo-Níquel), y la Clase II (fundiciones al Cromo-Molibdeno). En particular, esta investigación se concentra en aleaciones que corresponden a la segunda categoría.

Si bien dicha norma relaciona en forma práctica la composición química de las aleaciones, que en el caso del molibdeno varía entre 0 y 3%, esta no estipula de manera clara el efecto que tiene este elemento sobre la resistencia al desgaste de las fundiciones blancas, ni tampoco sobre el contenido de vanadio.

Se ha reportado que la adición del contenido de molibdeno a las fundiciones blancas inhibe la formación de perlita (ferrita y cementita) en concentraciones mayores a 3% en peso, lo cual promueve la formación de carburos complejos que aumentan la dureza y la resistencia al desgaste de fundiciones blancas [4]. Además, la adición de vanadio produce un refinamiento de los carburos de cromo aumentando la dureza de la fundición [3].

Investigaciones señalan que la microestructura de estas aleaciones está formada principalmente por carburos (M_7C_3), los que proveen alta dureza y resistencia al desgaste [3,4,7]. El alto contenido de cromo a su vez previene la formación de grafito y asegura la estabilidad de los carburos antes mencionados [7]. Normalmente se adiciona cobre, manganeso, níquel o molibdeno para evitar la formación de perlita durante el enfriamiento [3,4]. Luego de someter estas aleaciones a ensayos de desgaste abrasivo según la norma ASTM G-65 [8], se ha reportado que la resistencia al desgaste está principalmente controlada por el porcentaje volumétrico de carburos y el porcentaje de carbono presente en la aleación, y en menos medida afecta el porcentaje de cromo y la dureza del material [7]. Durante la solidificación de este tipo de aleaciones, debido a su alto contenido de cromo, se forma una gran cantidad de carburos (M_7C_3) eutécticos, lo que podría estar asociado a la matriz heterogénea austenítica/martensítica (producto de un tratamiento térmico) lo que se traduce en una gran dureza macroscópica [3,4].

Se ha corroborado que, al someter este tipo de aleaciones a pruebas de desgaste abrasivo, la microestructura de la matriz (fase y morfología de carburos) es más importante al determinar la resistencia al desgaste, que la dureza macroscópica propia del material [7]. Además, el aumento del porcentaje de molibdeno incrementa la dureza y disminuye la pérdida de masa por desgaste por deslizamiento [4].

Por otro lado, al aumentar la concentración de vanadio a fundiciones blancas endurecidas con níquel, hay un refinamiento en los carburos de cromo, asimismo de una disminución de la fracción volumétrica de carburos. Al aumentar la concentración de vanadio en 2% en peso, la dureza y la resistencia al desgaste fueron mejoradas sin afectar la tenacidad [9].

Uno de los factores que más ha sido estudiando en este tipo de fundiciones blancas de alto contenido de cromo con aplicaciones al desgaste es el estudio de las variaciones microestructurales que puede sufrir este tipo de material y su incidencia en las propiedades mecánicas y resistencia al desgaste [3], considerando el porcentaje en peso de adición del elemento aleante. En el caso de aleaciones con 30 % en peso de cromo se ha reportado que la resistencia a la corrosión depende principalmente de la concentración de cromo en la matriz y la fracción volumétrica de carburos, influyendo considerablemente en la resistencia al desgaste.

Por lo tanto, una de las principales motivaciones para estudiar este tipo de fundiciones se concentra en genera conocimiento que permita aportar soluciones prácticas a la industria minera a través del análisis de una fundición blanca (ASTM A532 Clase II Tipo D) modificada con Molibdeno y Vanadio, que podría ser utilizada en equipos que trabajan bajo condiciones de desgaste abrasivo severo.

1.1. Antecedentes generales

1.1.1. Fundición Blanca

Las fundiciones blancas son aquellas aleaciones hierro carbono en donde la totalidad del carbono está combinado en forma de cementita. Son muy frágiles y de difícil mecanizado, sin embargo presentan una alta dureza y resistencia al desgaste. La norma ASTM A532 cubre la composición y la dureza de tres grupos de fundiciones blancas. En particular la Clase II (Fundiciones al Cromo-Molibdeno) corresponde a las fundiciones con contenido de cromo entre 11% al 22%, molibdeno hasta 3% y pueden ser elaboradas con una matriz austenítica o austenítica-martensítica, y por medio de tratamiento térmico obtener una matriz martensítica para asegurar una máxima resistencia a la abrasión, siendo considerada la más dura de todas las fundiciones blancas. La adición de molibdeno se utiliza para evitar la formación de estructura perlítica y de ese modo asegurar máxima dureza.

1.2. Motivación

La minería representa la principal industria de la economía chilena, es por ello que resulta relevante optimizar sus procesos para mantener un nivel de producción acorde a lo proyectado. En este ámbito los consumibles de acero cumplen un rol fundamental respecto al transporte de pulpa y la molienda mineral, en donde existe un alto costo asociado a la reparación o reemplazo de piezas desgastadas [10].

Por lo tanto, la principal motivación de este trabajo consiste en aportar conocimiento relevante para el diseño y desarrollo de aleaciones que permitan disminuir los costos operacionales en la industria de la minería del cobre, a través del análisis de una fundición blanca (ASTM A532 Clase II Tipo D) modificada con Molibdeno y Vanadio, que podría ser utilizada en equipos que trabajan bajo condiciones de desgaste abrasivo.

1.3. Objetivos y alcances

1.3.1. Objetivo general

Analizar el efecto del contenido de molibdeno y vanadio en la microestructura y resistencia al desgaste abrasivo de cinco fundiciones blancas de alto cromo Fe-23Cr-3C.

1.3.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos de este trabajo son los siguientes:

- Estudiar la modificación de la microestructura de una fundición blanca “ASTM A532 Clase II Tipo D” producida por la variación de Molibdeno y Vanadio en su composición química.
- Estudiar la relación entre la fracción volumétrica y el tipo de carburos presentes en una fundición blanca “ASTM A532 Clase II Tipo D” y sus propiedades mecánicas.
- Analizar si existe una relación entre el porcentaje de Molibdeno y Vanadio presente en una fundición blanca y su desempeño frente al desgaste abrasivo según la norma ASTM G65.

1.3.3. Alcances

La investigación contempla un análisis comparativo de cinco aleaciones de composición química similar a la norma ASTM A532 Clase II – Tipo D con adición de molibdeno y vanadio. Se estudiará su microestructura y propiedades mecánicas para finalmente evaluar la influencia de estos parámetros en su desempeño frente al desgaste abrasivo según la norma ASTM G65.

2. Antecedentes

Las fundiciones blancas de alto cromo corresponden a un tipo de acero de alta resistencia al desgaste clasificadas en la norma ASTM A532. Poseen una microestructura que consiste principalmente en carburos primarios y eutécticos, por ejemplo $(FeCr)_3C$, $(FeCr)_7C_3$ y $(FeCr)_{23}C_6$. Los carburos primarios tienen comúnmente una geometría hexagonal con un agujero característico en el centro como se observa en la Figura 2.1. Dependiendo del tratamiento térmico aplicado y la composición química pueden presentar una matriz austenítica, ferrítica o perlítica. Los elementos presentes en la composición química pueden producir la precipitación de carburos secundarios de menor tamaño [11].

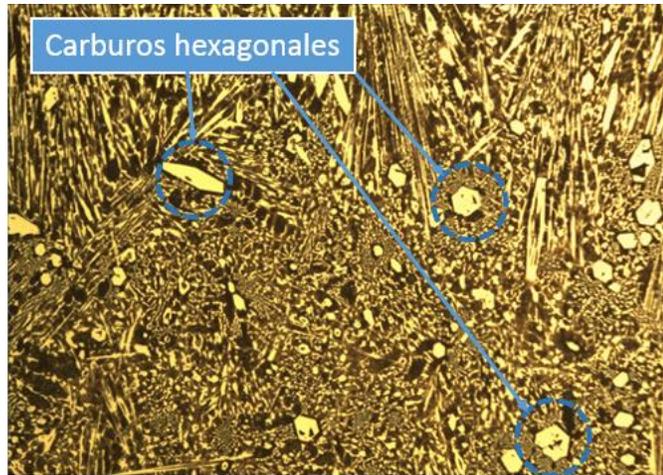


Figura 2.1: Ejemplo microestructura fundiciones blancas [elaboración propia]

Por otra parte las fundiciones blancas de alto cromo poseen propiedades mecánicas que las caracterizan, entre ellas destacan su alta dureza, típicamente 54-60 HRC [12] y su alta resistencia al desgaste, con tasas entre 5-10 $\left[\frac{mm^3}{km}\right]$ para aquellas fundiciones con más de 2.2% de contenido de carbono (Figura 2.2) [7].

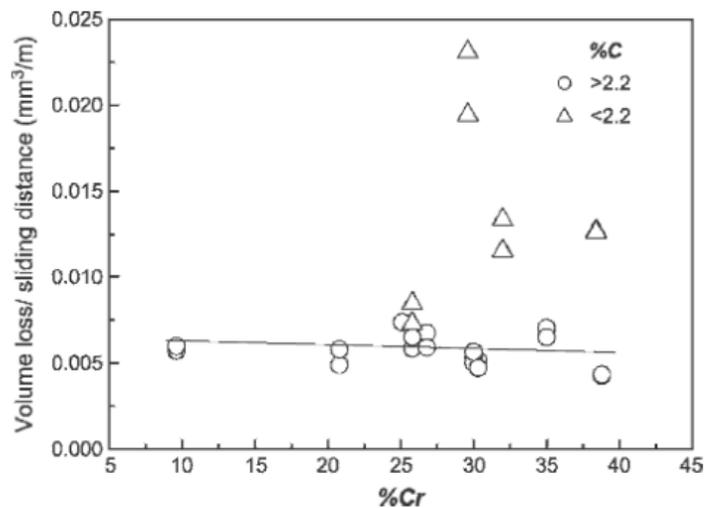


Figura 2.2: Tasa de desgaste en fundiciones blancas con distintos contenidos de cromo [7]

Por lo tanto para analizar el efecto de la adición de Molibdeno y Vanadio en la resistencia a la abrasión es necesario entender cómo afectan estos elementos a la microestructura de la aleación y a sus propiedades mecánicas. Por último para evaluar el desempeño de las fundiciones blancas frente al desgaste es necesario comprender que se reconoce en el ámbito de la ingeniería mecánica por desgaste abrasivo o desgaste por abrasión.

2.1. Aceros de fundición blanca

2.1.1. Características principales

Los aceros de fundición blanca o WCI por sus siglas en inglés (*White Cast Iron*) corresponden a aleaciones ferrosas con alto contenido de carbono (mayor a 1.5% wt.). En este tipo de material el carbono forma mayoritariamente cementita (F_3C), entregando a la aleación mayor dureza y mayor resistencia a la abrasión. La mayoría de estas aleaciones contienen una gran cantidad de cromo y pueden ser clasificadas según su contenido de Carbono y Cromo como se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Requerimientos químicos para fundiciones de acero resistentes a la abrasión

Clase	Tipo	Designación	Carbono	Manganeso	Silicio	Níquel	Cromo	Molibdeno	Cobre	Fósforo	Azufre
I	A	Ni-Cr-Hc	2,8-3,6	2,0 max	0,8 max	3,3-5,0	1,4-4,0	1,0 max	...	0,3 max	0,15 max
I	B	Ni-Cr-Lc	2,4-3,0	2,0 max	0,8 max	3,3-5,0	1,4-4,0	1,0 max	...	0,3 max	0,15 max
I	C	Ni-Cr-GB	2,5-3,7	2,0 max	0,8 max	4,0 max	1,0-2,5	1,0 max	...	0,3 max	0,15 max
I	D	Ni-HiCr	2,5-3,6	2,0 max	2,0 max	4,5-7,0	7,0-11,0	1,5 max	...	0,10 max	0,15 max
II	A	12 % Cr	2,0-3,3	2,0 max	1,5 max	2,5 max	11,0-14,0	3,0 max	1,2 max	0,10 max	0,06 max
II	B	15 % Cr-Mo	2,0-3,3	2,0 max	1,5 max	2,5 max	14,0-18,0	3,0 max	1,2 max	0,10 max	0,06 max
II	D	20 % Cr-Mo	2,0-3,3	2,0 max	1,0-2,2	2,5 max	18,0-23,0	3,0 max	1,2 max	0,10 max	0,06 max
III	A	25 % Cr	2,0-3,3	2,0 max	1,5 max	2,5 max	23,0-30,0	3,0 max	1,2 max	0,10 max	0,06 max

Según el criterio antes descrito se puede clasificar estas aleaciones en los siguientes grupos:

- Alto Cromo - Bajo Carbono WCI: aleaciones con menos de 2% de contenido de carbono y más de 20% de contenido de cromo.
- Medio Cromo - Alto Carbono WCI: aleaciones con alrededor de 3% de contenido de carbono y entre 10% a 20% de contenido de cromo.
- Alto Cromo - Alto Carbono WCI: aleaciones con más de 2.5% de contenido de carbono y más de 20% de contenido de cromo.

Esta investigación se centra en la tercera categoría la cual corresponde a aleaciones de alto cromo y alto carbono. Este tipo de aleaciones tiende a formar carburos (M_7C_3), los cuales aumentan considerablemente la dureza de este material. Específicamente se analizarán cinco aleaciones modificadas con base en la norma ASTM A532 Clase II - tipo D, las cuales poseen diferentes contenidos de molibdeno y vanadio. Estas aleaciones pueden formar diferentes tipos de carburos (hierro, cromo, molibdeno, vanadio) los cuales resultan ser más duros que la mayoría de los agentes abrasivos. [6]

2.1.2. Microestructura y propiedades mecánicas

Investigaciones señalan que la microestructura de estas aleaciones está formada principalmente por carburos (M_7C_3), los que proveen alta dureza y resistencia al desgaste. El alto contenido de cromo a su vez previene la formación de grafito y asegura la estabilidad de los carburos antes mencionados. Normalmente se adiciona cobre, manganeso, níquel o molibdeno para evitar la formación de perlita durante el enfriamiento.

Durante la solidificación de este tipo de aleaciones, debido a su alto contenido de cromo, se forma una gran cantidad de carburos (M_7C_3) eutécticos, lo que podría estar asociado a la matriz heterogénea austenítica/martensítica (producto de un tratamiento térmico) lo que se traduce en una gran dureza macroscópica.

Existen investigaciones que apuntan a estudiar el efecto del adicionamiento de vanadio en fundiciones blancas endurecidas con níquel, de composición similar a las estudiadas en este trabajo. En ellas se estudia la microestructura, las propiedades mecánicas y la resistencia al desgaste de una aleación de alto cromo con adición de níquel, además se estudian los cambios provocados por la adición de vanadio en el tamaño, morfología, fracción volumétrica de carburos precipitados. Sus autores reportan que al aumentar la concentración de vanadio los carburos de cromo fueron refinados y la fracción volumétrica de carburos aumentó [13]. Al aumentar la concentración de vanadio en 2% la dureza y la resistencia al desgaste fueron mejoradas sin afectar la tenacidad [9].

Las fundiciones blancas de alto cromo y alto carbono son reconocidas por poseer propiedades mecánicas que las caracterizan dentro del universo de las fundiciones metálicas existentes. Las aleaciones de alto cromo son muy utilizadas en aplicaciones en que se requiere un buen desempeño frente al desgaste, ya sea corrosivo, abrasivo o erosivo. En estas situaciones resulta muy importante la correcta selección del material a utilizar según sus características específicas. Las fundiciones blancas al cromo son muy comunes en estas aplicaciones, debido específicamente a su excelente resistencia al desgaste abrasivo y su moderada habilidad contra el impacto, la cual resulta importante en procesos de molienda, traslado de pulpa, entre otros.

Luego de someter estas aleaciones a ensayos de desgaste abrasivo según la norma ASTM G-65, los resultados permiten concluir que la resistencia al desgaste está principalmente controlada por el porcentaje volumétrico de carburos y el porcentaje de Carbono presente en la aleación, y en menos medida afecta el porcentaje de Cromo y la dureza del material [7]. Por otra parte se ha reportado que la matriz microestructural resulta más importante que la dureza macroscópica al momento de analizar la resistencia al desgaste abrasivo de las fundiciones blancas. Por último, al aumentar el porcentaje de molibdeno se observa un incremento en la dureza y disminución en la pérdida de material por desgaste por deslizamiento [4].

En algunas investigaciones se plantea como objetivo el estudio de las variaciones microestructurales que puede sufrir este tipo de material y su incidencia en las propiedades mecánicas y resistencia al desgaste [3]. En ese estudio se utilizaron aleaciones con 30 wt% de cromo resistentes al desgaste y la corrosión. A través de ensayos microscópicos y de desgaste se reportó que la resistencia a la corrosión depende principalmente de la concentración de cromo en la matriz y la fracción volumétrica de carburos. Esta última condición también influye de forma considerable en la resistencia al desgaste.

Considerando los antecedentes expuestos resulta razonable pensar que el adicionamiento de molibdeno y vanadio en una aleación de alto cromo tendrá incidencia en la modificación de su microestructura, los cuales podrán ser observados a través de ensayos de microscopía. Las variaciones microestructurales esperadas consideran el aumento de la fracción volumétrica de carburos, la aparición de carburos complejos de molibdeno y cromo, y la aparición de carburos secundarios de vanadio de menor tamaño. También es razonable pensar basándose en los estudios antes expuestos, que esta variación microestructural tendrá incidencia en el desempeño frente al desgaste de las distintas aleaciones modificadas.

2.2. Desgaste abrasivo

El desgaste corresponde a la alteración de una superficie sólida por la pérdida o desplazamiento progresivo de material producto del movimiento relativo entre una superficie y una o varias sustancias. El desgaste abrasivo es un mecanismo específico de desgaste, en el cual partículas duras o protuberancias de una superficie son forzadas a moverse sobre otra superficie sólida produciendo una pérdida de material. En la Figura 2.2 se puede observar un diagrama explicativo del desgaste abrasivo. [14]

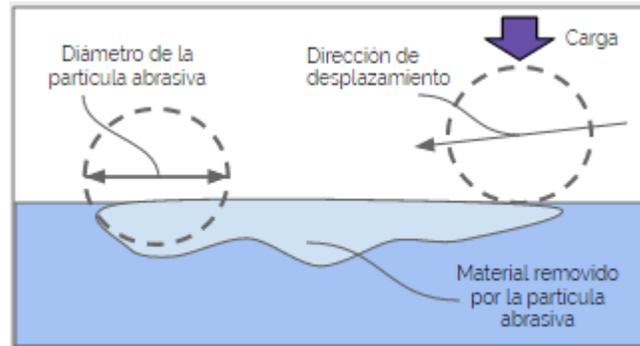


Figura 2.3: Diagrama explicativo del desgaste abrasivo [elaboración propia]

Las partículas duras que realizan la abrasión son conocidas como abrasivos, y su capacidad de causar desgaste abrasivo se mide en un coeficiente conocido como abrasividad.

Para cuantificar el desgaste producido en un cuerpo se utiliza el coeficiente de desgaste, que en tribología se define como un parámetro adimensional (k) que se relaciona con la distancia de deslizamiento, la carga aplicada a la partícula abrasiva y la dureza del material más blando involucrado según la Ecuación 2.1 (ecuación de Archard). [15]

$$\text{volumen de desgaste} = k \cdot \left(\frac{\text{carga} \times \text{distancia de deslizamiento}}{\text{dureza del material mas blando}} \right) \quad (2.1)$$

La tasa de desgaste corresponde a la tasa de material removido producto del desgaste por unidad de medición seleccionada, por ejemplo, cantidad de material removido (masa, volumen, espesor) por unidad de distancia de deslizamiento o unidad de tiempo. Para los propósitos de esta investigación se utilizará la tasa de desgaste como pérdida en volumen por unidad de distancia recorrida en la rueda de caucho (Ecuación 2.2), de acuerdo a lo consignado en la norma ASTM G65. [8]

$$\text{tasa de desgaste} = \left(\frac{\text{pérdida de volumen [mm}^3\text{]}}{\text{distancia [m]}} \right) \quad (2.2)$$

Para la industria minera el desgaste abrasivo representa un problema cotidiano, dado que la mayoría de los equipos que en ella se utilizan trabajan en un entorno abrasivo [16,17]. Este desgaste abrasivo produce pérdida de material superficial en distintas piezas de los equipos, algunos ejemplos de ellas son el cono central de un chancador como se observa en el círculo naranja de la Figura 2.3 o el impulsor de una bomba de pulpa mineral como se observa en la Figura 2.4.

3. Metodología experimental

La metodología de este trabajo consta de tres etapas principales (Figura 3.1):

- Para alcanzar el objetivo 1 se estudia la microestructura de cinco fundiciones blancas de alto cromo con diferentes porcentajes de Molibdeno y Vanadio. Principalmente se busca examinar el tipo de carburos formados, la microestructura de la matriz y la composición de fases presentes en cada aleación.

Tabla 3.1: Metodología – Etapa 1.

Variable	Nivel	Respuesta	Técnica
% Mo	1% - 1.5% - 3%	Fracción volumétrica, tamaño y composición de carburos.	Microscopía óptica, Microscopía electrónica de barrido, EDS.
% V	0% - 1% - 2%		

- Para alcanzar el objetivo 2 se estudia la relación entre la microestructura presente en cada aleación y sus propiedades mecánicas. Específicamente se analiza la dureza, resistencia al impacto y resistencia al desgaste abrasivo según la norma ASTM G65.

Tabla 3.2: Metodología – Etapa 2.

Variable	Nivel	Respuesta	Técnica
% volumétrico de carburos	25 - 35 %	Dureza Rockwell C, dureza Vickers, energía absorbida.	Durómetro Vickers, durómetro Rockwell, ensayo de impacto Charpy.
Tamaño de carburos	2500 – 10000 μm^2		
Composición de carburos	Mo – V – Cr – Fe		

- Para alcanzar el objetivo 3 se evalúa la existencia de una relación entre el porcentaje de Molibdeno y Vanadio presente en cada fundición blanca y su desempeño frente al desgaste abrasivo, analizando la información obtenida de las etapas anteriores.

Tabla 3.3: Metodología – Etapa 3.

Variable	Nivel	Respuesta	Técnica
% volumétrico de carburos	25 - 35 %	Tasa de desgaste [mm^3/m] y Micromecanismos de desgaste	Ensayo de desgaste ASTM G65 y microscopía electrónica de barrido.
Dureza Vickers	750 – 1000 HV		

Figura 3.1: Diagrama de flujo de la metodología experimental.



Para evaluar el efecto del Molibdeno se utilizarán las aleaciones 1, 2 y 3, cuyo porcentaje de Mo se observa en la Tabla 3.1.

Tabla 3.4: Fundiciones blancas con diferentes porcentajes de Mo.

Nº	Descripción	Molibdeno [%]	Vanadio [%]
1	ASTM A532, Clase II - Tipo D; 1% Mo	1.013	0.0
2	ASTM A532, Clase II - Tipo D; 1.5% Mo	1.476	0.0
3	ASTM A532, Clase II - Tipo D; 3.0% Mo	2.985	0.0

Para evaluar el efecto del Vanadio se utilizarán las aleaciones 3, 4 y 5, cuyo porcentaje de V se observa en la Tabla 3.2.

Tabla 3.5: Fundiciones blancas con diferentes porcentajes de V. (*Estimado)

Nº	Descripción	Molibdeno [%]	Vanadio [%]
3	ASTM A532, Clase II - Tipo D; 3.0% Mo	2.985	0.0
4	ASTM A532, Clase II - Tipo D; Modificada con 3.0% Mo y 1.0% V	2.909	1.0*
5	ASTM A532, Clase II - Tipo D; Modificada con 3.0% Mo y 2.0% V	2.948	2.0*

3.1. Procedimiento experimental

El procedimiento experimental de este trabajo se realizó de acuerdo al diagrama de flujo de la Figura 3.1. A continuación se detallan las etapas del procedimiento presentado:

- **Manufactura de fundiciones blancas:** Se prepararon 5 diferentes placas de fundición blanca según las composiciones anteriormente descritas. La secuencia de procesos incluye fusión en horno de arco eléctrico, fundición en arena y tratadas térmicamente. Las placas fueron fabricadas previo al inicio del presente trabajo de investigación.
- **Preparación de probetas:** En esta primera etapa se utilizaron las placas fundidas de las cinco aleaciones antes descritas. Se cortaron probetas y muestras que se utilizaron en el análisis metalográfico, difracción de rayos X y estudios de propiedades mecánicas.
- **Caracterización de las aleaciones:** En esta segunda etapa se realizan estudios de microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido y difracción de rayos X para caracterizar cada una de las aleaciones según su microestructura (tipos de carburos, estructura de la matriz, composición de fases, etc).
- **Evaluación de propiedades mecánicas:** En esta tercera etapa se realizan experimentos para evaluar las propiedades mecánicas de las cinco aleaciones estudiadas. Se realizan ensayos de impacto Charpy [20], ensayos de microdureza Vickers [21] y dureza Rockwell C [22].
- **Análisis de desgaste abrasivo:** En esta cuarta etapa se realizan ensayos de desgaste abrasivo según la norma ASTM G65 [8] para evaluar y comparar el desempeño de las aleaciones estudiadas.

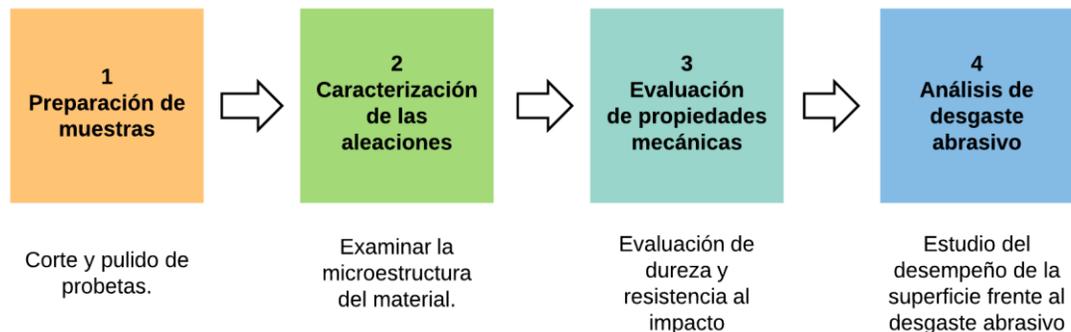


Figura 3.2: Diagrama de flujo del procedimiento experimental.

3.1.1. Materiales

Los materiales utilizados durante este trabajo de investigación son:

- Placas de fundición blanca de alto cromo con diferentes porcentajes de Mo y V.
- Lijas, paños y solución acuosa de alúmina para pulido.
- Resina polimérica.
- Reactivos químicos: vilella 5% y nital 6%.
- Arena de sílice con granulometría 95% bajo malla 50 y 5% bajo malla 40.

3.1.2. Equipos utilizados

Los equipos utilizados durante este trabajo de investigación son:

- Microscopio óptico - Optika modelo XDS-3 MET
- Microscopio electrónico de barrido - FEI-Quanta 250
- Micro-sonda de análisis químico elemental - Oxford Instruments
- Equipo de difracción de rayos X - Bruker D8 Advance
- Equipo para ensayo de impacto Charpy - Zwick 5113.300
- Microdurómetro Vickers - Struers Duramin
- Durómetro Rockwell Wilson – 103R Instron
- Equipo para ensayos de desgaste - ASTM G65
- Baño ultrasónico – Elma E 30H
- Balanza analítica - Radwag wlc60/62

3.1.3. Manufactura de fundiciones blancas

Las cinco aleaciones que serán objeto de este trabajo de investigación fueron manufacturadas en forma de placas de 25 x 25 x 2.5 [cm³] mediante un proceso de fundición por arco y modelo en arena. Este proceso consiste en fundir los metales en una composición de interés y luego vaciar la colada en un molde de arena para su posterior solidificación, enfriamiento y desmolde. Además, estas placas, recibieron un tratamiento térmico de temple y revenido el cual se detalla a continuación.

Se realizó inicialmente un calentamiento controlado con una tasa de calentamiento de 50 °C/h hasta alcanzar una temperatura 500 °C y posteriormente un calentamiento controlado a 100 °C/h hasta llegar a una temperatura de 1000 °C. Seguidamente se realiza un tratamiento de templado con aire forzado durante 1.5 hora hasta alcanzar temperatura ambiente.

Durante el proceso de enfriado, se debe asegurar que las piezas alcancen una temperatura inferior a 200 °C en toda la sección transversal, para evitar “autorevenido” y asegurar la transformación de fases de austenita a martensita en el mayor porcentaje posible para aumentar su dureza. Consecutivamente se realiza un revenido por calentamiento controlado a 50 °C/h hasta 350 °C, durante 3 horas y un enfriado por aire forzado hasta temperatura ambiente, con fin de aliviar tensiones dentro del material.

La adición porcentual de molibdeno y vanadio para cada una de las aleaciones se puede observar en la Tabla 3.3 y su composición química detallada se encuentra en la Tabla 3.4.

Tabla 3.1: Composición química fundiciones a estudiar. (*Estimado)

Nº	Descripción	Molibdeno [%]	Vanadio [%]	Cromo [%]	Carbono [%]
1	ASTM A532, Clase II - Tipo D; Estándar con 1.0% Mo	1.013	0.0	22.7	3.22
2	ASTM A532, Clase II - Tipo D; Estándar con 1.5% Mo	1.476	0.0	22.5	3.21
3	ASTM A532, Clase II - Tipo D; Estándar con 3.0% Mo	2.985	0.0	21.7	3.14
4	ASTM A532, Clase II - Tipo D; Modificada con 3.0% Mo y 1.0% V	2.909	1.0*	21.8	3.08
5	ASTM A532, Clase II - Tipo D; Modificada con 3.0% Mo y 2.0% V	2.948	2.0*	21.9	2.93

Tabla 3.2: Composición fundiciones blancas con diferentes porcentajes en peso de Mo y V. (*Estimado)

Muestra	Mo	V*	C	Mn	Si	Ni	Cr	Cu	P	S	Fe
M.1.0	1.01	0.00	3.22	0.82	0.67	0.15	22.70	0.06	0.021	0.028	Balance
M.1.5	1.48	0.00	3.21	0.81	0.65	0.15	22.50	0.07	0.021	0.030	
M.3.0	2.99	0.00	3.14	0.77	0.59	0.15	21.70	0.11	0.024	0.032	
M.3.0-V.1.0	2.91	1.00	3.08	0.77	0.62	0.15	21.80	0.11	0.025	0.037	
M.3.0-V.2.0	2.95	2.00	2.93	0.78	0.56	0.15	21.90	0.10	0.021	0.026	

3.1.4. Preparación de probetas

La etapa de preparación de muestras consiste en:

- Corte de placas fundidas por electroerosión para obtener las probetas de metalografía, desgaste y ensayo de impacto Charpy.
- Las probetas de microscopía fueron encapsuladas en resina (Figura 3.3 izquierda) para facilitar su manipulación.
- Las probetas para ensayos de desgaste (Figura 3.3 derecha) fueron pulidas con lijas para eliminar la capa superficial afectada por la temperatura del corte.

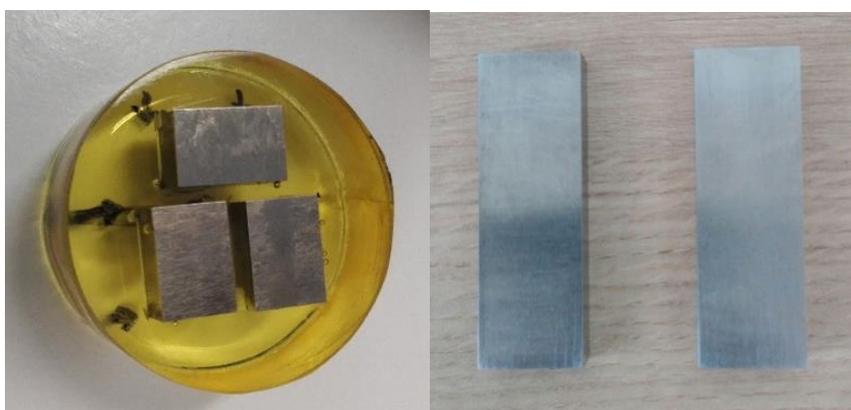


Figura 3.3: Probetas (izquierda: metalografía corte transversal – Derecha: desgaste abrasivo)

3.1.5. Caracterización de aleaciones

Se realizó una preparación metalográfica, exponiendo la superficie a dos soluciones para revelar la martensita y delinear carburos para el estudio de su morfología y fracción volumétrica. Las soluciones empleadas para el análisis metalográfico fueron:

1. Solución de Vilella (5 ml HCl, 5 g de ácido pícrico y 100 ml de etanol 95%) empleada para observar las muestras mediante Microscopía Óptica (OM)
2. Solución de Nital (6 ml HNO₃ y 100 ml etanol %) usada para obtener imágenes por Microscopía electrónica de barrido (SEM).

Para analizar el contenido de carburos (fracción volumétrica, tamaño y dispersión sobre la muestra) se empleó un Microscopio Óptico (Optika modelo XDS-3MET) perteneciente al laboratorio de Ingeniería de Materiales de la Universidad de Chile, y el software “Image Pro plus 6” (licencia libre) para realizar el tratamiento digital de imágenes.

Complementando el análisis morfológico y para identificación de los mecanismos de desgaste en las muestras, se usó un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) (FEI-Quanta 250) perteneciente al departamento de Geología de la Universidad de Chile, con detectores de electrones secundarios (SE) para observar la morfología de los carburos, topografía superficial y además se empleó un detector de Electrones retro dispersados (BSE), para obtener imágenes sensibles a la composición química (cambio en la escala de grises por efecto del número atómico).

Adicionalmente se usó una micro-sonda de análisis químico elemental adosada al microscopio electrónico de barrido, por medio de Espectroscopía de Energía Dispersiva por Rayos X (EDX) (Oxford Instruments). Esto con el fin de confirmar la composición química elemental en las muestras a través de un análisis puntual y en área a través de un mapeo composicional para complementar el análisis.

La composición y estructura cristalina de las fases en las fundiciones, fueron analizadas por la técnica de Difracción de Rayos X (XRD), mediante un Difractómetro (Bruker D8 Advance), en el cual se usó una fuente de radiación de $\text{Cu-K}\alpha = 1.5 \text{ \AA}$, con una geometría Bragg Bretano, con un tamaño de paso de 0.02° , un tiempo por paso de 1.6 segundos y un rango de barrido $2\theta: 30^\circ - 90^\circ$. Para identificar las fases presentes en las fundiciones estudiadas, se utilizaron las bases de datos de polvos de difracción ICDD-JCPDS, por medio del software Bruker EVA™ 4.2. La cantidad de cada fase al igual de los carburos identificados se utilizó el método de refinamiento Rietveld, en el software Bruker TOPAS™.

3.1.6. Evaluación de propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas se caracterización por medio de ensayos de macro y micro dureza Rockwell C y Vickers respectivamente, e impacto Charpy para determinar el comportamiento a la tenacidad por impacto.

Los ensayos de microdureza se llevaron a cabo en un equipo Struers Duramin $\pm 1/2$ [20], en el laboratorio de Ingeniería de Materiales de la Universidad de Chile. Se utilizaron dos cargas, una de 0.2 [kgf] (HV0.2) y otra de 2.0 [kgf] (HV 2.0) durante 15 segundos. Estos ensayos se realizaron a temperatura ambiente. Con el fin de minimizar los errores experimentales se realizaron 45 mediciones por probeta para cada carga.

El procedimiento empleado consiste en ubicar la probeta sobre la plataforma centrada, seleccionar en el equipo el tipo de ensayo que se realizará, luego presionar el botón de inicio para que automáticamente el equipo realice la indentación correspondiente.

Posteriormente se utiliza el lente para ajustar la distancia cero entre las líneas verticales que miden la longitud de la línea horizontal, luego se mueven las líneas a los vértices para ingresar la longitud de la diagonal-horizontal.

Se gira 90° el lente y se mide con el mismo método la línea diagonal-vertical. Finalmente el equipo realiza el cálculo y entrega la microdureza Vickers a través de la siguiente Fórmula 3.2.

$$HV(d) = 1,8522 \left(\frac{p \text{ [kg]}}{d \text{ [mm}^2\text{]}} \right) \quad (3.2)$$

Donde p es la carga aplicada en [kg] y d es la longitud promedio de las diagonales de la indentación d1 y d2. Ver Figura 3.4.

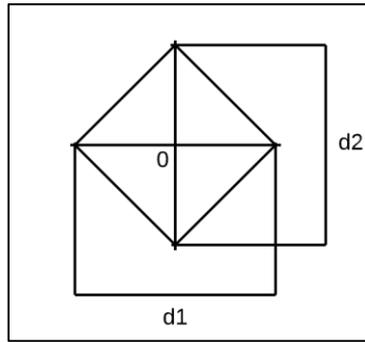


Figura 3.4: Esquema indentación Vickers.

Los ensayos de macrodureza se realizaron en un durómetro Rockwell Wilson 103R Instron con indentador de diamante, utilizando la escala de dureza Rockwell C (HRC) con una carga de 150 [kgf] durante 10 segundos según norma [22]. Estas mediciones se realizaron en la superficie del material sobrante luego del corte de las probetas. Este equipo pertenece al laboratorio de metalografía del Departamento de Ingeniería Mecánica. Con el fin de minimizar los errores experimentales se realizaron 5 mediciones por probeta.

Los ensayos de resistencia al impacto Charpy [20] se realizaron en un equipo Zwick 5113.300. Se realizaron 4 ensayos a especímenes tipo A estándar para cada fundición a temperatura ambiente. El equipo calcula la energía absorbida por la probeta según la Formula 3.2.

$$\tau = P(h - h')g \quad (3.2)$$

Donde τ es la energía absorbida en el impacto por la probeta en Joules, P es la masa del péndulo en [kg], h es la altura inicial del péndulo, h' es la altura final del péndulo y g es la aceleración de gravedad (9,8) [m/s^2].

3.1.7. Análisis de desgaste abrasivo

Los ensayos de desgaste abrasivo se realizaron en un equipo fabricado en el departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile según la norma ASTM G65, el cual ya fue utilizado en diversos trabajos de investigación desarrollados en el departamento entre los años 2010 y 2011 [23,24], y más recientemente en el año 2016 [25]. Este equipo se utiliza para la medición de desgaste abrasivo utilizando un disco con recubrimiento de goma (Clorobutilo) sobre el que se aplica arena de sílice seca de granulometría entre 200 – 300 μm , de acuerdo a la norma estándar ASTM-G65 [8]. Este ensayo permite efectuar procedimientos para determinar la resistencia de materiales metálicos a la abrasión. En la Figura 3.6 se observa el equipo utilizado.

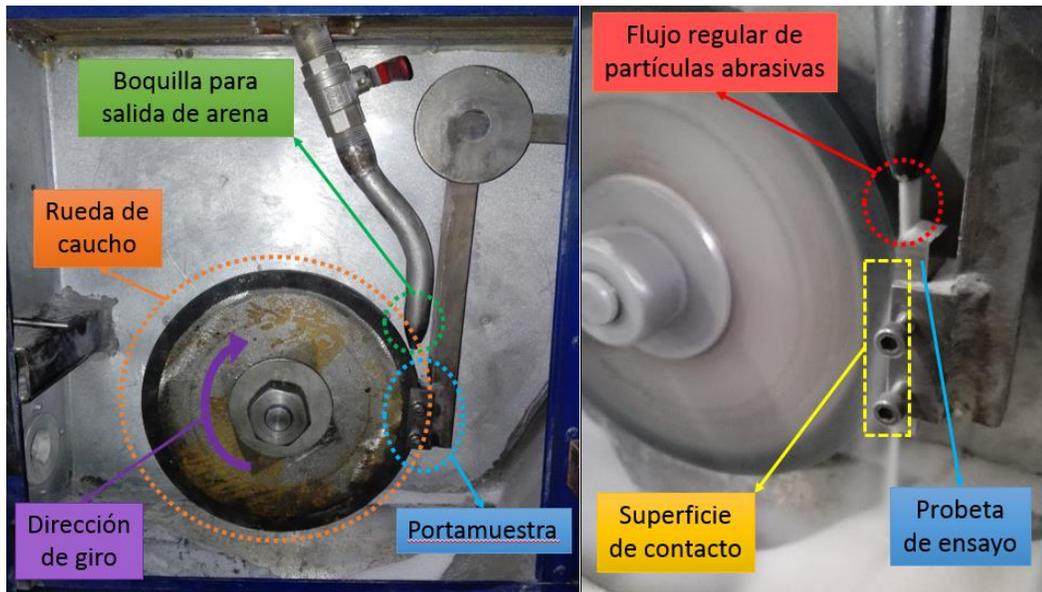


Figura 3.5: Equipo para ensayos de desgaste (norma ASTM-G65)

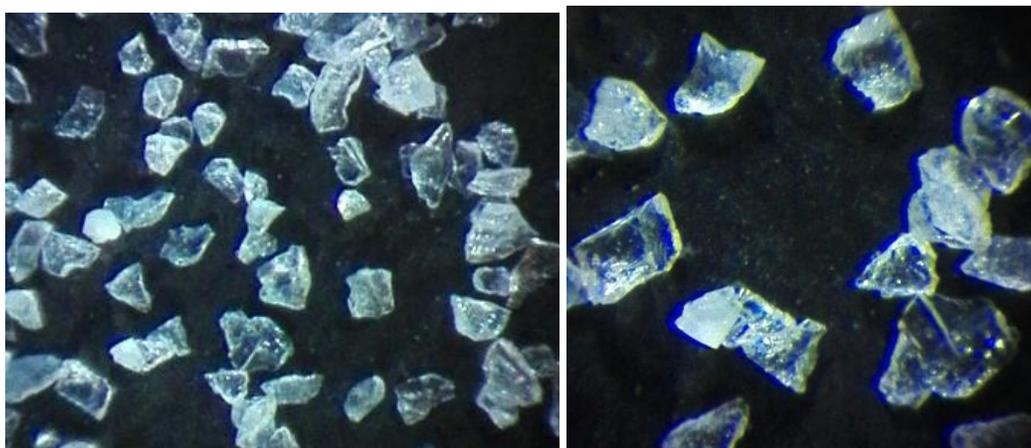


Figura 3.6: Arena de sílice utilizada en el ensayo de desgaste (norma ASTM-G65)

Los parámetros del ensayo que se utilizaron en esta experiencia son los siguientes:

- Caudal de arena de sílice: 389 [g/min]
- Diámetro inicial de la rueda de 223 [mm]
- Velocidad angular de la rueda: 189 [rpm]
- Fuerza aplicada a la probeta: 130 [N] (6,77 [kg] en el brazo)
- Procedimiento tipo A de la norma ASTM-G65 [8]

La medición experimental de la pérdida de masa durante el ensayo fue realizada cada 700 [m] aproximadamente, con un total de 6 mediciones por probeta y 4200 [m], todo esto según el procedimiento A de la norma indicada, para determinar la resistencia a la abrasión de las fundiciones en función de la pérdida de volumen a lo largo del ensayo. Para realizar esta medición se detuvo el equipo luego de cada ciclo, se limpió la probeta en un baño ultrasónico Elma E 30H con acetona y se procedió a medir su masa con una balanza analítica Radwag wlc60/62. Para cada aleación estudiada se utilizaron 3 probetas con el fin de minimizar los errores asociados al procedimiento experimental.

4. Resultados y discusión

4.1. Análisis microestructural

4.1.1. Microscopía Óptica

Se realizó un análisis de la micrografía de las muestras en la superficie correspondiente a la sección transversal de las placas originales a través de fotografías a 10x, 20x, 50x y 100x las cuales se encuentran en el Anexo A. Las cinco muestras presentaron una microestructura semihomogénea compuesta principalmente por carburos de geometría acicular y agrupaciones de carburos pequeños, a excepción de la muestra M.3-V.1 la cual presenta gran cantidad de carburos aciculares en sus extremos (superior e inferior) y una franja de agrupaciones de carburos pequeños en su centro. Las imágenes se obtuvieron luego del ataque químico realizado con vilella al 5%. En las Figuras 4.1 a 4.5 se puede observar las imágenes más representativas de cada fundición estudiada.

En las cinco fundiciones se pueden observar estructuras aciculares de similar tamaño, características de este tipo de materiales. Sin embargo en las fundiciones M.1, M.1.5 y M.3 se observan carburos masivos hexagonales con un agujero central ($> 100 \mu\text{m}$) los cuales disminuyen en tamaño a medida que aumenta el contenido de molibdeno (ver Figuras 4.1 a 4.3). Por otra parte las fundiciones M.1-V.1 y M.1-V.2 presentan carburos hexagonales de menor tamaño ($< 50 \mu\text{m}$) y predomina la presencia de carburos pequeños agrupados alrededor de carburos mayores (ver Figura 4.5 derecha).

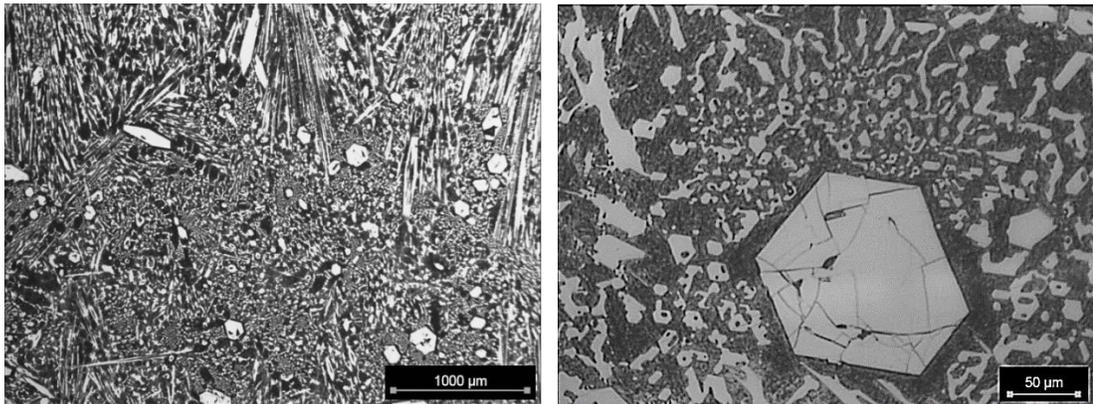


Figura 4.1: Muestra M.1 – izquierda: 10x | derecha: 100x

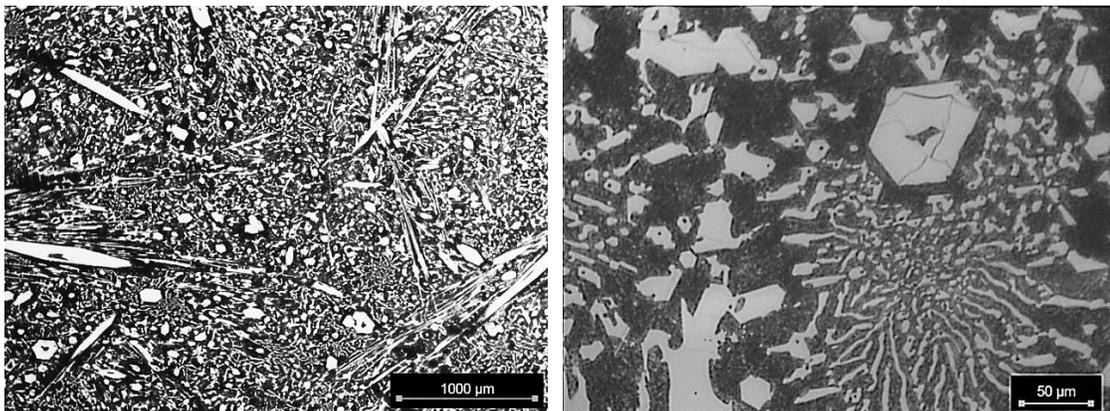


Figura 4.2: Muestra M.1.5 – izquierda: 10x | derecha: 100x

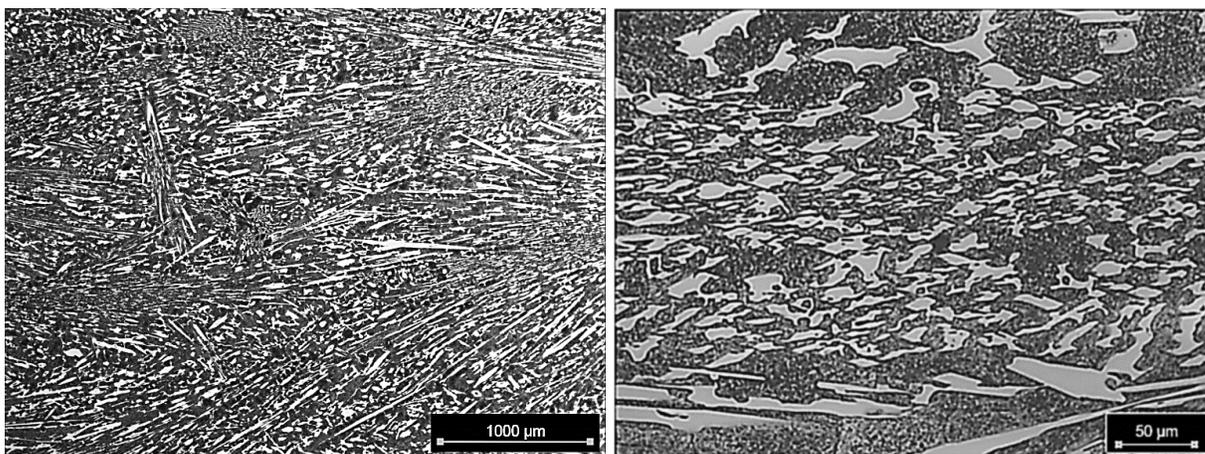


Figura 4.3: Muestra M.3 – izquierda: 10x | derecha: 100x

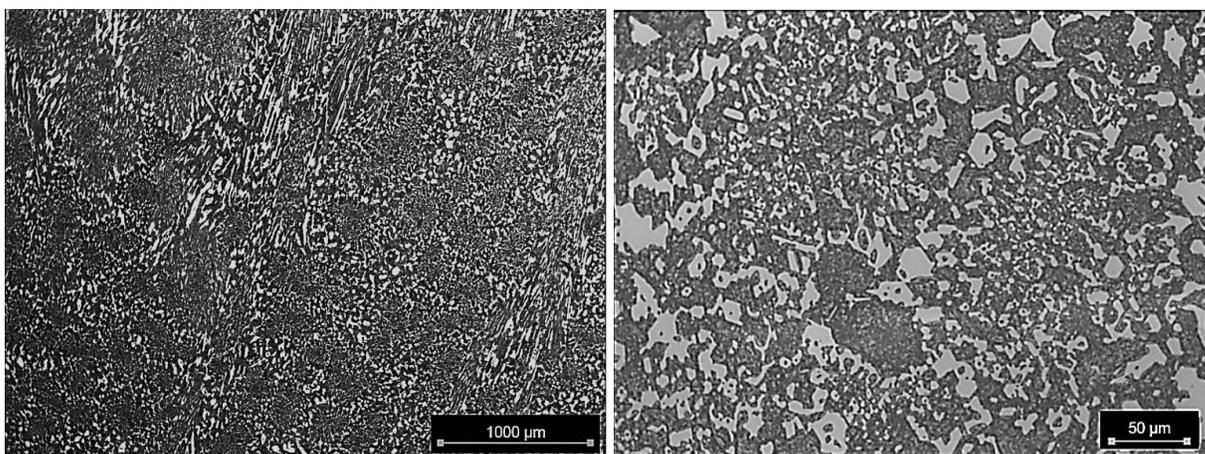


Figura 4.4: Muestra M.3 V.1 – izquierda: 10x | derecha: 100x

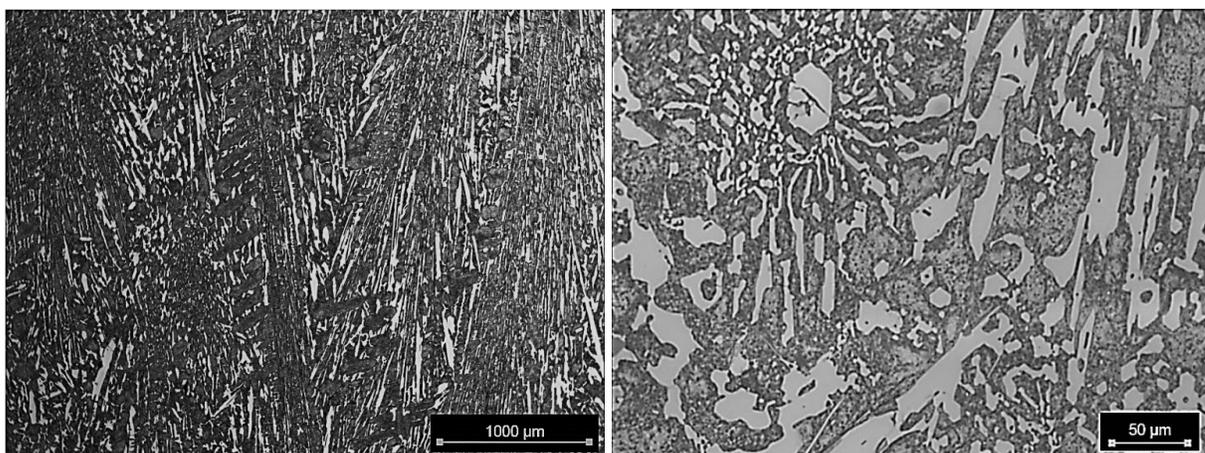


Figura 4.5: Muestra M.3 V.2 – izquierda: 10x | derecha: 100x

En base a las imágenes de microscopía óptica con aumento de 10x se realizó un análisis del porcentaje volumétrico de carburos presente en cada una de las fundiciones y también la distribución de tamaño de carburos según su área total.

Este análisis se realizó a través del procesamiento de imágenes de microscopía óptica utilizando el programa “Image Pro Plus” se obtuvo una aproximación de la distribución de área de los carburos para cada fundición estudiada en tres segmentos y del porcentaje volumétrico total de carburos. Los resultados exactos se pueden observar en el Anexo D.

En la Figura 4.6 se puede observar que existe un aumento leve de carburos pequeños ($<2500 \mu m^2$) a medida que aumenta el porcentaje en peso de Mo, esto permite corroborar la información obtenida de las imágenes de microscopía óptica analizadas anteriormente. Además existe una disminución en la fracción volumétrica total de las primeras tres fundiciones.

Por otra parte también podemos notar que la fundición M.1-V.1 presenta una menor cantidad de carburos masivos ($>10000 \mu m^2$) dando paso a una gran cantidad de carburos pequeños ($<2500 \mu m^2$) los cuales se observan en las imágenes de microscopía óptica como agrupaciones de carburos comúnmente denominados *clusters*, sin embargo esto no disminuye el porcentaje volumétrico total de carburos en comparación a la muestra M.3. Finalmente se observa que la muestra M.3-V.2 tiene una distribución en área de carburos muy similar a la muestra M.3.

Por último se observa que el aumento de porcentaje en peso de Mo genera una disminución en el porcentaje total de carburos de 34% en la muestra M.1 a 28% en la muestra M.3, por otra parte el aumento de porcentaje en peso de V genera un leve aumento en el porcentaje total de carburos de 28% en la muestra M.3 a 30% en la muestra M.3-V.2. Esto se relaciona directamente con los estudios presentados como antecedentes en donde se indica que el adición de V produce un refinamiento en los carburos sin afectar de forma considerable la fracción volumétrica total de carburos [3,7]

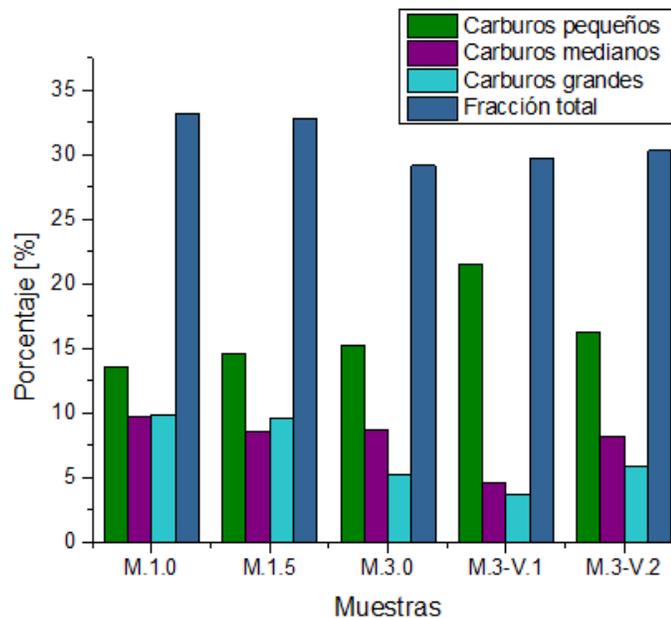


Figura 4.6: Distribución porcentual de área de carburos.

4.1.2. Microscopía Electrónica de Barrido

Se realizó un análisis utilizando microscopía electrónica de barrido (SEM) con espectroscopia de energía dispersiva (EDS) para determinar los elementos presentes en las distintas zonas de la muestra. Este análisis se realizó luego de atacar químicamente las muestras con nital al 6%. Las imágenes más representativas se presentan en las Figuras 4.6 a 4.10; la totalidad de las fotografías obtenidas se pueden encontrar en el Anexo B.

Con base en estas imágenes se puede reafirmar la presencia de estructuras aciculares y carburos hexagonales de mayor tamaño ($> 50 \mu\text{m}$) en las muestras M.1 y M.1.5, además de una matriz martensítica (Figuras 4.7 y 4.8). Esta microestructura resulta similar a la descrita en los antecedentes según la información de fundiciones blancas de similar composición química [11]

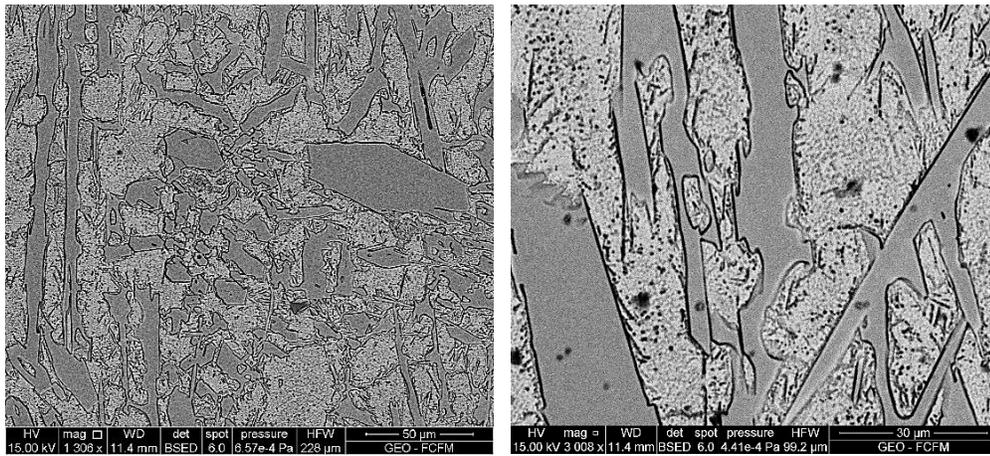


Figura 4.7: Muestra M.1 – izquierda BSE: 50 μm | derecha BSE: 30 μm

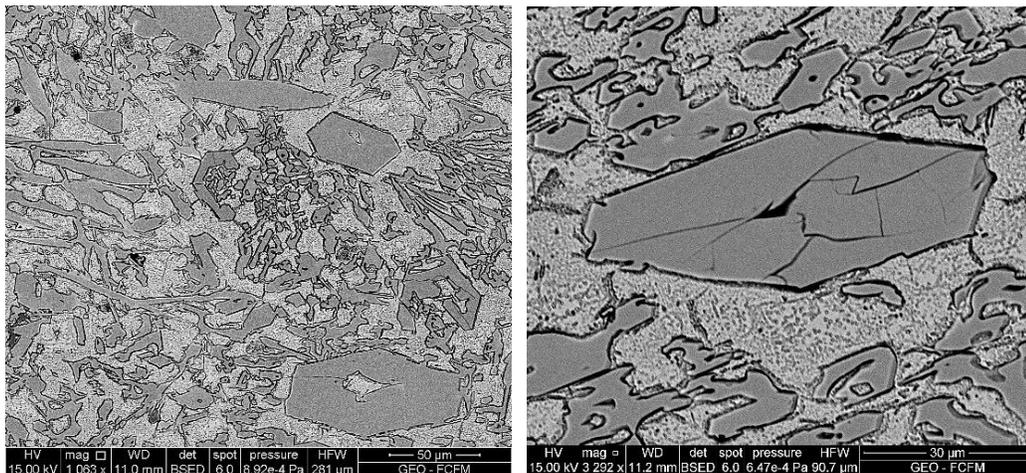


Figura 4.8: Muestra M.1.5 – izquierda BSE: 50 μm | derecha BSE: 30 μm

La muestra M.3 presenta estructuras aciculares similares a las anteriores, sin embargo los carburos hexagonales que presenta son de menor tamaño ($< 20 \mu\text{m}$). En particular en la Figura 4.9 izquierda se puede observar estructuras blancas de carácter eutéctico que serán analizadas posteriormente.

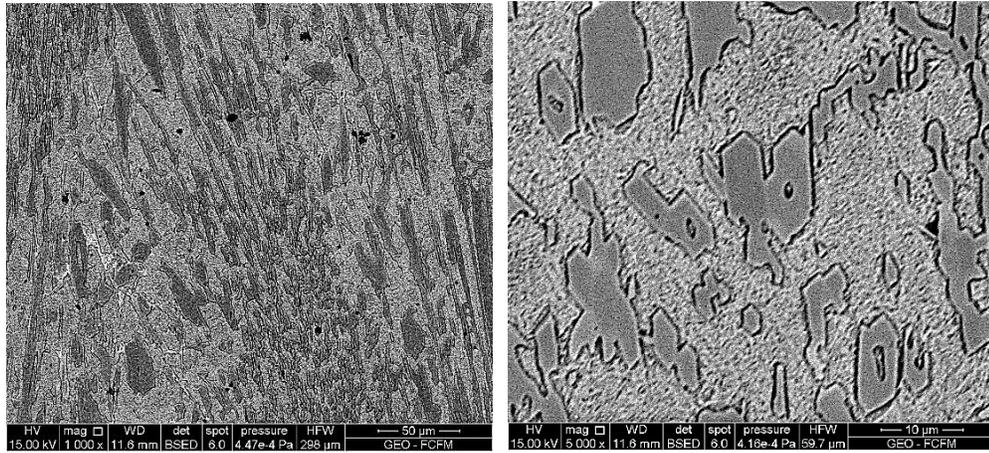


Figura 4.9: Muestra M.3 – izquierda BSE: 50 μm | derecha BSE: 10 μm

Finalmente en las muestras M.3-V.1 y M.3-V.2 las cuales contienen Vanadio, se puede observar un refinamiento en los carburos de cromo similar a lo reportado por C. Scandian [4]. Además se observan estructuras blancas similares a la muestra M.3 pero de mayor área total (Figuras 4.10 y 4.11).

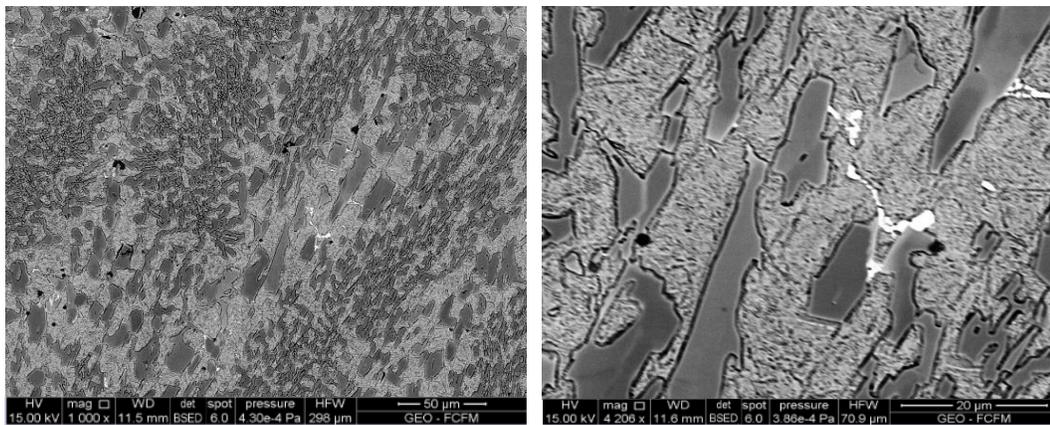


Figura 4.10: Muestra M.3 V.1 – izquierda BSE: 50 μm | derecha BSE: 20 μm

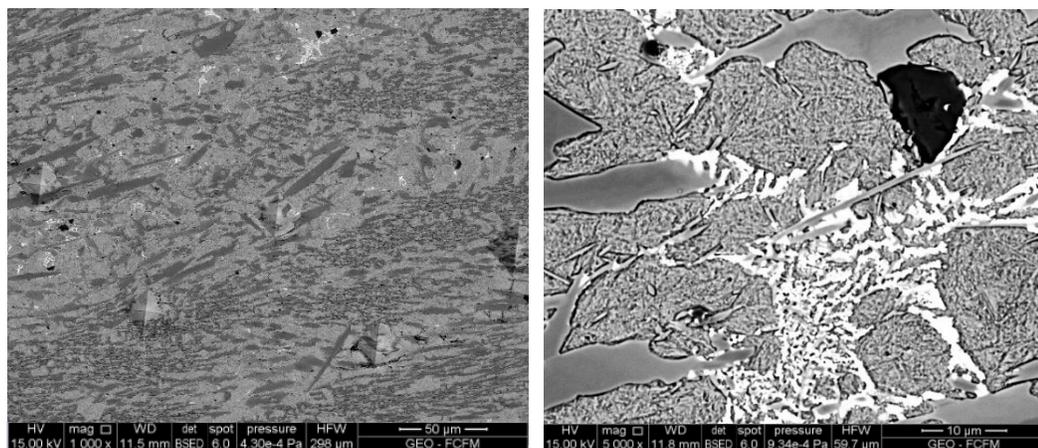


Figura 4.11: Muestra M.3 V.2 – izquierda BSE: 50 μm | derecha BSE: 10 μm

A continuación se presentan los resultados más representativos del análisis de composición realizado con EDS. El mapa de composición elemental para cada aleación se observa en las Figuras 4.12 a 4.16; la totalidad de los mapas obtenidos se pueden encontrar en el Anexo C.

En el mapa de la muestra M.1 se puede observar el Fe concentrado en la matriz y los carburos de mayor tamaño compuestos principalmente de Cr y C. Por otra parte el Mo y Si están presentes en la matriz en solución sólida (Figura 4.12).

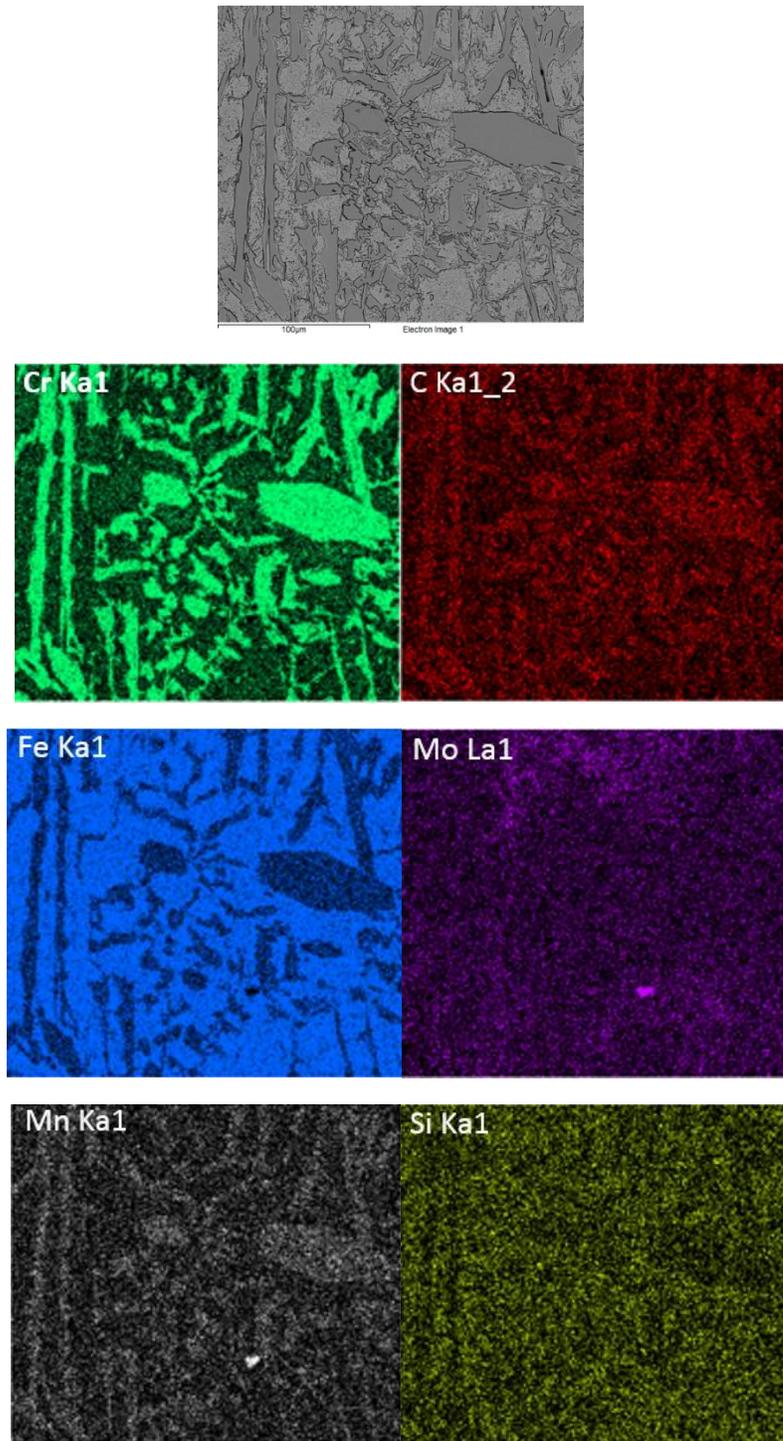


Figura 4.12: Mapa de composición elemental - Muestra M.1

En el mapa de la muestra M.1.5 se puede observar un fenómeno similar a la muestra M.1, el Fe se concentra en las matriz y los carburos están compuestos principalmente por Cr y C. El silicio está presente en solución sólida, sin embargo se observan zonas con mayor concentración de Mo a diferencia de la muestra M.1 esto está asociado principalmente a la tendencia de este elemento a formar estructuras propias alrededor de los carburos de mayor tamaño (Figura 4.13).

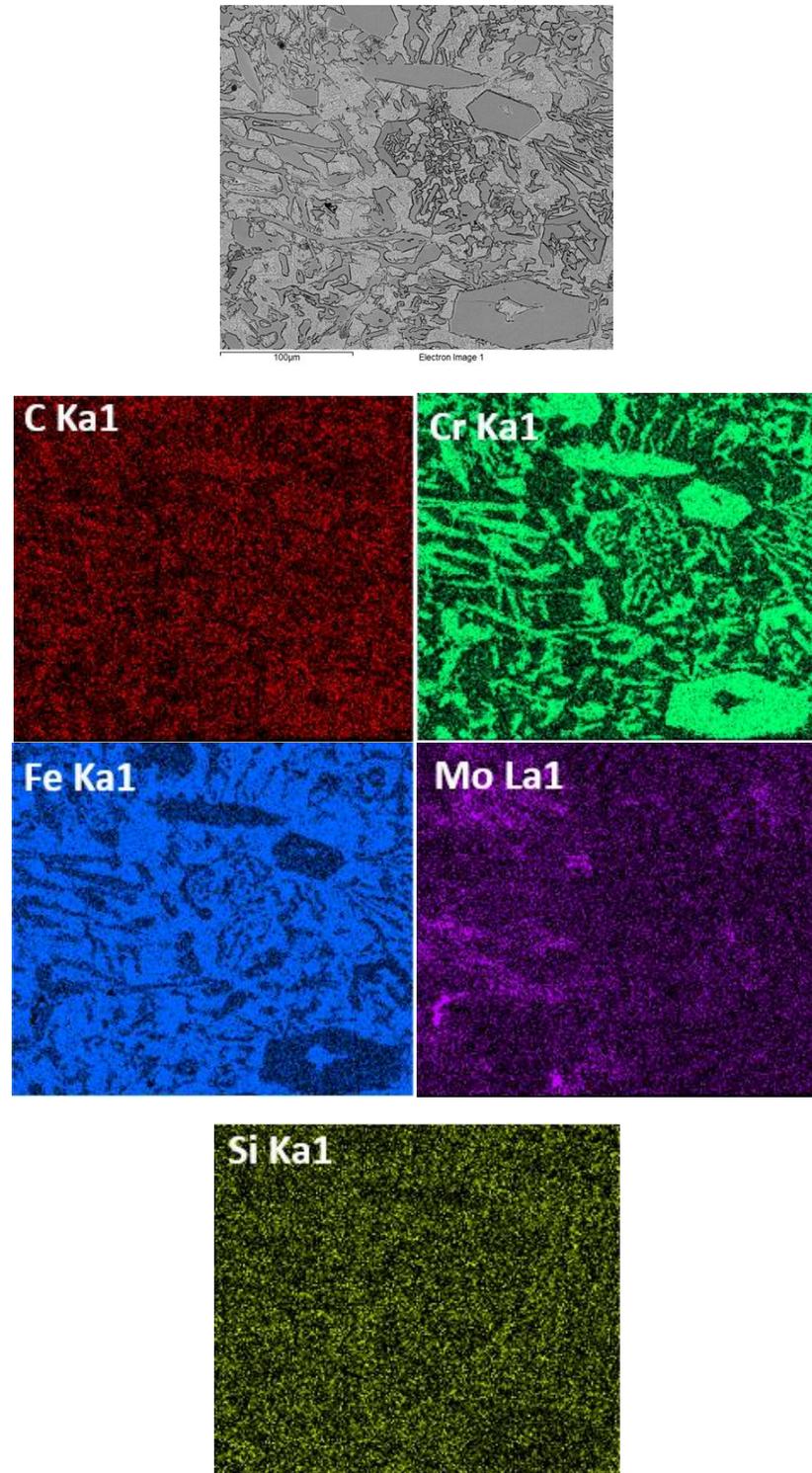


Figura 4.13: Mapa de composición elemental - Muestra M.1.5

En el mapa de la muestra M.3 se puede observar una estructura similar a las muestras anteriores, Fe presente en la matriz y carburos de cromo. Sin embargo es posible notar que el Mo ya no se presenta en solución sólida, sino que forma una fase de color blanco y de geometría eutéctica. Por otra parte observamos también un área de color negro la cual identificamos como una inclusión no metálica, específicamente sulfuro de manganeso (Figura 4.14).

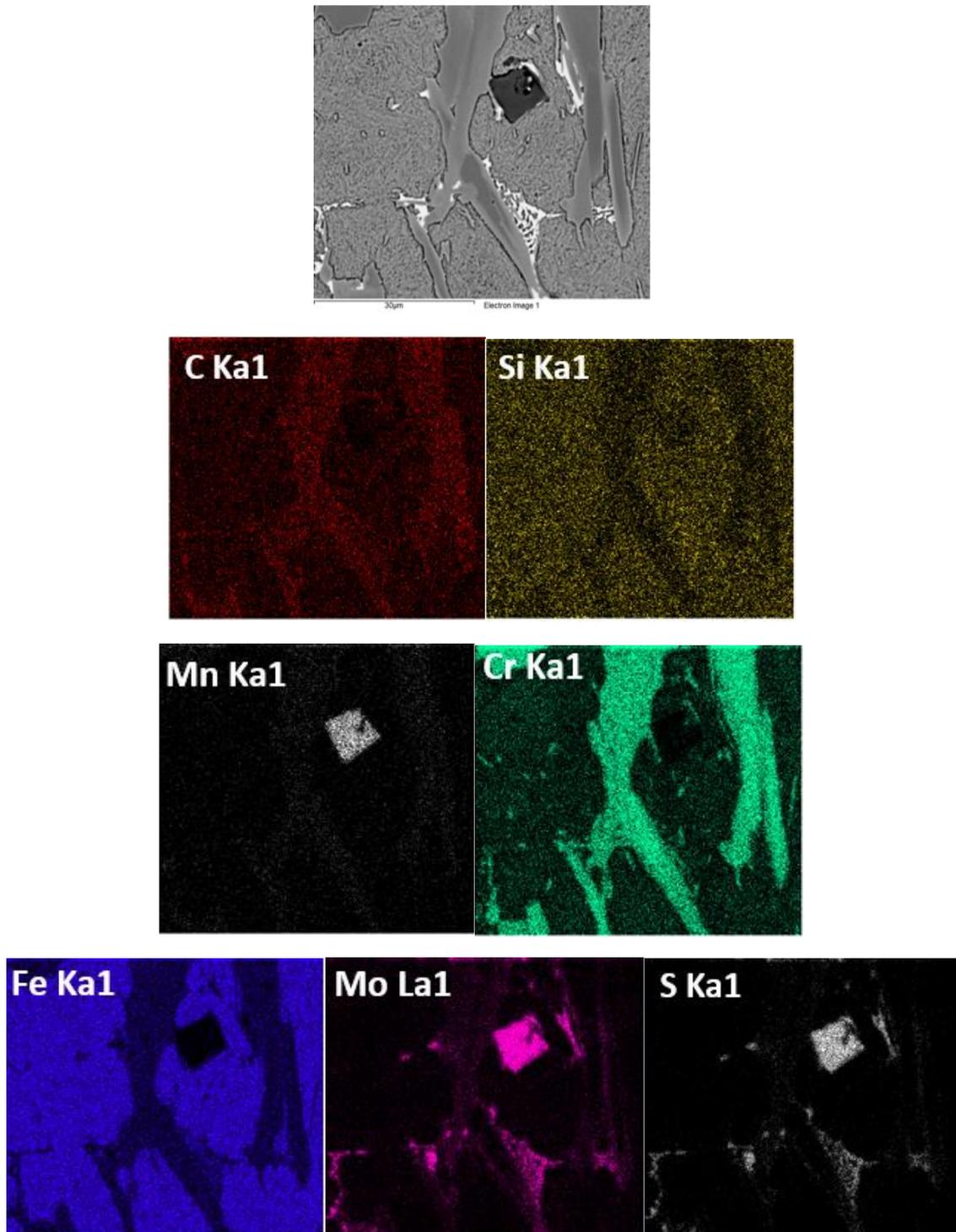


Figura 4.14: Mapa de composición elemental - Muestra M.3

En el mapa de la muestra M.3-V.1, se observa que las estructuras blancas ricas en Mo están presentes. Podemos notar que el V adicionado (1%) forma parte de los carburos de cromo que observamos en las muestras anteriores. El Si sigue participando en solución sólida (Figura 4.15).

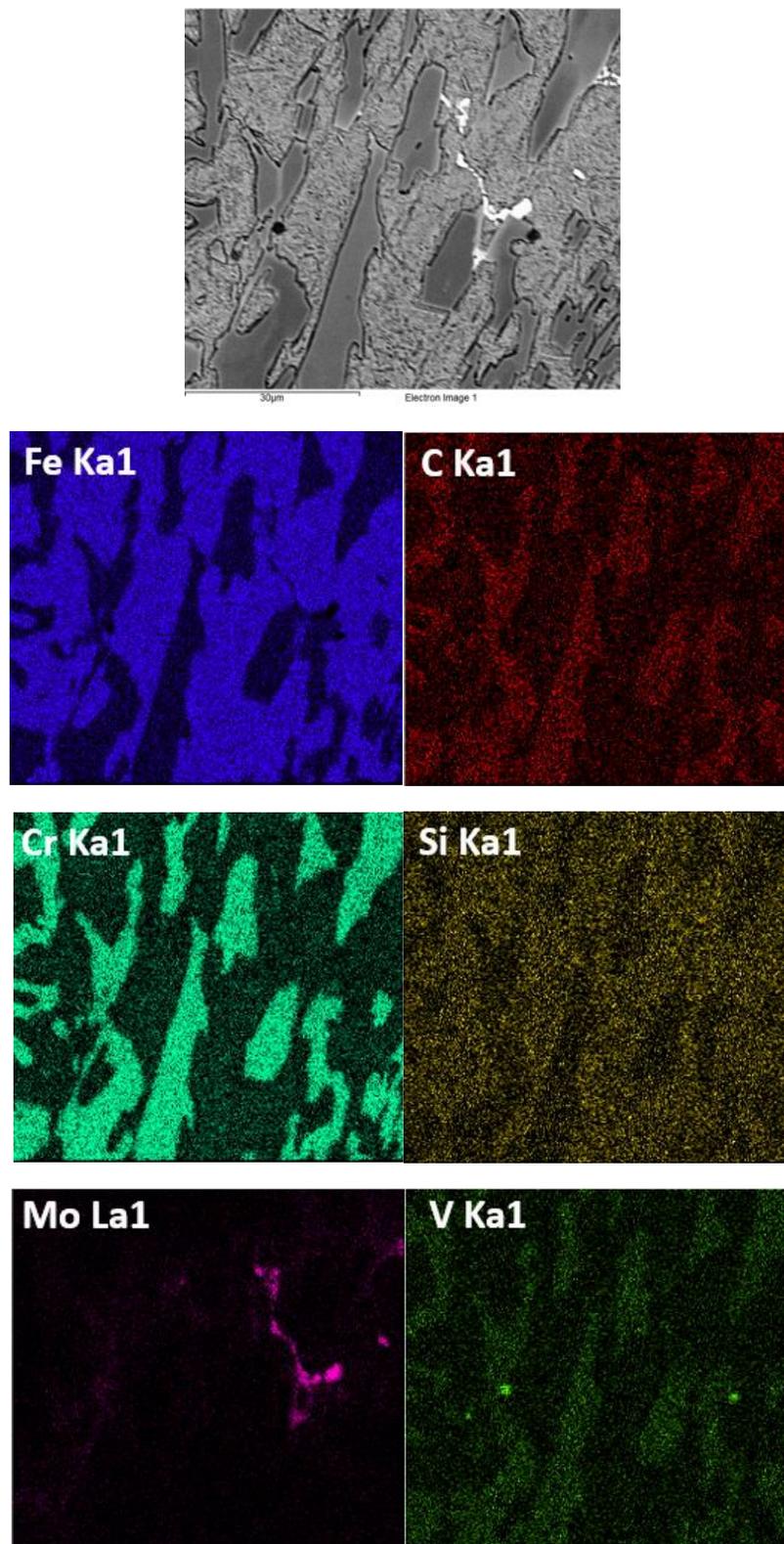


Figura 4.15: Mapa de composición elemental - Muestra M.3 V.1

En el mapa de la muestra M.3-V.2 se observa que las estructuras blancas ricas en Mo también están presentes y en mayor área. Además se hace más notoria la participación del V adicionado (2%) en los carburos de cromo en comparación a la muestra M3-V.1. El Si continúa participando en solución sólida y se observa nuevamente una inclusión no metálica (Figura 4.16).

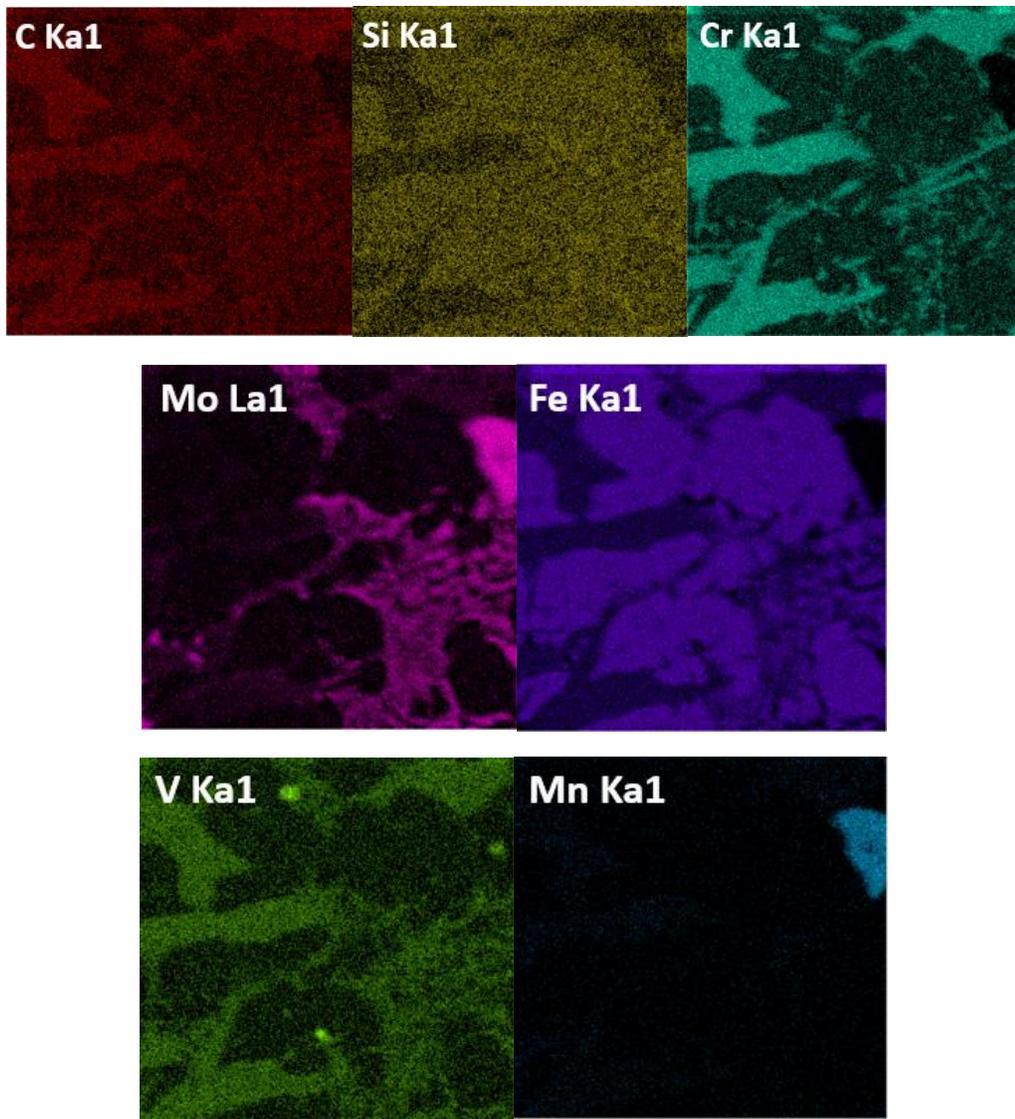
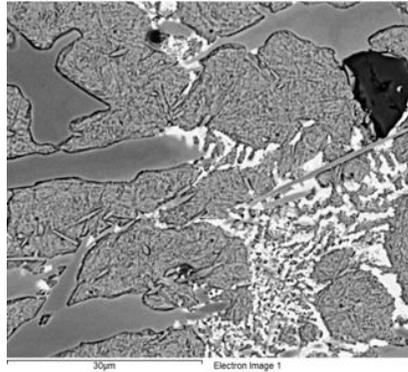
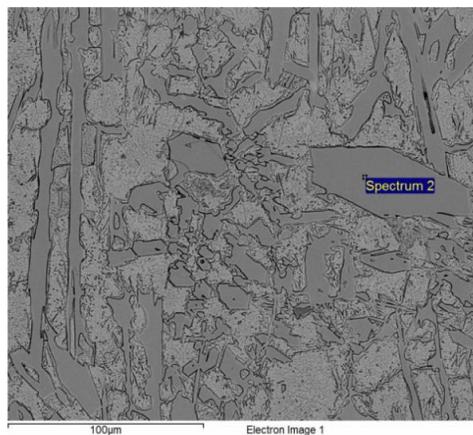


Figura 4.16: Mapa de composición elemental - Muestra M.3 V.2

Además se realizaron análisis de composición elemental global, con el fin de corroborar la composición entregada por el fabricante de las placas fundidas en aquellos elementos que están presentes en una cantidad suficiente para ser medidos. Estos análisis se pueden encontrar en el Anexo D y en ellos se puede observar que no existen grandes discrepancias con lo reportado por el fabricante.

Por último se presentan los resultados obtenidos del análisis puntual de composición realizado con EDS. Los análisis más importantes se observan a continuación, la composición porcentual de cada estudio se observa a la derecha de cada imagen y la zona estudiada junto con el espectro obtenido se observa en las Figuras 4.17 a 4.21. La totalidad de los análisis realizados se pueden encontrar en el Anexo E.

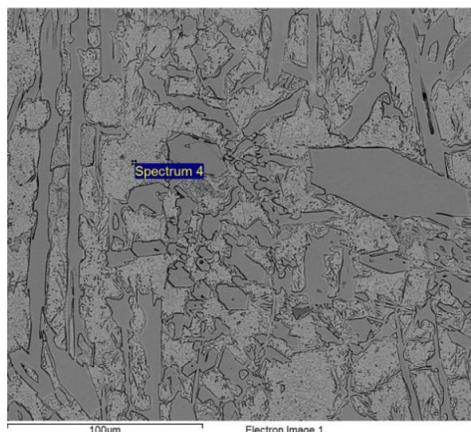
En la Figura 4.17 se puede observar un análisis puntual realizado sobre un carburo en la muestra M.1 el cual muestra que está compuesto por hierro, cromo y carbono. En base a este análisis y la geometría del carburo es posible deducir que estamos frente a un carburo del tipo M_7C_3 .



Element	Weight%	Atomic%
C K	14.24	42.48
Cr K	52.21	35.99
Fe K	33.55	21.53
Totals	100.00	

Figura 4.17: Análisis puntual de composición carburo - Muestra M.1

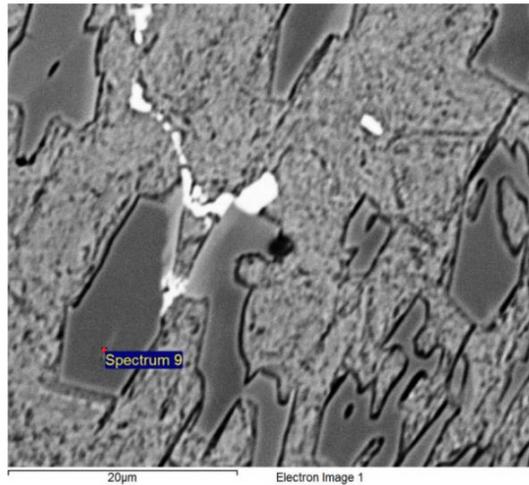
En la Figura 4.18 se observa un análisis puntual realizado sobre la matriz de la muestra M.1, en base a sus resultados podemos comprobar que la matriz está formada principalmente por Fe y otros elementos que participan en solución sólida. Este fenómeno se repite en las muestras M.1, M.1.5 y M.3.



Element	Weight%	Atomic%
C K	6.47	23.13
O K	1.89	5.07
Si K	0.80	1.22
Cr K	13.58	11.21
Mn K	0.78	0.61
Fe K	76.48	58.77
Totals	100.00	

Figura 4.18: Análisis puntual de composición matriz - Muestra M.1

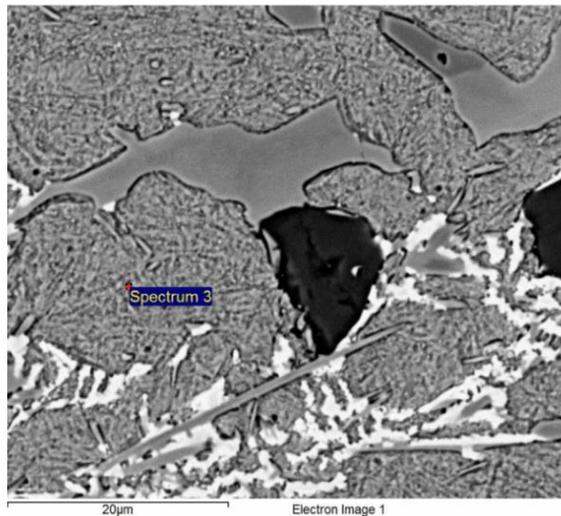
En la Figura 4.19 se presenta un análisis puntual realizado sobre un carburo hexagonal de la muestra M.3-V.1, a diferencia del caso de la muestra M.1 en este análisis el Mo y V participan de la composición del carburo junto con el cromo.



Element	Weight%	Atomic%
C K	15.78	46.07
V K	3.18	2.19
Cr K	43.73	29.49
Fe K	32.84	20.62
Mo L	4.47	1.63
Totals	100.00	

Figura 4.19: Análisis puntual de composición carburo - Muestra M.3-V.1

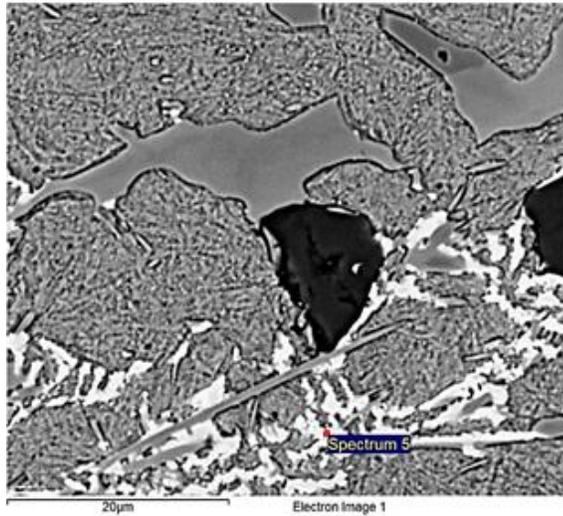
Observando la Figura 4.20 se puede comprobar, a través del análisis puntual realizado sobre la matriz de la muestra M.3-V.1, que el Mo, V, Si y Mn también se encuentran en la matriz en una menor medida.



Element	Weight%	Atomic%
C K	8.53	29.29
O K	1.99	5.14
Si K	1.05	1.54
V K	0.65	0.52
Cr K	9.39	7.44
Mn K	0.79	0.59
Fe K	71.75	52.96
Mo L	5.84	2.51
Totals	100.00	

Figura 4.20: Análisis puntual de composición matriz - Muestra M.3-V.2

Por último en la Figura 4.21 se observa un análisis realizado sobre la fase blanca eutéctica de la muestra M.3-V.2, en donde podemos corroborar que corresponde a una fase rica en Mo y también contiene una cantidad menor de V.



Element	Weight%	Atomic%
C K	13.09	44.84
O K	1.73	4.44
Si K	1.03	1.51
V K	4.33	3.50
Cr K	8.91	7.05
Fe K	26.87	19.79
Mo L	44.04	18.88
Totals	100.00	

Figura 4.21: Análisis puntual de composición fase Mo - Muestra M.3-V.2

4.1.3. Análisis de DRX

El análisis de las muestras de las cinco fundiciones blancas a través de la difracción de rayos X entregó como resultado cinco difractogramas los cuales pueden observarse en la Figura 4.22.

Se halló la presencia de carburos del tipo M_7C_3 en todas las fundiciones, donde el elemento M puede tratarse de Fe, Mn, Si o Cr. Además se observan carburos M_7C_3 principalmente de Mo en la muestra M.1.5 y carburos del tipo M_7C_3 basados en V en las muestras M.3-V.1 y M.3-V.2. En cuanto a la matriz se observa que las muestras M.3 y M.3-V.2 presentan austenita, lo que implica que su dureza será menor en comparación a las demás aleaciones. Por otra parte las muestras M.1 y M.1.5 presentan una combinación de martensita y austenita lo que implica una dureza media. Por último la muestra M.3-V.1 presenta solo martensita lo cuál asegura máxima dureza. Finalmente se observa en todas las fundiciones presencia de fases intermetálicas formadas principalmente por Fe, Mn, Si y Cr.

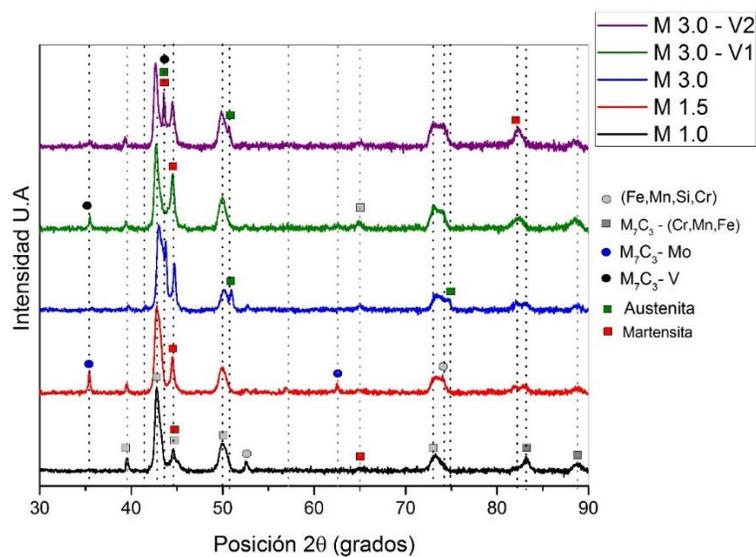


Figura 4.22: Difractograma fundiciones blancas con fases indexadas.

4.2. Análisis de propiedades mecánicas

4.2.1. Dureza

Para estudiar la microdureza se identificaron tres zonas dentro de las muestras rectangulares como se muestra en la Figura 4.23 y en cada zona se realizaron 15 ensayos de dureza Vickers de forma vertical. En la Figura 4.24 se muestra una microindentación representativa de los ensayos realizados. Se realizaron 45 ensayos con 200 [g] de carga y 45 ensayos con 2000 [g] de carga, durante 15 [s] para cada aleación estudiada, los resultados obtenidos se resumen en las Figuras 4.25 y 4.26. Las tablas con todos los datos específicos se pueden encontrar en el Anexo G.

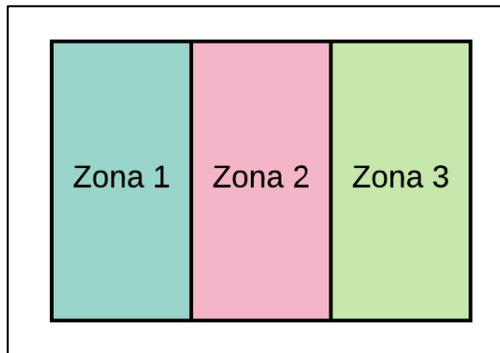


Figura 4.23: División por zonas de cada muestra (perfil transversal).

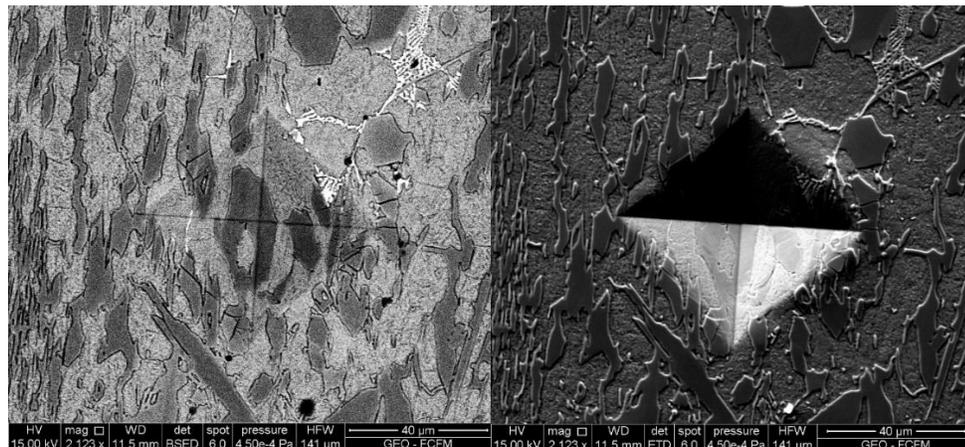


Figura 4.24: Fotografía microindentación Dureza Vickers

Los ensayos de microdureza Vickers realizados con 0.2 [kgf] de carga (Figura 4.25), muestran que el comportamiento del material logra en promedio microdurezas mayores o similares a las fundiciones blancas ensayadas por B. Lu, las cuales se ensayaron utilizando 0.1 [kgf] de carga [7]. A pesar de la variabilidad se puede observar que las muestras presentan durezas superiores a 850 $HV_{0.2}$, a excepción de la muestra M.3 V.2 que muestra una dureza mucho menor, cercana a 750 $HV_{0.2}$.

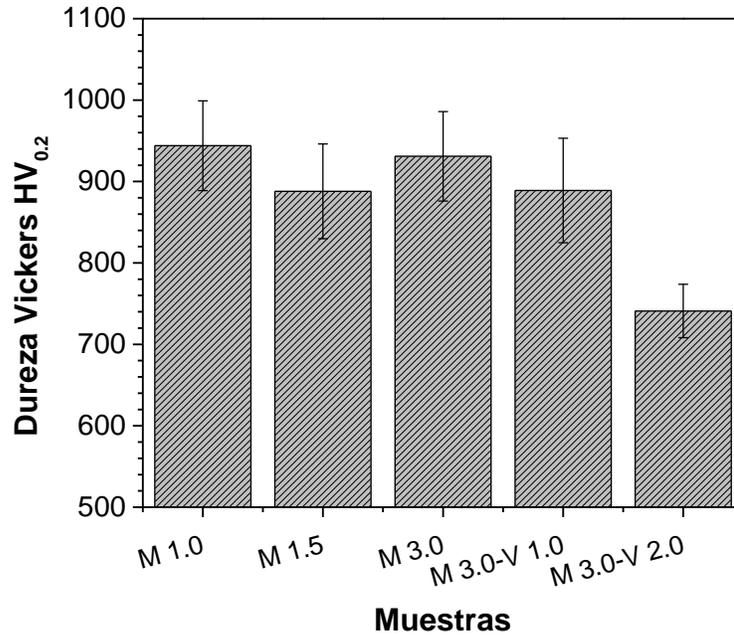


Figura 4.25: Resultados ensayos de microdureza Vickers $HV_{0.2}$

Por otra parte, los ensayos de microdureza Vickers con 2.0 [kgf] presentan menor variabilidad y al tratarse de una indentación de mayor tamaño, representan de mejor manera la dureza general del material. En la Figura 4.26 se puede observar que el porcentaje en peso de Molibdeno no tiene un efecto notorio en la dureza, a diferencia del Vanadio el cual disminuye la dureza al aumentar su porcentaje en peso.

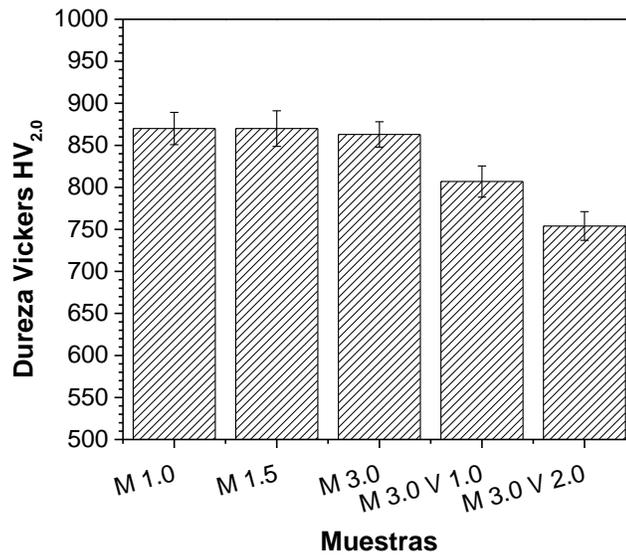


Figura 4.26: Resultados ensayos de microdureza Vickers $HV_{2.0}$

Para estudiar la macrodureza se realizaron 5 ensayos de dureza Rockwell C para cada aleación estudiada, los resultados obtenidos se muestran a continuación.

Analizando el gráfico de la Figura 4.27 se puede observar que el Molibdeno no presenta un efecto definido dentro de la macrodureza del material, no sucede así con el Vanadio puesto que el gráfico muestra una tendencia negativa de la dureza con respecto al porcentaje en peso de este elemento.

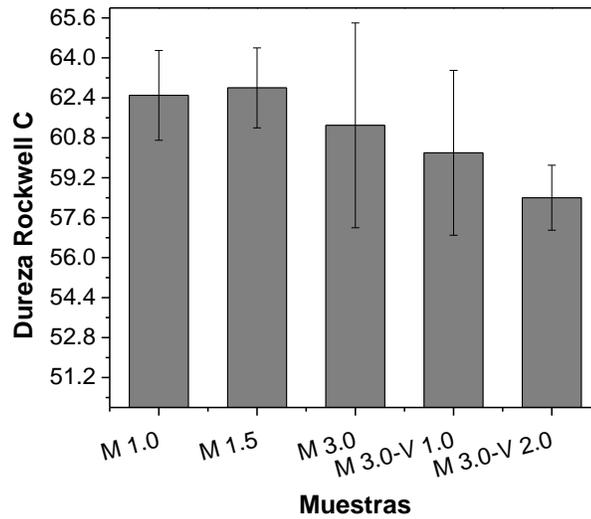


Figura 4.27: Resultados ensayos de dureza Rockwell C

Por último en el gráfico la Figura 4.28 observamos la dureza y fracción volumétrica de carburos de las fundiciones estudiadas. Se observa que con el adición de Mo no se produce un cambio notorio en la dureza Vickers, sin embargo si se observa una disminución de la fracción volumétrica de carburos total. Por otra parte la adición de V produce un aumento en la fracción volumétrica de carburos y una disminución en la dureza Vickers, esto se relaciona directamente con el refinamiento de los carburos primarios y la presencia de matriz austenítica principalmente en la muestra M.3-V.2.

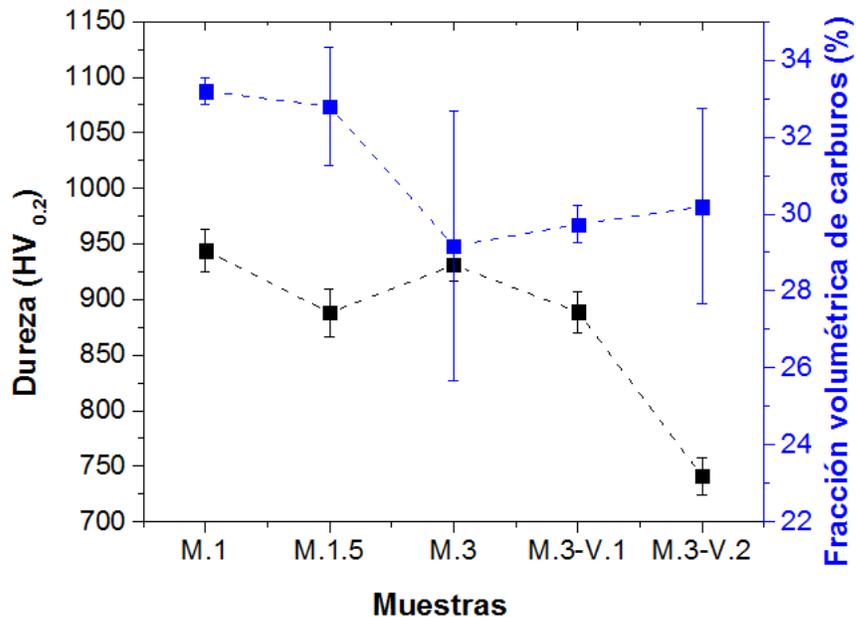


Figura 4.28: Microdureza Vickers / Fracción volumétrica de carburos.

4.2.2. Resistencia al impacto

Se realizaron cuatro ensayos de impacto Charpy para cada aleación estudiada, los resultados obtenidos se muestran a continuación. En la Figura 4.29 se puede observar que los resultados para todas las muestras son menores a 1 [J], es decir, las cinco muestras ensayadas se consideran frágiles (aceros de alto carbono presentan un valor promedio entre 10 y 15 [J]). En el gráfico de la Figura 4.28 podemos observar una tendencia que indica que el aumento del porcentaje de Molibdeno produce una disminución en la tenacidad de la muestra en el ensayo, por otra parte el aumento del porcentaje de Vanadio produce un aumento leve en la tenacidad de las muestras ensayadas.

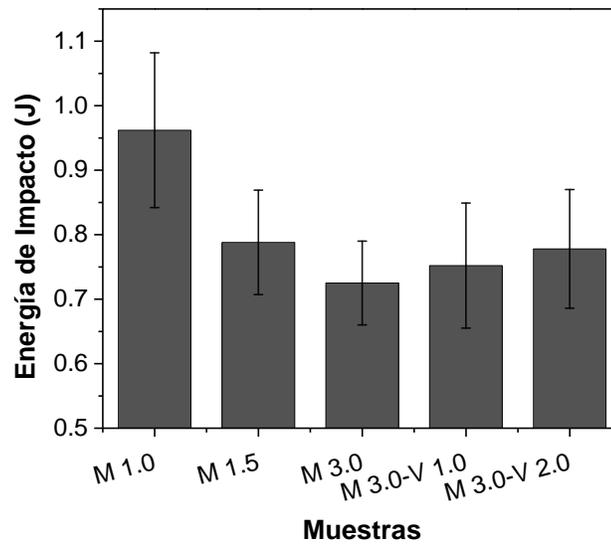


Figura 4.29: Resultados ensayos de impacto Charpy

4.3. Análisis de resistencia al desgaste por abrasión

4.3.1. Tasa de desgaste según norma ASTM G65

Se realizaron ensayos de desgaste a tres probetas de cada aleación para evaluar las diferencias en la pérdida de masa en función de la distancia recorrida sobre la rueda de caucho. El resumen de los resultados obtenidos se observa en la Tabla 4.1 y en las Figuras 4.31 a 4.36. Las tablas de resultados detallados se pueden encontrar en el Anexo H.

En la Figura 4.30 se observa la fotografía de dos probetas desgastadas donde se aprecia la huella de desgaste posterior al ensayo.

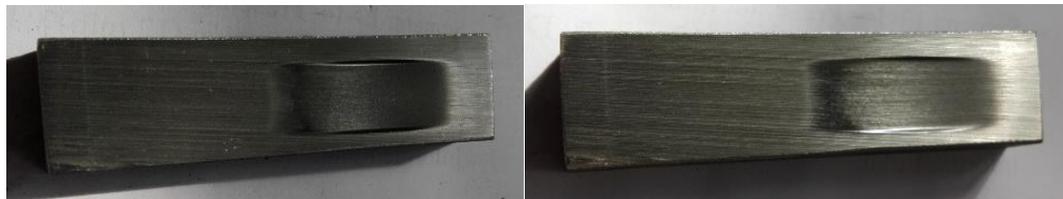


Figura 4.30: Probetas de desgaste posterior al ensayo de desgaste por abrasión según norma ASTM G65.

En primer lugar resulta importante señalar que las tasas de desgaste obtenidas para las cinco fundiciones estudiadas (Tabla 4.1) se encuentran dentro del mismo rango (0.005 – 0.010 [mm^3/m]) de las fundiciones analizadas por Baotong Lu, de similar dureza y porcentaje de Cromo [7]. Además es importante señalar que la diferencia entre la muestra con mejor desempeño y la con peor desempeño entre aquellas que solo contienen Mo (M.1, M.1.5 y M.3) es de 3.88%, por otra parte la misma diferencia entre las muestras que contienen Mo y V (M.3-V.1 y M.3-V.2) es de 17.35%. Por último es interesante notar que existe una mejora en la tasa de desgaste entre la muestra M.3 y M.3-V.1 de un 9,60%.

Para obtener los datos de la Tabla 4.1, se mide la masa de la probeta ensayada antes y después de cada ciclo, la diferencia entre estos valores corresponde a la pérdida de masa [g]. Este valor se divide por la densidad del material y se obtiene la pérdida de volumen [mm^3]. Luego se divide este valor por la distancia de deslizamiento recorrida por la probeta sobre la rueda de caucho y se obtiene la tasa de desgaste [mm^3/m] según la norma ASTM G65.

Tabla 4.1: Resumen valores totales promedio (5 muestras).

Probeta 3 [mm3]	Muestra 7 [perdida de volumen]			Muestra 8 [perdida de volumen]			Probeta 1 [mm3]
	Probeta 1 [mm3]	Probeta 2 [mm3]	Probeta 3 [mm3]	Probeta 1 [mm3]	Probeta 2 [mm3]	Probeta 3 [mm3]	
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
6,5195	6,1039	6,0000	6,3636	6,8961	7,5714	6,6883	5,7013
12,2468	11,7143	10,4545	11,8182	11,8961	15,3636	13,0390	10,8701
17,7013	17,0649	15,6623	17,4156	17,9221	19,9610	17,1169	15,4805
23,1818	23,2338	20,5974	22,6494	23,4156	24,0000	22,4156	20,1558
27,4935	25,9610	28,2468	28,4026	28,4675	28,8312	24,8442	27,1688
32,6364	31,0130	33,2078	33,6364	33,8442	32,8831	29,3377	31,6753

Además se puede observar en las Figuras 4.31 y 4.32 que la pérdida de masa y volumen por cada tramo de 700 [m] disminuye a medida que avanza el ensayo, esto se debe principalmente a dos fenómenos. En primer lugar la superficie expuesta al desgaste al comienzo del ensayo es menor al área expuesta al finalizar el mismo, producto de la pérdida de material en la probeta. Por lo tanto la carga aplicada se distribuye en una mayor área y las partículas ejercen menor carga sobre la superficie de la muestra y remueven menor cantidad de material. En segundo lugar al aumentar la profundidad de la huella de desgaste por la remoción de material de la matriz, comienzan a sobresalir los carburos presentes, los cuales actúan como barreras que detienen el deslizamiento de las partículas abrasivas. Por estas razones se observa que en la Figura 4.33 la tasa de desgaste presenta una tendencia negativa a medida que avanza el ensayo.

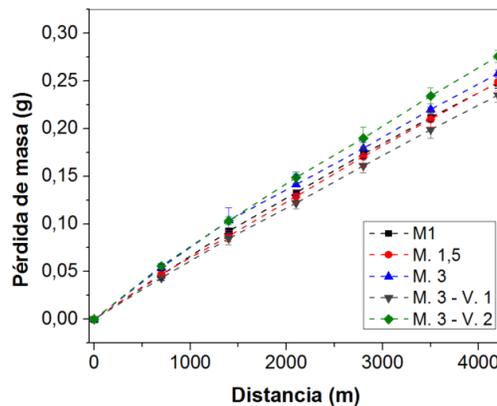


Figura 4.31: Pérdida de masa vs distancia de deslizamiento.

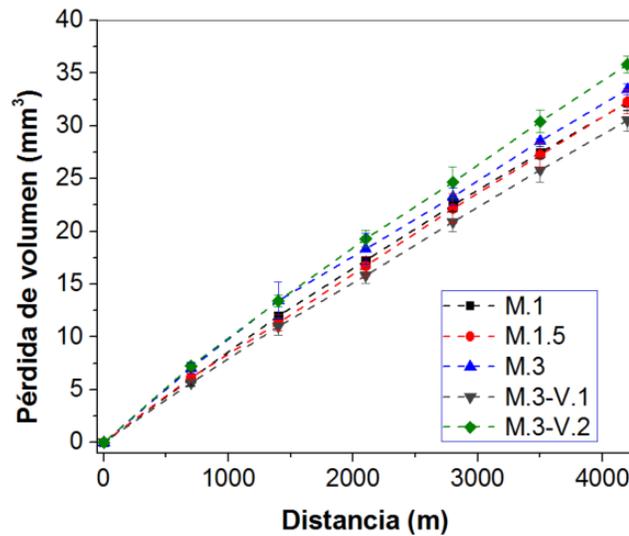


Figura 4.32: Pérdida de volumen vs distancia de deslizamiento.

A continuación en la Figura 4.35 se observa que la evolución de las tasas de desgaste durante el ensayo para las cinco fundiciones es similar, poseen la misma línea base pero con distintas magnitudes debido a sus diferencias en microestructura y propiedades mecánicas.

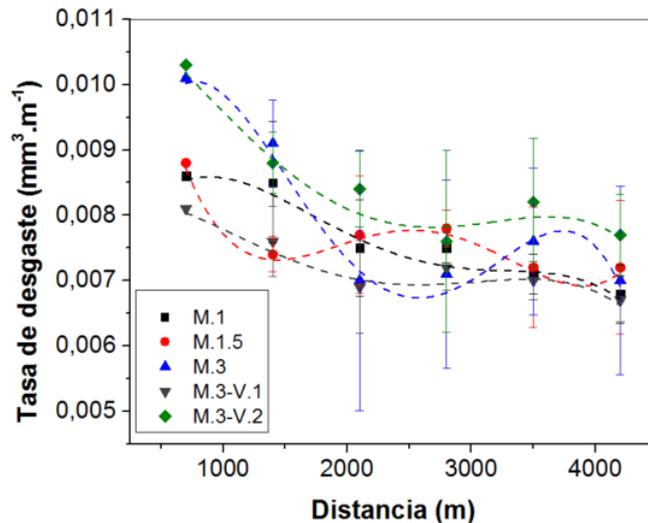


Figura 4.33: Tasa de desgaste vs distancia de deslizamiento.

Posteriormente en el gráfico de la Figura 4.34 se observa la tasa de desgaste y fracción volumétrica de carburos para cada fundición que se obtiene a través del procesamiento de las imágenes de microscopía óptica detallado en la sección de análisis microestructural. Analizando los resultados de las fundiciones M.1, M.1.5 y M.3 se puede destacar que el aumento del porcentaje de Molibdeno produce una disminución del porcentaje volumétrico de carburos y con esto un aumento relativo de la tasa al desgaste de las fundiciones.

Por otra parte en las muestras que contienen Vanadio no se observa una relación directa entre fracción volumétrica de carburos y tasa de desgaste, sin embargo las muestras M.3, M.3-V.1 y M.3-V.2 poseen un porcentaje volumétrico menor a 28 [%], que es el límite que diferencia fundiciones blancas con un buen desempeño frente al desgaste en comparación a las que presentan un mal desempeño [7].

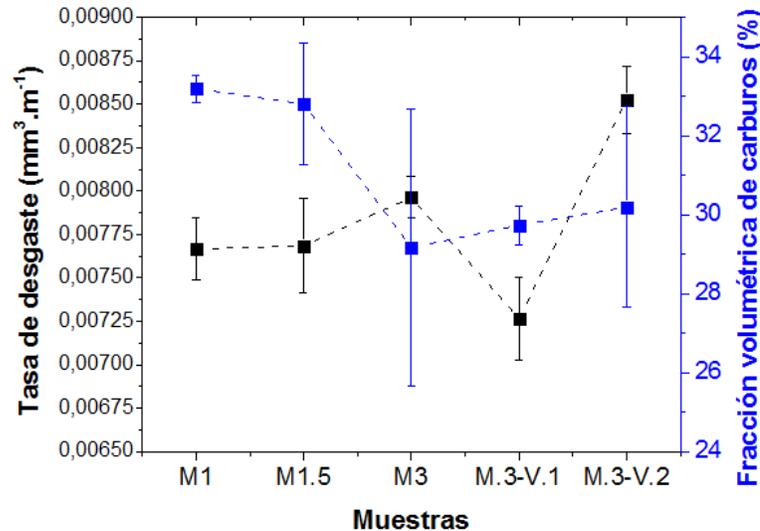


Figura 4.34: Comparación de la tasa de desgaste y la fracción volumétrica de carburos para las cinco fundiciones blancas de estudio.

En la Figura 4.35 se observa la tasa de desgaste y la dureza para cada una de las fundiciones ensayadas. Es posible notar que para las fundiciones M.1, M.1.5 y M.3 no existe una relación marcada dado que los resultados obtenidos para estas fundiciones son muy similares, sin embargo la fundición M.1 posee la mayor dureza y la menor tasa de desgaste. Por otra parte las fundiciones M.3, M.3-V.1 y M.3-V.2 presentan durezas decrecientes con el aumento del porcentaje de Vanadio y la fundición M.3-V.2 presenta la menor dureza y el peor desempeño frente al desgaste abrasivo.

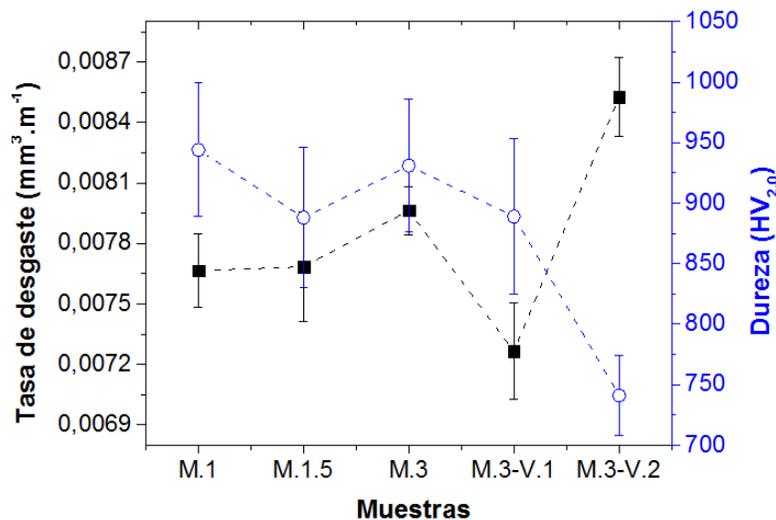


Figura 4.35: Comparación de la tasa de desgaste y la dureza Vickers para las cinco fundiciones blancas de estudio.

4.3.2. Análisis de micromecanismos de desgaste

Para complementar los ensayos de desgaste abrasivo se realizaron análisis de microscopía electrónica de barrido para identificar los mecanismos de desgaste presentes en superficie desgastada. A continuación se observan las imágenes más representativas en las cuales el desgaste se observa en dirección vertical, de arriba hacia abajo indicado con una flecha amarilla (Figuras 4.36 a 4.40). La totalidad de las imágenes se pueden encontrar en el Anexo F.

En la muestra M.1 se observa que la matriz sufre microarado, específicamente en la Fig. 4.36 izquierda se puede observar cómo la partícula abrasiva provocó deformación plástica a lo largo de la matriz y fue frenada por un carburo de mayor tamaño (naranja). Además en la Fig. 4.36 derecha, se puede observar los carburos masivos microfracturados (verde) luego de las pruebas de desgaste.

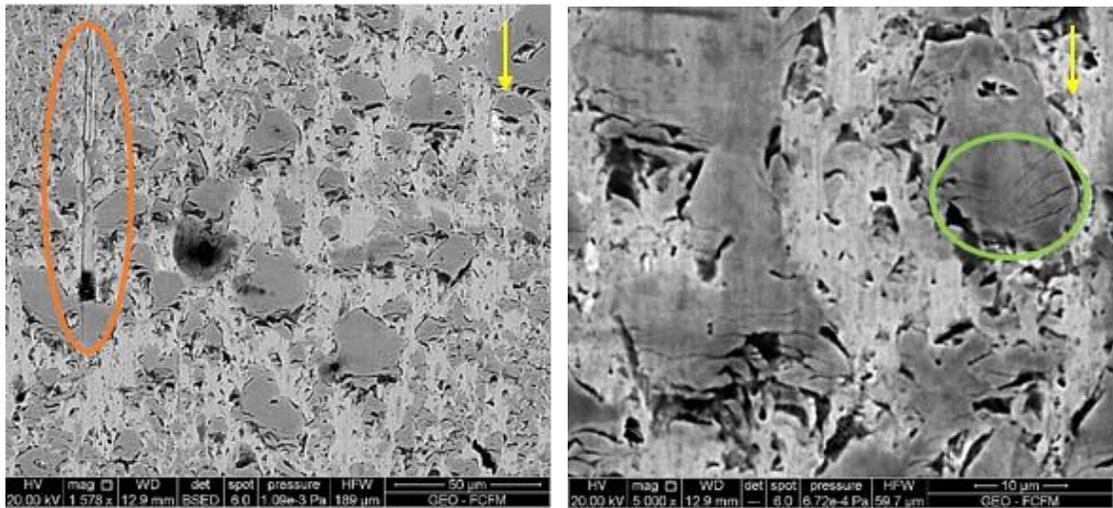


Figura 4.36: Muestra M.1 – izquierda: 50 µm | derecha: 10 µm

En la muestra M.1.5 se observa microarado en la matriz (naranja) y microfractura (verde) en los carburos de mayor tamaño (Figura 4.37) de forma muy similar a la muestra M.1.

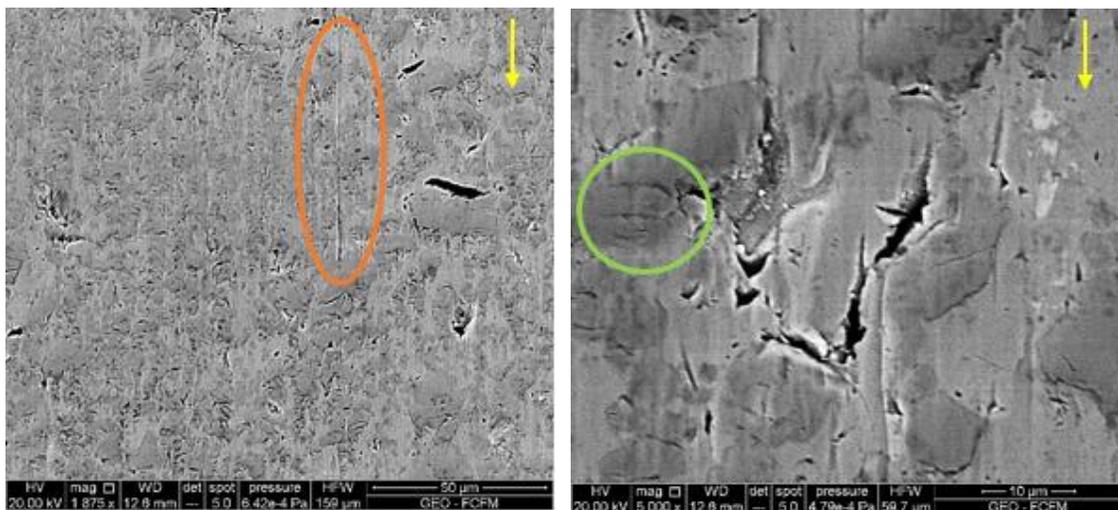


Figura 4.37: Muestra M.1.5 – izquierda: 50 µm | derecha: 10 µm

En la muestra M.3 se observa mecanismos similares a las muestras M.1 y M.1.5, es decir microarado (naranja) y microfractura (verde) de carburos (Figura 4.38). En particular en la Figura 4.38 izquierda observamos remoción de material a través del mecanismo de microcorte (azul).

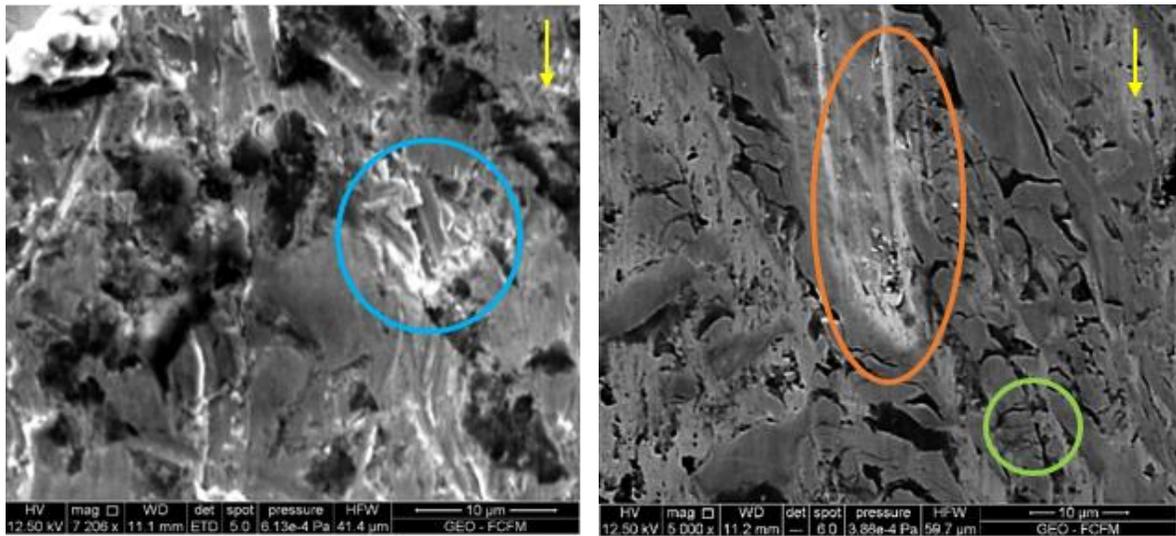


Figura 4.38: Muestra M.3– izquierda: 10 μm | derecha: 10 μm

En la muestra M.3-V.1 se observa deformación plástica producto de microarado de menor intensidad en comparación a las muestras anteriores (Figura 4.39 izquierda). Además en la Figura 4.39 derecha observamos que a diferencia de las muestras anteriores se presenta microfractura de carburos menos masiva.

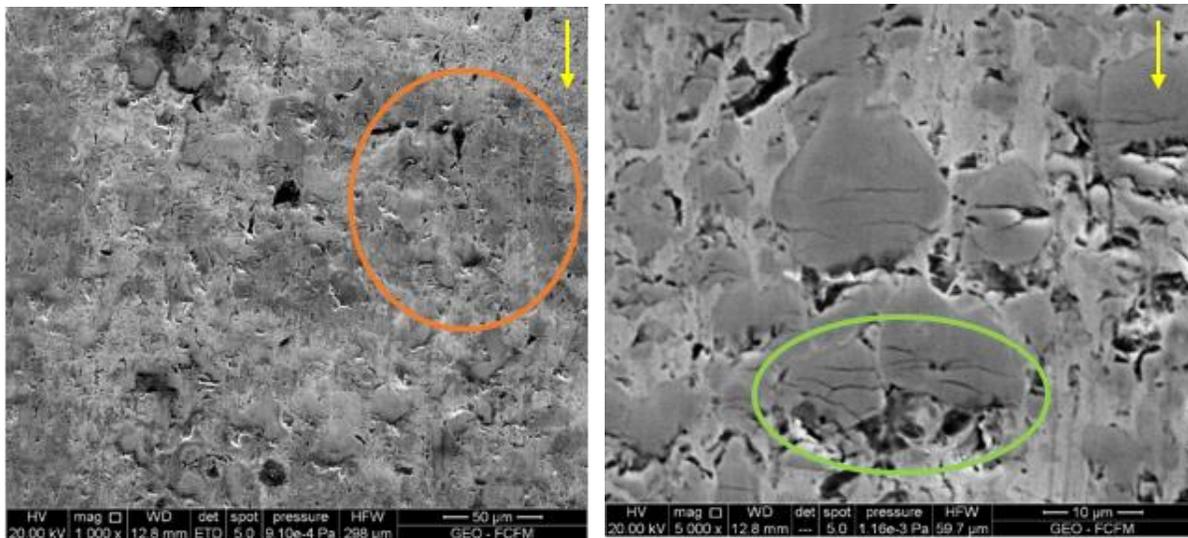


Figura 4.39: Muestra M.3 V.1 – izquierda: 50 μm | derecha: 10 μm

En la muestra M.3-V.2 se observa (Figura 4.40) deformación plástica masiva en la matriz producto de microarado (naranja). Además en la Figura 4.40 izquierda se observa microfractura de gran tamaño con remoción de gran cantidad de material por superación del límite de fluencia.

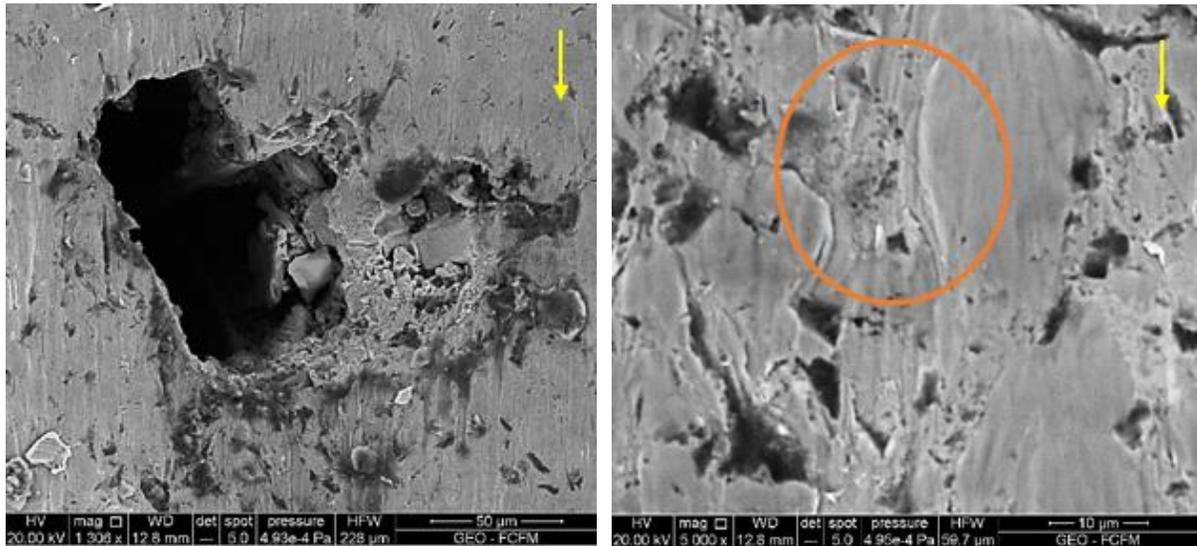


Figura 4.40: Muestra M.3 V.2 – izquierda: 50 μm | derecha: 10 μm

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

En este trabajo de investigación se logró analizar el efecto del contenido de molibdeno y vanadio en la microestructura, propiedades mecánicas y resistencia al desgaste abrasivo de cinco fundiciones blancas de alto cromo (Fe-23Cr-3C).

Las imágenes de microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido y análisis de composición química permitieron estudiar la modificación de la microestructura de las fundiciones analizadas producto de la adición de Mo y V. Esta microestructura se basa principalmente en una matriz martensítica con carburos de cromo aciculares y hexagonales del tipo M_7C_3 . Los estudios de difracción de rayos X permitieron corroborar la presencia de carburos M_7C_3 compuestos por Fe, Mn, Cr, Mo y V. Además se observa una matriz martensítica en la muestra M.3-V.1 y austenítica-martensítica en todas las demás. Al aumentar el porcentaje en peso de Mo presente en la fundición se observó una disminución en el tamaño de los carburos de cromo hexagonales y la disminución de este elemento en solución sólida. Por otra parte al aumentar el porcentaje en peso de V se observó un refinamiento en los carburos de cromo y un aumento en la fracción volumétrica de carburos pequeños.

A partir del estudio del tamaño y la fracción volumétrica de carburos realizado a través de procesamiento de imágenes de microscopía óptica, se logró observar una disminución de esta fracción a medida que se aumenta el porcentaje en peso de Mo, además se observó que el adicionamiento de V provoca un aumento en el porcentaje de carburos pequeños sin afectar la fracción volumétrica total de carburos.

Los ensayos de dureza, impacto Charpy y los análisis de composición puntuales realizados permitieron estudiar la relación entre el tipo y fracción volumétrica de carburos de las fundiciones con sus propiedades mecánicas. Se observó que la disminución en el tamaño de los carburos y formación de una nueva fase eutéctica producto del adicionamiento de Mo no tiene un efecto notorio en la dureza de las fundiciones, pero produce una disminución en la tenacidad. Por otra parte se observó que el refinamiento de carburos producto del adicionamiento de Vanadio tiende a reducir la dureza de las fundiciones, a pesar de no afectar directamente a la fracción volumétrica, además produce un leve aumento en la tenacidad de estas producto de la disminución de la fracción volumétrica de carburos grandes.

A partir de los ensayos de desgaste abrasivo realizados se observó que los principales mecanismos de desgaste son microarado en la matriz y microfractura en los carburos, los cuales son comunes a las cinco fundiciones y su efecto sobre las muestras depende de su microestructura y propiedades mecánicas. Además se observó que a medida que se aumenta el porcentaje en peso de Mo disminuye la fracción volumétrica de carburos dando paso a una mayor tasa de desgaste. Por otra parte se evidenció que la relación entre el porcentaje en peso de V y el desempeño frente al desgaste abrasivo de las fundiciones no es directa.

Por último la muestra M.3-V.1 (Fe-3%Mo-1%V) posee una mayor cantidad de carburos pequeños, lo cual sumado a su matriz martensítica se refleja en un mejor desempeño frente al desgaste, en comparación a la muestra M.3-V.2 (Fe-3%Mo-2%V) que presentó una tasa de desgaste mayor, lo cual se atribuye a su baja dureza debido a su matriz austenítica y a la menor presencia de grupos de carburos pequeños. Esta diferencia en tasa de desgaste llega al 17.35%.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda para investigaciones posteriores:

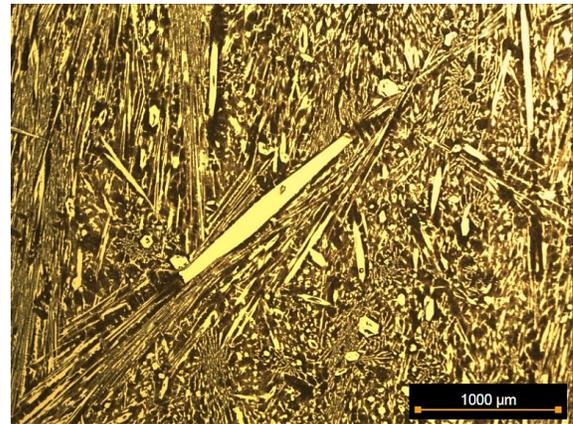
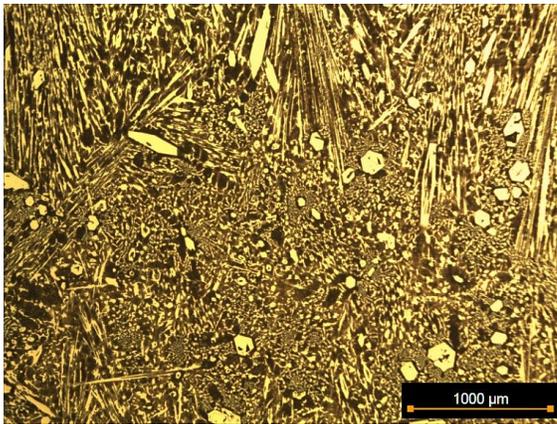
- En primer lugar considerando que entre la muestra M.3 y la muestra M.3 V.1 se mejoró el desempeño frente al desgaste en un 9,6% y que este adicionamiento de V tiene un costo asociado, resultaría interesante analizar si el aumento porcentual de costo resulta ser menor que este aumento de desempeño, lo cual validaría la opción de agregar este elemento a la fundición. Este nuevo análisis toma relevancia dado que las fundiciones blancas son preferidas en la industria incluso por sobre las fundiciones de cromo-níquel las cuales tienen mejor desempeño, pero su método de aplicación resulta más complicado.
- En segundo lugar resultaría interesante estudiar diferentes tratamientos térmicos para fundiciones de composición similar a las estudiadas en esta investigación. Esto porque con condiciones diferentes de calentamiento y enfriamiento, por ejemplo, se podría lograr mejorar las condiciones de la matriz haciéndola más dura, y generar mayor cantidad y nuevos tipos de carburos que mejoren el desempeño frente al desgaste.

5.3. Bibliografia

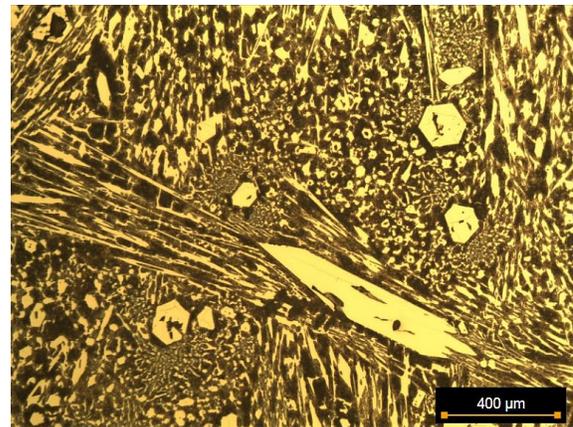
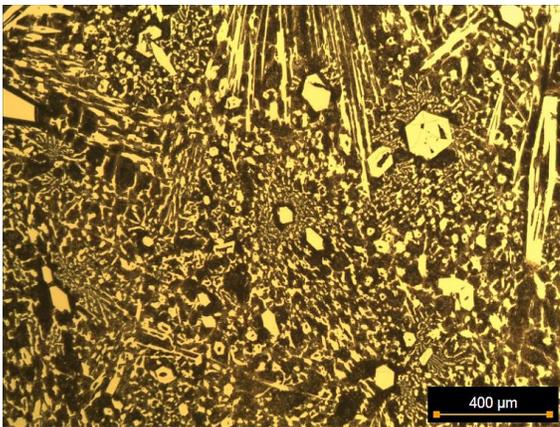
- [1] P. Kivikytö-Reponen, S. Ala-Kleme, J. Hellman, J. Liimatainen, and S.-P. Hannula, “The correlation of material characteristics and wear in a laboratory scale cone crusher,” *Wear*, vol. 267, no. 1, pp. 568–575, 2009.
- [2] S. Ala-Kleme, P. Kivikytö-Reponen, J. Liimatainen, J. Hellman, and S.-P. Hannula, “Abrasive wear properties of tool steel matrix composites in rubber wheel abrasion test and laboratory cone crusher experiments,” *Wear*, vol. 263, no. 1, pp. 180–187, 2007.
- [3] M. Filipovic, Z. Kamberovic, M. Korac, and M. Gavrilovski, “Correlation of microstructure with the wear resistance and fracture toughness of white cast iron alloys,” *Met. Mater. Int.*, vol. 19, no. 3, pp. 473–481, 2013.
- [4] C. Scandian, C. Boher, J. D. B. De Mello, and F. Rézal-Aria, “Effect of molybdenum and chromium contents in sliding wear of high-chromium white cast iron: the relationship between microstructure and wear,” *Wear*, vol. 267, no. 1–4, pp. 401–408, 2009.
- [5] Radzikowska, "ASM Handbook, Volume 9: Metallography and Microstructures. Vol. 9". George F. Vander Voort, 2004, pp. 565-587.
- [6] ASTM International, “ASTM A532/A532M – 10 (Reapproved 2014) Standard Specification for Abrasion-Resistant Cast Irons,” *ASTM Copyr.*, vol. 10, no. Reapproved 2014, pp. 1–4, 2014.
- [7] B. Lu, J. Luo, and S. Chiovelli, “Corrosion and Wear Resistance of Chrome White Irons — A Correlation to Their Composition and Microstructure,” *October*, vol. 37, no. October, 2006.
- [8] ASTM International, “G65-16: Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand / Rubber Wheel,” *ASTM Stand.*, vol. 4, no. Reapproved 2010, pp. 1–12, 2013.
- [9] M. Mohammadnezhad, V. Javaheri, M. Shamanian, M. Naseri, and M. Bahrami, “Effects of vanadium addition on microstructure, mechanical properties and wear resistance of Ni-Hard4 white cast iron,” *Mater. Des.*, vol. 49, pp. 888–893, 2013.
- [10] K. Holmberg, P. Kivikytö-Reponen, P. Härkisaari, K. Valtonen, and A. Erdemir, “Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry,” *Tribology International*, vol. 115, pp. 116–139, 2017.
- [11] Vander Voort. and George F., "ASM Handbook, Volume 9: Metallography and Microstructures" ASM International. 2004, pp. 565-587.
- [12] R. F. Arnoldy, “A Guide to the Evaluation & Selection of Hardfaced Plate” *Trite Alloy Products Group*. 1993, pp. 1-8.
- [13] L. Mampuru, "Grain refinement of 25 wt% high-chromium white cast iron by addition of vanadium", *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 116, no. 10, pp. 969-972, 2016.
- [14] G. Stachowiak, “Engineering Tribology”. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2016, pp. 483-508.
- [15] ASTM G40-15 Standard Terminology Relating to Wear and Erosion, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

- [16] E. Minero, "Combatiendo el Desgaste del Chancador", Equipo-minero.com, 2017. [Online]. Disponible: <http://www.equipo-minero.com/contenidos/1154-combatiendo-el-desgaste-del-chancador>. [Revisado: 28-Jul-2017].
- [17] E. Minero, "Soluciones - trimestre 1-2017", Equipo-minero.com, 2017. [Online]. Disponible: <http://www.equipo-minero.com/secciones/soluciones/2215-soluciones-cuarto-1-2017.html#.Wdrm-VtSzX4>. [Revisado: 31- Oct- 2017].
- [18] Minería Chilena. (2012). "Claves para un buen proceso". [Figura 1]. Recuperado de: <http://www.mch.cl/reportajes/claves-para-un-buen-proceso/>.
- [19] Industrial and Mining Solution. (2016). "Bombas para pulpa". [Figura 2]. Recuperado de: http://imssac.com/productos_bombas_para_pulpa.html.
- [20] ASTM International, "E23-12: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials," ASTM Stand., vol. 12, no. Reapproved 2012, pp. 1-25, 2012.
- [21] ASTM International, "E384-11: Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials," ASTM Stand., vol. 11, no. Reapproved 2011, pp. 1-43, 2012.
- [22] ASTM International, "E18-15: Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials" ASTM Stand., vol. 1, no. Reapproved 2015, pp. 1-38, 2014.
- [23] R. I. Azaad Calderón, "Recubrimiento de un substrato de acero con ferro-aleaciones mediante ESD" Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, Universidad de Chile, 2011.
- [24] F. A. Soto Meza, "Fabricación de un material compuesto mediante síntesis por combustión asistida por metalotermia" Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, Universidad de Chile, 2010.
- [25] J. Marín Perez, "Evaluación de las soluciones en recubrimientos resistentes al desgaste por abrasión en Chile" Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, Universidad de Chile, 2016.

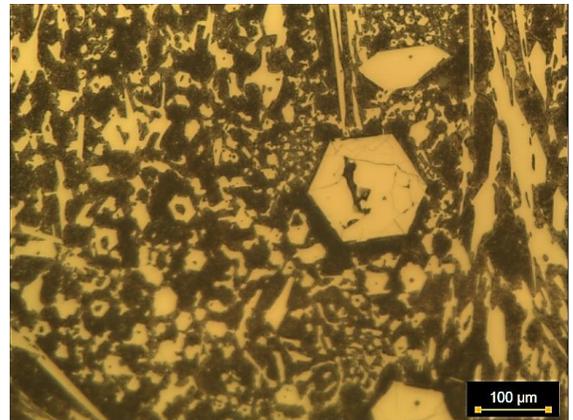
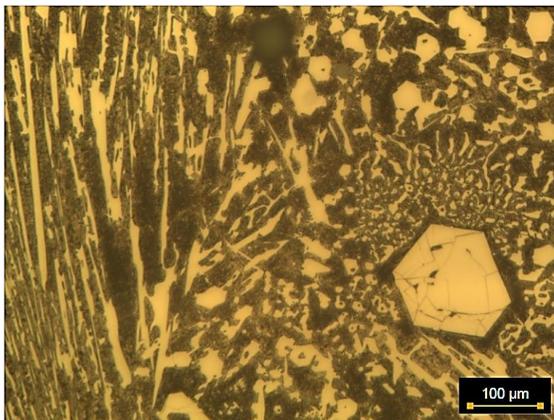
Anexo A. Imágenes Microscopía Óptica



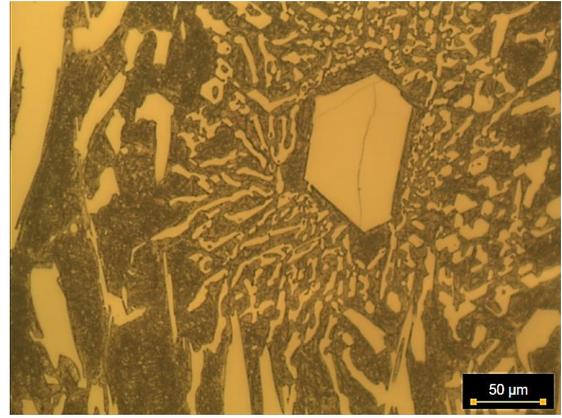
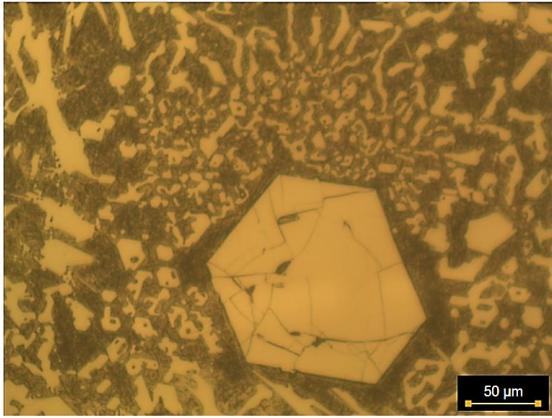
Fotografías M.1 – 10x.



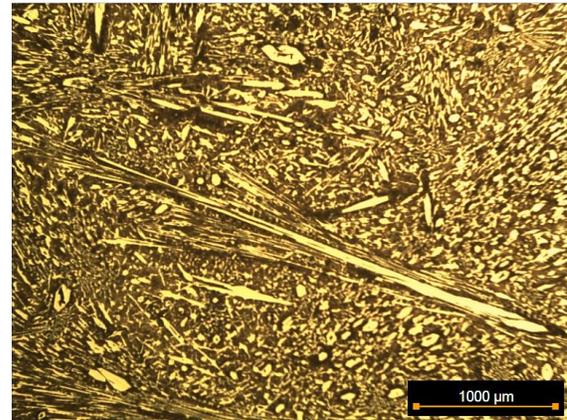
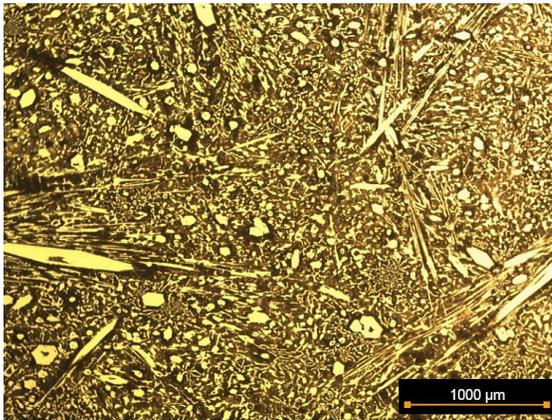
Fotografías M.1 – 20x.



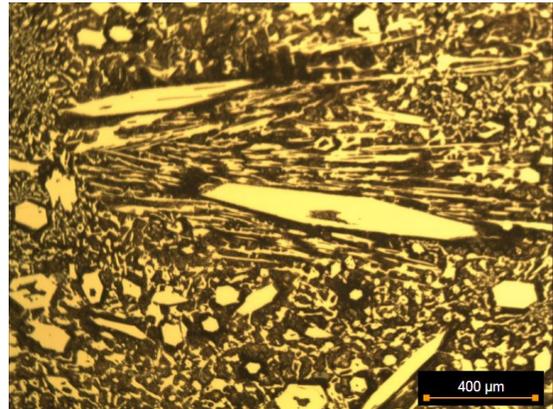
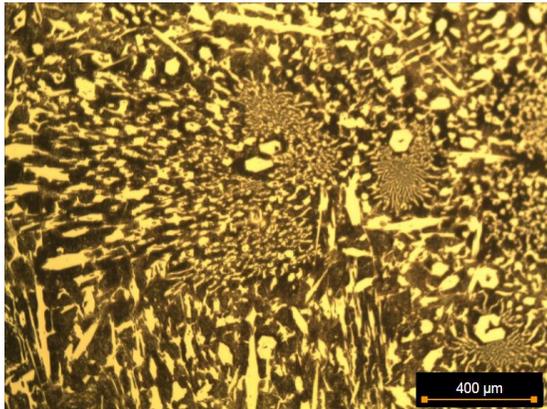
Fotografías M.1 – 50x.



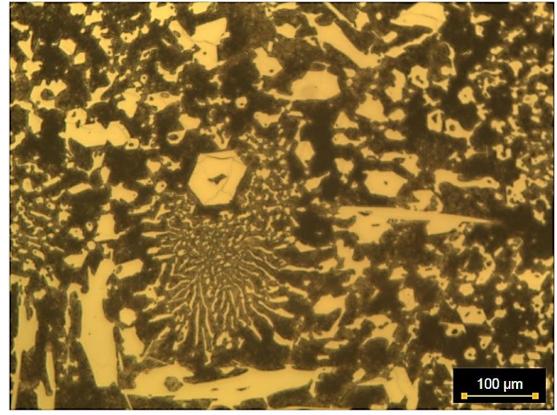
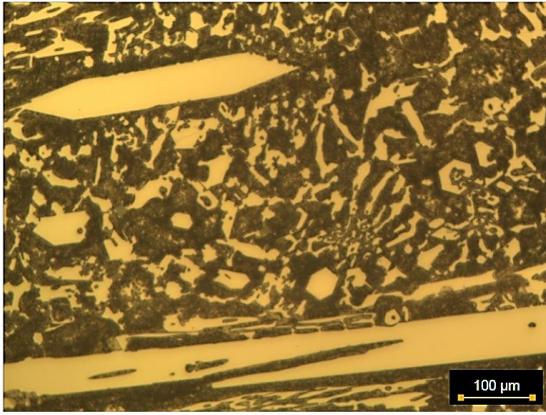
Fotografías M.1 – 100x.



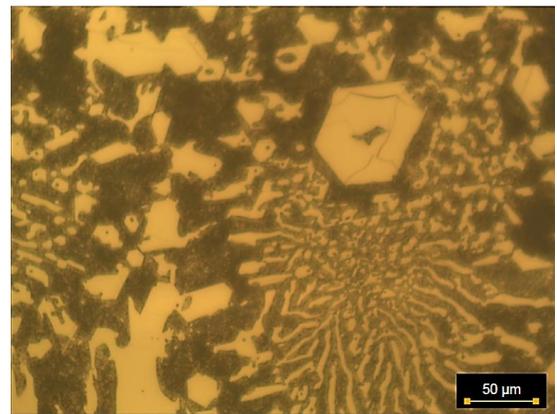
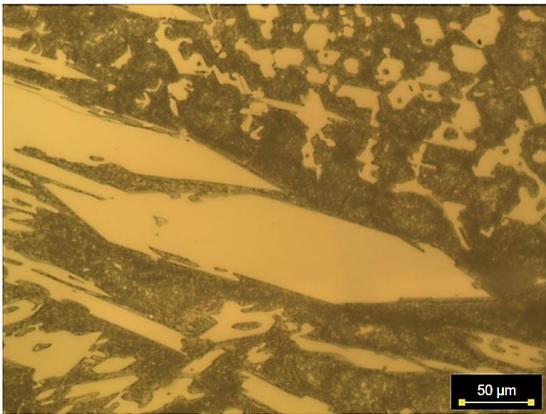
Fotografías M.1.5 – 10x.



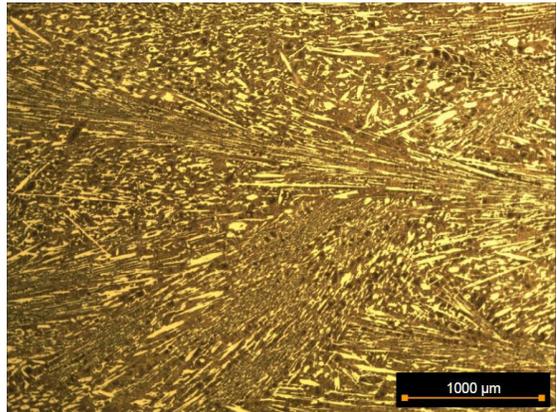
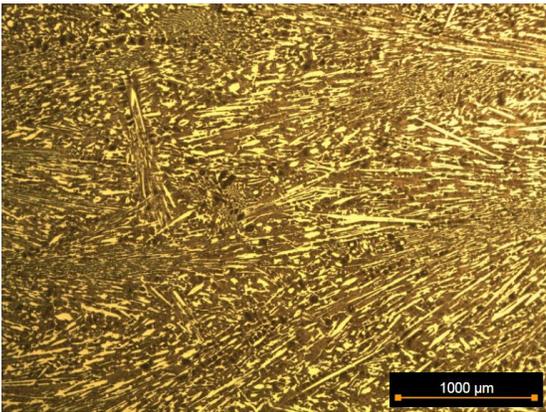
Fotografías M.1.5 – 20x.



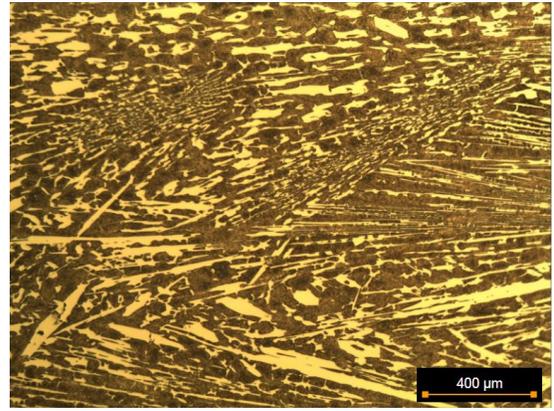
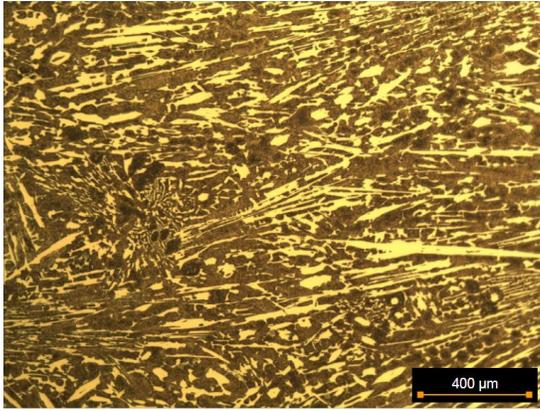
Fotografías M.1.5 – 50x.



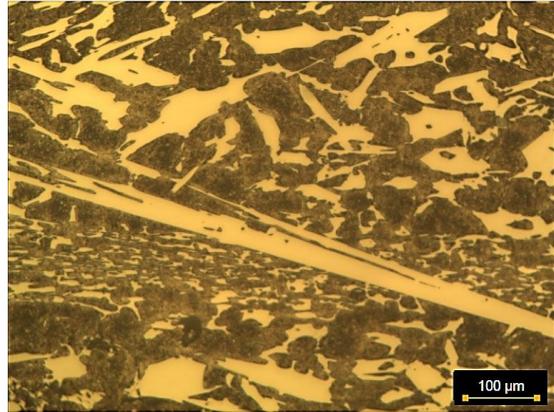
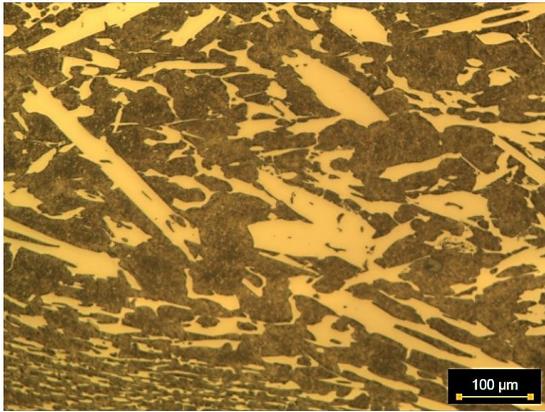
Fotografías M.1.5 – 100x.



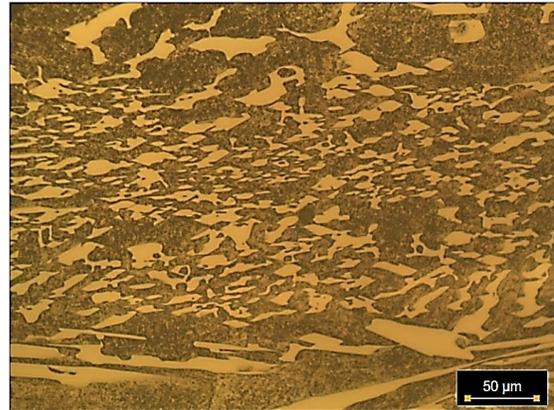
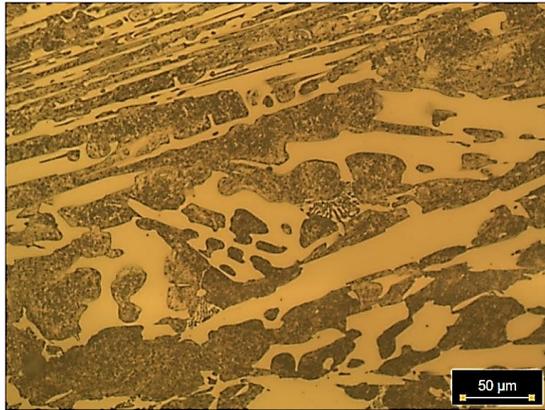
Fotografías M.3 – 10x.



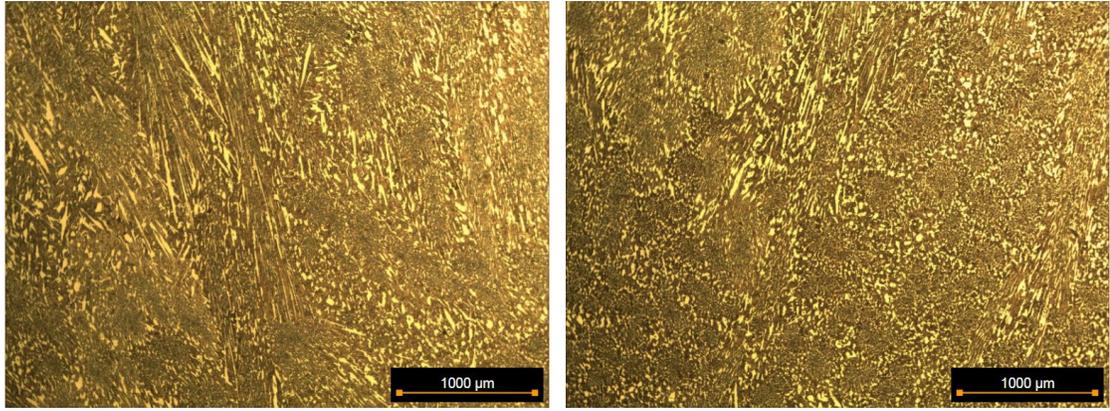
Fotografías M.3 – 20x.



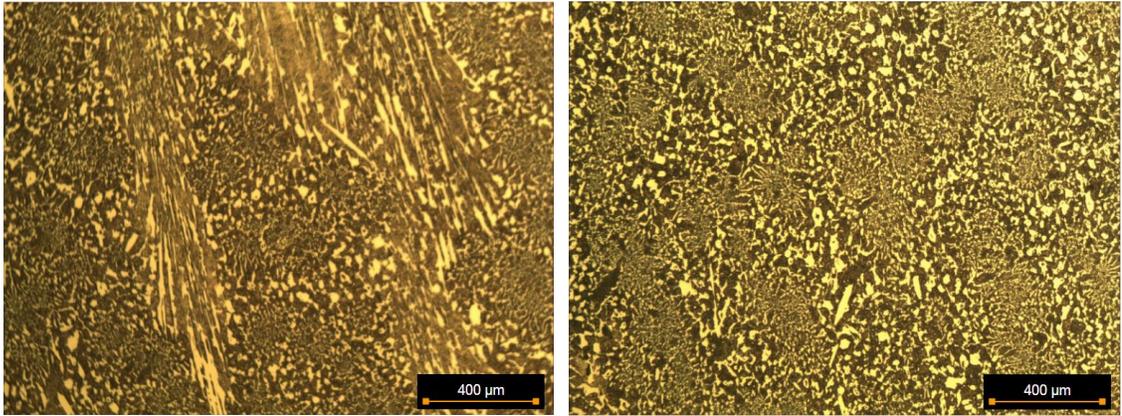
Fotografías M.3 – 50x.



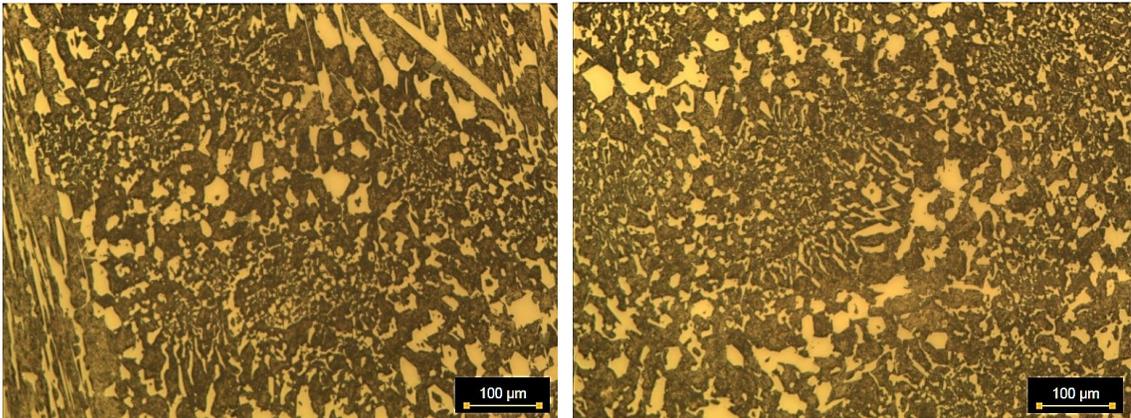
Fotografías M.3 – 100x.



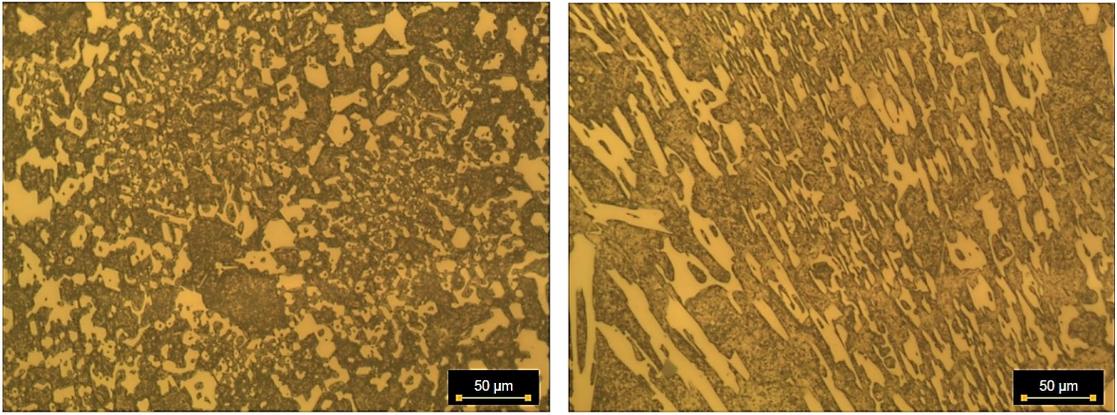
Fotografías M.3 V.1 – 10x.



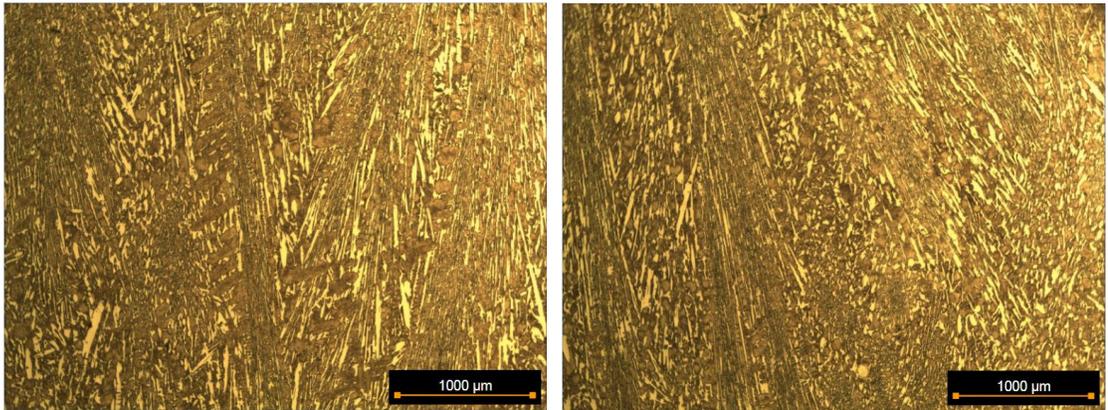
Fotografías M.3 V.1 – 20x.



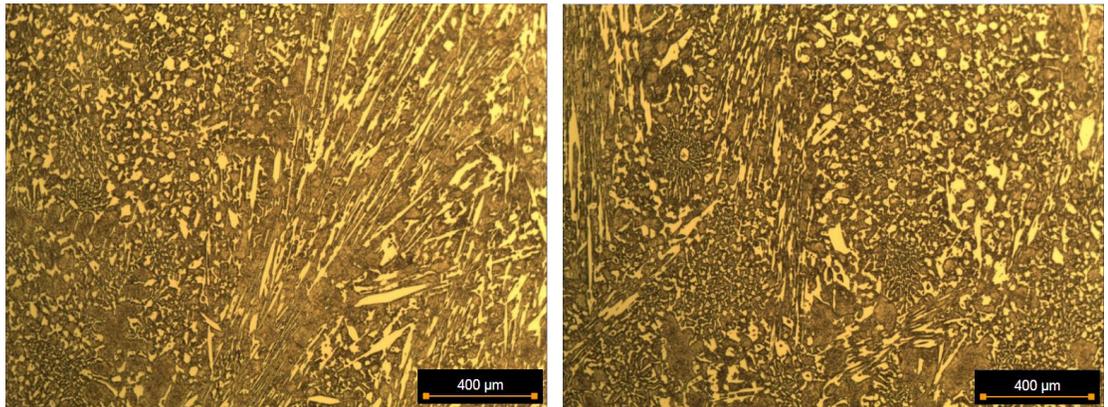
Fotografías M.3 V.1 – 50x.



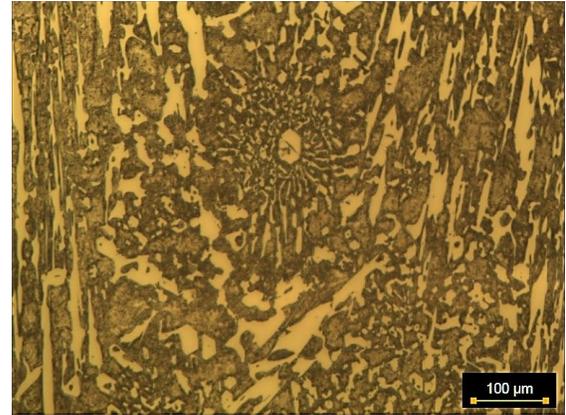
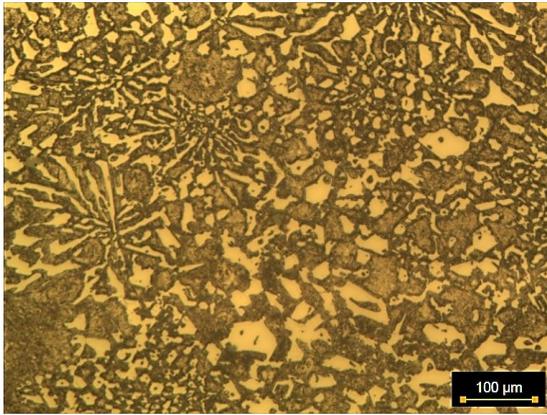
Fotografías M.3 V.1 – 100x.



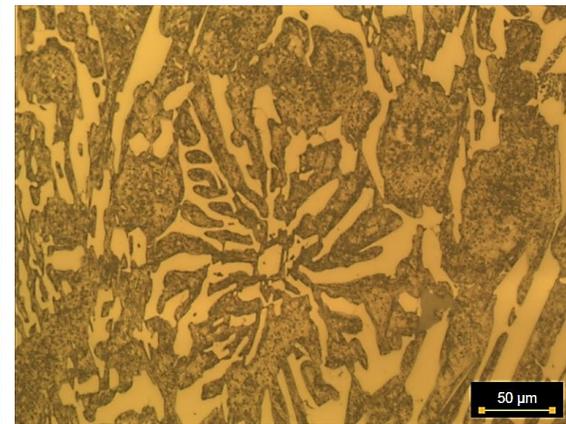
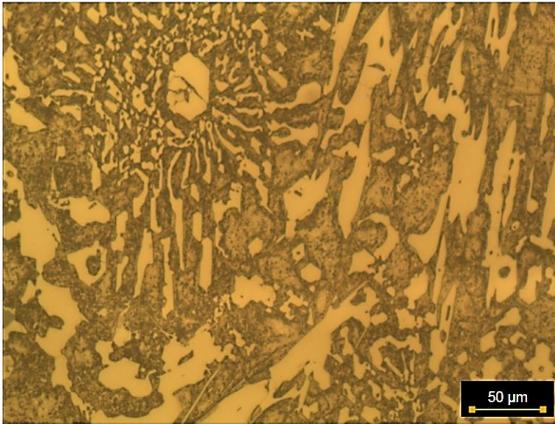
Fotografías M.3 V.2 – 10x.



Fotografías M.3 V.2 – 20x.

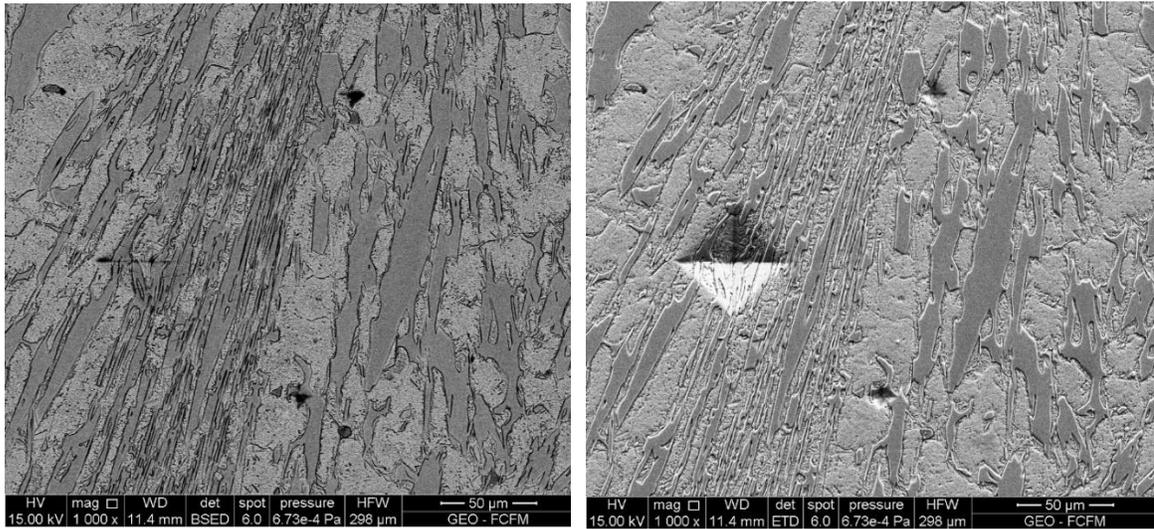


Fotografías M.3 V.2 – 50x.

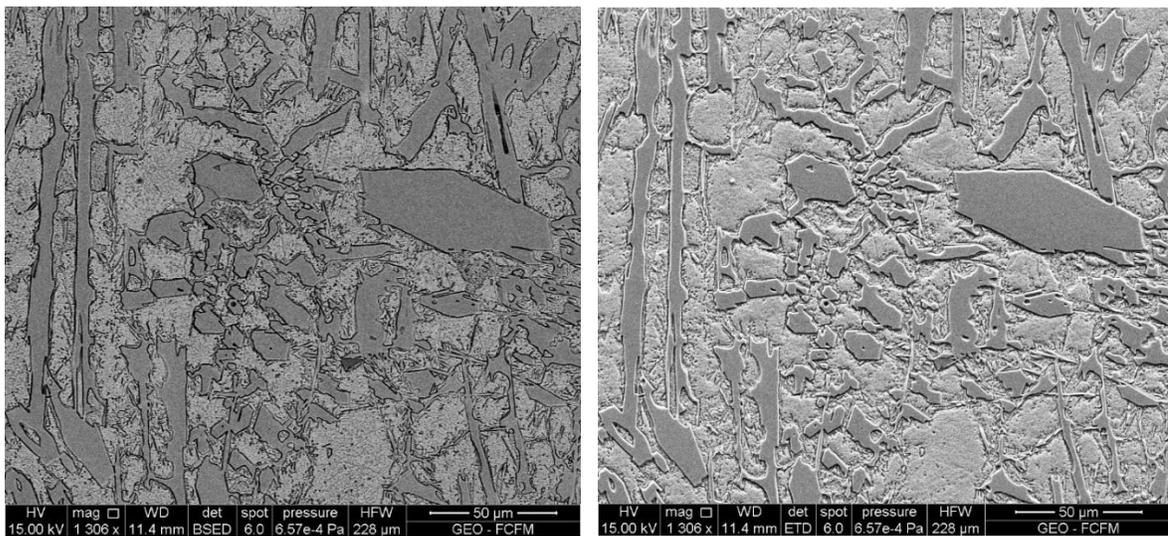


Fotografías M.3 V.2 – 100x.

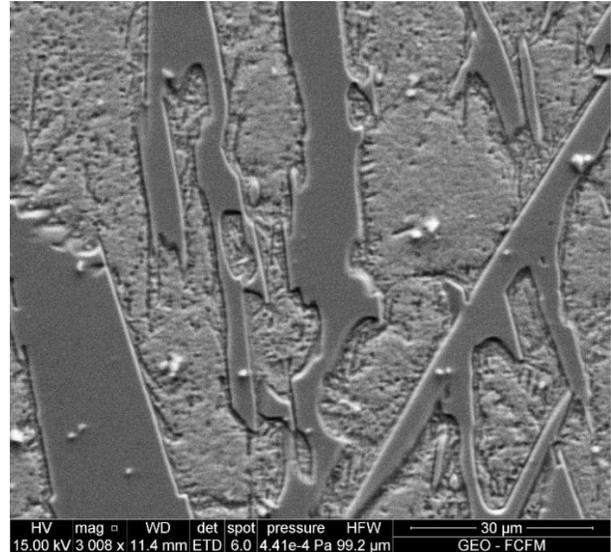
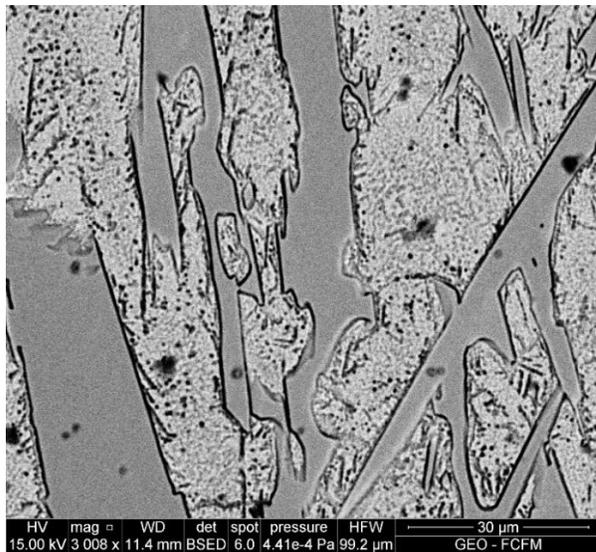
Anexo B. Microscopía Electrónica de Barrido



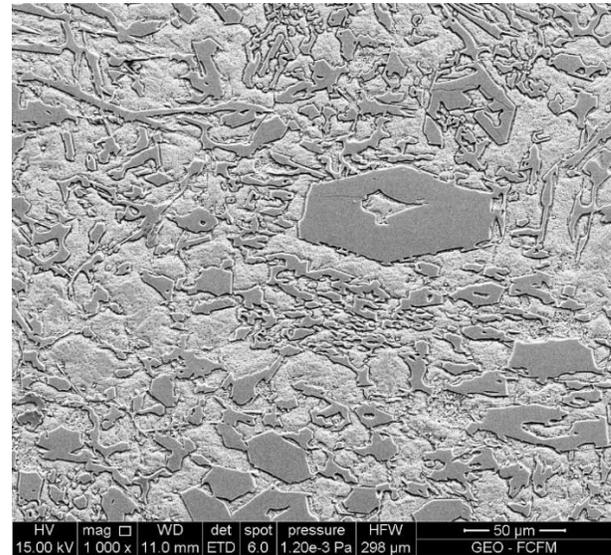
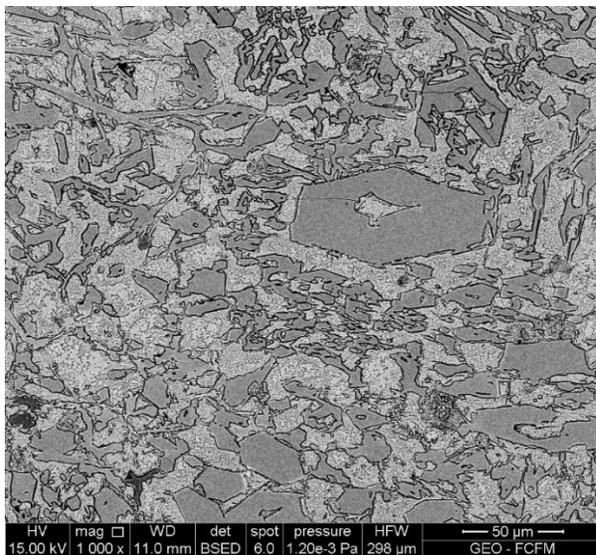
Fotografía SEM – M.1 – 1000x (izquierda: BSE / derecha: SE)



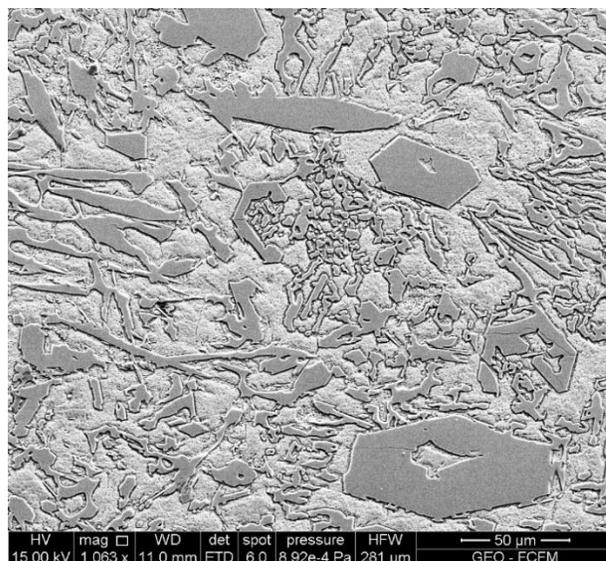
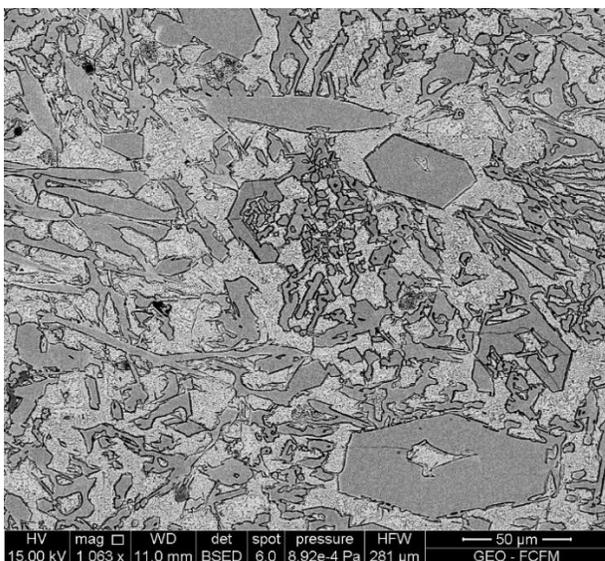
Fotografía SEM – M.1 – 1300x (izquierda: BSE / derecha: SE)



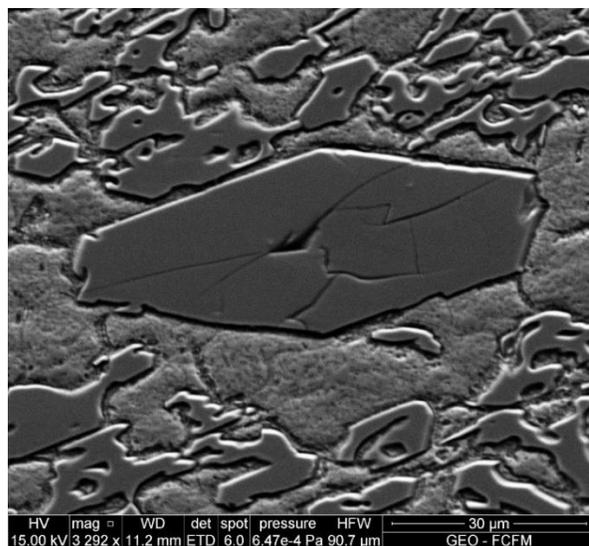
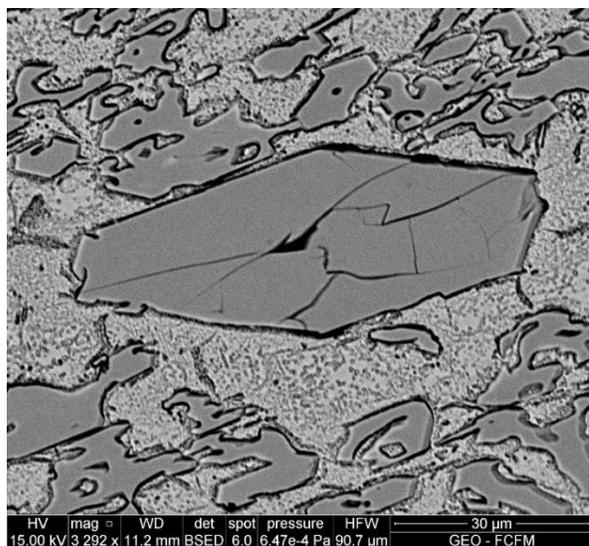
Fotografía SEM – M.1– 3000x (izquierda: BSE / derecha: SE)



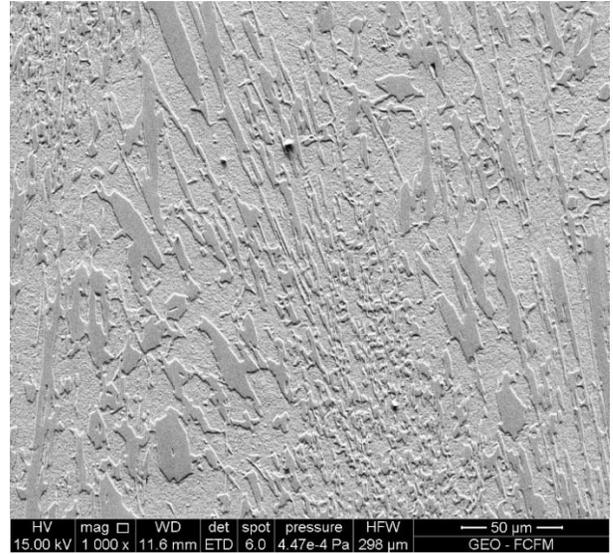
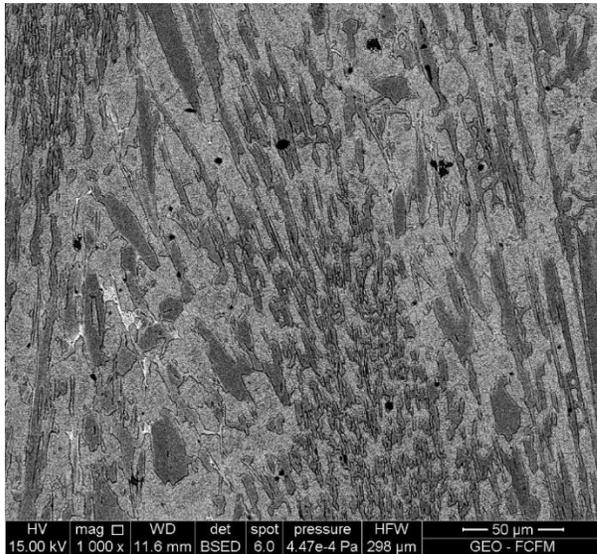
Fotografía SEM – M.1.5 – 1000x (izquierda: BSE / derecha: SE)



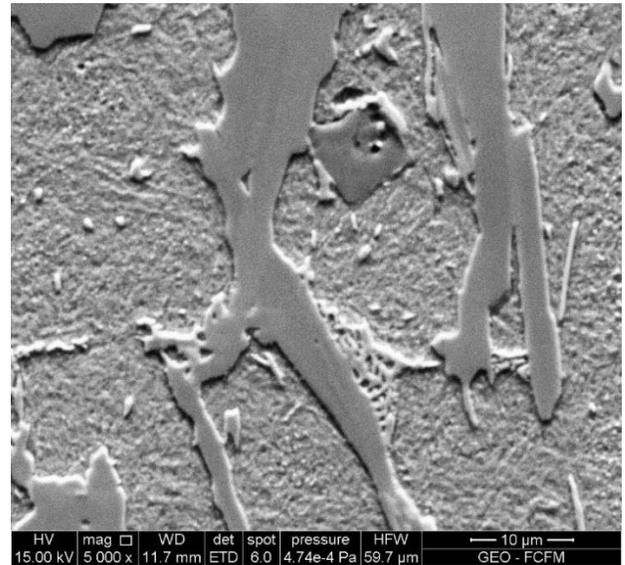
Fotografía SEM – M.1.5 – 1063x (izquierda: BSE / derecha: SE)



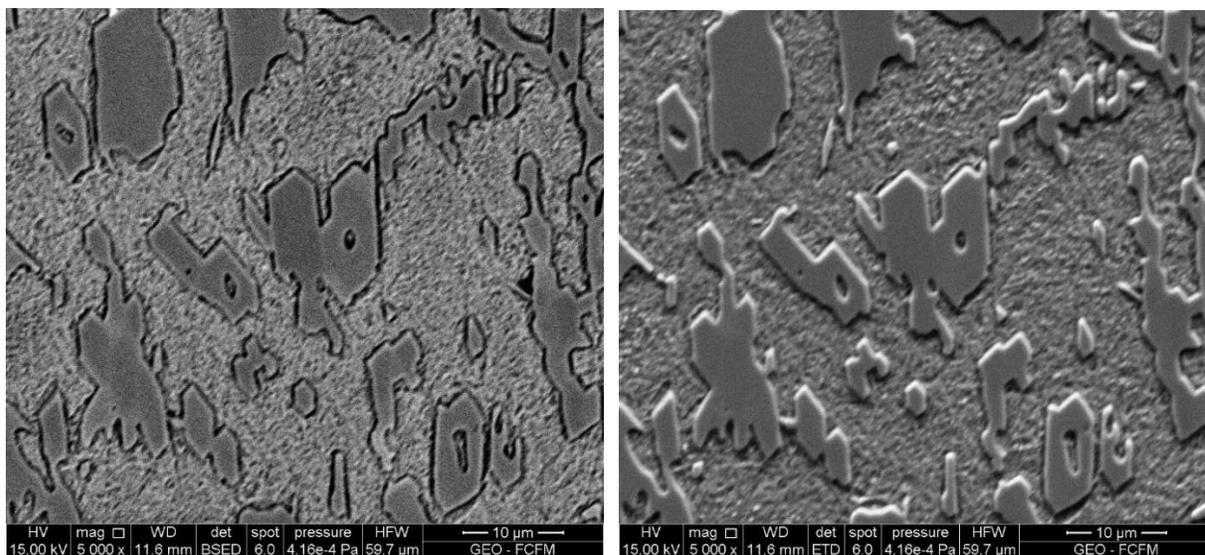
Fotografía SEM – M.1.5 – 3292x (izquierda: BSE / derecha: SE)



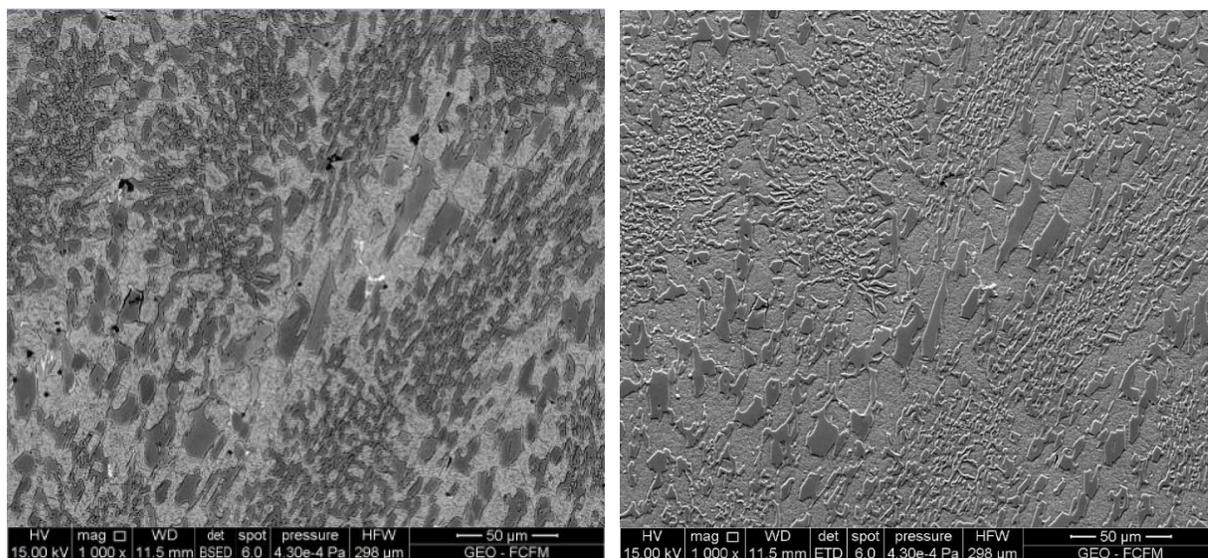
Fotografía SEM – M.3 – 1000x (izquierda: BSE / derecha: SE)



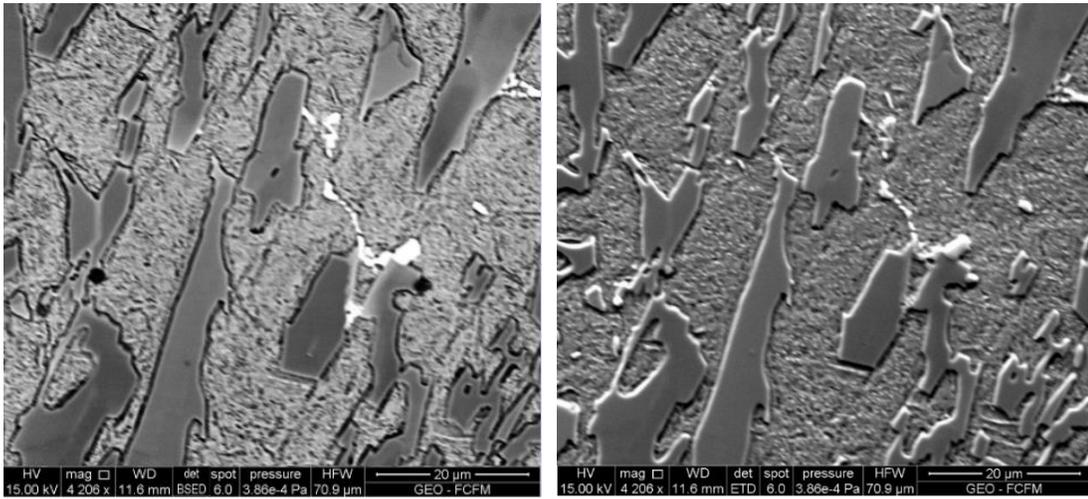
Fotografía SEM – M.3 – 5000x (izquierda: BSE / derecha: SE)



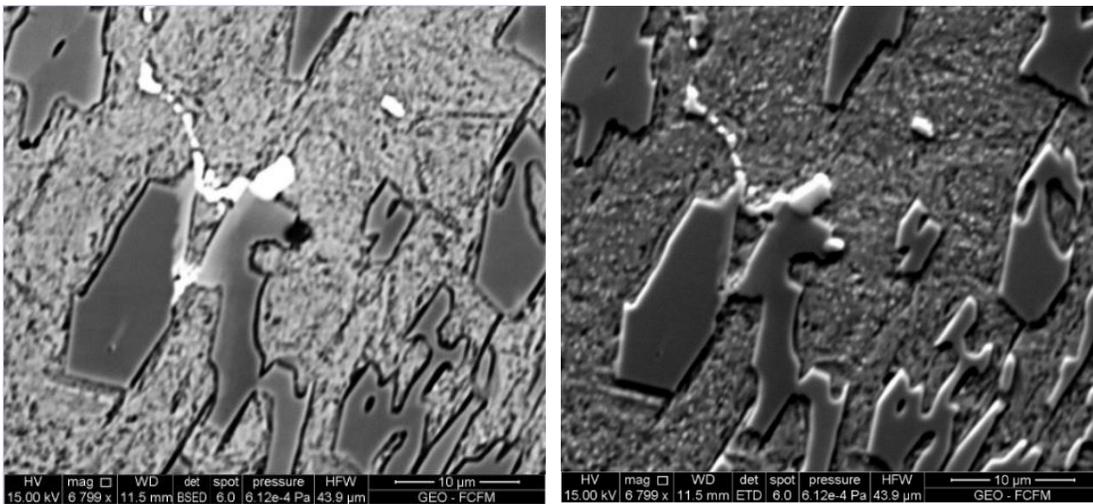
Fotografía SEM – M.3 – 5000x (izquierda: BSE / derecha: SE)



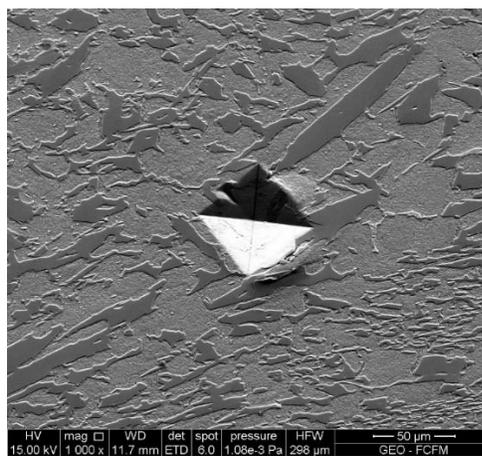
Fotografía SEM - M.3 V.1 – 1000x (izquierda: BSE / derecha: SE)



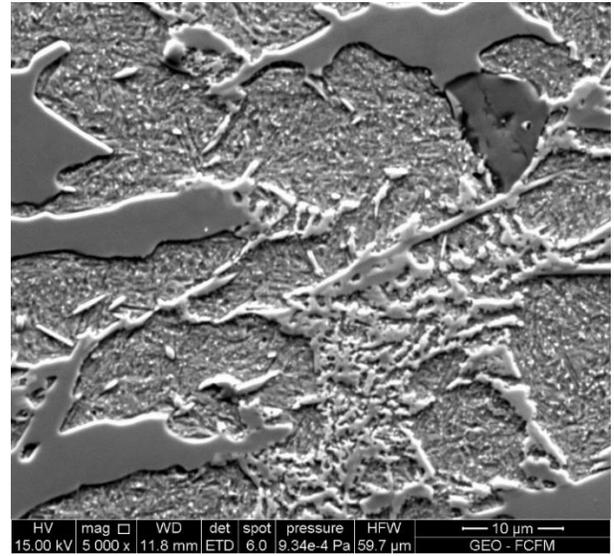
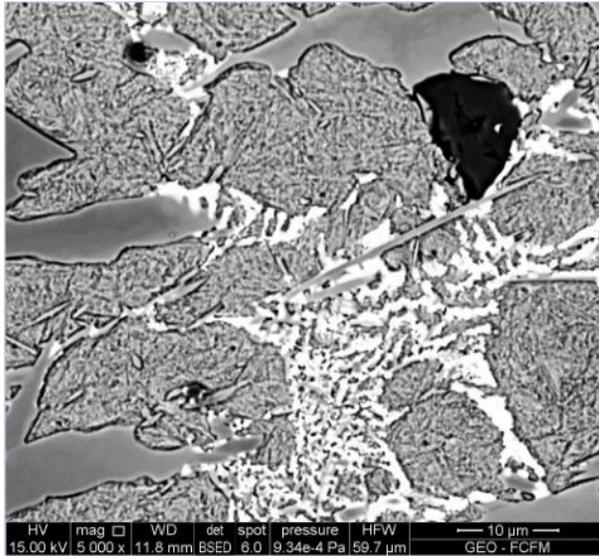
Fotografía SEM – M.3 V.1 – 4200x (izquierda: BSE / derecha: SE)



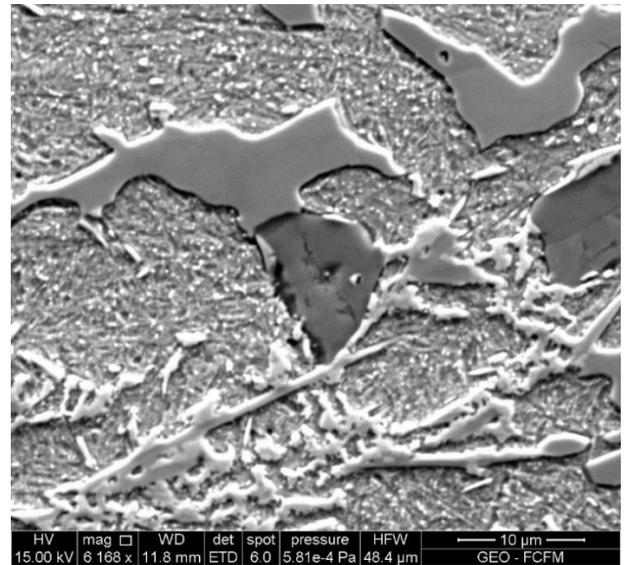
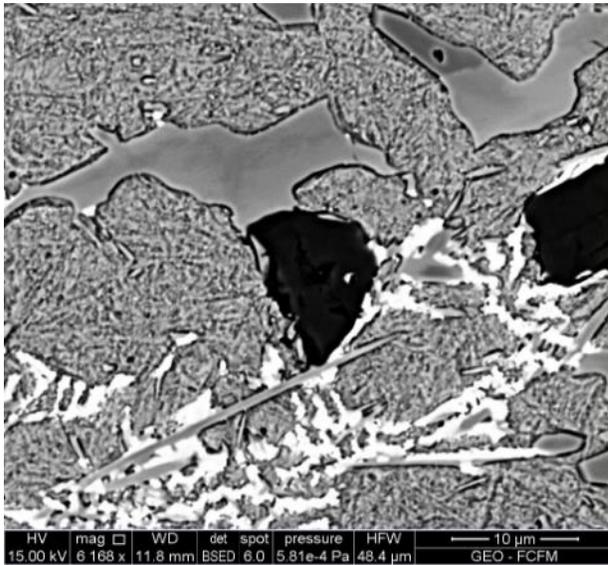
Fotografía SEM – M.3 V.1 – 6800x (izquierda: BSE / derecha: SE)



Fotografía SEM – M.3 V.2 – 1000x (SE)

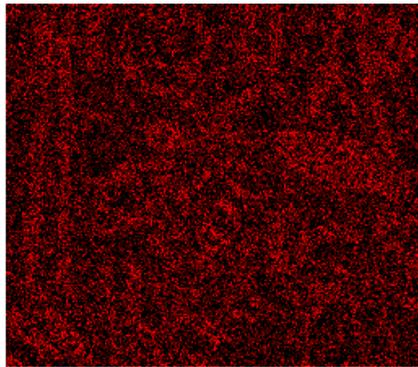
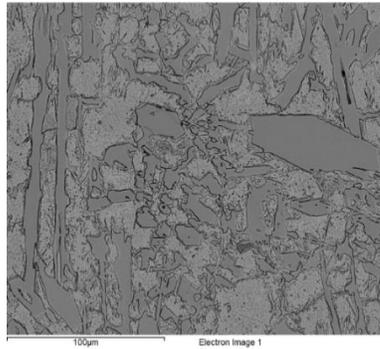


Fotografía SEM – M.3 V.2 – 5000x (izquierda: BSE / derecha: SE)

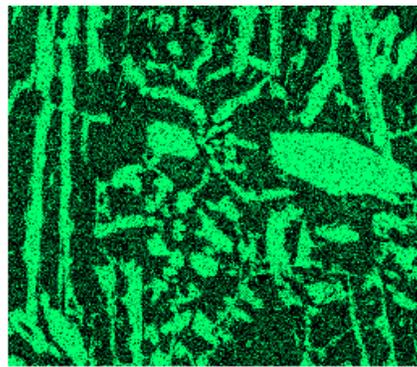


Fotografía SEM - M.3 V.2 – 6168x (izquierda: BSE / derecha: SE)

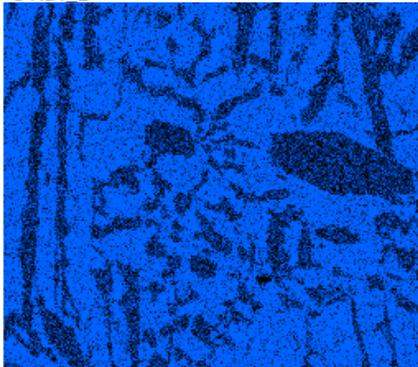
Anexo C. Mapas de composición elemental (EDS)



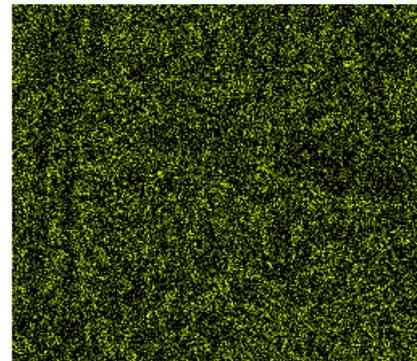
C Ka1 2



Cr Ka1



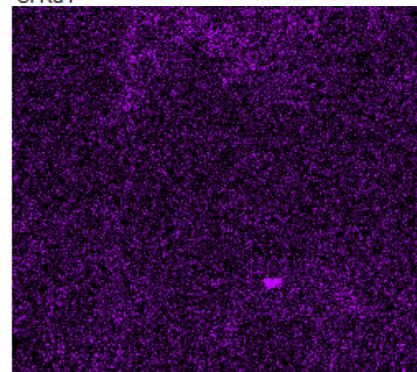
Fe Ka1



Si Ka1

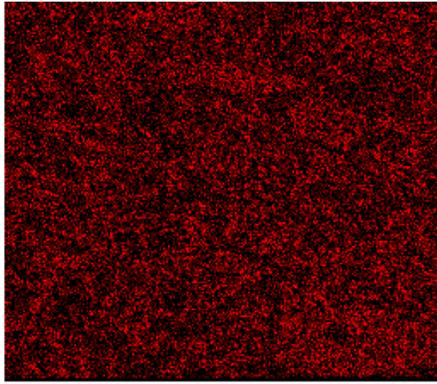
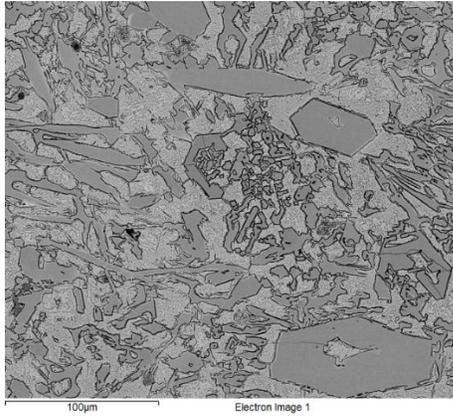


Mn Ka1

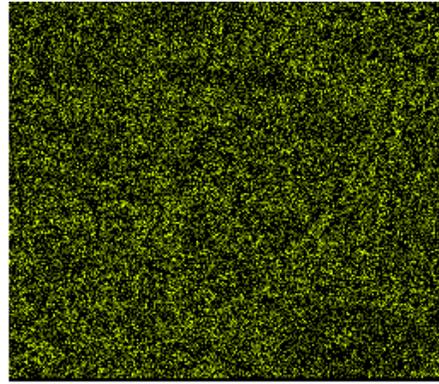


Mo La1

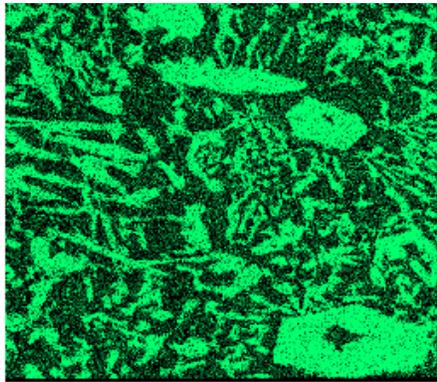
Mapa elemental 1 (EDS) – M.1



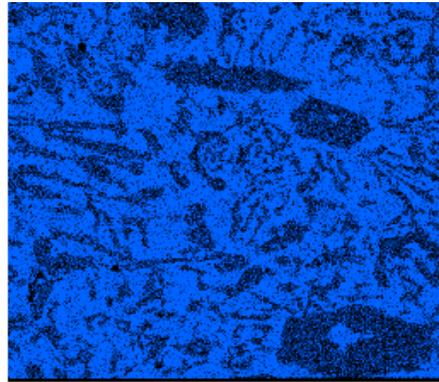
C Ka1 2



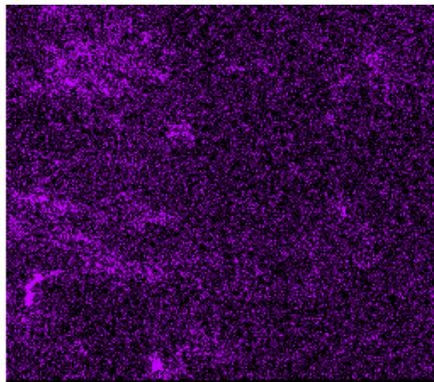
Si Ka1



Cr Ka1

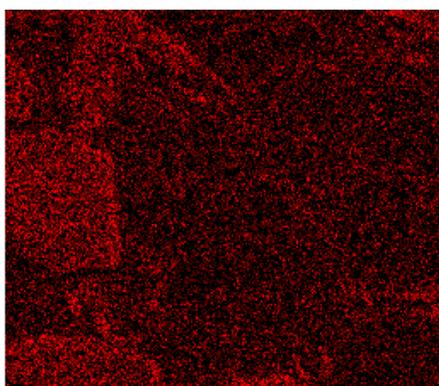
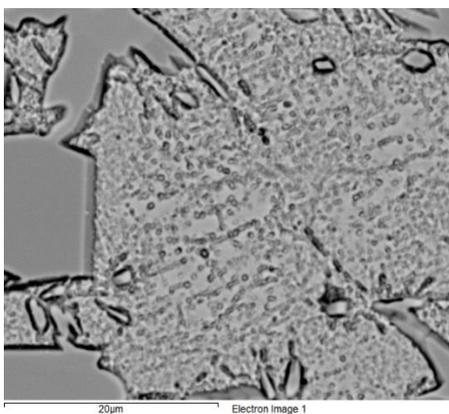


Fe Ka1

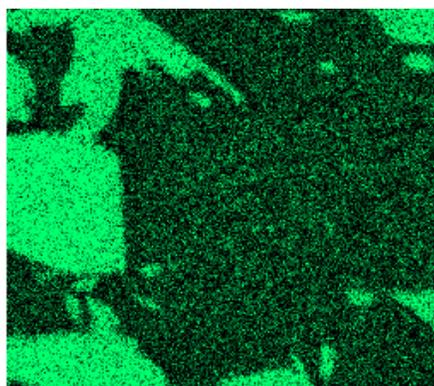


Mo La1

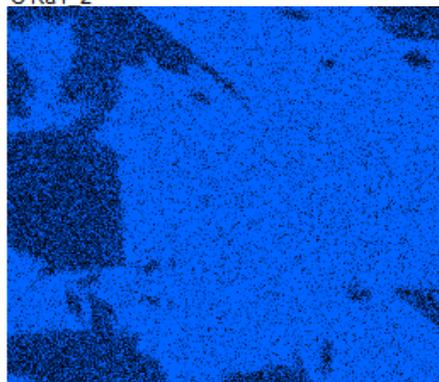
Mapa elemental 1 (EDS) – M.1.5



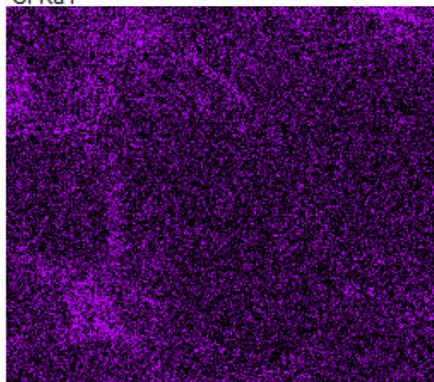
C Ka1_2



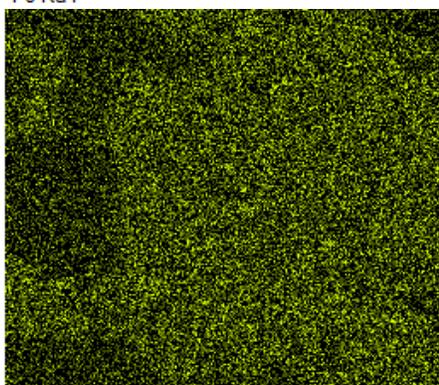
Cr Ka1



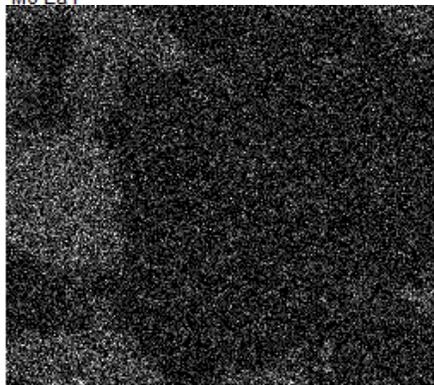
Fe Ka1



Mo La1

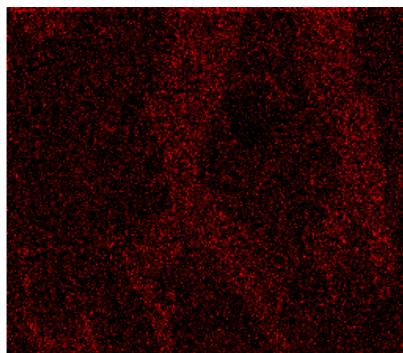
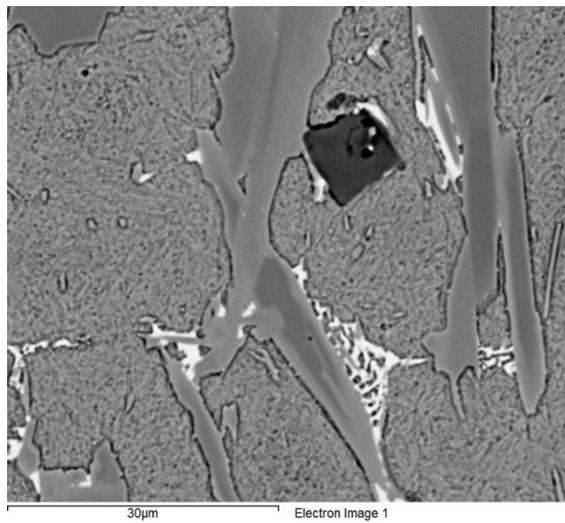


Si Ka1

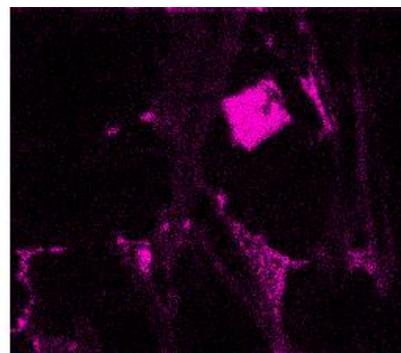


Mn Ka1

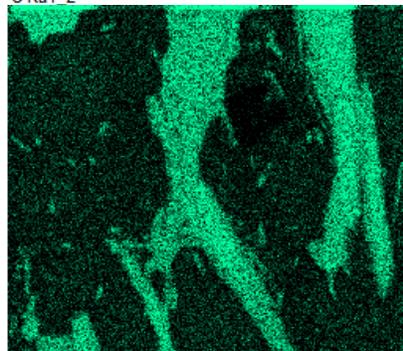
Mapa elemental 2 (EDS) – M.1.5



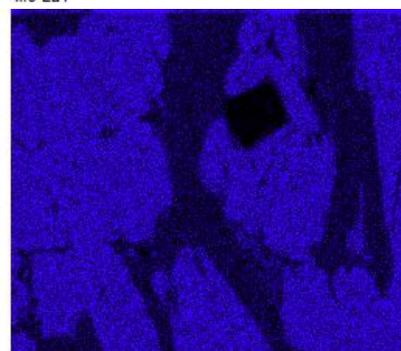
C Ka1 2



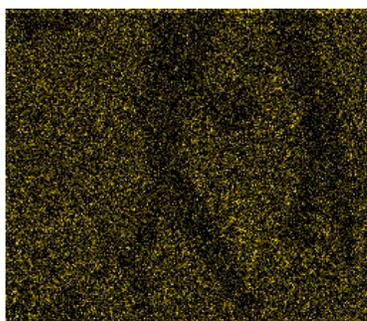
Mo La1



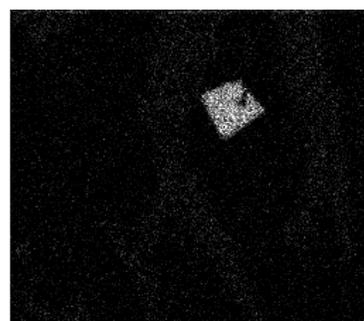
Cr Ka1



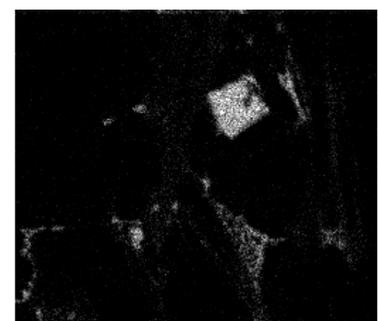
Fe Ka1



Si Ka1

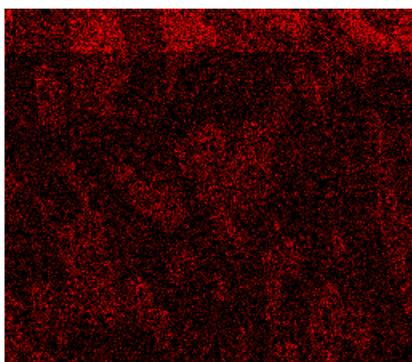
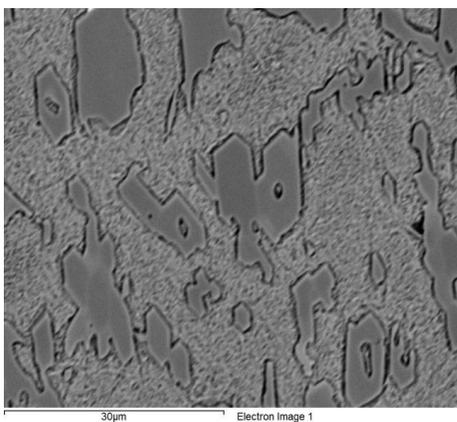


Mn Ka1

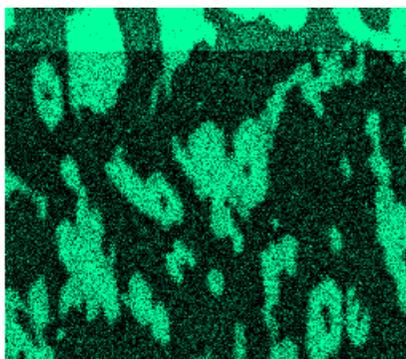


S Ka1

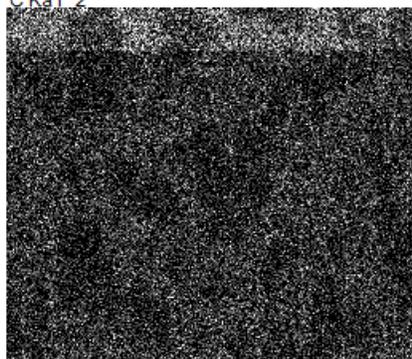
Mapa elemental 1 (EDS) – M.3



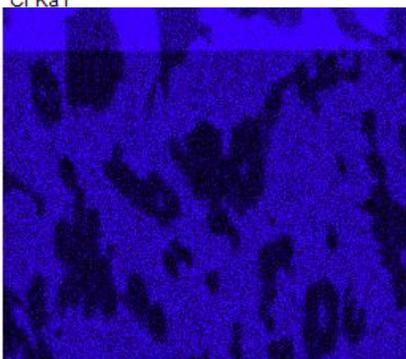
C Ka1,2



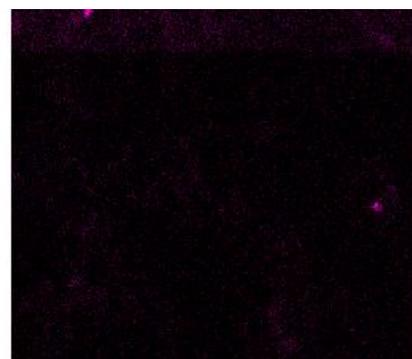
Cr Ka1



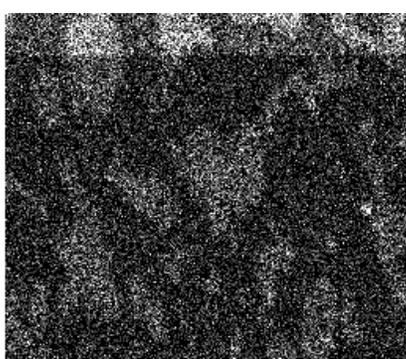
Si Ka1



Fe Ka1

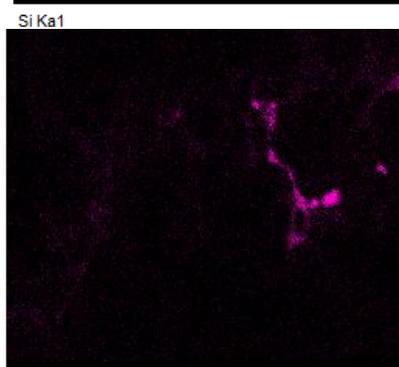
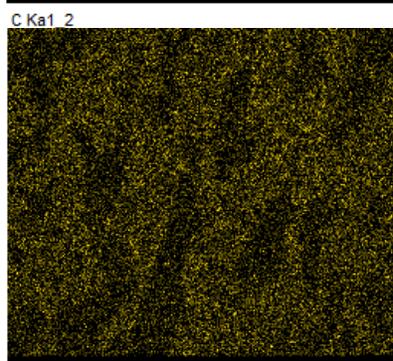
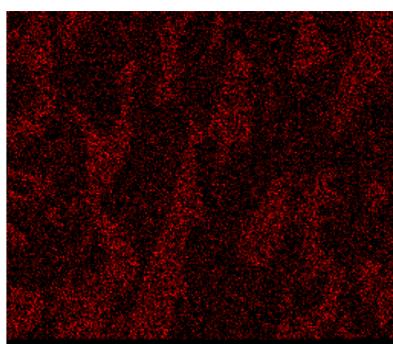


Mo La1

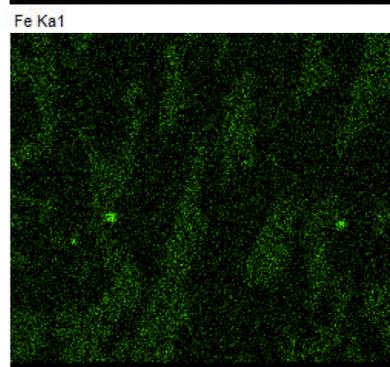
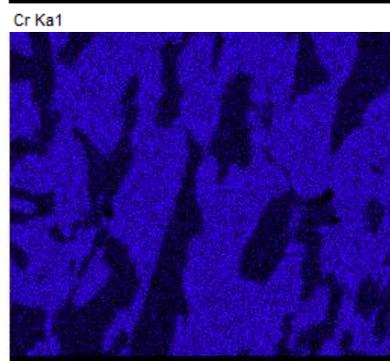
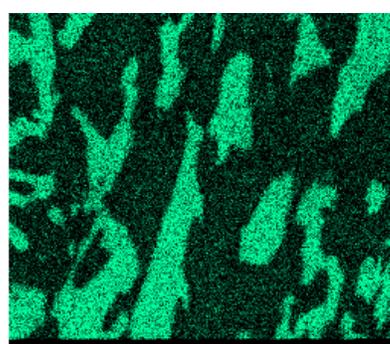


Mn Ka1

Mapa elemental 2 (EDS) – M.3

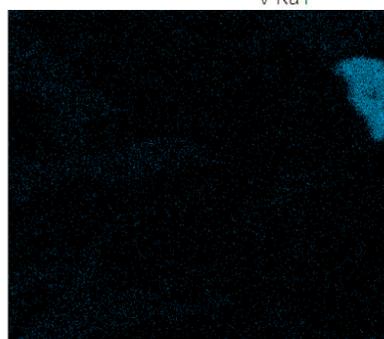
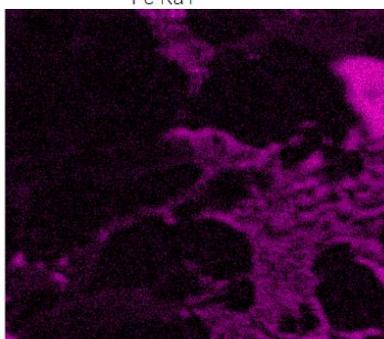
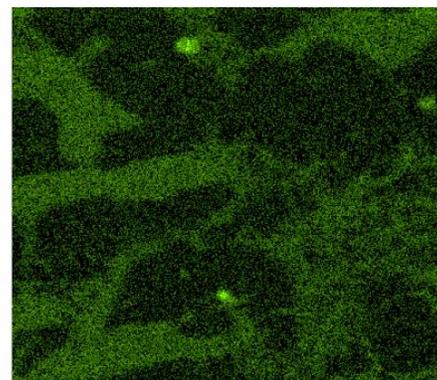
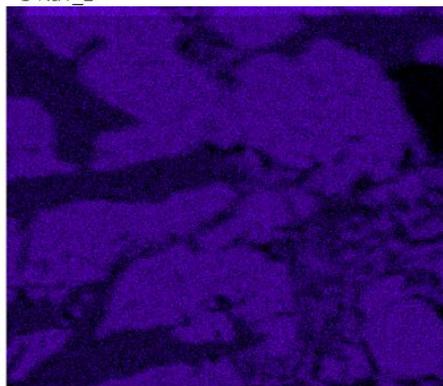
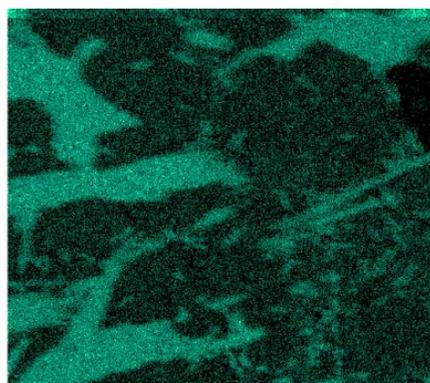
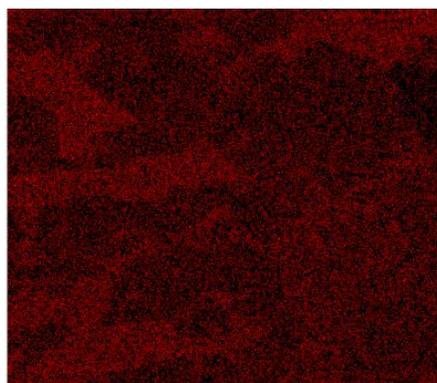
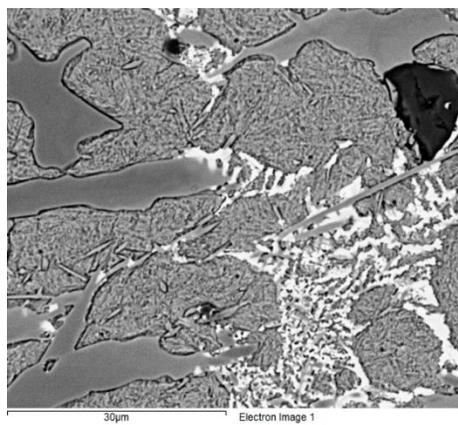


Mo La1



V Ka1

Mapa elemental 1 (EDS) – M.3 V.1



Mo La1

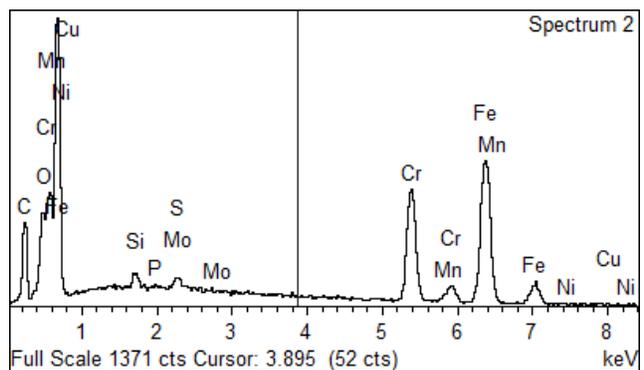
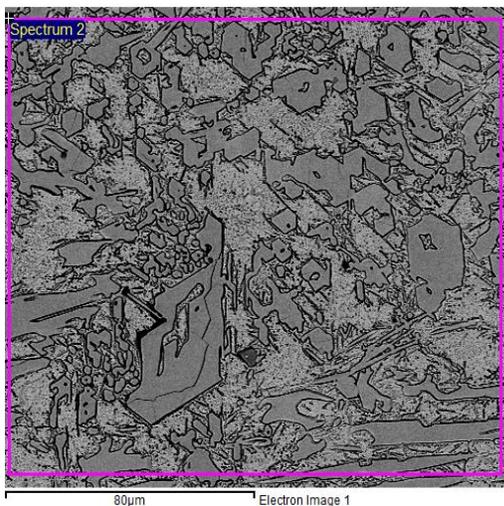
Mn Ka1

Si Ka1

Mapa elemental 1 (EDS) – M.3 V.2

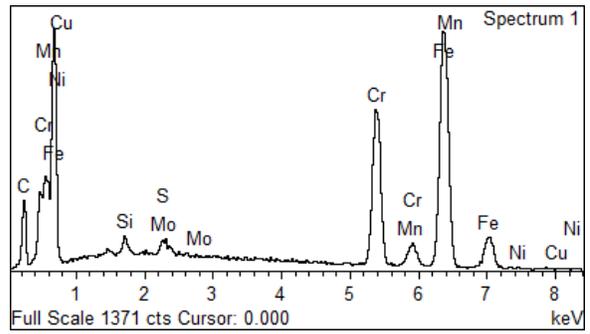
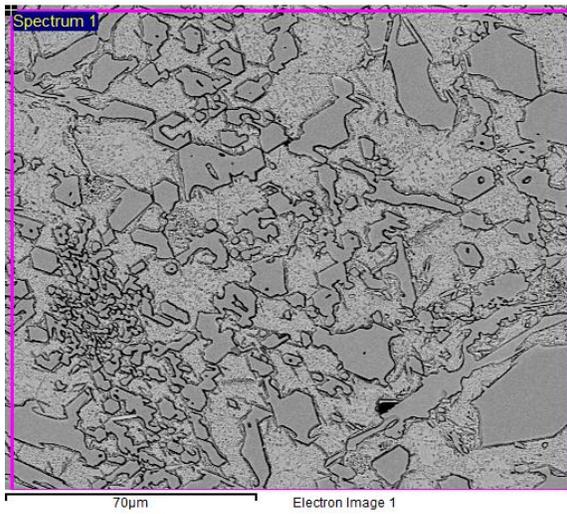
Anexo D. Mapas de composición global (SEM)

Muestra M.1



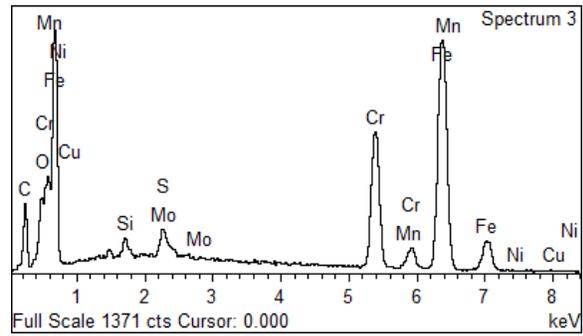
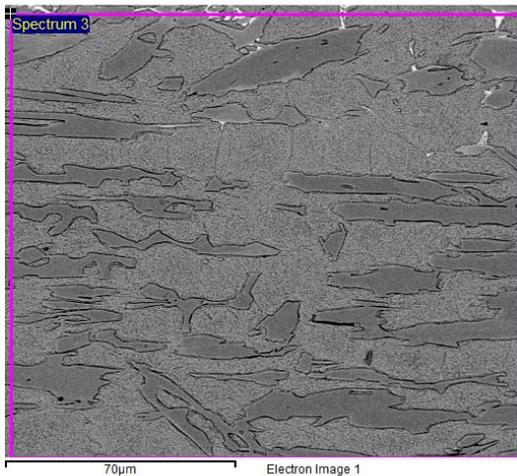
Elemento	% Peso	% Atómico
C K	11.14	35.25
O K	1.75	4.16
Si K	0.64	0.86
P K	0.00	0.00
S K	0.00	0.00
Cr K	23.94	17.50
Mn K	0.70	0.48
Fe K	60.64	41.27
Ni L	0.00	0.00
Cu L	0.00	0.00
Mo L	1.20	0.48
Total	100.00	100.00

Muestra M.1.5



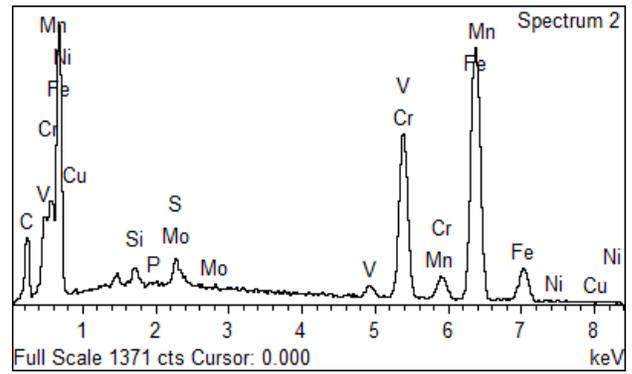
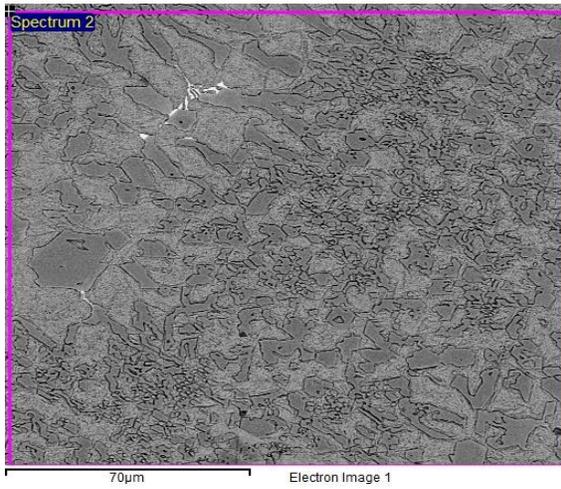
Elemento	% Peso	% Atómico
C K	12.36	39.16
Si K	0.63	0.86
S K	0.00	0.00
Cr K	22.96	16.80
Mn K	0.93	0.64
Fe K	61.47	41.88
Ni K	0.00	0.00
Cu L	0.00	0.00
Mo L	1.64	0.65
Total	100.00	100.00

Muestra M.3



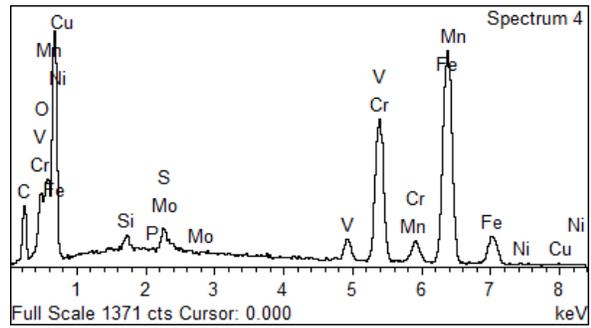
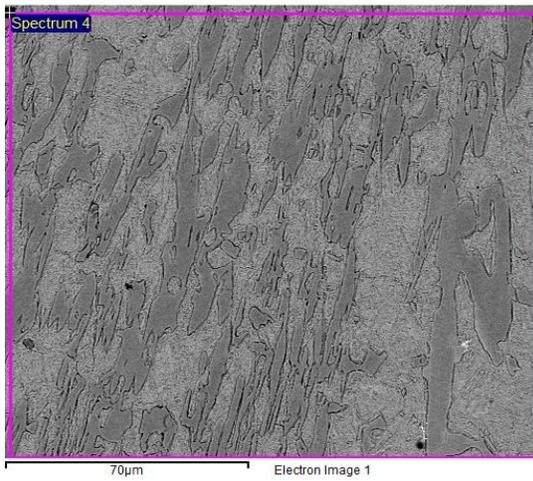
Elemento	% Peso	% Atómico
C K	11.93	36.76
O K	2.59	5.98
Si K	0.69	0.91
S K	0.00	0.00
Cr K	20.11	14.31
Mn K	0.83	0.56
Fe K	60.83	40.31
Ni K	0.00	0.00
Cu L	0.00	0.00
Mo L	3.01	1.16
Total	100.00	100.00

Muestra M.3 – V.1



Elemento	% Peso	% Atómico
C K	11.75	37.82
Si K	0.55	0.76
P K	0.00	0.00
S K	0.27	0.33
V K	1.34	1.01
Cr K	21.86	16.25
Mn K	0.78	0.55
Fe K	61.23	42.38
Ni K	0.00	0.00
Cu L	0.00	0.00
Mo L	2.21	0.89
Total	100.00	100.00

Muestra M.3 V.2

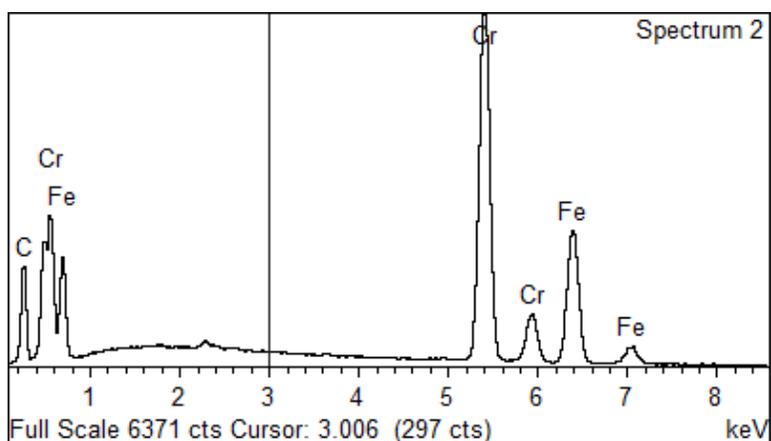
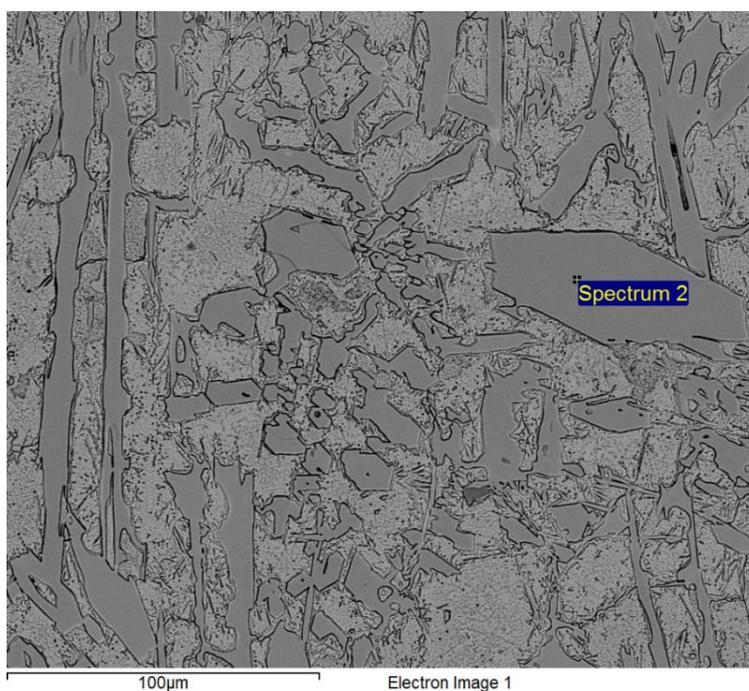


Elemento	% Peso	% Atómico
C K	11.15	35.07
O K	2.37	5.59
Si K	0.57	0.76
P K	0.00	0.00
S K	0.00	0.00
V K	2.67	1.98
Cr K	21.47	15.61
Mn K	0.72	0.49
Fe K	58.15	39.35
Ni K	0.00	0.00
Cu L	0.00	0.00
Mo L	2.91	1.15
Total	100.00	100.00

Anexo E. Análisis puntual (EDS)

Tabla E.1: Composición porcentual - Zona 1 – M.1

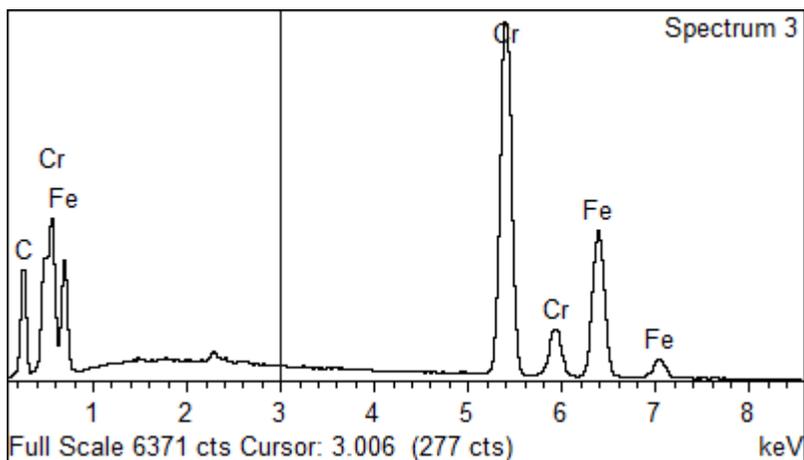
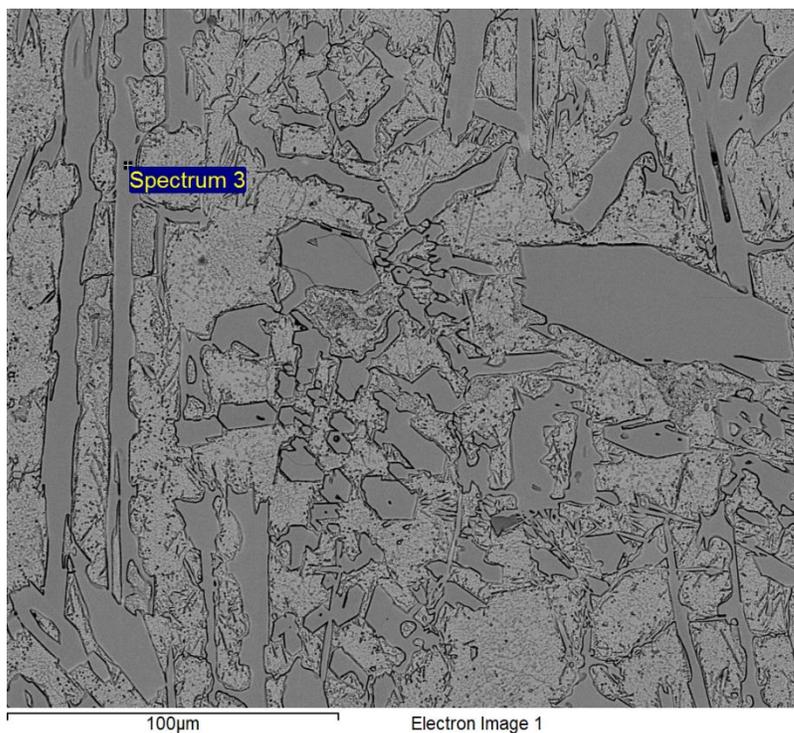
Elemento	% Peso	% Atómico
C (K α)	14.24	42.48
Cr (K α)	52.21	35.99
Fe (K α)	33.55	21.53



Análisis puntual (EDS) – Zona 1 – M.1

Tabla E.2: Composición porcentual - Zona 2 – M.1

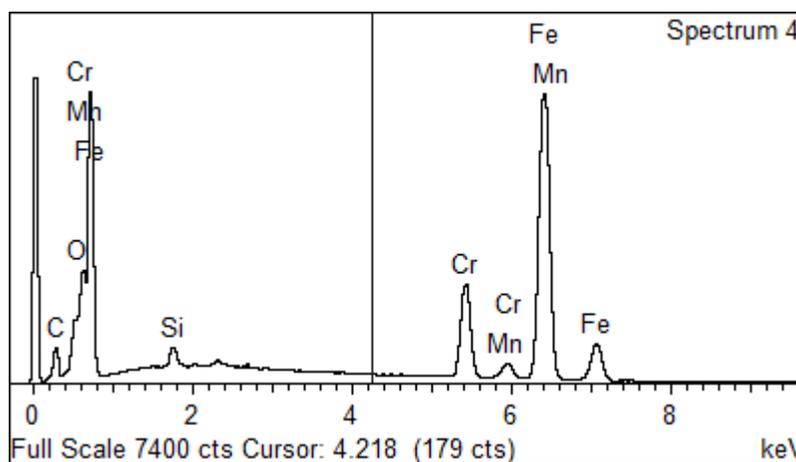
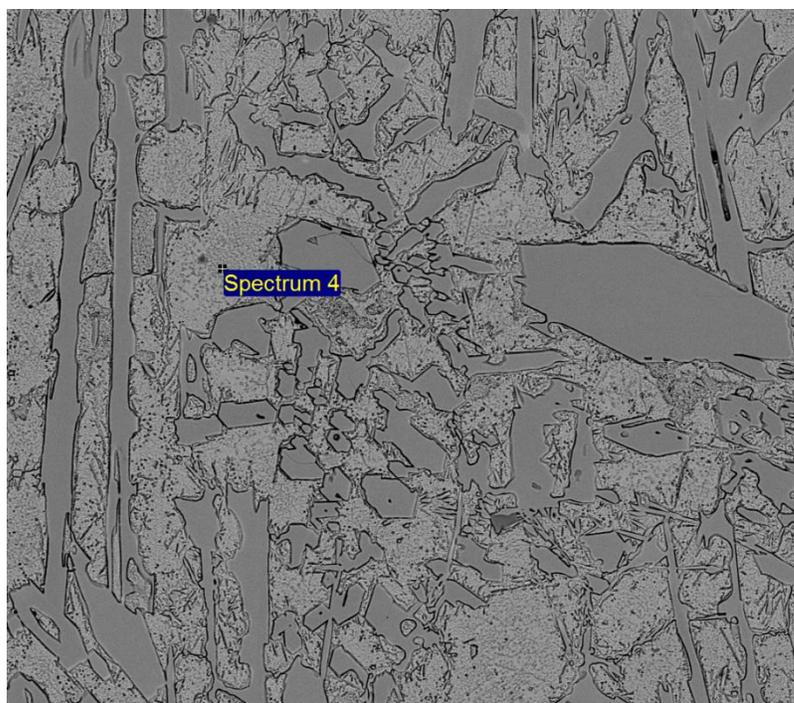
Elemento	% Peso	% Atómico
C (K α)	14.89	43.81
Cr (K α)	50.37	34.22
Fe (K α)	34.73	21.97



Análisis puntual (EDS) – Zona 2 – M.1

Tabla E.3: Composición porcentual - Zona 3 – M.1

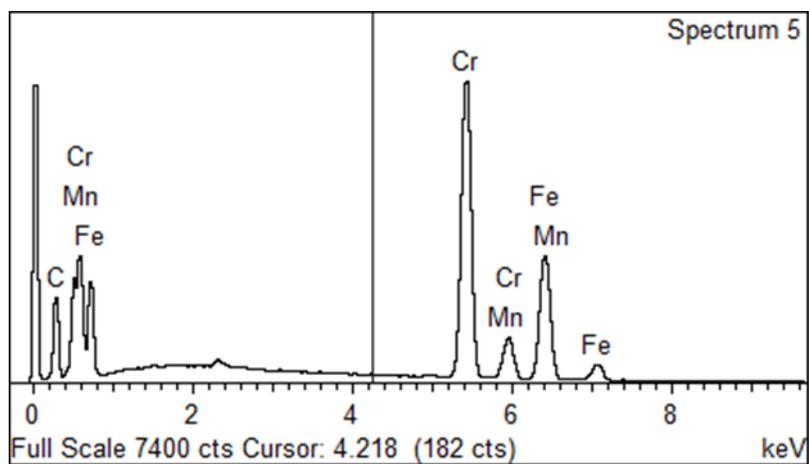
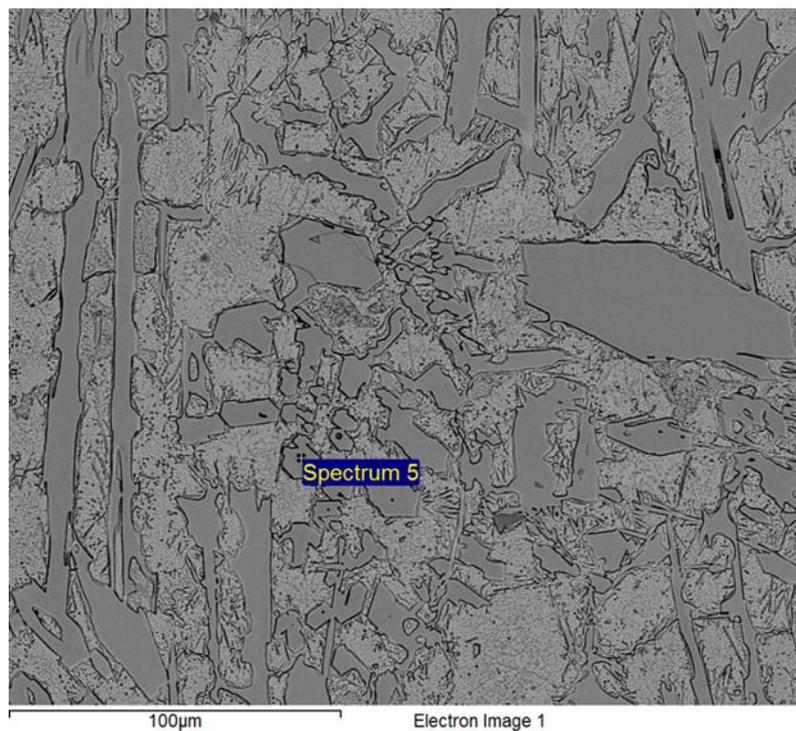
Elemento	% Peso	% Atómico
C (K α)	6.47	23.13
O (K α)	1.89	5.07
Si (K α)	0.80	1.22
Cr (K α)	13.58	11.21
Mn (K α)	0.78	0.61
Fe (K α)	76.48	58.77



Análisis puntual (EDS) – Zona 3 – M.1

Tabla E.4: Composición porcentual - Zona 4 – M.1

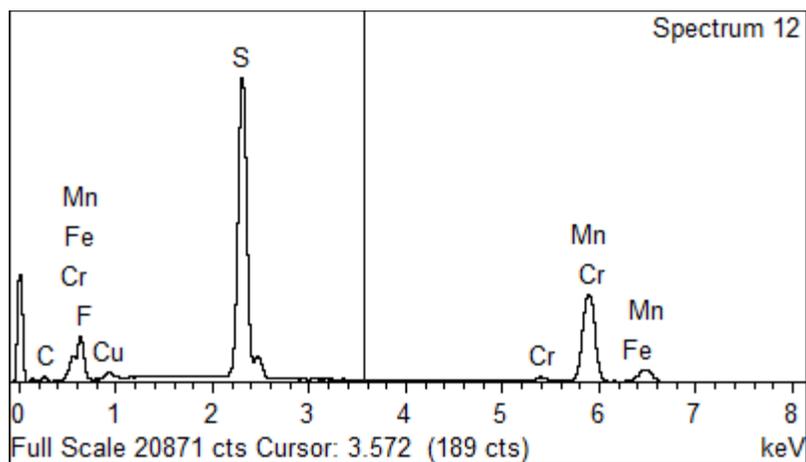
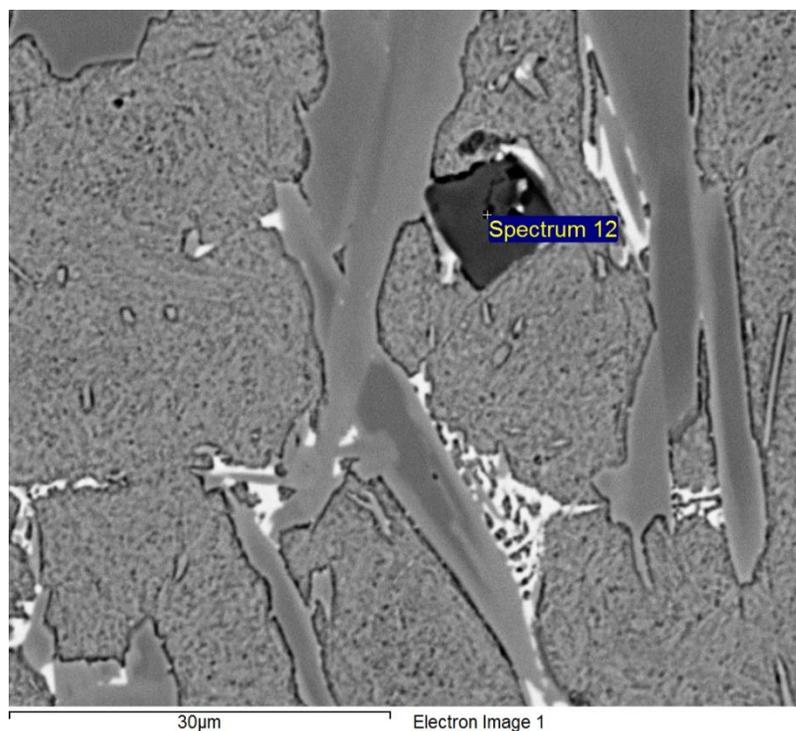
Elemento	% Peso	% Atómico
C (K α)	14.10	42.27
Cr (K α)	49.35	34.17
Mn (K α)	0.98	0.64
Fe (K α)	35.57	22.92



Análisis puntual (EDS) – Zona 4 – M.1

Tabla E.5: Composición porcentual - Zona 1 – M.3

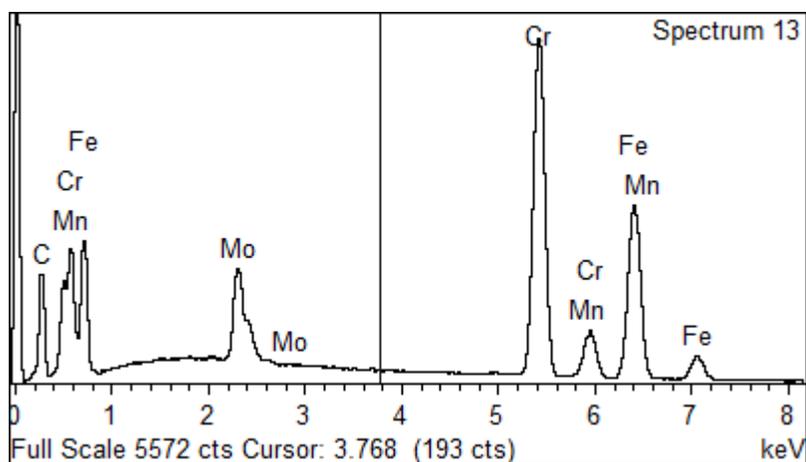
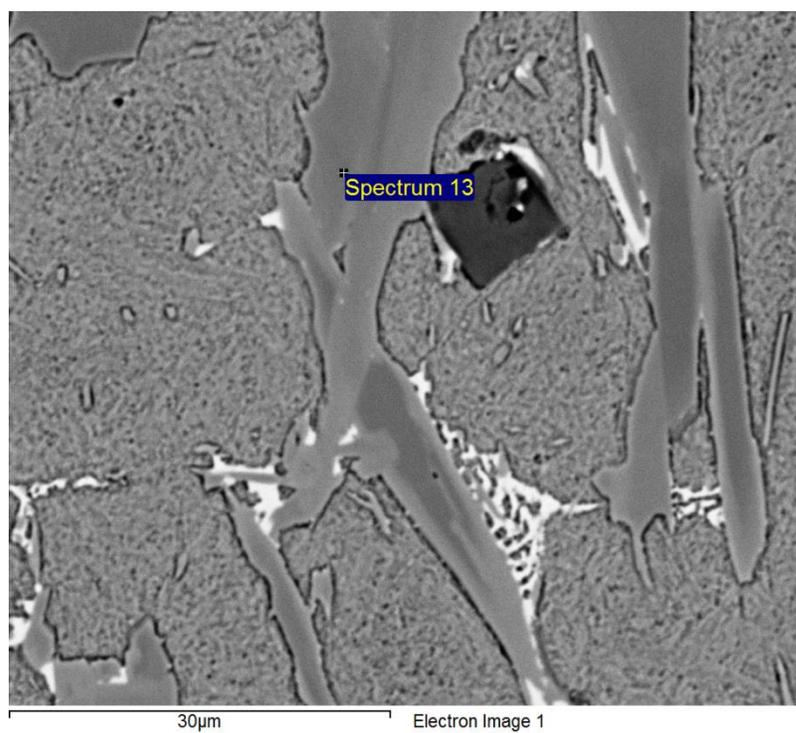
Elemento	% Peso	% Atómico
C (K α)	6.46	19.28
F (K α)	2.93	5.52
S (K α)	34.87	38.99
Cr (K α)	1.74	1.20
Mn (K α)	50.17	32.74
Fe (K α)	1.39	0.89
Cu (L α)	2.44	1.38



Análisis puntual (EDS) – Zona 1 – M.3

Tabla E.6: Composición porcentual - Zona 2 – M.3

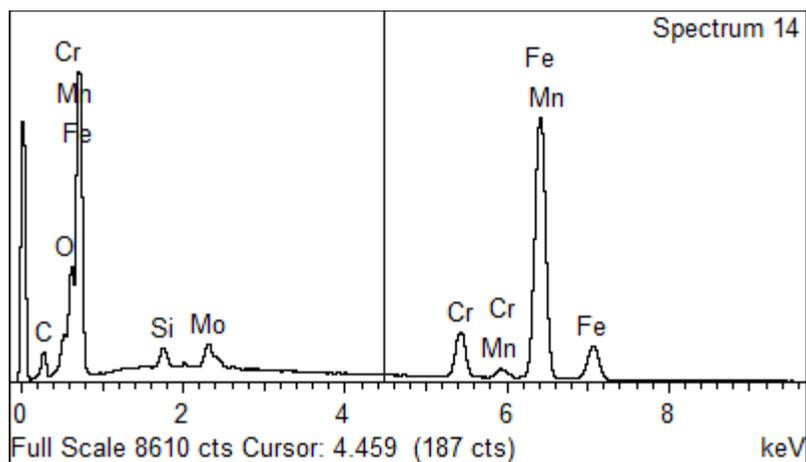
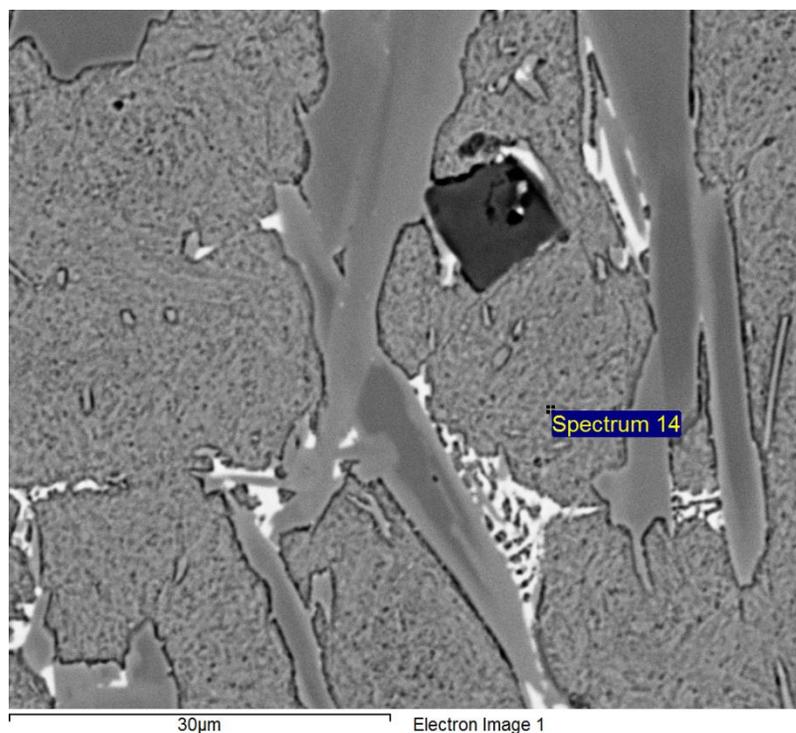
Elemento	% Peso	% Atómico
C (K α)	15.52	46.20
Cr (K α)	40.13	27.59
Mn (K α)	0.83	0.54
Fe (K α)	35.35	22.63
Mo (L α)	8.16	3.04



Análisis puntual (EDS) – Zona 2 – M.3

Tabla E.7: Composición porcentual - Zona 3 – M.3

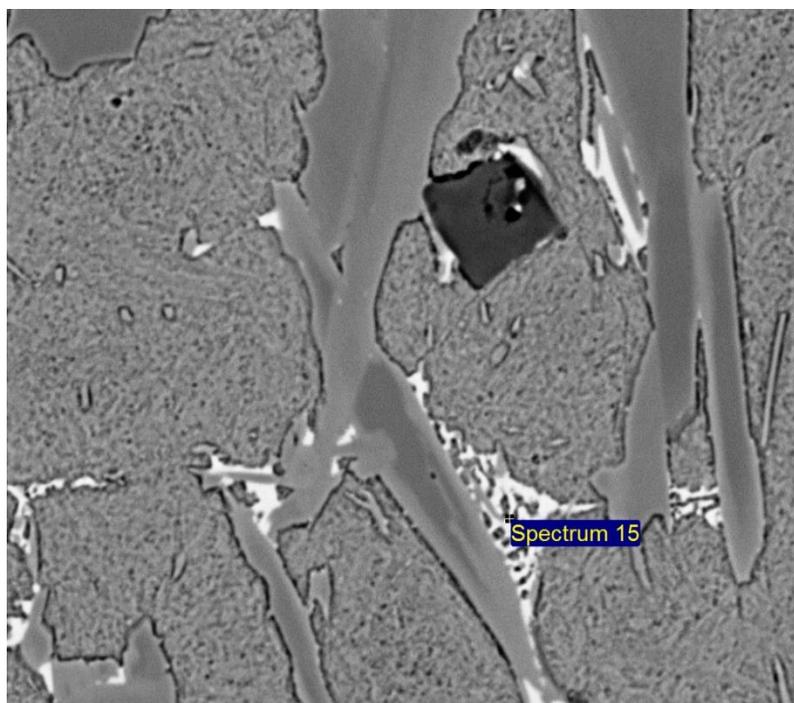
Elemento	% Peso	% Atómico
C (K α)	6.33	22.91
O (K α)	2.09	5.67
Si (K α)	0.98	1.52
Cr (K α)	7.55	6.31
Mn (K α)	0.86	0.68
Fe (K α)	78.96	61.45
Mo (L α)	3.23	1.46



Análisis puntual (EDS) – Zona 3 – M.3

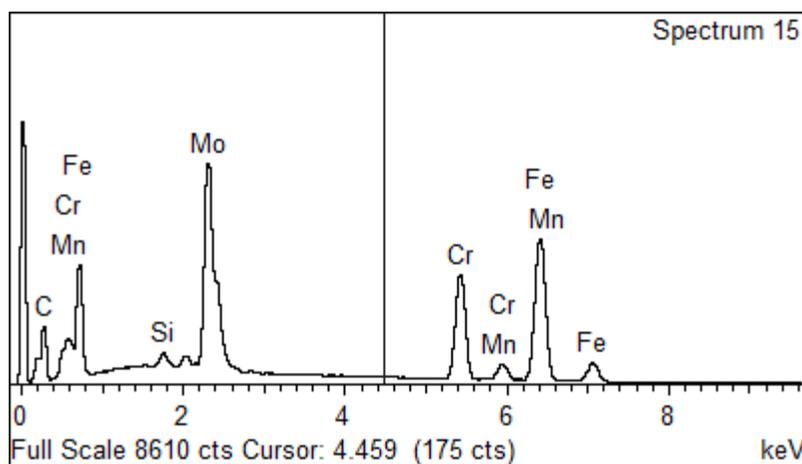
Tabla E.8: Composición porcentual - Zona 4 – M.3

Elemento	% Peso	% Atómico
C (K α)	15.20	48.15
Si (K α)	0.53	0.72
Cr (K α)	17.79	13.01
Mn (K α)	0.65	0.45
Fe (K α)	40.62	27.67
Mo (L α)	25.21	10.00



30 μ m

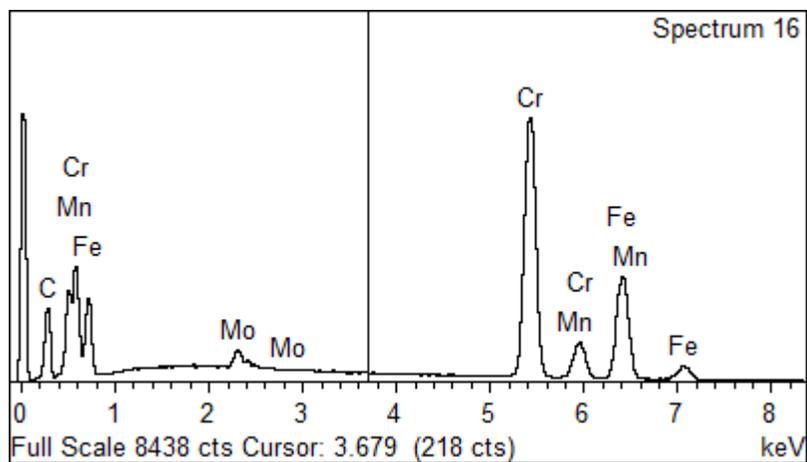
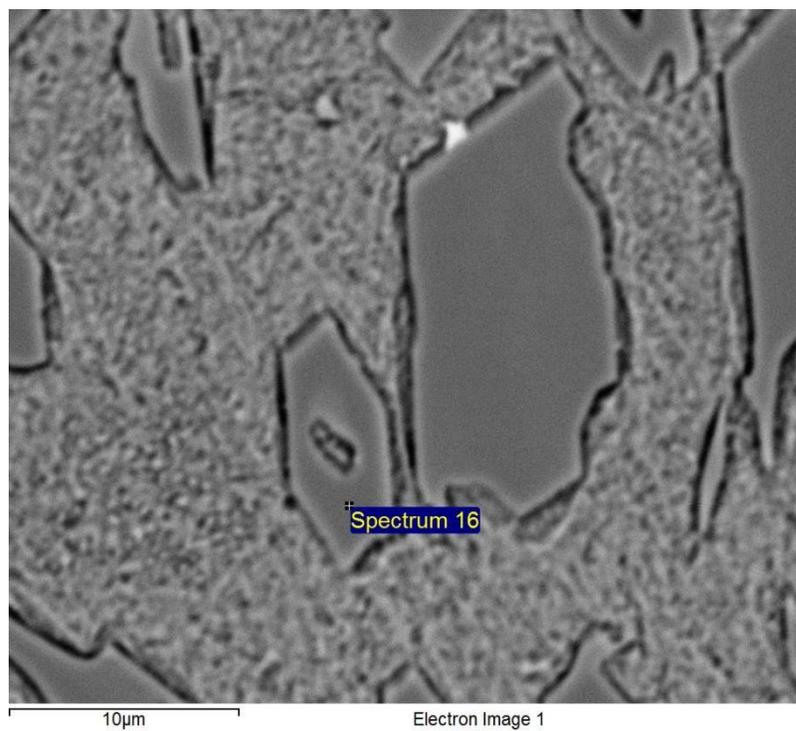
Electron Image 1



Análisis puntual (EDS) – Zona 4 – M.3

Tabla E.9: Composición porcentual - Zona 5 – M.3

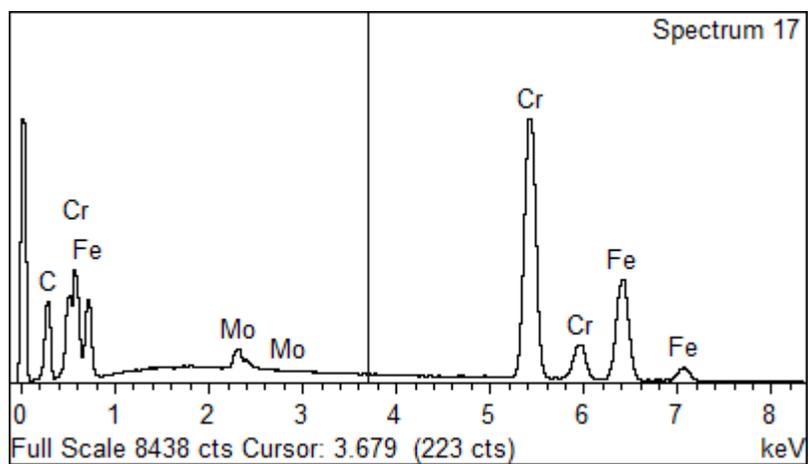
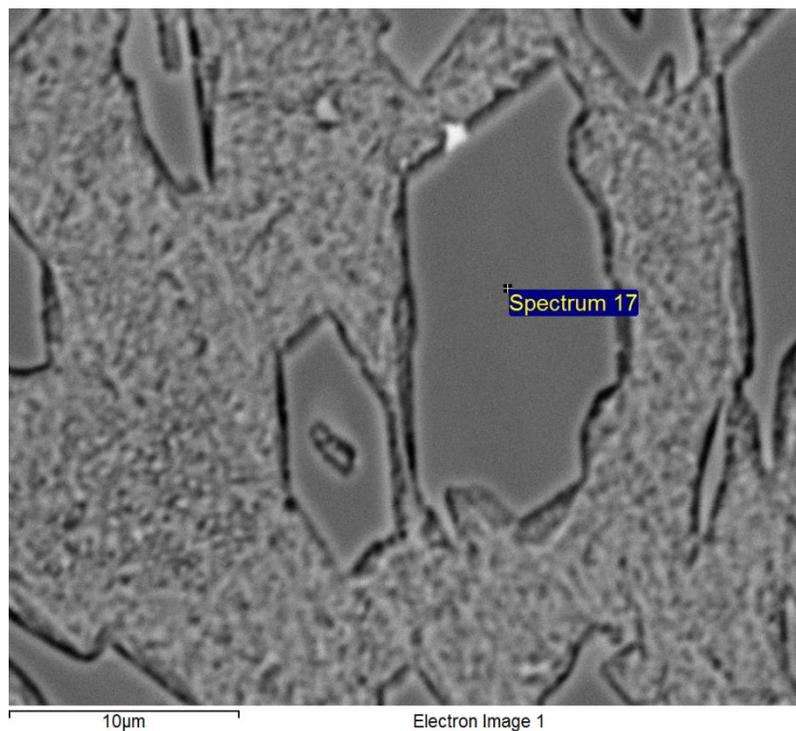
Elemento	% Peso	% Atómico
C (K α)	14.39	43.12
Cr (K α)	49.23	34.07
Mn (K α)	0.93	0.61
Fe (K α)	33.10	21.32
Mo (L α)	2.34	0.88



Análisis puntual (EDS) – Zona 5 – M.3

Tabla E.10: Composición porcentual - Zona 6 – M.3

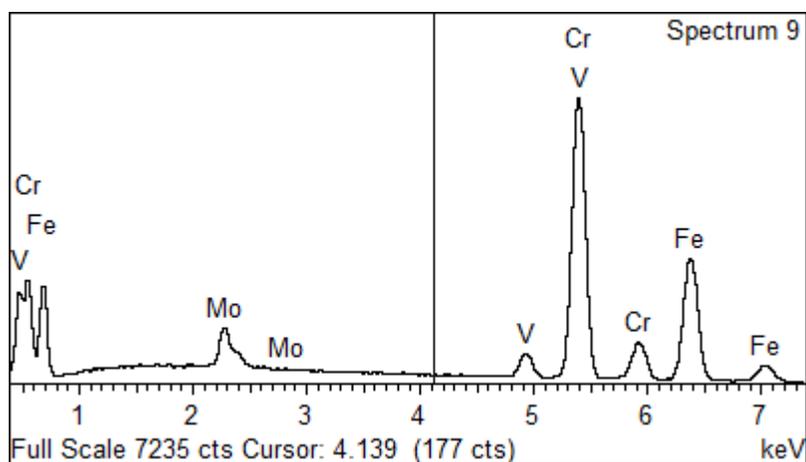
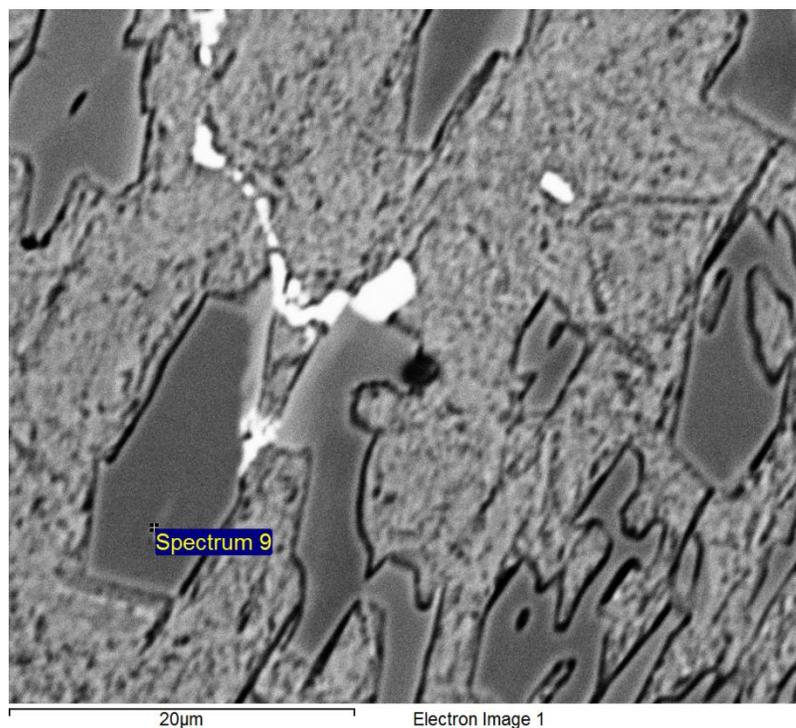
Elemento	% Peso	% Atómico
C (K α)	15.43	45.14
Cr (K α)	49.52	33.47
Fe (K α)	32.53	20.47
Mo (L α)	2.53	0.93



Análisis puntual (EDS) – Zona 6 – M.3

Tabla E.11: Composición porcentual - Zona 1 – M.3 V.1

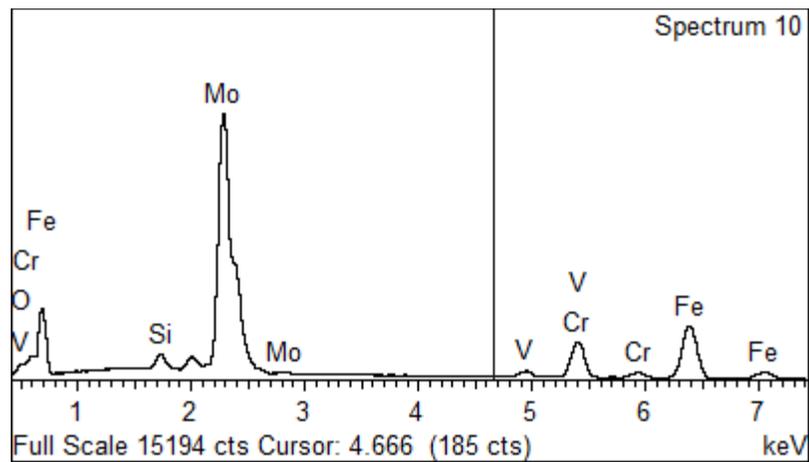
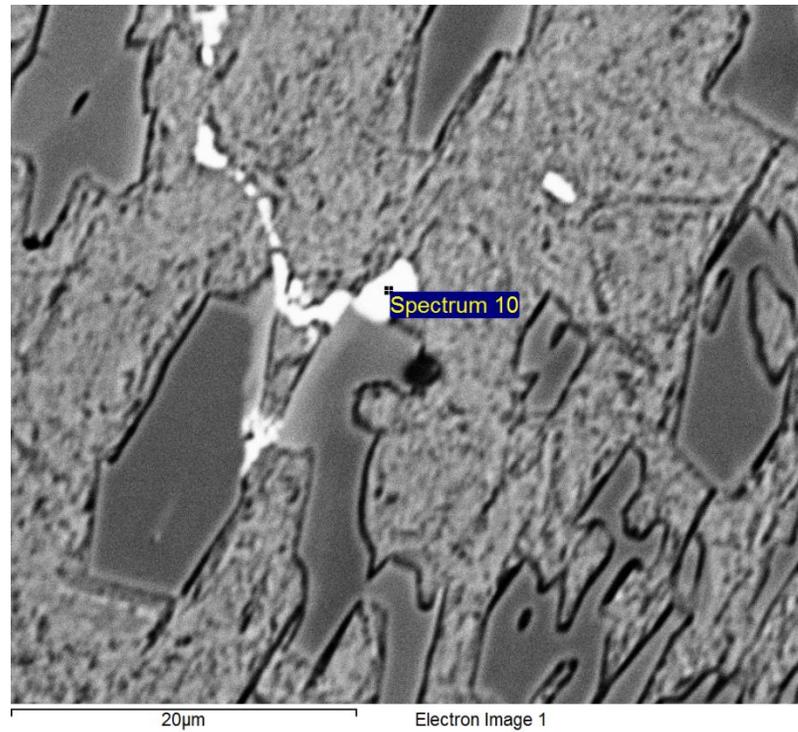
Elemento	% Peso	% Atómico
C (K α)	15.78	46.07
V (K α)	3.18	2.19
Cr (K α)	43.73	29.49
Fe (K α)	23.84	20.62
Mo (L α)	4.47	1.63



Análisis puntual (EDS) – Zona 1 – M.3 V.1

Tabla E.12: Composición porcentual - Zona 2 – M.3 V.1

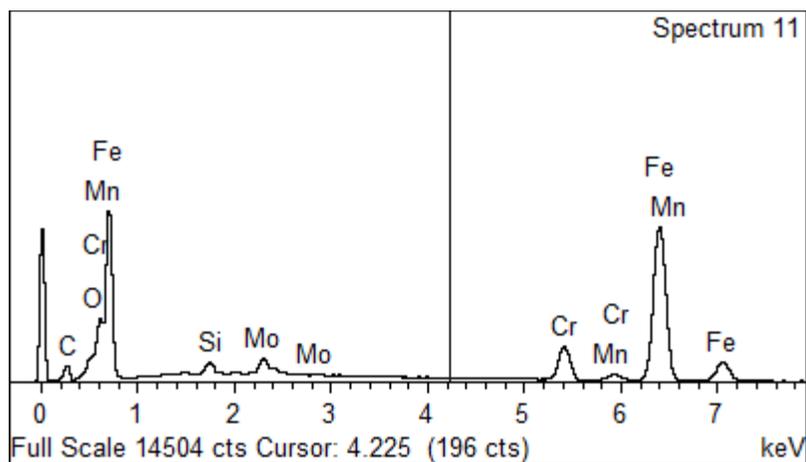
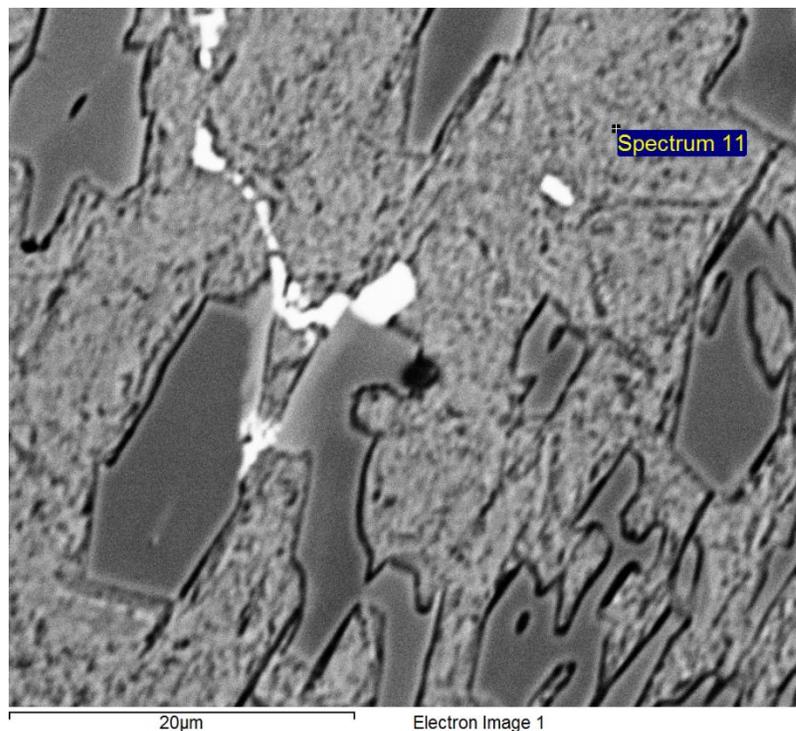
Elemento	% Peso	% Atómico
C (K α)	14.56	48.48
O (K α)	1.95	4.87
Si (K α)	0.84	1.19
V (K α)	1.41	1.11
Cr (K α)	9.72	7.48
Fe (K α)	23.59	16.89
Mo (L α)	47.93	19.98



Análisis puntual (EDS) – Zona 2 – M.3 V.1

Tabla E.13: Composición porcentual - Zona 3 – M.3 V.1

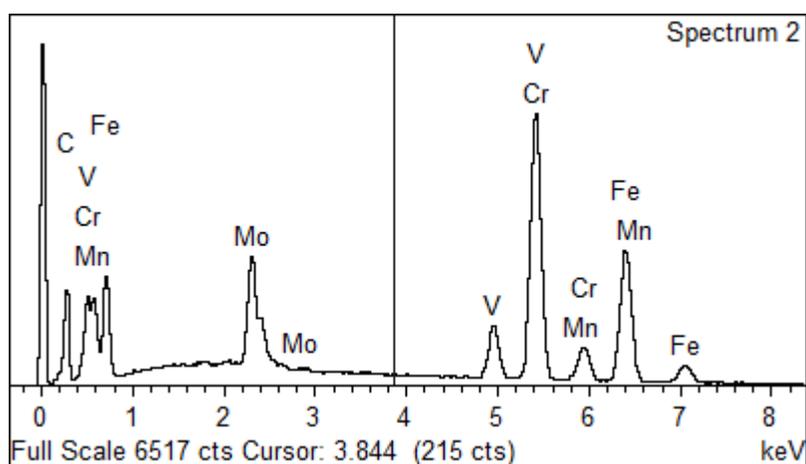
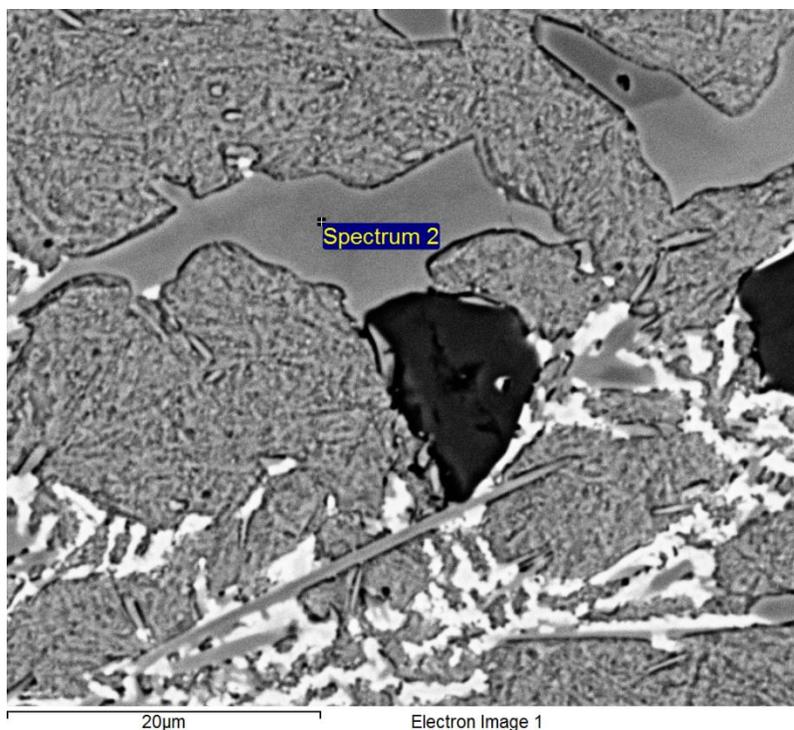
Elemento	% Peso	% Atómico
C (K α)	6.56	23.79
O (K α)	1.68	4.56
Si (K α)	0.95	1.47
Cr (K α)	9.10	7.62
Mn (K α)	0.78	0.62
Fe (K α)	77.37	60.32
Mo (L α)	3.57	1.62



Análisis puntual (EDS) – Zona 3 – M.3 V.1

Tabla E.14: Composición porcentual - Zona 1 – M.3 V.2

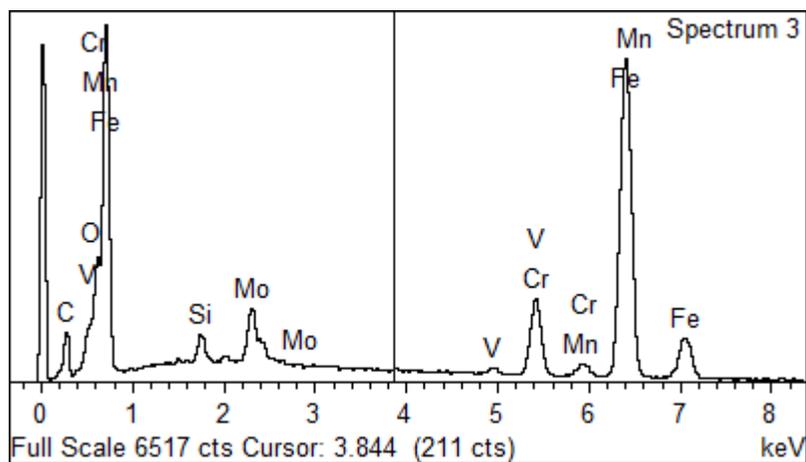
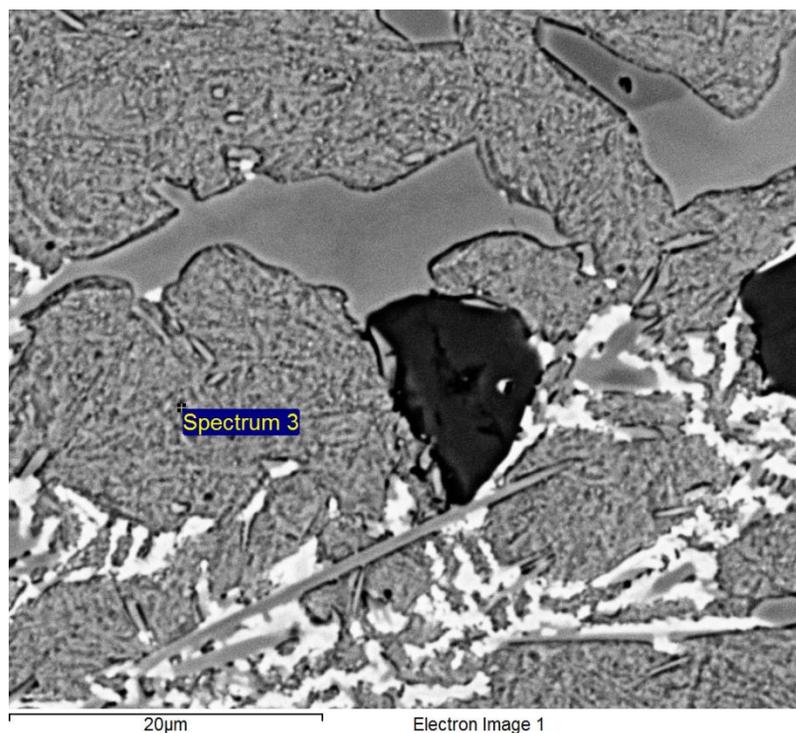
Elemento	% Peso	% Atómico
C (K α)	15.81	46.98
V (K α)	6.19	4.34
Cr (K α)	35.87	24.61
Mn (K α)	0.97	0.63
Fe (K α)	30.45	19.46
Mo (L α)	10.72	3.99



Análisis puntual (EDS) – Zona 1 – M.3 V.2

Tabla E.15: Composición porcentual - Zona 2 – M.3 V.2

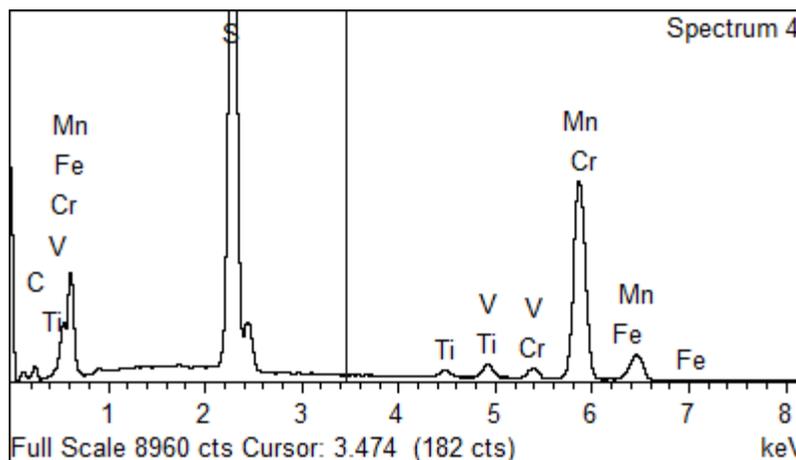
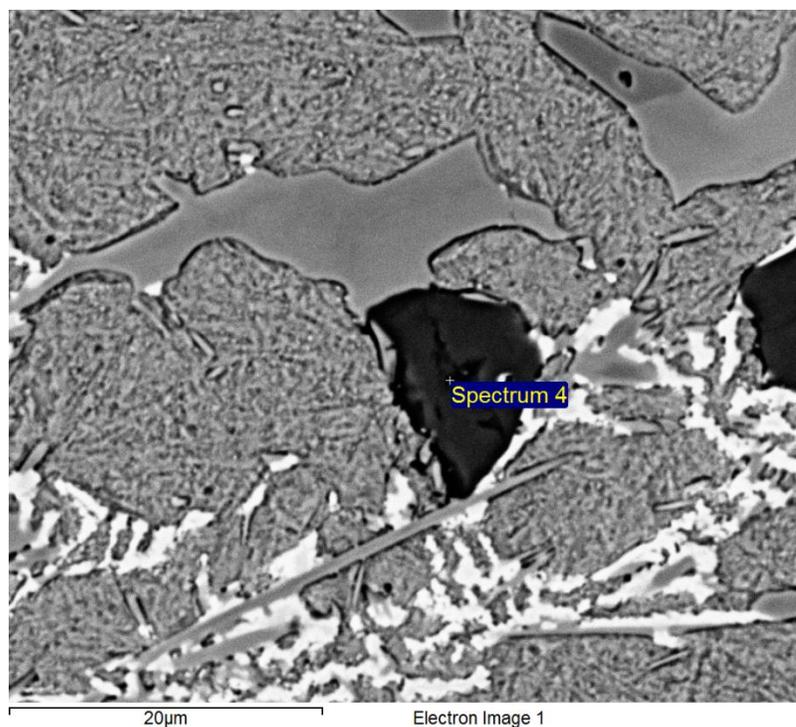
Elemento	% Peso	% Atómico
C (K α)	8.53	29.29
O (K α)	1.99	5.14
Si (K α)	0.65	0.52
V (K α)	9.39	7.44
Cr (K α)	0.79	0.59
Mn (K α)	71.75	52.96
Fe (K α)	30.45	19.46
Mo (L α)	5.84	2.51



Análisis puntual (EDS) – Zona 2 – M.3 V.2

Tabla E.16: Composición porcentual - Zona 3 – M.3 V.2

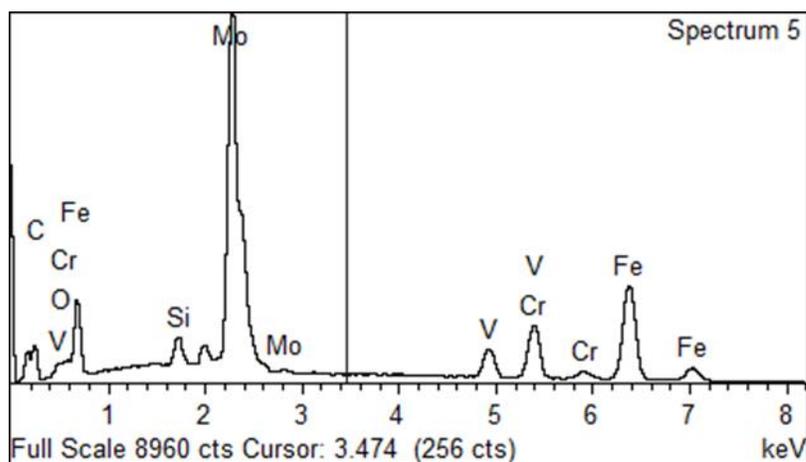
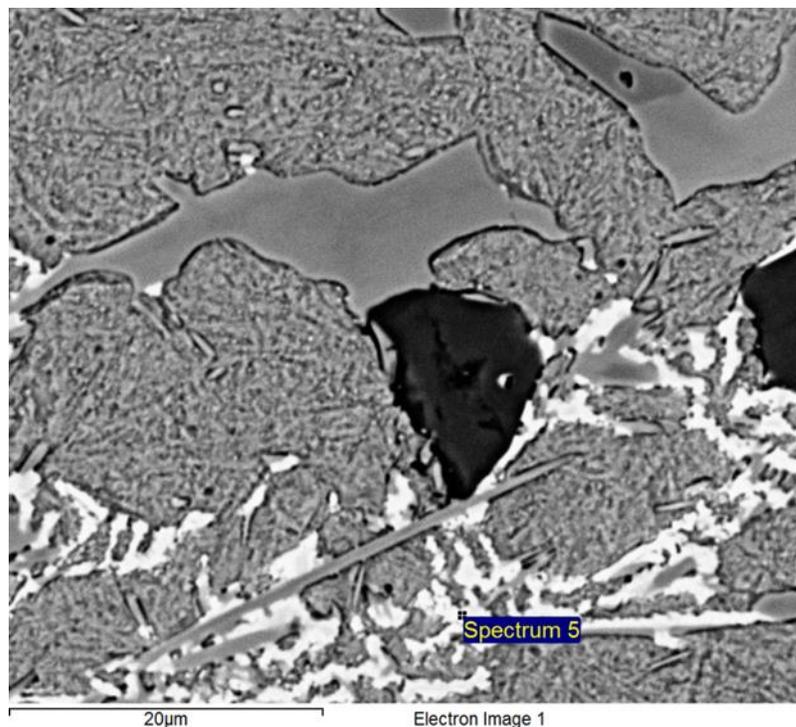
Elemento	% Peso	% Atómico
C (K α)	7.22	21.82
S (K α)	35.20	39.87
Ti (K α)	0.97	0.74
V (K α)	1.89	1.34
Cr (K α)	1.84	1.28
Mn (K α)	51.24	33.87
Fe (K α)	1.64	1.06



Análisis puntual (EDS) – Zona 3 – M.3 V.2

Tabla E.17: Composición porcentual - Zona 4 – M.3 V.2

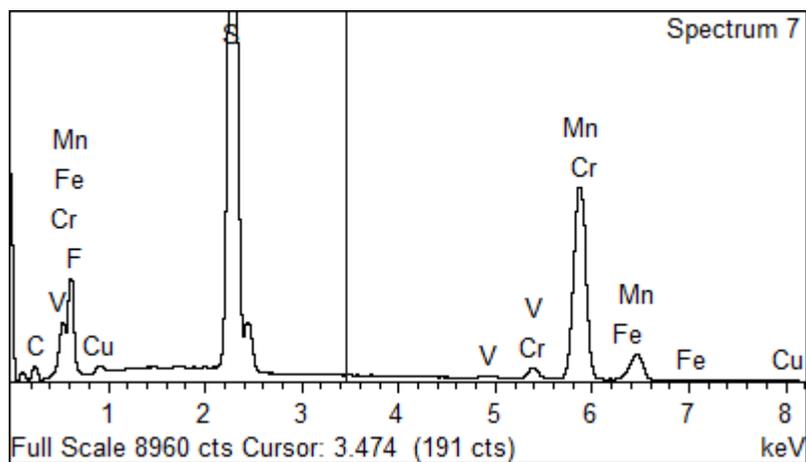
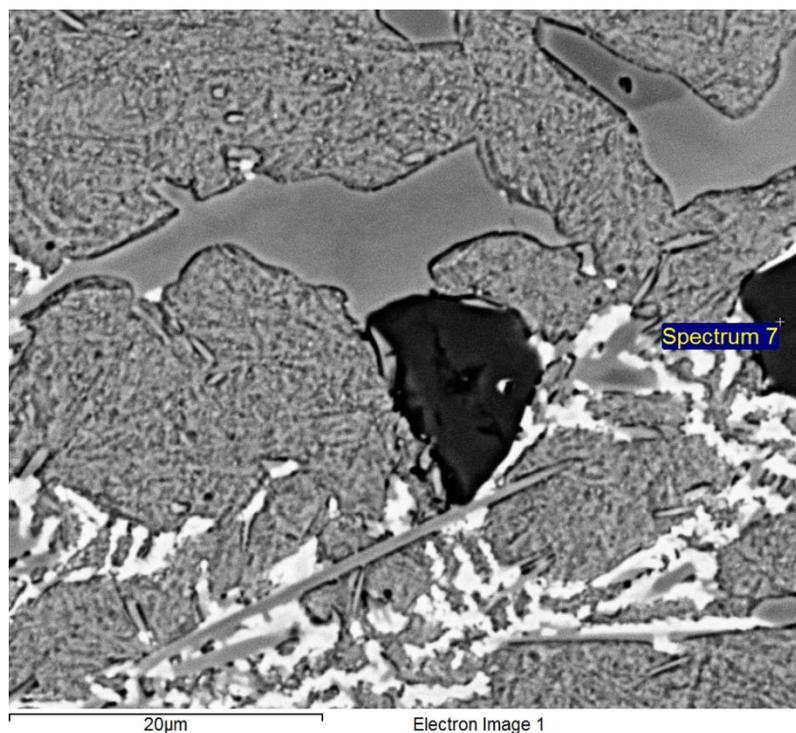
Elemento	% Peso	% Atómico
C (K α)	13.09	44.84
O (K α)	1.73	4.44
Si (K α)	1.03	1.51
V (K α)	4.33	3.50
Cr (K α)	8.91	7.05
Fe (K α)	26.87	19.79
Mo (L α)	44.04	18.88



Análisis puntual (EDS) – Zona 4 – M.3 V.2

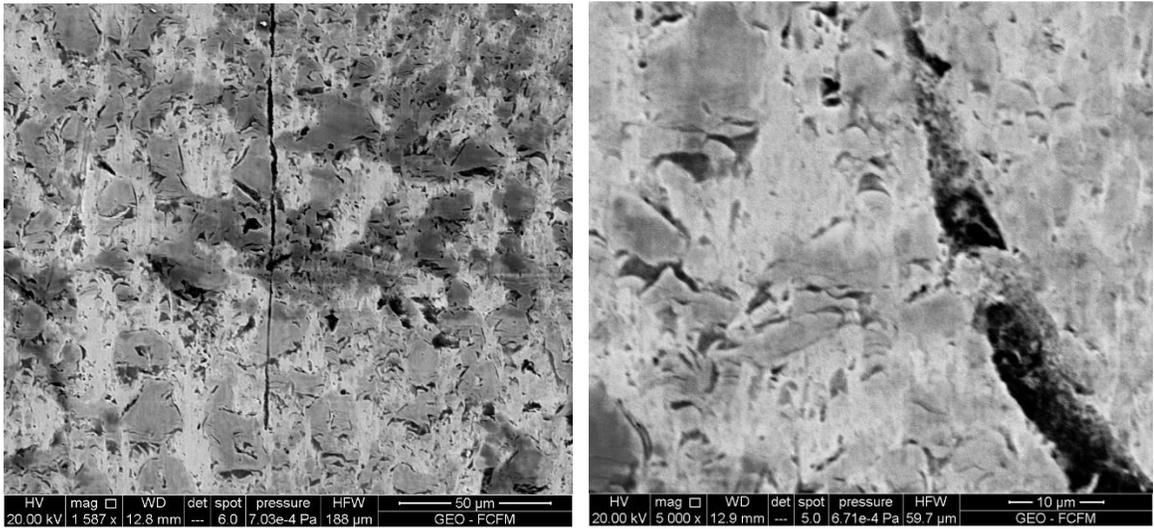
Tabla E.18: Composición porcentual - Zona 5 – M.3 V.2

Elemento	% Peso	% Atómico
C (K α)	7.96	22.90
F (K α)	3.10	5.63
S (K α)	34.77	37.45
V (K α)	0.38	0.26
Cr (K α)	1.97	1.31
Mn (K α)	49.42	31.07
Fe (K α)	1.10	0.68
Cu (L α)	1.28	0.70

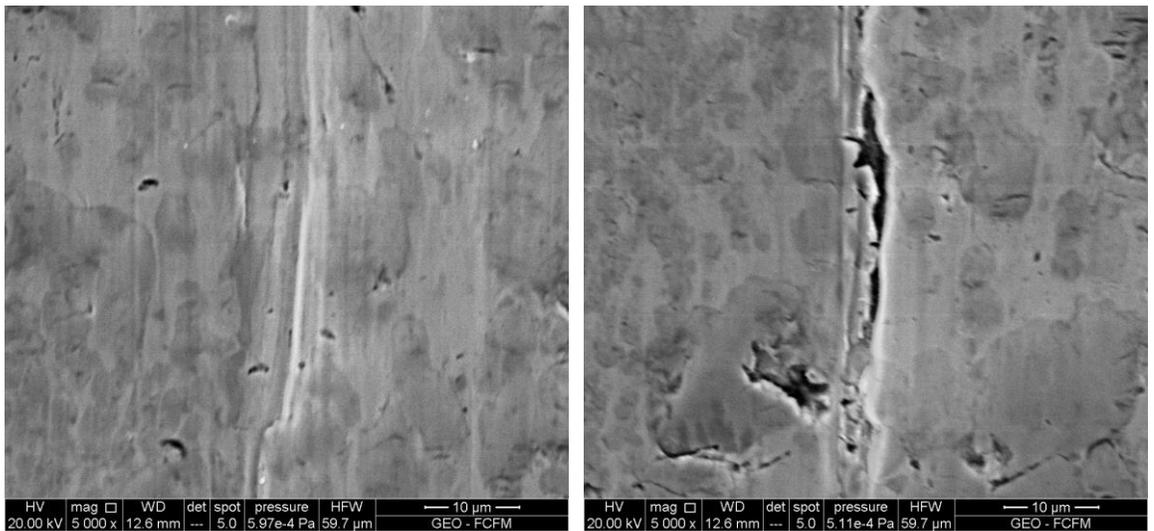


Análisis puntual (EDS) – Zona 5 – M.3 V.2

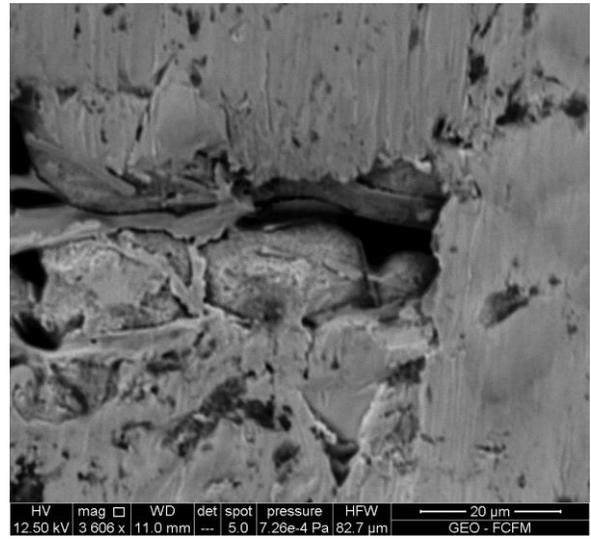
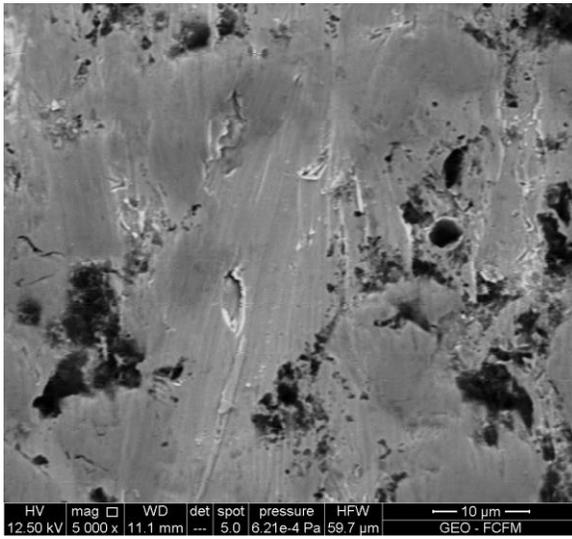
Anexo F. Fotografías de mecanismo de desgaste (SEM)



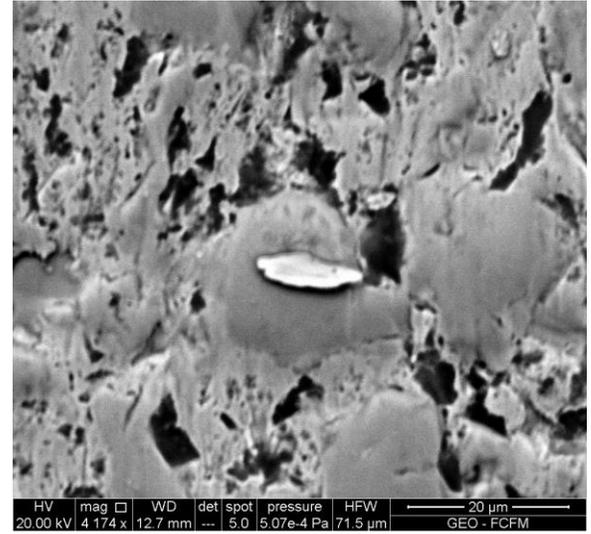
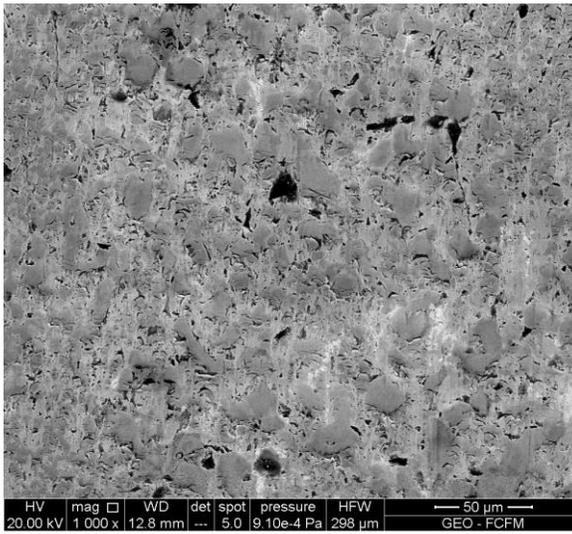
Fotografías desgaste SEM – M.1



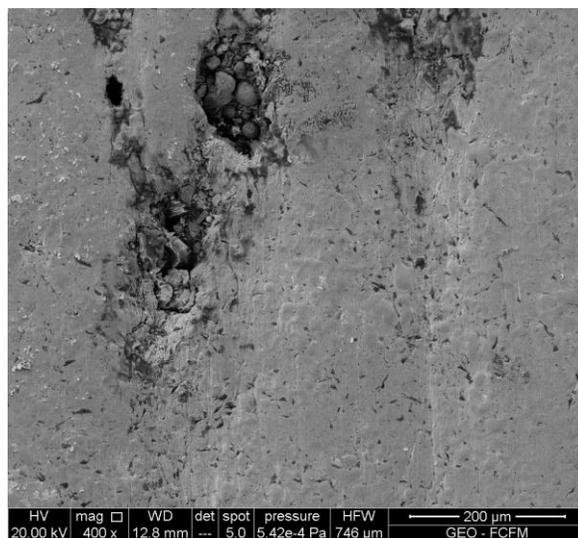
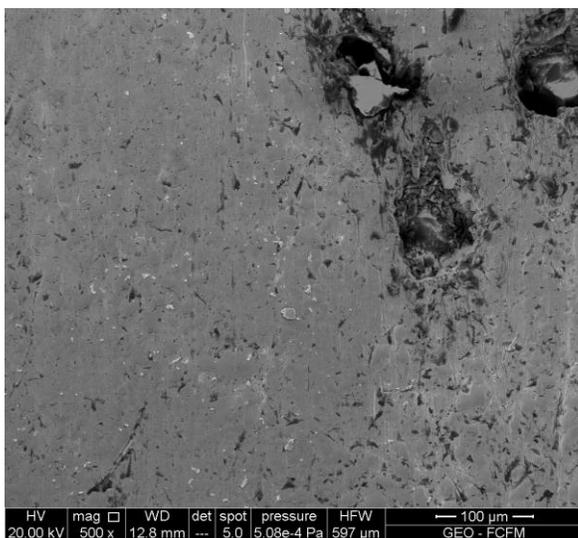
Fotografías desgaste SEM – M.1.5



Fotografías desgaste SEM – M.3



Fotografías desgaste SEM – M.3-V.1



Fotografías desgaste SEM – M.3-V.2

Anexo G. Datos microdureza Vickers

Tabla G.1: Resultados ensayos de dureza Vickers M.1 (1.0% Mo).

M.1 – 1.0% Mo						
Ensayo	Microdureza Vickers 200 [g] – [HV0.2]			Microdureza Vickers 2000 [g] – [HV2.0]		
N°	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 1	Zona 2	Zona 3
1	928	916	1018	853	918	827
2	883	1063	791	850	855	860
3	962	970	1116	836	916	847
4	1089	908	1052	855	874	897
5	1041	954	956	874	867	846
6	967	889	920	926	862	848
7	911	842	1070	873	910	921
8	927	881	997	963	849	870
9	906	985	932	884	815	859
10	945	497	909	888	843	890
11	841	898	1055	857	868	874
12	887	953	968	880	873	837
13	1049	878	1053	922	851	956
14	838	948	1006	878	846	795
15	916	880	1102	857	885	816
Promedio	944			870		
Desv. Std.	55			19		
%CV	5.84 %			2.20 %		

Tabla G.2: Resultados ensayos de dureza Vickers M.1.5 (1.5% Mo).

M.1.5 – 1.5% Mo						
Ensayo	Microdureza Vickers 200 [g] – [HV0.2]			Microdureza Vickers 2000 [g] – [HV2.0]		
N°	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 1	Zona 2	Zona 3
1	932	810	769	905	836	810
2	787	851	1113	844	878	848
3	988	990	795	894	844	930
4	1005	791	775	819	880	804
5	937	966	847	857	866	884
6	747	917	1251	854	879	885
7	1091	983	756	828	948	851
8	875	1121	856	895	901	856
9	863	812	956	853	887	907
10	907	929	959	800	856	840
11	803	807	768	868	870	841
12	698	765	859	863	959	890
13	811	848	896	870	843	851
14	989	766	999	887	887	815
15	835	889	869	903	887	893
Promedio	888			870		
Desv. Std.	58			21		
%CV	6.55 %			2.43 %		

Tabla G.3: Resultados ensayos de dureza Vickers M.3 (3.0% Mo).

M.3 – 3.0% Mo						
Ensayo	Microdureza Vickers 200 [g] – [HV0.2]			Microdureza Vickers 2000 [g] – [HV2.0]		
N°	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 1	Zona 2	Zona 3
1	856	941	858	850	844	844
2	903	986	882	876	886	865
3	1197	888	852	849	889	885
4	931	1035	953	853	867	849
5	704	978	873	865	865	913
6	813	974	904	852	864	811
7	858	868	894	871	847	894
8	1018	944	1058	827	873	871
9	916	773	931	934	820	897
10	1052	975	1089	828	915	888
11	1160	812	864	868	802	881
12	1006	930	955	845	904	871
13	938	936	982	821	879	821
14	968	931	882	865	859	814
15	913	915	803	837	854	908
Promedio	931			863		
Desv. Std.	55			15		
%CV	5.90 %			1.74 %		

Tabla G.4: Resultados ensayos de dureza Vickers M.3-V.1 (3.0% Mo 1.0% V).

M.3 V.1 – 3.0% Mo 1.0% V						
Ensayo	Microdureza Vickers 200 [g] – [HV0.2]			Microdureza Vickers 2000 [g] – [HV2.0]		
N°	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 1	Zona 2	Zona 3
1	910	1001	806	822	833	821
2	944	933	901	824	841	849
3	759	898	852	855	801	770
4	865	1084	775	785	774	726
5	1033	870	945	839	800	736
6	968	960	1106	806	831	836
7	998	996	861	794	806	807
8	809	985	874	846	737	789
9	864	981	765	849	824	799
10	950	1025	792	934	773	731
11	906	591	797	801	813	839
12	845	998	873	811	803	793
13	818	820	727	800	789	811
14	788	864	911	796	829	765
15	873	906	763	822	827	787
Promedio	889			807		
Desv. Std.	64			19		
%CV	7.21 %			2.30 %		

Tabla G.5: Resultados ensayos de dureza Vickers M.3-V.2 (3.0% Mo 2.0% V).

M.3 V.2 – 3.0% Mo 2.0% V						
Ensayo	Microdureza Vickers 200 [g] – [HV0.2]			Microdureza Vickers 2000 [g] – [HV2.0]		
N°	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 1	Zona 2	Zona 3
1	686	810	721	756	781	732
2	894	747	792	728	803	727
3	874	648	720	723	792	766
4	776	662	723	734	800	811
5	817	625	770	729	782	713
6	680	802	703	774	806	767
7	778	845	761	754	711	695
8	796	595	777	804	792	733
9	844	654	723	784	737	707
10	921	734	657	749	752	760
11	780	780	720	726	753	739
12	829	688	654	751	790	755
13	769	561	713	709	767	764
14	824	726	673	770	744	736
15	899	631	600	725	786	720
Promedio	741			754		
Desv. Std.	33			17		
%CV	4.44 %			2.26 %		

Anexo H. Datos propiedades mecánicas y resistencia al desgaste

Tabla H.1: Resumen valores acumulativos promedio muestra M.1.

Distancia (m)	Pérdida acumulativa de masa [g]	DE Pérdida de masa [g]	CV [%]	Pérdida acumulativa de volumen [mm ³]	DE Pérdida de volumen [mm ³]	CV [%]	Tasa de desgaste [mm ³ /m]	DE Tasa de desgaste [mm ³ /m]	CV [%]
0.00	0.0000	0.00000	0.00	0.0000	0.00000	0.00	0.0000	0.00000	0.00
700.22	0.0465	0.00501	10.77	6.0390	0.65052	10.77	0.0086	0.00093	10.77
1400.44	0.0923	0.00177	1.91	11.9827	0.22952	1.91	0.0086	0.00016	1.91
2100.66	0.1328	0.00303	2.28	17.2511	0.39334	2.28	0.0092	0.00019	2.28
2800.88	0.1732	0.00469	2.71	22.4892	0.60878	2.71	0.0080	0.00022	2.71
3501.10	0.2115	0.00453	2.14	27.4632	0.58806	2.14	0.0078	0.00017	2.14
4201.32	0.2480	0.00585	2.36	31.3766	0.75953	2.36	0.0077	0.00018	2.36

Tabla H.2: Resumen valores acumulativos promedio muestra M.1.5.

Distancia (m)	Pérdida acumulativa de masa [g]	DE Pérdida de masa [g]	CV [%]	Pérdida acumulativa de volumen [mm ³]	DE Pérdida de volumen [mm ³]	CV [%]	Tasa de desgaste [mm ³ /m]	DE Tasa de desgaste [mm ³ /m]	CV [%]
0.00	0.0000	0.00000	0.00	0.0000	0.00000	0.00	0.0000	0.00000	0.00
700.22	0.0474	0.00144	3.04	6.1558	0.18730	3.04	0.0088	0.00027	3.04
1400.44	0.0872	0.00584	6.70	11.3290	0.75908	6.70	0.0081	0.00054	6.70
2100.66	0.1287	0.00714	5.56	16.7143	0.92773	5.56	0.0080	0.00044	5.56
2800.88	0.1706	0.01066	6.25	22.1602	1.38458	6.25	0.0079	0.00049	6.25
3501.10	0.2097	0.00897	4.28	27.2339	1.16478	4.28	0.0078	0.00033	4.28
4201.32	0.2486	0.00877	3.53	32.2857	1.13864	3.53	0.0077	0.00027	3.53

Tabla H.3: Resumen valores acumulativos promedio muestra M.3.

Distancia (m)	Pérdida acumulativa de masa [g]	DE Pérdida de masa [g]	CV [%]	Pérdida acumulativa de volumen [mm ³]	DE Pérdida de volumen [mm ³]	CV [%]	Tasa de desgaste [mm ³ /m]	DE Tasa de desgaste [mm ³ /m]	CV [%]
0.00	0.0000	0.00000	0.00	0.0000	0.00000	0.00	0.0000	0.00000	0.00
700.22	0.0543	0.00356	6.55	7.0519	0.46172	6.55	0.0101	0.00066	6.55
1400.44	0.1034	0.01361	13.15	13.4329	1.76701	13.15	0.0096	0.00126	13.15
2100.66	0.1412	0.01129	8.00	18.3333	7.46600	8.00	0.0087	0.00070	8.00
2800.88	0.1792	0.00617	3.44	23.2771	0.80124	3.44	0.0083	0.00029	3.44
3501.10	0.2200	0.00178	0.81	28.5671	0.23098	0.81	0.0082	0.00007	0.81
4201.32	0.2576	0.00389	1.51	33.4545	0.50566	1.51	0.0080	0.00012	1.51

Tabla H.4: Resumen valores acumulativos promedio muestra M.3 V.1.

Distancia (m)	Pérdida acumulativa de masa [g]	DE Pérdida de masa [g]	CV [%]	Pérdida acumulativa de volumen [mm ³]	DE Pérdida de volumen [mm ³]	CV [%]	Tasa de desgaste [mm ³ /m]	DE Tasa de desgaste [mm ³ /m]	CV [%]
0.00	0.0000	0.00000	0.00	0.0000	0.00000	0.00	0.0000	0.00000	0.00
700.22	0.0434	0.00293	6.74	5.6407	0.38026	6.74	0.0081	0.00054	6.74
1400.44	0.0846	0.00660	7.80	10.9870	0.85665	7.80	0.0078	0.00061	7.80
2100.66	0.1211	0.00579	4.76	15.7273	0.75239	4.76	0.0075	0.00041	4.76
2800.88	0.1595	0.00707	4.40	20.7100	0.91853	4.40	0.0074	0.00038	4.40
3501.10	0.1963	0.00898	4.52	25.4978	1.16611	4.52	0.0073	0.00042	4.52
4201.32	0.2314	0.00771	3.28	30.0476	1.00138	3.28	0.0072	0.00034	3.28

Tabla H.5: Resumen valores acumulativos promedio muestra M.3 V.2.

Distancia (m)	Pérdida acumulativa de masa [g]	DE Pérdida de masa [g]	CV [%]	Pérdida acumulativa de volumen [mm ³]	DE Pérdida de volumen [mm ³]	CV [%]	Tasa de desgaste [mm ³ /m]	DE Tasa de desgaste [mm ³ /m]	CV [%]
0.00	0.0000	0.00000	0.00	0.0000	0.00000	0.00	0.0000	0.00000	0.00
700.22	0.0558	0.00252	4.52	7.2468	0.32778	4.52	0.0103	0.00047	4.52
1400.44	0.1032	0.00416	4.03	13.4026	0.54002	4.03	0.0096	0.00039	4.03
2100.66	0.1486	0.00609	4.10	19.2987	0.79114	4.10	0.0092	0.00038	4.10
2800.88	0.1998	0.01139	6.00	24.6450	1.47963	6.00	0.0088	0.00053	6.00
3501.10	0.2341	0.00825	3.53	30.3983	1.07206	3.53	0.0097	0.00031	3.53
4201.32	0.2758	0.00628	2.28	35.8225	0.81584	2.28	0.0085	0.00019	2.28

Tabla H.6: Distribución porcentual de área de carburos.

Muestra	Carburos pequeños (<2500 μm ²) [%]	Carburos Medianos (2500 – 10000 μm ²) [%]	Carburos Grandes (>10000 μm ²) [%]	Matriz [%]
M.1	13.59	9.72	9.89	66.81
M.1.5	14.62	8.58	9.61	67.20
M.3	15.28	8.62	5.27	70.83
M.3 V.1	21.49	4.54	3.70	70.27
M.3 V.2	16.22	8.22	5.85	69.71

Tabla H.7: Resultados ensayos de dureza Rockwell C.

Muestras	Dureza Rockwell C [HRC]				
	1,0% Mo	1,5% Mo	3,0% Mo	3,0% Mo 1,0% V	3,0% Mo 2,0% V
Ensayo 1	57.5	64.0	62.0	62.0	58.0
Ensayo 2	63.5	61.0	63.0	59.0	56.5
Ensayo 3	64.0	61.0	56.0	55.0	59.0
Ensayo 4	63.5	64.0	63.5	62.0	58.5
Ensayo 5	64.0	64.0	64.0	63.0	60.0
Promedio	62.5	62.8	61.7	60.2	58.4
Desv. Std.	2.8	1.6	3.3	3.3	1.3
CV [%]	4.48	2.55	5.35	5.48	2.23

Tabla H.8: Resultados ensayos de impacto Charpy.

Muestras	Energía absorbida por la probeta [J]						
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 2	Ensayo 4	Promedio	Desv. Standar	CV [%]
Mo.1,0	1.080	0.937	0.806	1.026	0.962	0.120	12.44
Mo.1,5	0.730	0.852	0.707	0.863	0.788	0.081	10.27
Mo.3,0	0.737	0.804	0.648	0.710	0.725	0.065	8.92
Mo.3,0 V.1,0	0.895	0.730	0.683	0.701	0.752	0.097	12.91
Mo.3,0 V.2,0	0.677	0.812	0.734	0.888	0.778	0.092	11.83