

ESTUDIO DE LOS MECANISMOS DE DESGASTE ABRASIVO EN ENSAYOS DE
LABORATORIO Y CAMPO DE FUNDICIONES BLANCAS AL ALTO CROMO

LUIS ALFREDO ACEVEDO SUAREZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA

2019

ESTUDIO DE LOS MECANISMOS DE DESGASTE ABRASIVO EN ENSAYOS DE
LABORATORIO Y CAMPO DE FUNDICIONES BLANCAS AL ALTO CROMO

LUIS ALFREDO ACEVEDO SUAREZ

Trabajo de grado: Proyecto de investigación para optar al título de Ingeniero
Metalúrgico

Director:

Dr. CRISTIAN CAMILO VIÁFARA ARANGO

Doctor en Ingeniería Mecánica

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA

2019

DEDICATORIA

A mis padres que han sido mi apoyo constante,
mi motor para nunca rendirme.
A toda mi familia que ha estado conmigo en todo
momento.

AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero Cristian Camilo Viáfara Arango, por su orientación, apoyo, entendimiento, paciencia y disposición siempre para resolver dudas e inconvenientes.

A la Profa Geralda Cristina Durães de Godoyo por su cordialidad, por sus conocimientos brindados y por su recibimiento en el grupo de investigación de Modificação e Caracterização de Superfícies de la Universidad Federal de Minas Gerais.

A Patricia por su ayuda, colaboración y conocimientos brindados con el MEB en los laboratorios de la Universidade Federal de Minas Gerais.

A los estudiantes Dimas Pacheco y Claudio Oliveira miembros del grupo de investigación de Modificação e Caracterização de Superfícies por su recibimiento y orientación.

A todos los profesores de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica por la formación y las enseñanzas impartidas.

A los técnicos de la escuela de Ingeniería Metalúrgica: Sergio, Domingo, Ambrosio, Javier, Mario y Oscar por su orientación, disposición y ayuda a lo largo de mi carrera universitaria.

*A Paula Mercedes por su apoyo incondicional durante mi pregrado.
A Karol G, Brayán O y Jhon A por ser parte de la búsqueda y de los resultados.*

CONTENIDO

	pág
INTRODUCCIÓN	15
1 OBJETIVOS	16
1.1 OBJETIVO GENERAL	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	17
2.1 SISTEMA TRIBOLÓGICO	17
2.2 MECANISMOS DE DESGASTE	18
2.3 MICROMEKANISMOS DE DESGASTE ABRASIVO	20
2.4 RÉGIMEN DE DESGASTE ABRASIVO	21
3 DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL	22
3.1 ADQUISICIÓN DE IMÁGENES CON EL MEB	23
3.2 ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES DE DESGASTE	24
3.2.1 Clasificación según la morfología superficial y nivel de rugosidad.	24
3.2.3 Clasificación según la presencia de corte.	26
3.2.4 Clasificación según el nivel de deformación superficial.	26
3.2.5 Papel desempeñado por los carburos.	27

3.2.6 Clasificación según el nivel de agrietamiento superficial.	28
3.2.7 Clasificación según la presencia de abrasivo en la superficie de desgaste.	28
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
4.1 FUNDICIÓN FBCRMO	30
4.2 FUNDICIÓN FBCrMoNb	32
4.3 FUNDICIÓN FBCrMoB	34
4.4 FUNDICIÓN FBCrMoNbB	36
5 CONCLUSIONES	40
BIBLIOGRAFÍA	41
ANEXOS	43

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Resumen de las características principales de las superficies FBCrMo sometidas a las cinco condiciones de desgaste.	31
Tabla 2. Resumen de las características principales de las superficies FBCrMoNb sometidas a las cinco condiciones de desgaste.	33
Tabla 3. Resumen de las características principales de las superficies FBCrMoB sometidas a las cinco condiciones de desgaste.	35
Tabla 4. Resumen de las características principales de las superficies FBCrMoNbB sometidas a las cinco condiciones de desgaste.	37
Tabla 5. Mecanismos de desgaste predominante para cada condición de desgaste y la clasificación según la severidad del desgaste.....	39

LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1. Representación gráfica de un tribosistema y sus elementos. Fuente: Tomado y adaptado de [13].	18
Figura 2. Representación gráfica de los cuatro mecanismos de desgaste. Fuente: Tomado y adaptado de [13].	18
Figura 3. Micromecanismos de desgaste por abrasión. Fuente: tomado y adaptado de [5].	20
Figura 4. Representación esquemática de las cinco condiciones variables a las cuales fueron sometidas las probetas durante los ensayos de desgaste.	23
Figura 5. Micrografías electrónicas de la fundición FBCrMoNbB 100/130 tomadas en el modo de a) electrones secundarios y b) electrones retrodispersados.	24
Figura 6. Micrografías electrónicas de las superficies desgastadas a) FBCrMoNbB 100/45, b) FBCrMoB 100/130 y c) FBCrMo 50/45.	25
Figura 7. Micrografía electrónica de la superficie desgastada FBCrMoNb 50/45. .	25
Figura 8. Micrografía electrónica de la superficie desgastada FBCrMoNb-Campo.	26
Figura 9. Micrografías electrónicas de las superficies desgastadas a) FBCrMoNb-Campo, b) FBCrMoNb 50/45 y c) FBCrMo 100/130.	27

Figura 10. Micrografía electrónica de la superficie de desgaste FBCrMoNb 100/130.
.....27

Figura 11. Micrografías electrónicas de las superficies de desgaste a) FBCrMo
50/130, b) FBCrMoNb 100/130 y c) FBCrMoNb 50/45.28

Figura 12. Muestra FBCrMo 50/130 con aproximadamente un 27% de superficie con
abrasivo calculada con el software ImageJ.29

ANEXOS

pág

Anexo A Caracterización de materiales y ensayos de desgaste.....	43
Anexo B. Espectros EDS de las zonas contrastadas.....	48
Anexo C. Micrografías electrónicas de las superficies desgastadas.....	49

RESUMEN

- TITULO:** ESTUDIO DE LOS MECANISMOS DE DESGASTE ABRASIVO EN ENSAYOS DE LABORATORIO Y CAMPO DE FUNDICIONES BLANCAS AL ALTO CROMO *
- AUTOR:** ACEVEDO SUAREZ, LUIS ALFREDO**
- PALABRAS CLAVE:** DESGASTE ABRASIVO, FUNDICIÓN BLANCA, NIOBIO, BORO, ALTO CROMO, MECANISMOS DE DESGASTE.

Este trabajo tiene como objetivo estudiar los mecanismos de desgaste abrasivo mediante el análisis de imágenes tomadas con el microscopio electrónico de barrido sobre superficies previamente desgastadas, en ensayos de laboratorio y campo, de cuatro tipos de fundiciones blancas al alto cromo, aleadas con: molibdeno, molibdeno y niobio, molibdeno y boro y finalmente, aleada con molibdeno, niobio y boro. Las fundiciones desgastadas en laboratorio se encuentran divididas en cuatro tipos debido las diferentes configuraciones de desgaste a las que fueron sometidas variando el tamaño de partícula y carga aplicada. La muestra del ensayo en campo solo presenta una condición en la cual fue evaluada. Se elaboró una metodología para tomar y clasificar las micrografías electrónicas de superficies desgastadas según varios factores representativos como: la morfología superficial y el nivel de rugosidad, los surcos, la presencia de corte, el nivel de deformación superficial, el papel desempeñado por los carburos, el nivel de agrietamiento y la presencia de abrasivo en la superficie. Se efectuó la caracterización de la severidad del desgaste basado en los resultados obtenidos de la clasificación. Los resultados mostraron que la fundición aleada con molibdeno, niobio y boro presentó un mejor desempeño frente al desgaste abrasivo en campo y frente a condiciones severas de desgaste en comparación con las demás fundiciones estudiadas.

*Trabajo de grado (modalidad, proyecto de investigación)

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

Director: Dr. Cristian Camilo Viáfara Arango, Ingeniero Mecánico.

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF THE ABRASIVE WEAR MECHANISMS IN LABORATORY AND FIELD TRIALS OF HIGH-CHROMIUM WHITE CAST IRONS *

AUTHOR: ACEVEDO SUAREZ, LUIS ALFREDO**

KEYWORDS: ABRASIVE WEAR, WHITE CAST IRON, NIOBIUM, BORON, HIGH-CHROMIUM, WEAR MECHANISMS.

The objective of this work is to study the abrasive wear mechanisms by analyzing images taken with the scanning electron microscope on previously worn surfaces, in laboratory and field tests, of four types of high chromium white cast irons, alloyed with: molybdenum, molybdenum and niobium, molybdenum and boron and finally, alloyed with molybdenum, niobium and boron. The cast irons worn in the laboratory are divided into four types due to the different configurations of wear to which they were subjected by varying the particle size and applied load. The test sample in the field only presents a condition in which it was evaluated. A methodology was developed to take and classify the electronic micrographs of worn surfaces according to several representative factors such as: the surface morphology and the level of roughness, the grooves, the presence of microcutting, the level of superficial deformation, the role played by the carbides, the level of cracking and the presence of abrasive on the surface. The characterization of the severity of wear was based on the results obtained from the classification. The results showed that cast iron alloy with molybdenum, niobium and boron showed a better performance against abrasive wear in the field and against severe wear conditions compared to other cast irons studied.

*Trabajo de grado (modalidad, proyecto de investigación)

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

Director: Dr. Cristian Camilo Viáfara Arango, Ingeniero Mecánico.

INTRODUCCIÓN

En industrias como la minera y la manufacturera, el buen desempeño de sus materiales mejora la economía y la eficiencia de sus procesos [6]. De este modo, es necesario el estudio del desgaste como principal fuente del deterioro y de la pérdida de funcionalidad de los materiales, acarreado consigo un avance en el desarrollo tecnológico a nivel industrial.

Las fundiciones blancas de alto contenido de cromo presentan gran resistencia al desgaste abrasivo debido a una alta fracción volumétrica y dureza de sus carburos, por lo cual, son ampliamente utilizadas en industrias como la minera para la fabricación de placas de desgaste, siendo estas piezas las que presentan fallas por desgaste prematuro [7]. Estas industrias en conjunto con centros de investigación le apuestan al mejoramiento de sus fundiciones blancas de alto cromo, las cuales, han sido foco de varias investigaciones en las que evalúan la adición de elementos como el niobio, el molibdeno y el boro. Estos elementos permiten obtener una resistencia superior al desgaste bajo condiciones de desgaste abrasivo, obteniendo industrialmente un mejor costo beneficio en sus estructuras [3,8,10,11].

Actualmente en el grupo de investigación de Modificação e Caracterização de Superfícies de la Univerdade Federal de Minas Gerais se estudian cuatro tipos de fundiciones blancas con alto contenido de cromo, siendo este el material base y una de las fundiciones a estudiar, las otras tres fundiciones fueron aleadas con: niobio, boro y niobio más boro respectivamente [9,10]. Sin embargo, no se tiene claridad sobre el mecanismo de desgaste predominante en cada aleación. En este trabajo se realizó un análisis de las superficies de desgaste obtenidas en ensayos de laboratorio y campo mediante el microscopio electrónico de barrido (MEB) con el fin

de caracterizar los mecanismos de desgaste presentes y contribuir a la selección adecuada del material.

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar los mecanismos de desgaste por medio del análisis de imágenes de superficies desgastadas en fundiciones blancas aleadas de alto cromo sometidas a ensayos de desgaste en laboratorio y campo.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar las superficies de desgaste de las fundiciones blancas al alto cromo mediante el uso del MEB.
2. Identificar los mecanismos de desgaste abrasivo teniendo en cuenta la literatura científica especializada.
3. Relacionar los mecanismos de desgaste con la variación del tamaño de partícula y de la carga aplicada.

2 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

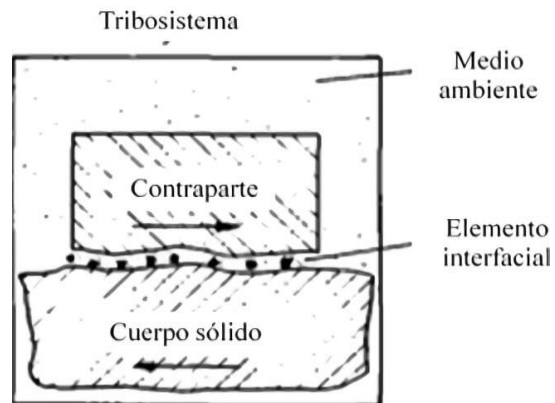
La tribología es el estudio de la fricción, el desgaste y la lubricación. La fricción es el fenómeno por el cual se disipa la energía a partir del contacto y del movimiento relativo entre dos cuerpos. El desgaste es el daño superficial producto de la fricción, y la lubricación el proceso que logra disminuir el desgaste y la fricción entre superficies. Los conceptos mencionados brindan las bases para definir un sistema tribológico [13].

2.1 SISTEMA TRIBOLÓGICO

Un sistema tribológico o tribosistema es aquel modelo con el cual se representa una interacción entre dos partes en contacto, para poder realizar un análisis de forma aislada [13]. En la figura 1 se presenta un esquema, en donde se observa de forma sencilla un sistema tribológico y las partes fundamentales que lo constituyen.

Cabe resaltar que cada parte o elemento del tribosistema tendrá un efecto sobre el comportamiento tribológico. Un tribosistema presentará cambios con el tiempo obteniendo como resultado un óptimo funcionamiento, con una baja tasa de desgaste, o una disminución considerable de su vida útil, a causa de un aumento en la velocidad de desgaste. El estudio de cada tribosistema es necesario, dado que los resultados obtenidos no se pueden generalizar para otros estudios, por semejantes que sean sus elementos [13]

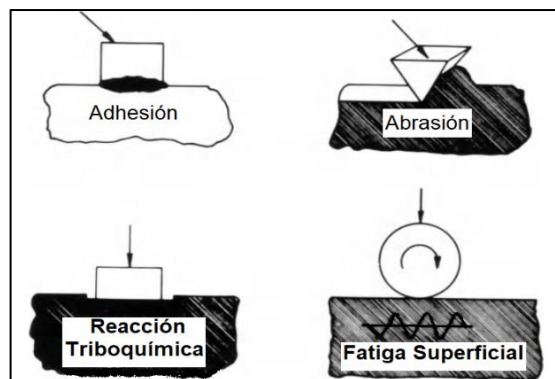
Figura 1. Representación gráfica de un tribosistema y sus elementos. Fuente: Tomado y adaptado de [13].



2.2 MECANISMOS DE DESGASTE

El desgaste en los materiales se presenta de distintas formas y han sido clasificadas por múltiples autores a través de los años. Sin embargo, existe una clasificación otorgada por el Instituto Alemán de Normalización (DIN) [9]. Esta clasificación comprende cuatro mecanismos principales de desgaste: adhesión, abrasión, fatiga superficial y reacción triboquímica [13]. En la figura 2 se observa una representación básica de cada uno.

Figura 2. Representación gráfica de los cuatro mecanismos de desgaste. Fuente: Tomado y adaptado de [13].



Es necesario tener en cuenta la posibilidad de hallar más de un mecanismo de desgaste en un tribosistema, dado al número de variables presentes y su evolución en el tiempo. Sin embargo, existirá uno dominante frente a los demás [13].

Adhesión: Es el mecanismo de desgaste caracterizado por la formación de juntas localizadas de adhesión y la ruptura de estas, producto del movimiento relativo y de la presión ejercida entre las superficies en contacto. De esta manera los materiales en contacto se deforman plásticamente hasta tal punto de que se presenta la adhesión y su rompimiento, para luego haber transferencia de material de una superficie a otra.

Abrasión: Es el mecanismo por el cual ocurre deformación plástica o corte en el material. Puede producirse por dos elementos poseedores de una mayor dureza, protuberancias presentes en alguno de los cuerpos en contacto o por partículas en la interface de los cuerpos en movimiento relativo.

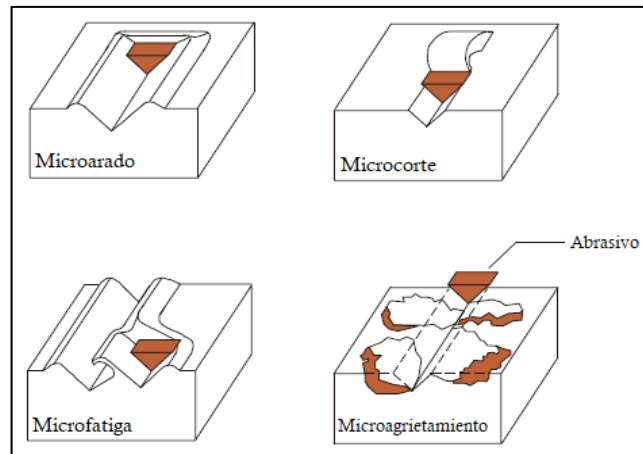
Fatiga superficial: Este mecanismo se caracteriza por someter un material a cargas cíclicas y estas a su vez generan esfuerzos que terminan en la formación de grietas y en el desprendimiento de material.

Reacción triboquímica: Este proceso de desgaste consiste en la remoción mecánica y continua de una capa de material modificada por su reacción con el ambiente, entre los dos cuerpos que presentan movimiento relativo. Las superficies fuertemente unidas son las más susceptibles a presentar daño por desgaste triboquímico, por ejemplo, los alabes de turbinas fijados al rotor, clutches, eslabones de cadenas, placas de muelles entre otros.

2.3 MICROMECHANISMOS DE DESGASTE ABRASIVO

Debido a la interacción entre las partículas o asperezas duras y el material blando, el desgaste abrasivo se subdivide en los siguientes micromecanismos: microarado (microploughing), microcorte, microfractura y fatiga acelerada por deformaciones repetidas [5,13], representados esquemáticamente en la figura 3.

Figura 3. Micromecanismos de desgaste por abrasión. Fuente: tomado y adaptado de [5].



El microarado abrasivo causa desplazamiento del material, formando surcos a su paso y no se presenta pérdida de masa. Al actuar simultánea o sucesivamente partículas abrasivas, la superficie del material puede ser surcada al lado de otros surcos repetidamente y desprenderse material por fatiga, dando origen a la microfata. En el microcorte, el abrasivo funciona como una herramienta de corte común donde pequeñas porciones de material superficial son removidas y se producen pérdidas de material de igual volumen al surco producido. Finalmente, el microagrietamiento ocurre cuando el abrasivo suministra esfuerzos altamente concentrados sobre la superficie del material, especialmente en superficies de materiales frágiles [6,1].

Existen factores que modifican el micromecanismo dominante en un sistema. Para que ocurra una transición entre el microarado y el microcorte va a depender de las propiedades mecánicas del material desgastado, como su dureza, y de las condiciones externas como el ángulo de ataque que forma el abrasivo con la superficie o el coeficiente de fricción. El tamaño de partícula abrasiva influye críticamente la transición de desgaste predominante por microcorte a microagrietamiento [13] y entre predominante por microcorte a microarado [2].

2.4 RÉGIMEN DE DESGASTE ABRASIVO

Los micromecanismos descritos en el inciso anterior operan de forma dominante en un sistema tribológico que presenta desgaste abrasivo, donde al poseer una tasa de desgaste constante, se puede caracterizar como un régimen severo o moderado, con una tasa alta o baja de desgaste, respectivamente [6].

La operación de los regímenes de desgaste depende de factores como la carga normal, la dureza del abrasivo, la dureza del material, el tamaño del abrasivo entre otros factores del sistema tribológico [2]. Al modificar la magnitud de uno de estos factores puede provocar la transición entre los regímenes de desgaste severo y moderado [12].

3 DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL

La presente investigación fue realizada por el autor en base al trabajo que desarrolló durante su intercambio académico con el departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiales de la Universidad Federal de Minas Gerais en el periodo 2018-I donde el autor trabajo en conjunto con el grupo de investigación Modificação e Caracterização de Superfícies a cargo de la profesora Geralda Cristina Durães de Godoy, analizando superficies de desgaste de fundiciones blancas durante el desarrollo de los trabajos de maestría y doctorado de los estudiantes Dimas de Andrade Pacheco y Cláudio Gonçalves de Oliveira, respectivamente [9,10], miembros del grupo de investigación mencionado.

La caracterización de los materiales y descripción de los ensayos de desgaste realizados se presentan en el anexo A.

La figura 4 presenta los cuatro tipos de fundiciones estudiadas, FBCrMo*, FBCrMoB**, FBCrMoNb*** y FBCrMoNbB****, y las condiciones variables del ensayo en laboratorio con un código de dos valores para la simplificación de términos durante el desarrollo del proyecto. El primer valor hace referencia al tamaño del abrasivo (número de malla) y el segundo valor representa la carga aplicada en newton. En el ensayo en campo las probetas de cada aleación fueron colocadas en una placa de desgaste de una tolva que permite el transporte de mineral de hierro en una empresa minera del estado de Minas Gerais en Brasil durante 60 días.

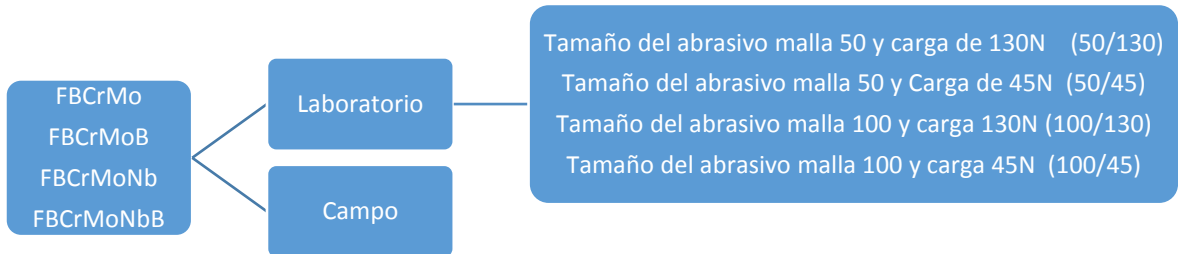
* (FBCrMo) Fundición blanca de alto cromo.

** (FBCrMoNb) Fundición blanca de alto cromo aleada con niobio.

*** (FBCrMoB) Fundición blanca de alto cromo aleada con boro.

**** (FBCrMoNbB) Fundición blanca de alto cromo aleada con niobio y boro.

Figura 4. Representación esquemática de las cinco condiciones variables a las cuales fueron sometidas las probetas durante los ensayos de desgaste.

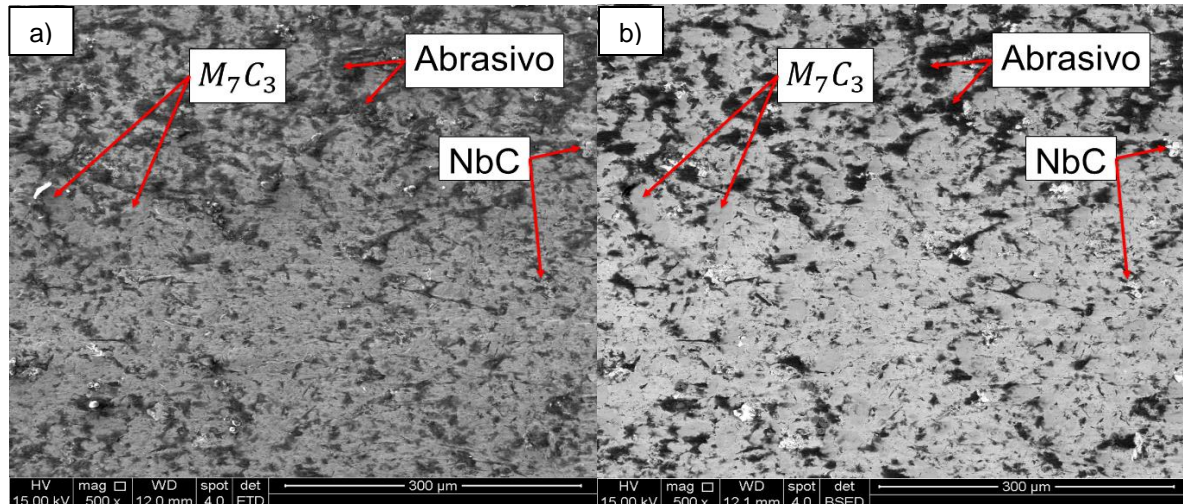


3.1 ADQUISICIÓN DE IMÁGENES CON EL MEB

Para el análisis de las superficies desgastadas se llevó a cabo la preparación de las probetas desgastadas en el Laboratorio de Tribología de la UFMG, realizando una limpieza ultrasónica de las probetas y posteriormente se tuvo acceso a la técnica de MEB en el centro de microscopio electrónica de la UFMG, donde se efectuó el siguiente procedimiento para la toma de imágenes de las superficies desgastadas. Se tomaron 5 imágenes a aumentos de 100x en diferentes regiones de la muestra para obtener una visión general de la superficie y 5 imágenes a 500x. Se empleó el modo de electrones retrodispersados más espectroscopía de rayos x de energía dispersa (EDS) para la identificación del material presente en la superficie, y se tomaron 2 imágenes a aumentos de 1000x, 2000x y 5000x, en regiones representativas del desgaste, para un total de 320 imágenes considerando las 5 condiciones analizadas.

La figura 5 presenta un ejemplo de la identificación de especies químicas en las imágenes de la fundición FBCrMoNbB 100/130 donde se identificó la presencia de carburos de hierro, carburos de niobio y abrasivo, los espectros EDS correspondientes se presentan en el anexo B.

Figura 5. Micrografías electrónicas de la fundición FBCrMoNbB 100/130 tomadas en el modo de a) electrones secundarios y b) electrones retrodispersados.

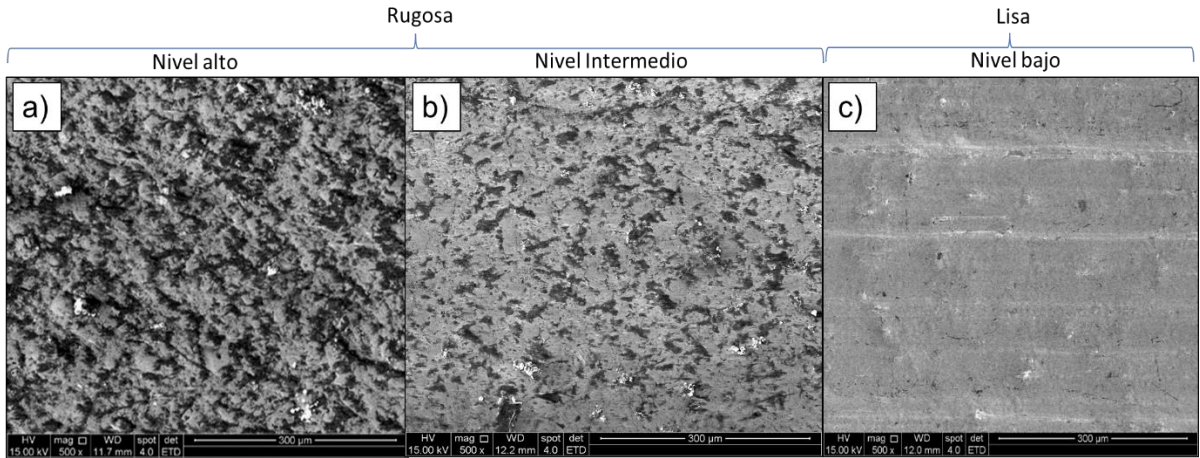


3.2 ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES DE DESGASTE

Se realizó un estudio detallado de cada imagen y se seleccionaron para este trabajo aquellas de buena calidad, representatividad y que dieron aporte significativo al análisis. Las imágenes se caracterizaron según varios factores descritos a continuación.

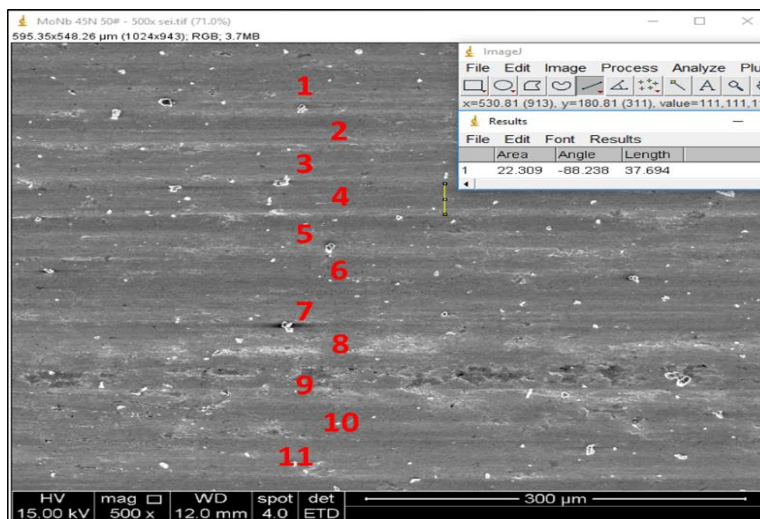
3.2.1 Clasificación según la morfología superficial y nivel de rugosidad. Se clasificaron las muestras según su rugosidad y dependiendo de la profundidad se clasificó como alta, intermedia o baja (si la superficie es lisa). La figura 6 presenta las superficies representativas para cada nivel.

Figura 6. Micrografías electrónicas de las superficies desgastadas a) FBCrMoNbB 100/45, b) FBCrMoB 100/130 y c) FBCrMo 50/45.



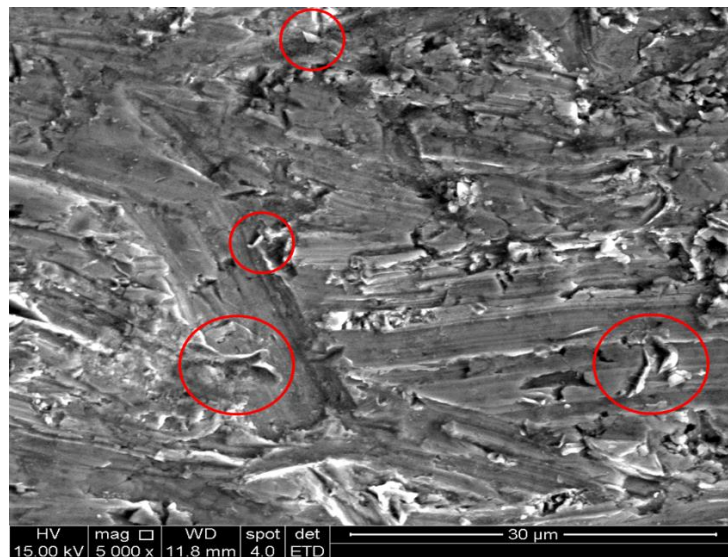
3.2.2 Clasificación según los surcos. El segundo factor fue la cantidad y ancho de los surcos presentes en las muestras, para lo cual se consideró en imágenes a 500x de aumento, alta cantidad de surcos si presenta más de 10, media entre 5 a 10 y baja con 5 surcos o menos y se midió el ancho de los surcos con el software libre ImageJ. La figura 7 es un ejemplo del conteo y medición de surcos en una de las muestras.

Figura 7. Micrografía electrónica de la superficie desgastada FBCrMoNb 50/45.



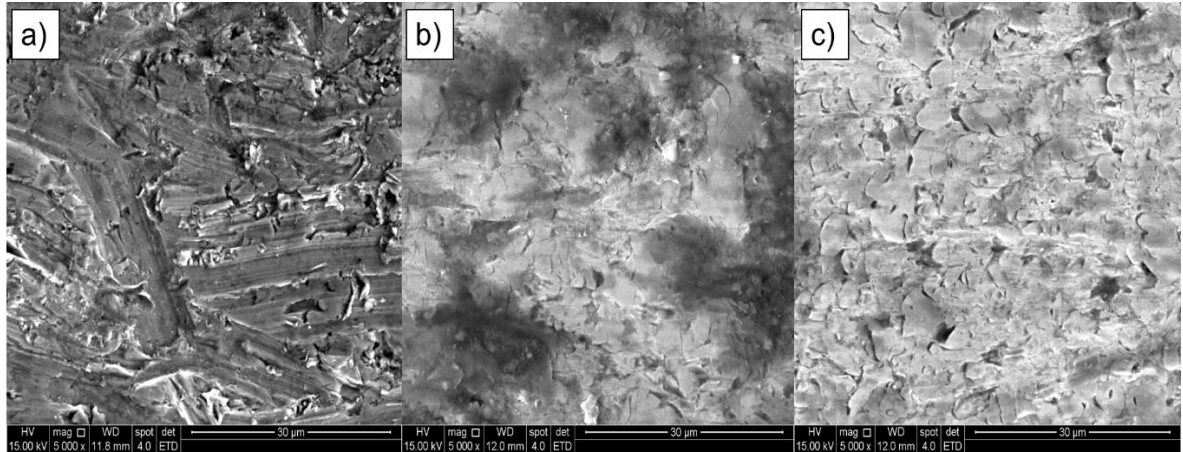
3.2.3 Clasificación según la presencia de corte. El tercer factor, la presencia de corte, donde en imágenes a 5000x de aumento se consideró un nivel intermedio la presencia de entre 3 a 6 evidencias de corte. La figura 8 presenta la micrografía de una muestra desgastada con 4 evidencias de corte en la superficie, clasificada como poseedora de un alto nivel de corte

Figura 8. Micrografía electrónica de la superficie desgastada FBCrMoNb-Campo.



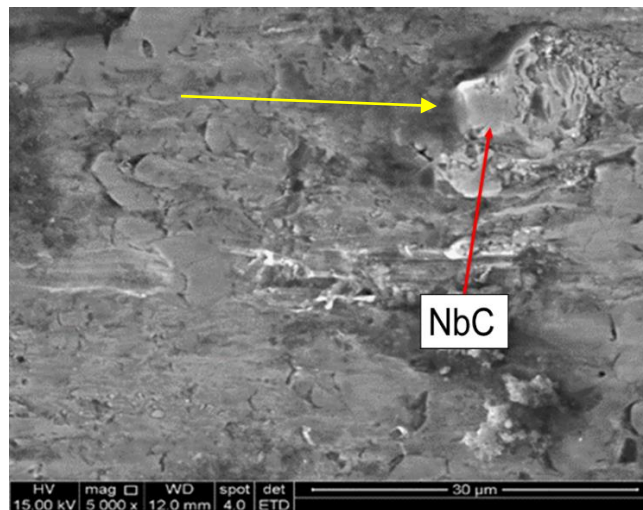
3.2.4 Clasificación según el nivel de deformación superficial El cuarto factor fue la severidad en la deformación superficial, para la cual, dependiendo del área deformada en una imagen a 5000x se tomó como referencia de alta deformación, la muestra FBCrMoNb Campo, para un nivel intermedio se consideró como referencia la muestra FBCrMo 50/45 y para un nivel bajo se consideró como referencia la muestra FBCrMo 100/130. la figura 9 presenta las superficies representativas para cada nivel.

Figura 9. Micrografías electrónicas de las superficies desgastadas a) FBCrMoNb-Campo, b) FBCrMoNb 50/45 y c) FBCrMo 100/130.



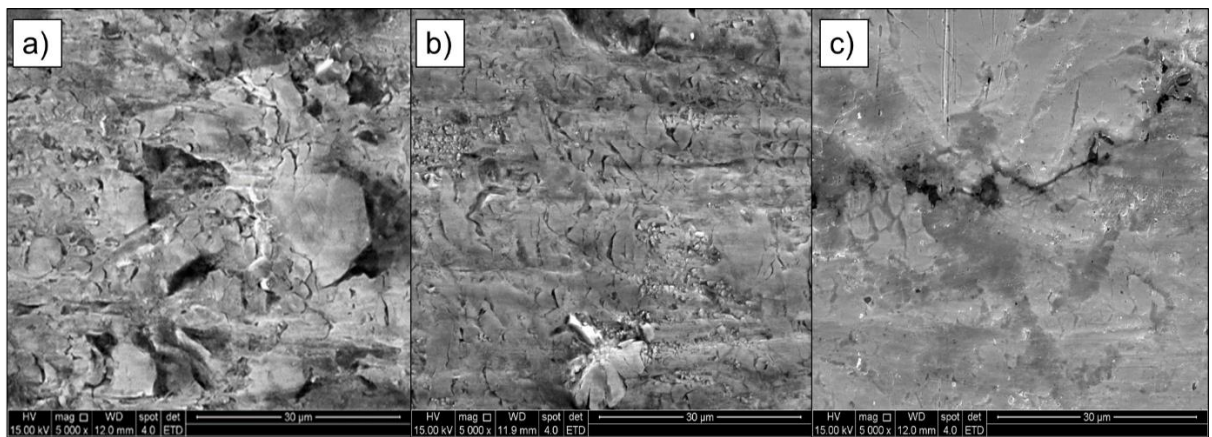
3.2.5 Papel desempeñado por los carburos. Para describir el papel desempeñado por los carburos en los ensayos de desgaste, se buscó en las imágenes la presencia de carburos actuando como barrera contra el abrasivo al evitar la continuidad de un surco (figura 10 flecha amarilla).

Figura 10. Micrografía electrónica de la superficie de desgaste FBCrMoNb 100/130.



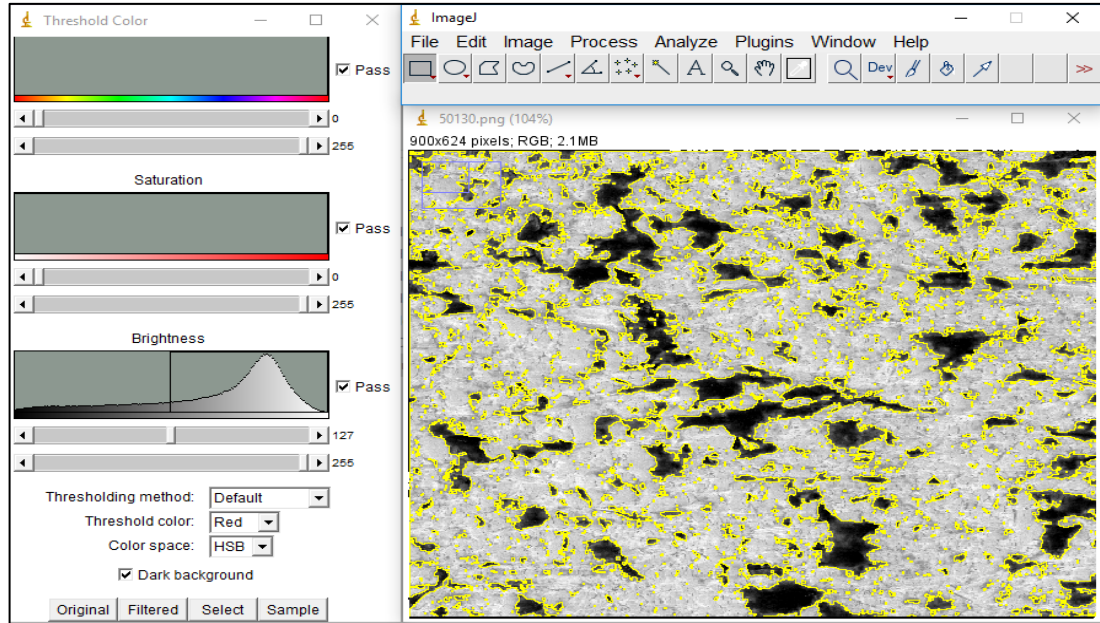
3.2.6 Clasificación según el nivel de agrietamiento superficial. El sexto factor fue la severidad en el agrietamiento, se observó en imágenes a 5000x de aumento y se consideró como referencia la muestra FBCrMo 50/130, FBCrMoNb 100/130 y FBCrMoNb 50/45 para un nivel Alto, intermedio y bajo respectivamente. La figura 11 presenta las superficies representativas para cada nivel.

Figura 11. Micrografías electrónicas de las superficies de desgaste a) FBCrMo 50/130, b) FBCrMoNb 100/130 y c) FBCrMoNb 50/45.



3.2.7 Clasificación según la presencia de abrasivo en la superficie de desgaste. Finalmente, el séptimo factor fue la presencia de abrasivo en la superficie de desgaste donde se realizó un análisis de las imágenes de desgaste obtenidas en modo de electrones retrodispersados, con el software libre ImageJ para calcular el área de las regiones contrastadas como se evidencia en la figura 12. Se consideró alta presencia de abrasivo si las regiones oscuras superan un 20% del área en la imagen, se consideró un nivel intermedio entre un 10% a 20% de área oscura y nivel bajo si el área oscura fue menor al 10%.

Figura 12. Muestra FBCrMo 50/130 con aproximadamente un 27% de superficie con abrasivo calculada con el software ImageJ.



Al terminar de clasificar cada tipo de fundición en las 5 condiciones de desgaste a las que fueron sometidas, se realizó una tabla que permitió la síntesis de las características mencionadas para obtener finalmente cuatro tablas correspondientes a las 4 fundiciones y se elaboró una tabla general que permitió la síntesis y caracterización de los mecanismos de desgaste.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La presentación de los resultados está dividida en 4 partes correspondientes a cada fundición analizada, algunas de las imágenes de las fundiciones se exponen en el anexo C.

4.1 FUNDICIÓN FBCrMo

La tabla 1 presenta un resumen de las características principales de las superficies desgastadas correspondientes a la fundición FBCrMo sometida a las cinco condiciones de desgaste. En la condición 50/45, la fundición presenta una superficie lisa y con poca rugosidad, sin embargo, al aumentar la carga, es decir, sometiendo la fundición a la condición más severa en laboratorio (50/130), aumenta el desgaste en la superficie al evidenciarse un agrietamiento severo en la matriz y una rugosidad alta.

La condición 100/130 presenta un tamaño de abrasivo menor y se evidencia un buen comportamiento frente al desgaste, con agrietamiento intermedio, baja rugosidad y baja presencia de abrasivo. Al mantener el tamaño de partícula pequeño y disminuye la carga, es decir, al presentarse la condición 100/45 sus características evidencian un aumento en la rugosidad, presentando nuevamente un agrietamiento severo.

En el ensayo en campo la fundición presentó poca resistencia al desgaste evidenciando un alto microagrietamiento, surcos aleatorios con una mayor deformación plástica, presentó alta rugosidad y una considerable presencia de abrasivo.

Tabla 1. Resumen de las características principales de las superficies FBCrMo sometidas a las cinco condiciones de desgaste.

Fundición	Condición	Morfología superficial	Nivel de rugosidad	Surcos		Corte	Deformación	Agrietamiento	Función de los carburos	Presencia de abrasivo
				Cantidad	Ancho promedio (μm)					
FBCrMo	50/130	Rugosa	Alto	Sin presencia		Sin presencia	Baja	Alto	M_7C_3 no tiene un papel importante	Alta
	50/45	Lisa	Bajo	Intermedio	10	Sin presencia	Baja	Intermedio		Baja
	100/130	Lisa	Bajo	Intermedio	10	Sin presencia	Baja	Intermedio		Baja
	100/45	Rugosa	Alto	Sin presencia		Intermedio	Intermedia	Alto		Alta
	Campo	Rugosa	Alto	Alta	10	Intermedio	Intermedia	Alto		Intermedia

4.2 FUNDICIÓN FBCrMoNb

La tabla 2 presenta un resumen de las características de desgaste en las superficies de la fundición FBCrMoNb sometida a las cinco condiciones. Al aumentar la carga, y pasar de la condición 50/45 a la condición más severa en laboratorio 50/130, se evidencia un aumento significativo del desgaste con un aumento en el microagrietamiento, presencia de surcos y una alta rugosidad con poca deformación plástica.

En las condiciones con tamaño de abrasivo pequeño (100/130) y (100/45) se observa un mejor comportamiento frente al desgaste comparándolo con la fundición FBCrMo. Estas condiciones presentan una menor rugosidad, deformación y microagrietamiento de la matriz, gracias a la presencia de carburos de niobio, los cuales evitaron un desgaste mayor en su superficie al actuar como barrera para el abrasivo (figura 10).

El comportamiento de la fundición desgastada en campo mejoró en comparación con la fundición FBCrMo, presentando un menor microagrietamiento y una mayor deformación plástica.

Tabla 2. Resumen de las características principales de las superficies FBCrMoNb sometidas a las cinco condiciones de desgaste.

Fundición	Condición	Morfología superficial	Nivel de rugosidad	Surcos		Corte	Deformación	Agrietamiento	Función de los carburos	Presencia de abrasivo
				Cantidad	Ancho promedio (μm)					
FBCrMoNb	50/130	Rugosa	Alto	Intermedia	20	Sin presencia	Baja	Alto	NbC actúan como barrera para el abrasivo (pocas zonas observables)	Intermedia
	50/45	Lisa	Bajo	Alta	40	Sin presencia	Baja	Bajo		Baja
	100/130	Rugosa	Intermedio	Sin presencia		Sin presencia	Baja	Intermedio		Baja
	100/45	Lisa	Bajo	Baja	20	Sin presencia	Baja	Intermedio		Baja
	Campo	Rugosa	Intermedio	Alta	15	Intermedio	Alta	Intermedio		Intermedia

4.3 FUNDICIÓN FBCrMoB

En la tabla 3 se presenta un resumen de las características de desgaste en las superficies de la fundición FBCrMoB sometida a las cinco condiciones. La fundición, al aumentar la carga y pasar de la condición 50/45 a la condición más severa en laboratorio 50/130, evidencia un menor desgaste en comparación a la fundición FBCrMoNb y la fundición FBCrMo. Presentó un menor microagrietamiento y rugosidad superficial además de baja presencia de abrasivo en la superficie.

En las condiciones con tamaño de abrasivo pequeño (100/130) y (100/45) presenta un desgaste mayor, al ser poseedor de una alta rugosidad, baja deformación y microagrietamiento de la matriz.

El comportamiento de la fundición desgastada en campo es similar al comportamiento de la fundición FBCrMoNb, con deformación plástica alta y microagrietamiento intermedio.

Tabla 3. Resumen de las características principales de las superficies FBCrMoB sometidas a las cinco condiciones de desgaste.

Fundición	Condición	Morfología superficial	Nivel de rugosidad	Surcos		Corte	Deformación	Agrietamiento	Función de los carburos	Presencia de abrasivo
				Cantidad	Ancho promedio (μm)					
FBCrMoB	50/130	Lisa	Bajo	Baja	15	Sin presencia	Baja	Intermedio	Alta presencia de $(Fe, Cr)_7C_3 - M_7C_3$ que actúan como barrera para el abrasivo	Baja
	50/45	Lisa	Bajo	Baja	15	Sin presencia	Intermedia	Sin presencia		Intermedia
	100/130	Rugosa	Intermedio	Sin presencia		Sin presencia	Baja	Intermedio		Alta
	100/45	Rugosa	Alto	Sin presencia		Sin presencia	Baja	Intermedio		Alta
	Campo	Rugosa	Intermedio	Alta	10	Intermedio	Alta	Intermedio		Intermedia

4.4 FUNDICIÓN FBCrMoNbB

La tabla 4 presenta un resumen de las características de desgaste en las superficies de la fundición FBCrMoNbB sometida a las cinco condiciones. La fundición, al aumentar la carga y pasar de la condición 50/45 a la condición más severa en laboratorio 50/130. Presentó un menor desgaste en comparación a la fundición FBCrMoNb y la fundición FBCrMo. En la condición de laboratorio 50/130 presentó un menor microagrietamiento y una menor rugosidad superficial, además de presencia de abrasivo baja en la superficie. Este comportamiento fue similar al comportamiento de la fundición FBCrMoB.

En las condiciones con tamaño de abrasivo pequeño (100/130) y (100/45) se observa un desgaste mayor en comparación con las otras condiciones. Las condiciones (100/130) y (100/45) presentan una rugosidad alta, deformación baja y microagrietamiento de la matriz intermedio.

La condición FBCrMoNbB Campo presenta un agrietamiento bajo con deformación plástica alta por lo que se considera como poseedor de buena resistencia al desgaste en la condición Campo.

Tabla 4. Resumen de las características principales de las superficies FBCrMoNbB sometidas a las cinco condiciones de desgaste.

Fundición	Condición	Morfología superficial	Nivel de rugosidad	Surcos		Corte	Deformación	Agrietamiento	Función de los carburos	Presencia de abrasivo
				Cantidad	Ancho promedio (μm)					
FBCrMoNbB	50/130	Rugosa	Intermedio	Intermedia	17	Sin presencia	Baja	Intermedio	NbC y $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3 - \text{M}_7\text{C}_3$ actúan como barrera para el abrasivo	Baja
	50/45	Lisa	Bajo	Baja	10	Intermedio	Intermedia	Sin presencia		Alta
	100/130	Rugosa	Intermedio	Sin presencia		Sin presencia	Baja	Intermedio		Intermedia
	100/45	Rugosa	Alto	Sin presencia		Sin presencia	Baja	Intermedio		Alta
	Campo	Rugosa	Intermedio	Alta	10	Intermedio	Alta	Bajo		Intermedia

Después de caracterizar las imágenes y recopilar la información en las 4 tablas, se puede observar un comportamiento similar en las características de cada fundición, estableciendo relaciones entre ellas y las distintas condiciones. De esta forma se caracterizó como un comportamiento de desgaste severo aquellas que cumplen con las siguientes condiciones:

- a) Agrietamiento severo.
- b) Agrietamiento intermedio con:
 - i. Morfología superficial rugosa
 - ii. Rugosidad alta o intermedia
 - iii. Presencia de abrasivo alta o intermedia

Con base en lo anterior sí en determinada condición no se presentaron las características necesarias descritas para caracterizar como un comportamiento de desgaste severo, se clasifica como desgaste moderado. La tabla 5 presenta los mecanismos de desgaste predominantes y la clasificación según la severidad en el desgaste como severo o moderado además de características como el papel desempeñado por los carburos.

Teniendo en cuenta que la condición de laboratorio más crítica es (50/130) se puede observar en esta condición un mejor desempeño de las fundiciones FBCrMoNbB y FBCrMoB. Además, se observa en los ensayos de campo que la fundición FBCrMoNbB presenta un mejor comportamiento frente al desgaste, haciendo de esta fundición el material ideal para la fabricación de placas de desgaste de tolvas que transporten mineral de hierro.

Las fundiciones FBCrMo y la fundición FBCrMoNb presentan mayor resistencia al desgaste abrasivo en las condiciones (100/130) y (100/45), las cuales presentan un abrasivo de menor tamaño. De las dos fundiciones, la fundición FBCrMoNb posee

un mejor desempeño frente al desgaste abrasivo tanto en laboratorio como en campo.

Tabla 5. Mecanismos de desgaste predominante para cada condición de desgaste y la clasificación según la severidad del desgaste.

Fundición	Tipo de desgaste	Condición	Mecanismos de desgaste		Desempeño de los carburos
			Predominante	Secundarios	
FBCrMo	Severo	50/130	Microagrietamiento	-	M_7C_3 no tiene un papel representativo
		100/45	Microagrietamiento		
		Campo	Microarado	Microagrietamiento	
	Moderado	50/45	Microarado	Microagrietamiento	
100/130					
FBCrMoNb	Severo	50/130	Microagrietamiento	Microarado	NbC mejoró las condiciones frente al desgaste disminuyendo la severidad del microagrietamiento y actuando como barrera para el abrasivo.
		Campo	Microarado	Microagrietamiento, Microcorte	
	Moderado	50/45	Microarado	Microagrietamiento	
		100/130	Microagrietamiento	-	
		100/45		Microarado	
FBCrMoB	Severo	100/130	Microagrietamiento	-	M_7C_3 mejoró el comportamiento de barrera frente al desgaste abrasivo en comparación con FBCrMo.
		100/45			
		Campo	Microarado	Microagrietamiento, Microcorte	
	Moderado	50/130	Microagrietamiento	Microarado	
		50/45	Microarado	-	
FBCrMoNbB	Severo	100/130	Microagrietamiento	-	NbC y M_7C_3 , mejoró el comportamiento frente a condiciones severas de desgaste y empero con tamaño de abrasivo pequeño.
		100/45	Microagrietamiento		
	Moderado	50/130	Microagrietamiento	Microarado	
		50/45	Microarado	Microcorte	
		Campo	Microarado	Microagrietamiento, Microcorte	

5 CONCLUSIONES

A partir del proyecto realizado se pueden indicar las siguientes conclusiones:

- Se destaca la importancia del análisis de imágenes de superficies desgastadas para una mejor caracterización e interpretación de los resultados de desgaste, brindando información cualitativa de gran valor que pueden predecir el comportamiento de las fundiciones frente a los ensayos de desgaste en laboratorio y campo.
- Se identificaron parámetros de gran importancia para la caracterización cualitativa de las superficies de desgaste en fundiciones blancas al alto cromo sometidas a ensayos de desgaste abrasivo.
- Se desarrollo una metodología para analizar de forma cualitativa las superficies de desgaste en fundiciones blancas al alto cromo que puede aplicarse para el análisis de desgaste abrasivo en otros materiales. Adicionalmente dicha metodología podría extenderse al análisis de superficies desgastadas con otros tipos de desgaste.
- La fundición FBCrMoNbB presentó el mejor comportamiento frente a desgaste abrasivo en campo y en condiciones severas de laboratorio, por lo cual, se recomienda el uso de este material para la fabricación de placas de desgaste.

BIBLIOGRAFÍA

1. CORONADO MARIN, Jhon Jairo; SINATORA, Amilton. Particle size effect on abrasion resistance of mottled cast iron with different retained austenite contents, *Wear*, 2009, vol.267. p. 2077–2082.
2. CORONADO MARIN, Jhon Jairo; SINATORA, Amilton. Effect of abrasive size on wear of metallic materials and its relationship with microchips morphology and wear micromechanisms Part 1. *Wear*, 2012, vol.271. p. 1804-1812.
3. CORREAA, R; BEDOLLA-JACUINDEA, A; ZUNO-SILVAB J; CARDOSOC, E; MEJÍAA, I; Effect of boron on the sliding wear of directionally solidified high-chromium white irons. *Wear*, 2009, vol.267. p. 495-504.
4. Verschleiß; Begriffe, Systemanalyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes. DIN 50320:1979-12. Beuth Verlag, Berlin 1979.
5. GONZALEZ HERNANDEZ, Andres Giovanni. Estudio de la influencia de las propiedades físicas y mecánicas en el comportamiento tribológico de recubrimientos duros para herramientas de corte y procesamiento de polietileno. Tesis de magister en ingeniería: Universidad de Antioquia. Medellín. Facultad de Ingeniería, 2008.
6. HUTCHINGS, I.M. Tribology: friction and wear of engineering materials, Edward Arnold, London, 1992. ISBN 0-340-56184-x
7. MACHADO, Ana Paula. Estudo do desgaste erosivo em aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos. Tesis de Magíster en Ingeniería Química: Universidad Federal de Minas Gerais. Escuela de Ingeniería, 2017.
8. OLIVEIRA, Claudio. Desenvolvimento e caracterização de liga de ferro fundido branco alto cromo com adição de nióbio para uso em mineração. Tesis de

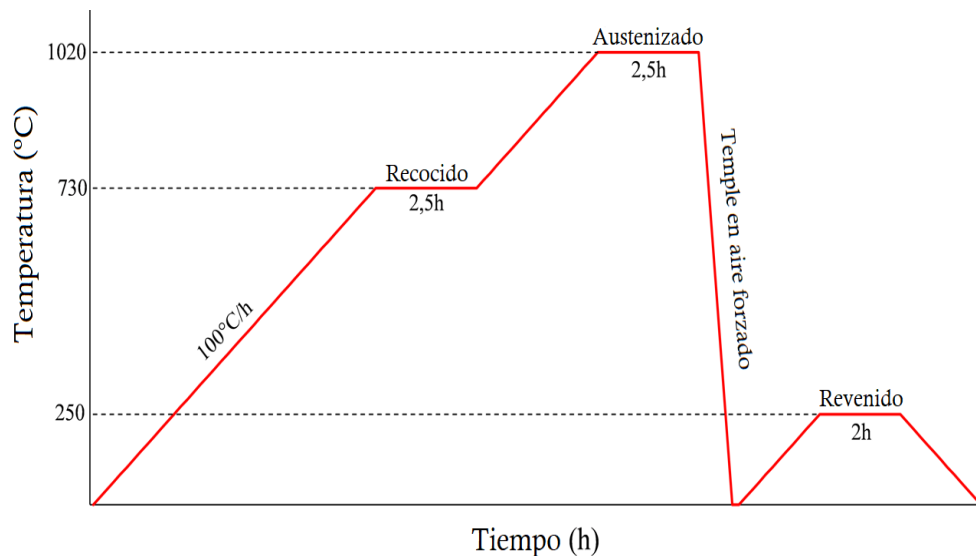
Magíster en Engenharia de Materiais: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2015.

9. OLIVEIRA, Claudio. Estudo do desgaste abrasivo de ferro fundido branco alto cromo com adição de nióbio e boro em testes de laboratório e campo. Tesis de doctorado en Engenharia Metalúrgica e Minas: Universidade Federal de Minas Gerais, Escuela Materiais e de Minas, En proceso.
10. PACHECO, Dimas. Caracterização estrutural e propriedades mecânicas e tribológicas de ferro fundido branco alto cromo com adição de nióbio, Tesis de maestria en Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais, Escuela Materiais e de Minas, 2018.
11. PENAGOS, J.J; PEREIRA, J.I; MACHADO, P.C; ALBERTIN, E; SINATORA, A. SYNERGETIC effect of niobium and molybdenum on abrasion resistance of high chromium cast irons, *Wear*, 2017, vol.376-377, p. 983-982
12. VIÁFARA, Cristian. Transição no regime de desgaste por deslizamento dos aços: uma abordagem termodinâmica, Tesis de doctorado en Ingeniería Mecánica: Escola politécnica da universidade de são Paulo, Escola de ingenieria, 2010.
13. ZUM-GAHR, K.H. *Microstructure and Wear of Materials*, North Holland: Elsevier, 1987. ISBN: 9780080875743

ANEXOS

Anexo A Caracterización de materiales y ensayos de desgaste.

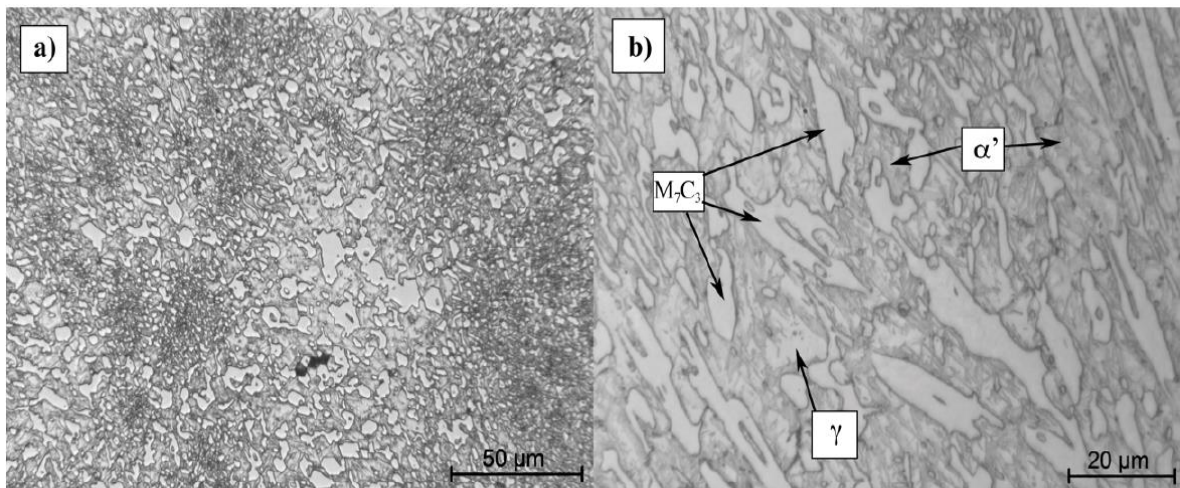
El tratamiento térmico de las muestras de acuerdo con la norma ASTM A532 siguiendo las etapas de: recocido a 730°C por 2,5 h; austenizado a 1020°C por 2,5 h; enfriamiento en aire forzado; y revenido a 250°C por 2 h [10]. La rampa de calentamiento y enfriamiento utilizado, excepto para el enfriamiento forzado, fue de 120°C/h [10]. El esquema del tratamiento térmico empleado en las fundiciones se presenta a continuación:



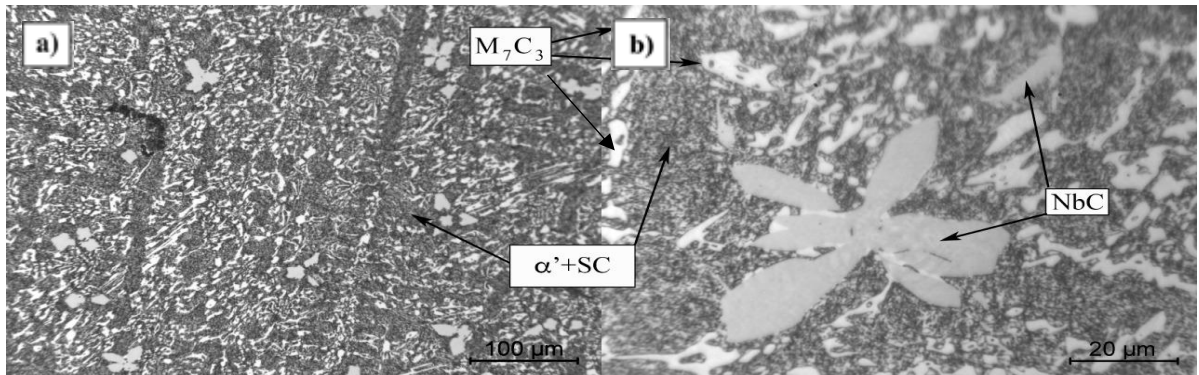
Los datos de macrodureza Vickers de los materiales ensayados se presentan en la tabla siguiente, los cuales fueron obtenidos con una carga aplicada de 50 kgf – 490 N y un tiempo de penetración de 15 s [9,10].

Material	Dureza, HV ₅₀
FBCrMo	844 ± 22
FBCrMoB	907 ± 29
FBCrMoNb	796 ± 48
FBCrMoNbB	883 ± 21

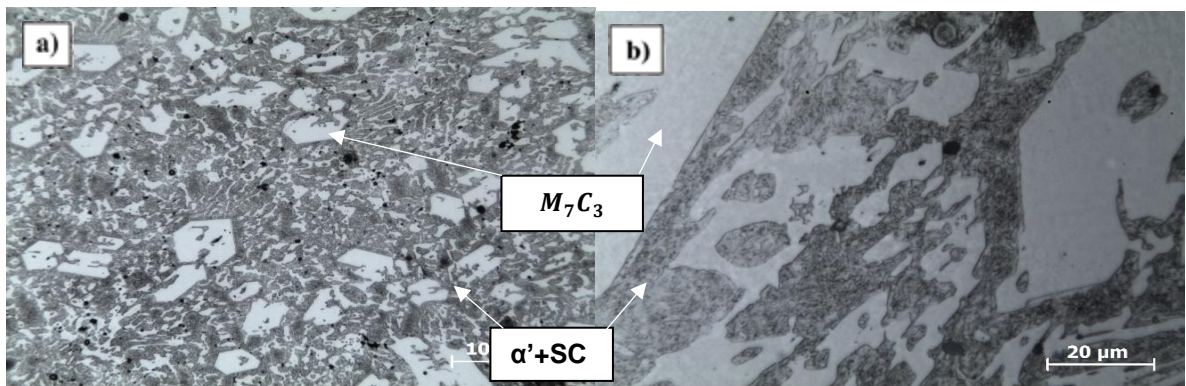
A continuación se presentan las micrografías obtenidas por microscopía óptica de la fundición FBCrMo tratada térmicamente. Se observa la presencia de agujas de martensita (α') y cementita (M_7C_3) en la matriz, además de regiones con presencia de austenita retenida (γ), a) tomada a 500x de aumento b) tomada a 1000x de aumento [10].



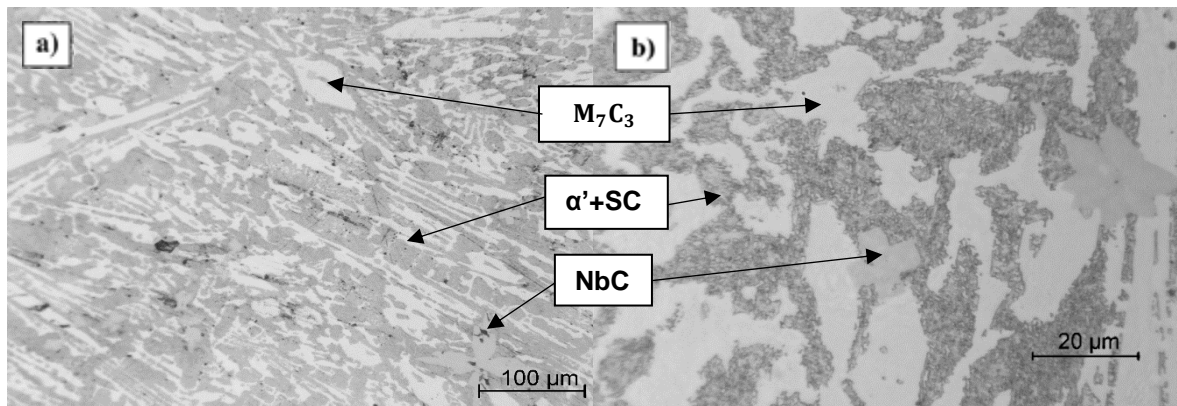
La siguiente imagen presenta las micrografías obtenidas por microscopía óptica de la fundición FBCrMoNb tratada térmicamente. Se identifica una matriz martensítica con presencia de cementita, carburos eutecticos (NbC) y carburos secundarios (SC), a) tomada a 500x de aumento b) tomada a 1000x de aumento [10].



A continuación se presentan las micrografías obtenidas por microscopía óptica de la fundición FBCrMoB tratada térmicamente. Se identifica una matriz martensítica con presencia de carburos secundarios y carburos ricos en cromo del tipo $(Fe, Cr)_7C_3 - M_7C_3$, llamado en adelante simplemente M_7C_3 , a) tomada a 500x de aumento b) tomada a 1000x de aumento.



La siguiente imagen presenta las micrografías obtenidas por microscopía óptica de la fundición FBCrMoNbB tratada térmicamente. Se identifica una matriz martensítica con presencia de carburos secundarios, carburos eutécticos de niobio y carburos ricos en cromo del tipo $(Fe, Cr)_7C_3 - M_7C_3$, a) tomada a 500x de aumento b) tomada a 1000x de aumento.



La composición química obtenida mediante Espectrometría Óptica de los cuatro tipos de fundiciones al alto cromo se puede observar en la tabla siguiente [9].

Aleación	%Fe	%C	%Cr	%Mn	%Si	%Ni	%Mo	%Nb	%B
FBCrMo	68,70	2,92	24,60	0,79	1,00	0,55	1,00	-	-
FBCrMoB	68,44	3,02	24,75	1,15	0,85	0,41	0,97	-	0,60
FBCrMoNb	66,35	2,92	24,75	0,83	0,82	0,43	1,05	2,35	-
FBCrMoNbB	66,08	2,87	25,01	0,71	0,93	0,45	1,13	2,34	0,62

Los ensayos de laboratorio se realizaron con el equipo de desgaste abrasivo de rueda de caucho con base en la norma ASTM G65 que se encuentra en el Departamento de Engenharia de Materiais del Centro Federal de Educación Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG). Los ensayos fueron realizados con arena brasilera estándar (ABNT NBR 7214) del Instituto de Pesquisas Tecnológicas del Estado de São Paulo (IPT).

La condición más severa se realizó con una carga de 130 N, duración de 90 min (6024 revoluciones y una distancia recorrida de 4088 m), un tamaño de abrasivo promedio malla 50 (500 µm) y con un caudal del abrasivo de 310 g/min. En la segunda configuración se modificó la carga a 45 N manteniendo igual las demás condiciones. En la tercera configuración se modificó nuevamente la carga a 130 N

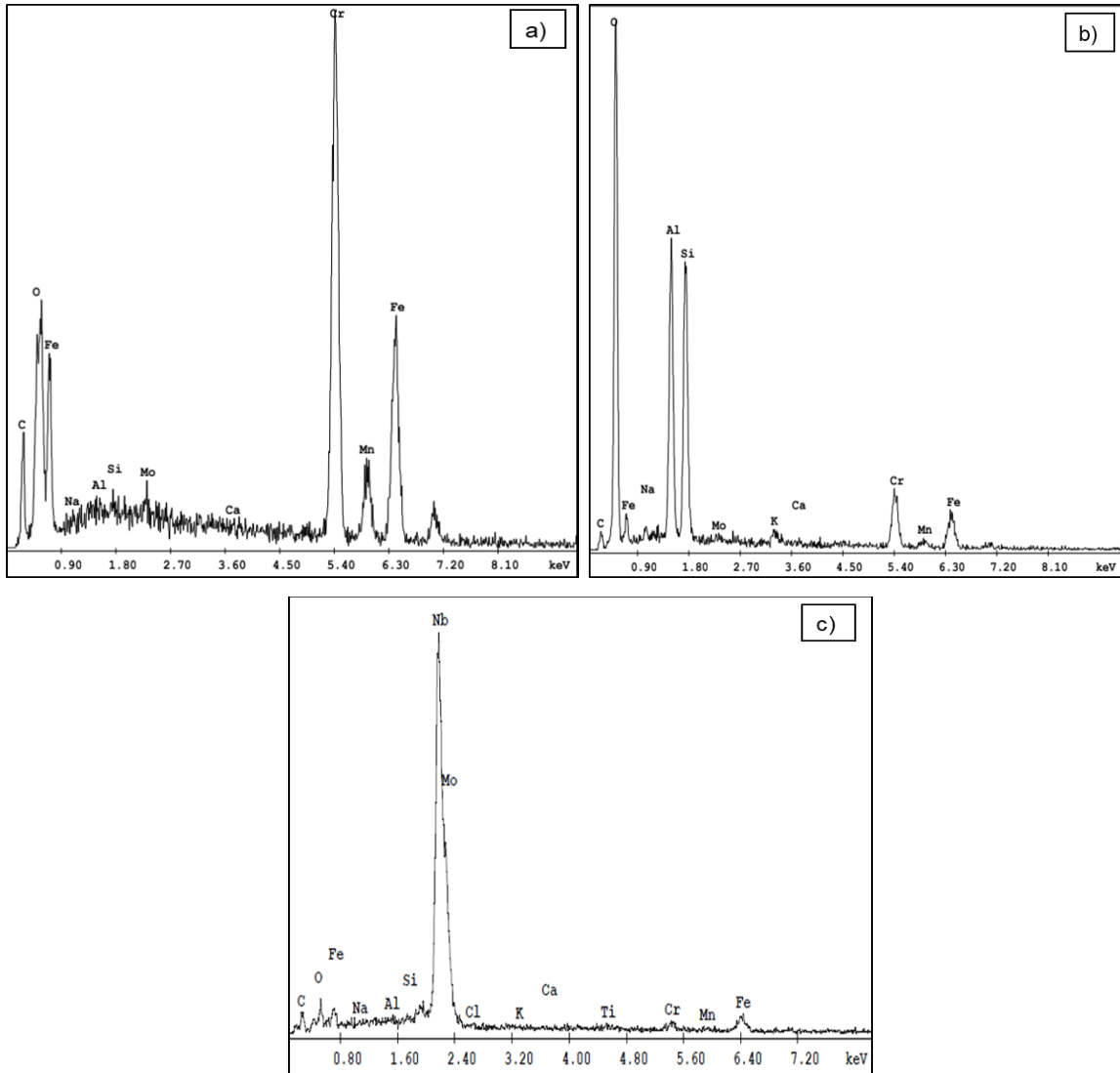
y el tamaño del abrasivo a uno de malla 100 (posee un tamaño promedio de 300 μm) y en la cuarta y última configuración se modificó la carga a 45 N y un taño de abrasivo malla 100 manteniendo igual las demás condiciones.

En los ensayos en campo las probetas de cada aleación fueron colocadas en una placa de desgaste de una tolva que permite el transporte de mineral de hierro en una empresa minera del estado de Minas Gerais en Brasil durante 60 días. La figura mostrada a continuación representa la posición de las probetas en la placa de desgaste y en la tolva, a) Tolva de traspaso minero. b) Posición de la placa de desgaste en la tolva, c) Placa de desgaste después de 60 días en operación [9].



Anexo B. Espectros EDS de las zonas contrastadas.

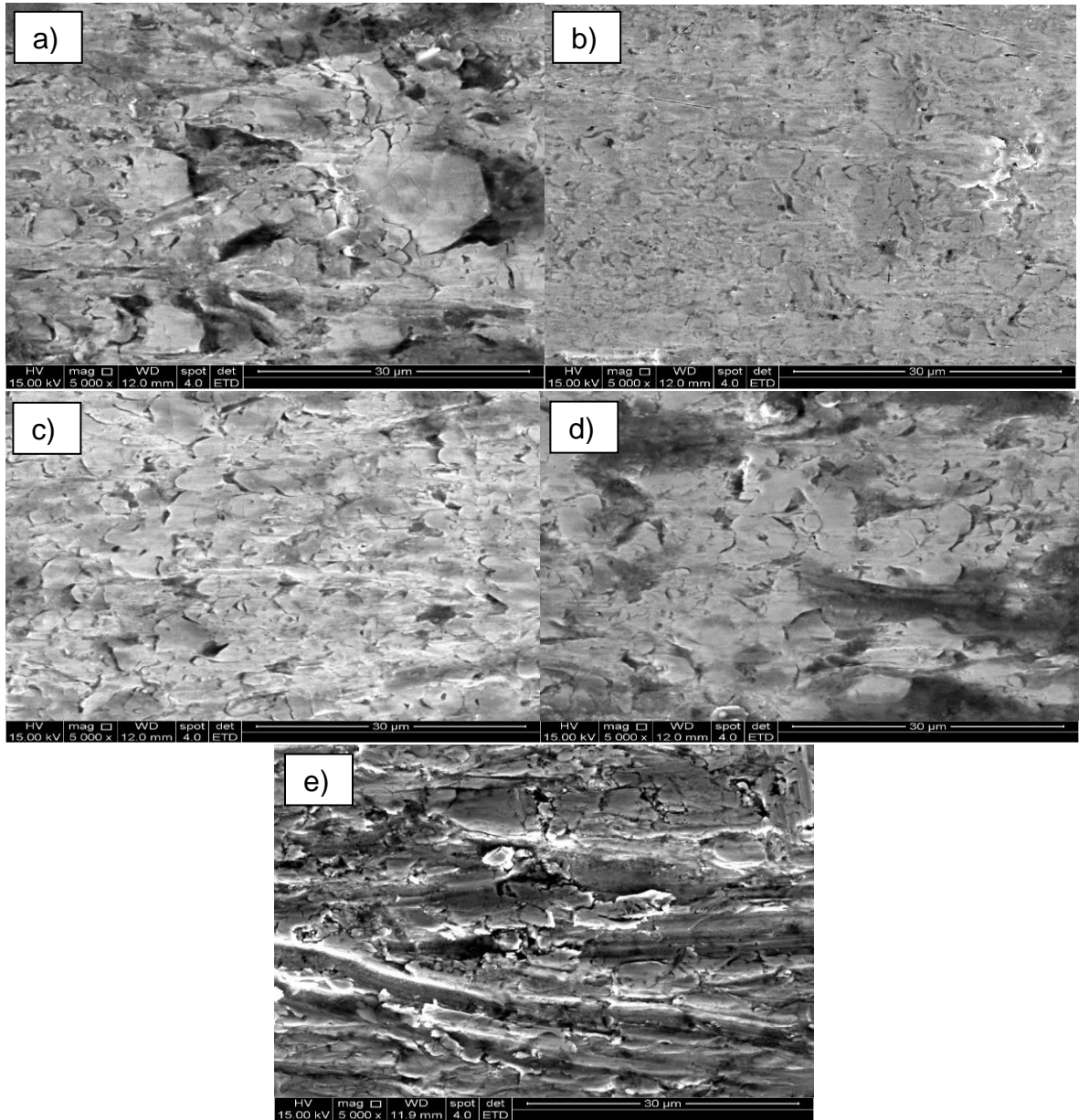
Espectros EDS de: a) Regiones grises con aspecto liso b) Regiones oscuras c) Regiones blancas



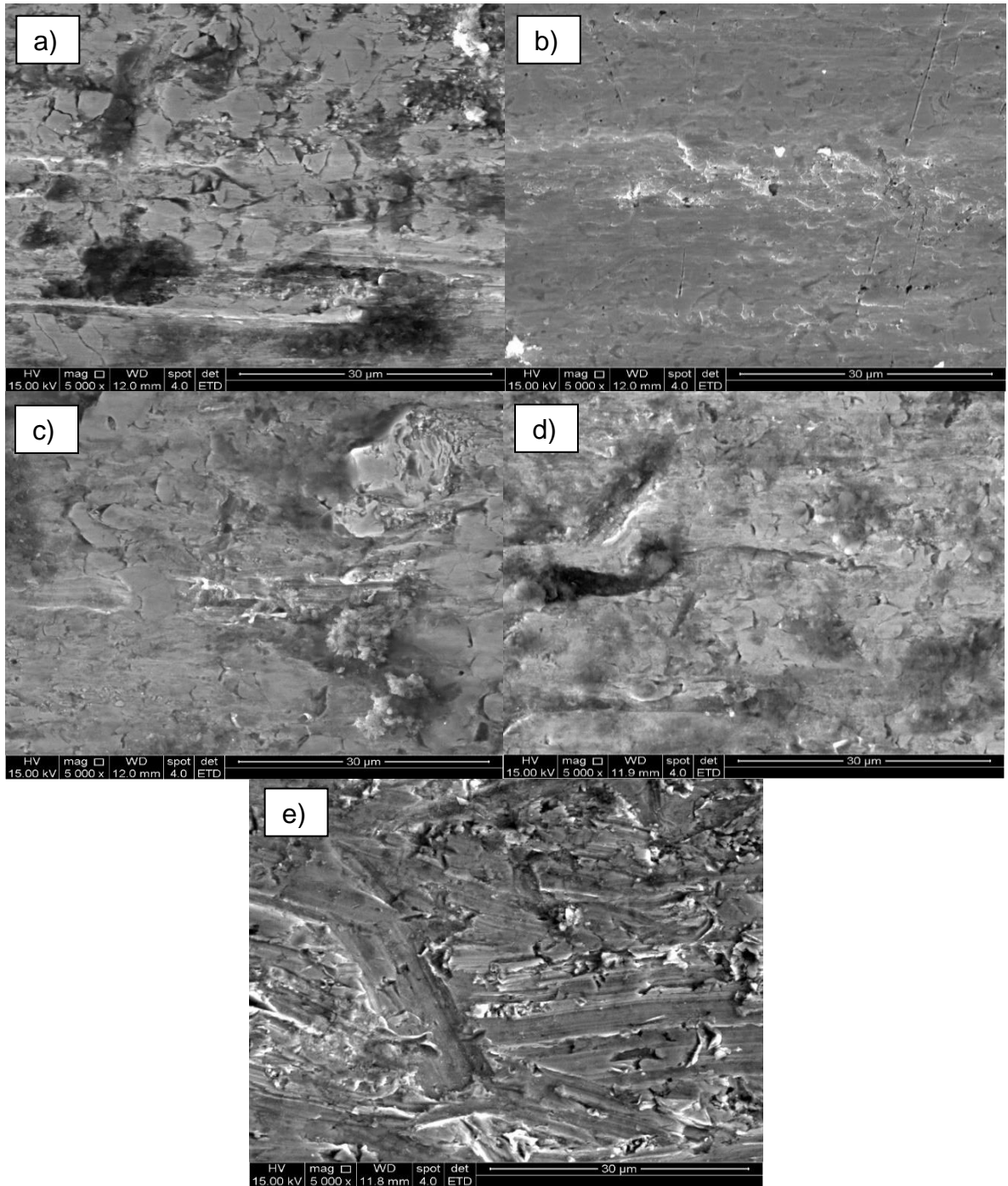
Anexo C Micrografías electrónicas de las superficies desgastadas.

Micrografías electrónicas de las superficies de desgaste con un aumento de 5000x

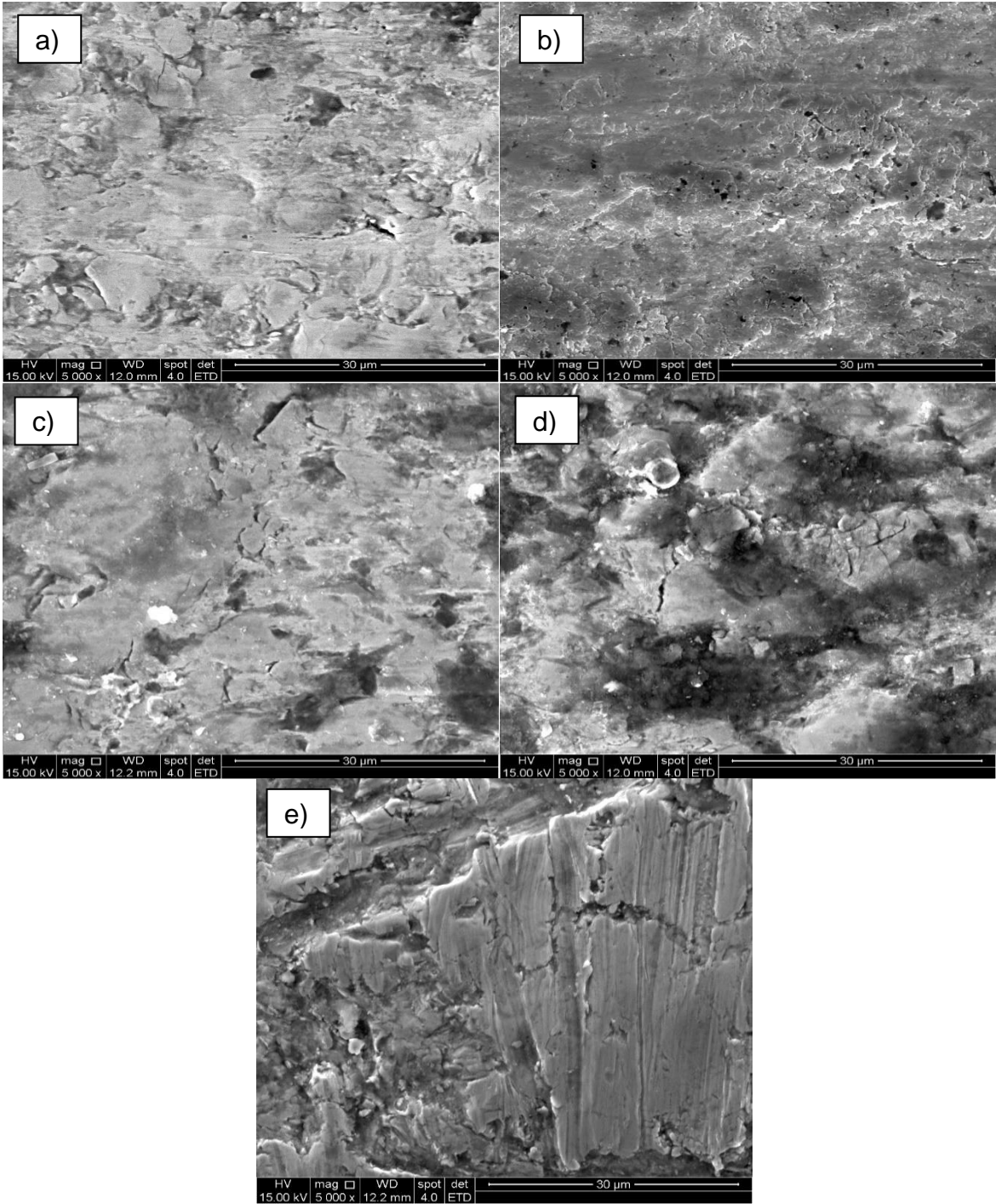
a) FBCrMo 50/130, b) FBCrMo 50/45, c) FBCrMo 100/130, d) FBCrMo 100/45 y e) FBCrMo-Campo:



Micrografías electrónicas de las superficies de desgaste con un aumento de 5000x
a) FBCrMoNb 50/130, b) FBCrMoNb 50/45, c) FBCrMoNb 100/130, d) FBCrMoNb
100/45 y e) FBCrMoNb-Campo:



Micrografías electrónicas de las superficies de desgaste con un aumento de 5000x
a) FBCrMoB 50/130, b) FBCrMoB 50/45, c) FBCrMoB 100/130, d) FBCrMoB 100/45
y e) FBCrMoB-Campo:



Micrografías electrónicas de las superficies de desgaste con un aumento de 5000x
a) FBCrMoNbB 50/130, b) FBCrMoNbB 50/45, c) FBCrMoNbB 100/130, d)
FBCrMoNbB 100/45 y e) FBCrMoNbB-Campo.

