



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE ZACATECAS
"FRANCISCO GARCIA SALINAS"



MAESTRIA EN CIENCIA E INGENIERIA DE LOS MATERIALES

**Desgaste de recubrimientos duros Fe-Cr-C, obtenidos a partir de
ferroaleaciones, con adiciones de niobio
y óxido de lantano.**

TESIS

Para obtener el título de:

Maestro en Ciencia e Ingeniería de los Materiales

Presenta

HERIBERTO IBARRA NARBÁEZ

DOCENTE:

DIRECTOR DE TESIS: DR. SERGIO HARO RODRÍGUEZ

Asesores:

Dr. Omero Alonso González

Dr. Simitrio Ignacio Maldonado Ruíz.

Asesor externo:

Dr. Dheerendra Kumar Dwivedi

ZACATECAS, ZAC. A 25 DE MAYO DEL 2021

DEDICATORIA

Este proyecto lo dedico:

A mis padres, por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida y por su apoyo incondicional a través del tiempo.

A mi pareja Rosalba Ramírez por impulsarme a ser mejor cada día y por ser mi gran apoyo en los momentos difíciles.

A mis hermanas y hermano por ser siempre una muestra de apoyo y cariño, por aconsejarme y por darme siempre un hombro en el cual apoyarme.

Finalmente, a los maestros, aquellos que sin duda marcaron cada etapa de mi camino como estudiante en la maestría.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a Dios por permitirme llegar con salud hasta este punto de mi vida y por darme la paz y la sabiduría para afrontar todas las adversidades.

A mis padres, Ma. Antonia Narváez y Gilberto Ibarra, que son parte fundamental de mi vida, ya que sin su apoyo nada hubiera sido posible; agradezco infinitamente sus consejos, su apoyo incondicional y por siempre tener palabras de aliento y motivación para lograr todo lo que me proponga

A mis profesores por compartirme sus conocimientos, por ser siempre una guía y una fuente de inspiración y admiración en esta travesía, al Dr. Sergio Haro Rodríguez por brindarme su apoyo y los recursos para la realización de esta Tesis.

Al Consejo Nacional De Ciencia Y Tecnología (CONACYT) por haberme apoyado económicamente durante 2 años con una beca de maestría para poder realizar mis estudios.

RESUMEN.

En la presente investigación se desarrollaron varias aleaciones para revestimiento duro, a base de ferroaleaciones, con adición de niobio y óxido de lantano (tierra rara), por el proceso de soldadura manual de arco metálico protegido (SMAW) con la técnica de colocación previa. El objetivo principal de la tesis fue la evaluación de la influencia de la adición de niobio y óxido de lantano en las características microestructurales, dureza, microdureza y desgaste seco deslizante.

Para la elaboración de recubrimientos duros se usaron ferroaleaciones como: Fe-39.6Cr-5.4C; Fe-66Nb y La_2O_3 en polvo. Se elaboraron tres grupos de recubrimientos, Fe-Cr-C, Fe-Cr-C-Nb y Fe-Cr-C-Nb con adición de óxido de lantano. El contenido de niobio experimentado fue de 1.5 y 3.2 por ciento en peso, mientras que el óxido de lantano se añadió en tres niveles: 2, 5 y 7 % en peso. La aleación Fe-14Cr-1.9C, se empleó como referencia en el estudio. El trabajo experimental se realizó en tres etapas: la elaboración del recubrimiento duro Fe-Cr-C, la incorporación de niobio y la adición de óxido de lantano.

La composición química de las aleaciones obtenidas para recubrimientos duros se obtuvo por espectrometría de emisión óptica, la caracterización microestructural se realizó por microscopía óptica y microscopio electrónico de barrido (SEM) equipado con espectrómetro de energía dispersiva (EDX), el cual se usó para la identificación de los elementos químicos en la microestructura y evaluación de la composición química semicuantitativa de las fases. La evaluación del porcentaje de área de matriz y carburos se hizo mediante el Software ImageJ.

Para la evaluación de la resistencia al desgaste seco deslizante de los recubrimientos duros se usó una máquina de desgaste tipo Pin on Disc (ASTM G99). El diámetro del pin de desgaste fue de 6 mm y longitud de 20 mm, el pin de desgaste fue el recubrimiento duro a evaluar, el cual se mantuvo rotando contra un disco de acero de

dureza HRC 63, pulido hasta 0.5 Ra de rugosidad. Las pruebas se hicieron con dos cargas, 7 y 10 kgf, y una velocidad de deslizamiento de 1.67 m/s. El desgaste se midió por la técnica de pérdida en peso con la ayuda de una balanza electrónica digital con precisión de hasta 0.1 mg. Las pérdidas en peso se evaluaron cada 500 m de deslizamiento, hasta completar una distancia total de deslizamiento de 2500 m. Los resultados de las pruebas de desgaste se presentan en función de la pérdida de volumen, mm³ y la velocidad de desgaste, g/km. Finalmente, se hizo una comparación del desgaste presentado por los recubrimientos experimentados y se hizo un breve análisis del mecanismo de desgaste.

Resultados.

La técnica empleada para la elaboración de recubrimientos duros permitió la obtención de recubrimientos duros Fe-Cr-C. Los recubrimientos duros experimentados tienen una microestructura que contiene una matriz austenítica, dendrítica, con un eutéctico de carburos de cromo y austenita.

Recubrimiento base. En el recubrimiento duro base presentó una microestructura dendrítica con un eutéctico (carburos de cromo y austenita). En su microestructura se observó la presencia de NbC muy pequeños (0.5-1.5 μ), en una fracción de área de 0.8%, proveniente seguramente, de las ferroaleaciones.

Recubrimientos con Nb. La adición de niobio al recubrimiento duro Fe-Cr-C produjeron un refinamiento de la microestructura, reduciendo el espaciado inter-carburos, aumentando con ello la fracción de área de carburos. Se observa que, a mayor adición de niobio en forma de ferroaleación en los recubrimientos duros, aumentó la cantidad, el tamaño y la distribución de los NbC, asimismo, los resultados constatan un mayor contenido de niobio en sus carburos de niobio, revelado por el análisis de EDX.

El refinamiento de la microestructura obtenida con la adición de Nb, así como el incremento del porcentaje de fracción de área de carburos de cromo, incrementó la

dureza de la aleación de los recubrimientos duros. Mayor adición de niobio en el recubrimiento favoreció el incremento en la dureza en la matriz (endurecimiento por solución sólida) y el incremento en la dureza de los carburos de cromo.

Recubrimientos con óxido de lantano. Su adición produjo un refinamiento de la microestructura, reduciendo el espaciado intercarburos, aumentando la fracción de área de carburos de cromo, FAC, además de una modificación del eutéctico (carburos de cromo más austenita). Así mismo, la adición de La_2O_3 al recubrimiento duro Fe-Cr-C-Nb resultó beneficioso para el refinamiento de los carburos de niobio y la modificación de su forma a una más redondeada. El análisis por EDX mostró que, en los recubrimientos duros con la adición de óxido de lantano, los carburos de cromo presentaron un contenido mayor de cromo.

El incremento en la dureza fue directamente influenciado por el refinamiento de la estructura de grano, así como a la mayor fracción de área de carburos, ocurrida tanto en las adiciones de Nb como de óxido de lantano.

Mayor adición de óxido de lantano en el recubrimiento duro favoreció el incremento en la dureza en la matriz, atribuible a un posible endurecimiento por solución sólida. Así mismo se produjo un incremento en la dureza de los carburos de cromo en el eutéctico. Este se puede atribuir a la presencia de una matriz endurecida por solución sólida y a la modificación de la morfología de los carburos de cromo.

Pruebas de desgaste. Los resultados de la prueba de desgaste del recubrimiento base y de dos recubrimientos con contenidos de niobio (1.5% y 3.4% en peso) a una distancia de deslizamiento de 2500 metros, con carga aplicada de 10 kgf, mostraron que el recubrimiento duro base, presentó el menor desgaste, expresado por la menor pérdida de volumen (2.49 mm^3) y menor velocidad de desgaste (0.0077 g/km).

Mientras que el recubrimiento alto niobio presentó el mayor desgaste, con un aumento considerable de su pérdida en volumen (19.91 mm^3) y su velocidad de desgaste (0.062 g/km) para una carga de 10 kg, debido a la mayor cantidad, mayor tamaño de carburos de niobio ($1-4.7 \mu$) y a su morfología angulada, los cuales al desprenderse actuaron como partículas abrasivas, produciendo un desgaste abrasivo severo, dejando en la superficie de desgaste marcas de arado profundas.

Aun cuando la adición de óxido de lantano fue beneficioso y produjo un refinamiento de la microestructura, mayor fracción de área de carburos, refinamiento de partículas de carburos de niobio y mayor dureza, su desgaste fue mayor al del recubrimiento base y menor al del recubrimiento con niobio. Lo anterior, debido a que aún preserva partículas de carburo de niobio gruesas y angulares. El recubrimiento con adición de 7% La_2O_3 presentó una pérdida de volumen (8.78 mm^3) y una velocidad de desgaste de (0.027 g/km).

Palabras clave: recubrimientos duros, ferroaleaciones, niobio, lantano, desgaste.

ABSTRACT.

In the present research, several hardfacing alloys were developed, based on ferroalloys with the addition of niobium and lanthanum oxide (rare earth), by the manual shielded metal arc welding (SMAW) process with the previous placement technique. The main objective of this work was the evaluation of the influence of the addition of niobium and lanthanum oxide on the microstructural characteristics, hardness, microhardness and sliding dry wear.

For the elaboration of hardfacing alloys, ferroalloys such as: Fe-39.6Cr-5.4C; Fe-66Nb were used and La_2O_3 in powder. Three groups of hardfacing alloys were made, Fe-Cr-C, Fe-Cr-C-Nb and Fe-Cr-C-Nb with the addition of lanthanum oxide. The niobium content experimented was 1.5 and 3.2 percent by weight, while the lanthanum oxide was added at three levels: 2, 5, and 7% by weight. The Fe-14Cr-1.9C alloy was used as a reference in the study. The experimental work was carried out in three stages: the elaboration of the Fe-Cr-C hardfacing alloy, the incorporation of niobium and then the addition of lanthanum oxide.

The chemical composition of the alloys obtained for hardfacing was obtained by optical emission spectrometer, the microstructural characterization was carried out by optical microscopy and scanning electron microscope (SEM) equipped with an energy dispersive spectrometer (EDX), which was used for the identification of the chemical elements in the microstructure and evaluation of semi-quantitative chemical composition of the phases. The evaluation of the percentage of matrix and carbides area fraction was made using the ImageJ Software.

For the evaluation of the sliding dry wear of the hardfacing alloys, a Pin on Disc type wear machine (ASTM G99) was used. The diameter of the wear pin was 6 mm and a length of 20 mm, the wear pin was the hardfacing alloy to be evaluated, which was kept rotating against a steel disc of 63 HRC, polished to 0.5 Ra roughness. The tests were

made with two loads 7 and 10 kgf and a sliding speed of 1.67 m / s. Wear was measured by the weight loss technique with the help of a digital electronic scale with precision up to 0.1 mg. Weight losses were evaluated every 500 m of sliding, until completing a total sliding distance of 2500 m. Wear test results are presented as a function of volume loss (mm^3) and wear rate (g/km). Finally, a comparison of the wear presented by the experienced hardfacing alloys was made and a brief analysis of the wear mechanism was made.

Results.

The technique used allowed obtaining Fe-(14-18)Cr-(1.7-2.6)C hardfacing coatings. Experienced hardfacing coatings have a microstructure containing an austenitic, dendritic matrix, with a eutectic of chromium carbides and austenite.

Base hardfacing. This hardfacing presented a dendritic microstructure with a eutectic (chromium carbides and austenite). In its microstructure, the presence of very small NbC ($0.5\text{-}1.5\ \mu$) was observed, in an area fraction of 0.8% surely from ferroalloys.

Hardfacing with Nb. The addition of niobium to the Fe-Cr-C hardfacing produced a refinement of the microstructure, reducing the inter-carbides spacing, thereby increasing the area fraction of carbides. It is observed that, with greater addition of niobium in the form of ferroalloy in hardfacings, the amount, size and distribution of NbC increased, likewise, the results confirm a higher content of niobium in their niobium carbides, revealed by the EDX analysis.

The refinement of the microstructure obtained with the addition of Nb, as well as the increase in the percentage of area fraction of chromium carbides, increased the hardness of the hardfacing alloys. Also, greater addition of niobium in the coating favored the increase in the hardness in the matrix (hardening by solid solution) and the increase in the hardness of the chromium carbides.

Hardfacing with lanthanum oxide. Its addition produced a refinement of the microstructure, reducing the inter-carbide spacing, increasing the area fraction of chromium carbides, FAC, in addition to a modification of the eutectic (chromium carbides plus austenite). Likewise, the addition of La_2O_3 to the Fe-Cr-C-Nb hardfacing was beneficial for the refinement of the niobium carbides and the modification of their shape to a more rounded one. The analysis by EDX showed that, in the hardfacing coatings with the addition of lanthanum oxide, the chromium carbides had a higher chromium content.

The increase in hardness was directly influenced by the refinement of the grain structure, as well as the higher area fraction of carbides, which occurred in both the Nb and lanthanum oxide additions.

Greater addition of lanthanum oxide in the hardfacing alloy favored the increase in hardness in the matrix, attributable to a possible solid solution hardening. Likewise, there was an increase in the hardness of the chromium carbides in the eutectic. This can be attributed to the presence of a solid solution hardened matrix and the modification of the chromium carbides morphology.

Wear tests. The results of the wear test of the base hardfacing and of two hardfacing coatings with niobium content (1.5% and 3.4% by weight) at a sliding distance of 2500 meters, with applied load of 10 kgf, showed that the hardfacing base alloy presented the less wear, expressed by the less loss of volume (2.49 mm^3) and lower speed of wear (0.0077 g/km).

While the high niobium hardfacing alloy presented the greatest wear, with a considerable increase in its loss in volume (19.91 mm^3) and its wear rate (0.062 g/km) for a load of 10 kg, due to the larger quantity, larger size of niobium carbides ($1-4.7 \mu$) and its angled morphology, which when detached acted as abrasive particles, producing severe abrasive wear, leaving deep plow marks on the wear surface.

Even though the addition of lanthanum oxide was beneficial and produced a refinement of the microstructure, a higher area fraction of carbides, refinement of niobium carbide particles and higher hardness, its wear resistance was lower than that of the base coating. This is due to the fact that it still preserves coarse and angular niobium carbide particles. The hardfacing with addition of 7% La_2O_3 showed a loss of volume (8.78 mm^3) and the wear rate (0.027 g/km).

Keywords: hardfacing alloys, ferroalloys, niobium, lanthanum, wear.

CONTENIDO.

CAPITULO 1 INTRODUCCION Y ANTECEDENTES.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 ANTECEDENTES.....	2
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.4 PROYECTO EN GENERAL.....	3
1.5 PROYECTO EN PARTICULAR.....	3
1.6 PREGUNTAS ACERCA DEL PROYECTO.....	4
1.7 OBJETIVO GENERAL.....	5
1.8 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
1.9 JUSTIFICACIÓN.....	6
1.10 HIPÓTESIS.....	7
CAPITULO 2. MARCO REFERENCIAL.....	8
2.1 RECUBRIMIENTOS DUROS.....	8
2.2 ALEACIONES DE RECUBRIMIENTO DURO.....	9
2.3 ELEMENTOS ALEANTES.....	13
2.3.1 Tierras raras.....	13
2.3.2 Elementos que forman parte de las tierras raras:.....	14
2.3.3 Efecto de las tierras raras en las propiedades tribológicas.....	15
2.4 CONDICIONES QUE ASEGURAN LA CALIDAD EN LOS RECUBRIMIENTOS DUROS.....	16
2.4.1 Selección del proceso de soldadura.....	17
2.4.2 Factores que influyen en la selección de un proceso de soldadura.....	17
2.5 SOLDADURA POR ARCO DE METAL PROTEGIDO SMAW.....	18
2.5.1 Tipos de electrodos:.....	21
2.5.2 Clasificación de los electrodos.....	21
2.6 DESGASTE.....	22
2.6.1 DESGASTE SECO DESLIZANTE ADHESIVO.....	23
2.6.2 Los factores que definen el desgaste adhesivo son:.....	23
2.7 PRUEBA DE DESGASTE PIN ON DISC.....	24
2.8 TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN PREVIOS.....	27
CAPITULO 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	28
3.1 EQUIPOS, MATERIALES Y MÉTODOS.....	28
3.2 DIAGRAMA DE FLUJO EXPERIMENTAL.....	29

3.3	MAPA CONCEPTUAL DE PROCESOS DE ELABORACIÓN DE RECUBRIMIENTOS DUROS.....	30
3.4	DISEÑO EXPERIMENTAL	31
3.5	MOLIENDA DE FERROALEACIONES.	32
3.6	TAMAÑO DE PARTÍCULAS.	32
3.7	RANURADO DE PIEZA.	33
3.8	PREPARACIÓN DE LA FERROALEACIÓN.	33
3.9	INTEGRACIÓN DE FERROALEACIONES POR MEDIO DE SMAW.	34
3.9.1	Fundir la aleación en polvo con el electrodo 6013.....	34
3.9.2	Corte de probetas para prueba de chispa.	35
3.9.3	Espectrometría de emisión óptica (prueba de chispa).	36
3.10	PRUEBAS DE DUREZA ROCKWELL HRC.....	37
3.11	MICROSCOPIA Y SEM.	38
3.11.1	Preparación de muestras para microscopia y SEM.	38
3.11.2	Equipo para microscopia óptica.	39
3.11.3	Microscopia electrónica de barrido.	39
3.12	MICRODUREZA.....	40
3.13	PRUEBA DE DESGASTE PIN ON DISC.	41
3.13.1	Maquinado de muestras para pruebas pin on disc.	41
3.13.2	Rectificado de discos para la prueba de desgaste.....	42
3.13.3	Máquina de desgaste pin on disc.	43
3.13.4	Cálculo para distancia de deslizamiento:	43
3.13.5	Factores experimentales y sus niveles de acuerdo a nuestros equipos de pin on disc.	44
CAPITULO 4. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.		45
4.1	PRUEBAS PRELIMINARES.	45
4.2	COMPOSICIÓN QUIMICA DE RECUBRIMIENTOS DUROS EXPERIMENTALES.....	47
4.3	MICROSCOPIA OPTICA.	49
4.3.1	Efecto de la adición de niobio.	50
4.3.2	Efecto de la adición de óxido de lantano.....	53
4.3.3	Comparación microestructural entre los dos efectos, adición de niobio y adición de La_2O_3	56
4.4	MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM).	57
4.4.1	Recubrimientos con adición de Niobio.....	60
4.4.2	Recubrimientos con adición de óxido de lantano.	64
4.4.3	Efecto del niobio en cada una de las zonas de los recubrimientos duros experimentales.	68
4.4.4	Análisis del efecto del La_2O_3 en el recubrimiento Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb.....	73

4.5	ESPECTROSCOPÍA DE ENERGÍA DISPERSIVA DE RAYOS X (EDX) MEB.	78
4.5.1	Caracterización de fases de recubrimientos duros con niobio	78
4.5.2	Caracterización de fases de recubrimientos duros con óxido de lantano.	101
4.6	CARACTERIZACIÓN DE FRACCION DE AREA DE CARBUROS.	115
4.6.1	Recubrimientos base y Niobio	115
4.6.2	Recubrimientos adición de La_2O_3	119
4.7	DUREZA	121
4.8	RELACIÓN DE DUREZA CONTRA FRACCIÓN DE ÁREA DE CARBUROS (FAC).	122
4.9	MICRODUREZA.	125
4.9.1	Microdureza recubrimientos duros Fe-Cr-C con Nb.	125
4.9.2	Microdureza recubrimientos duros Fe-Cr-C con La_2O_3	129
4.10	DESGASTE SECO DESLIZANTE DE RECUBRIMIENTOS DUROS EXPERIMENTALES.	134
4.10.1	Desgaste en recubrimientos duros, base y Nb.	134
4.10.2	Desgaste en recubrimientos duros, Nb y adición de La_2O_3	138
4.10.3	Comparación de desgaste de recubrimientos duros, base y con adiciones de Nb y La_2O_3	144
CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		149
5.1	CONCLUSIONES	149
5.2	RECOMENDACIONES	152
BIBLIOGRAFIA		153

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Estructura del recubrimiento a 500X.....	13
Figura 2.2 Factores para selección de proceso de soldadura.....	17
Figura 2.4 Procesos de soldadura por arco.....	18
Figura 2.5 Soldadura por arco de metal protegido (SMAW).....	20
Figura 2.6 Clasificación de electrodos.....	21
Figura 2.7 Desgaste seco deslizante.....	24
Figura 2.8 Maquina de prueba pin on disk.....	25
Figura 2.9 Tribómetro PIN-DISCO.....	26
Figura 3.1 Elaboración de recubrimiento duro.....	30
Figura 3.2 Molino MIXER 8000M.....	32
Figura 3.3 Molienda de ferroaleaciones.....	32
Figura 3.4 Polvo de ferroaleación.....	32
Figura 3.5 Tamaño de tamix.....	32
Figura 3.6 Tamices de laboratorio.....	32
Figura 3.7 Primer corte.....	33
Figura 3.8 Segundo corte.....	33
Figura 3.9 Depósito de la ferroaleación.....	34
Figura 3.10 Secado de la ferroaleación.....	34
Figura 3.11 Probeta con ferroaleación.....	34
Figura 3.12 Probeta de recubrimiento.....	34
Figura 3.13 Esmeriladora de disco.....	35
Figura 3.14 Corte de muestras.....	35
Figura 3.15 Espectrómetro de chispa.....	36
Figura 3.16 Durómetro Affri modelo 206RT.....	37
Figura 3.17 Marcas de prueba de dureza.....	37
Figura 3.18 Muestras sin encapsular.....	38
Figura 3.19 Muestras encapsuladas en baquelita.....	38
Figura 3.20 Microscopio óptico Uniment Versamet.....	39
Figura 3.21 (SEM) modelo: JSM-6510LV.....	40
Figura 3.22 Microdurómetro HMV-2T (Shimadzu).....	40
Figura 3.23 Torno GH-1340A.....	41
Figura 3.24 Esmeril de pedestal.....	41

Figura 3.25 Pines para prueba de desgaste.....	41
Figura 3.26 Disco de acero D2.	42
Figura 3.27 Rectificadora de superficies planas.	42
Figura 3.28 Pantalla de control maquina pin on disc.	43
Figura 3.29 Pin perpendicular al disco.....	43
Figura 3.30 Marca del pin en el disco.	43
Figura 3.31 Peso de pin antes de la prueba de desgaste.	44
Figura 3.32 Peso del pin después de la prueba de desgaste.	44
Figura 4.1 a) Falta de continuidad en el arco eléctrico del electrodo y b) problemas de porosidad en los recubrimientos.	45
Figura 4.2 Unión de ranura del metal base a) vista frontal b) vista transversal.....	46
Figura 4.3 a) Recubrimiento con defecto de falta de fusión. b) recubrimiento sin defecto de fusión.....	46
Figura 4.4 Micrografías ópticas del recubrimiento duro base a 100, 200, 500X e imagen macro de recubrimiento dura base.....	49
Figura 4.5 Micrografías de los recubrimientos duros, a) Fe-14Cr-1.9C. b) Fe-15Cr-1.7C-1.5Nb y c) Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb. 100 X. d) imagen macro de recubrimiento duro 1.5 Nb depositado.	50
Figura 4.6 Micrografías de los recubrimientos duros, a) Fe-14Cr-1.9C, b) Fe-15Cr-1.7C-1.5Nb y c) Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb. 200X. d) imagen macro de recubrimiento duro 1.5 Nb depositado.	51
Figura 4.7 Micrografías de los recubrimientos duros, a) Fe-14Cr-1.9C, b) Fe-15Cr-1.7C-1.5Nb y c) Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb. 500X. d) imagen macro de recubrimiento duro base depositado.	52
Figura 4.8 Micrografías de recubrimientos duros, a) Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb, b) Fe-176Cr-2.2C-3Nb+2% peso La ₂ O ₃ , c) Fe-14Cr-2.6C-3.4Nb- 5% peso La ₂ O ₃ y d) Fe-14Cr-4.C-3.6Nb+ 7% peso La ₂ O ₃ . 100X.....	53
Figura 4.9 Micrografías de recubrimientos duros, a) Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb, b) Fe-176Cr-2.2C-3Nb+2% peso La ₂ O ₃ , c) Fe-14Cr-2.6C-3.4Nb- 5% peso La ₂ O ₃ y d) Fe-14Cr-4.C-3.6Nb+ 7% peso La ₂ O ₃ . 200X.	54
Figura 4.10 Micrografías de recubrimientos duros, a) Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb, b) Fe-176Cr-2.2C-3Nb+2% peso La ₂ O ₃ , c) Fe-14Cr-2.6C-3.4Nb- 5% peso La ₂ O ₃ y d) Fe-14Cr-4.C-3.6Nb+ 7% peso La ₂ O ₃ . 500X.....	55
Figura 4.11 Micrografías ópticas de microestructuras de recubrimientos duros a 500X. a) recubrimiento base Fe-14Cr-1.9C, b) 3.2Nb y c) 3.2Nb+7% La ₂ O ₃	56
Figura 4.12 Microestructura del límite de fusión del recubrimiento base Fe-14cr-1.9C a diversos aumentos: 150x, 500x, 750x y 1000x.	57
Figura 4.13 Microestructura de la parte central del recubrimiento duro base Fe-14cr-1.9C. a diversos aumentos: 250x, 500x, 750x, 1000x, 2000x y 5000x.	59
Figura 4.14 Microestructura del límite de fusión del recubrimiento Fe-15Cr-1.7C-1.5Nb, 250X, 500X,750X, 1000X y 2000X.....	60
Figura 4.15 Microestructura del centro del recubrimiento Fe-15Cr-1.7C-1.5Nb, 250X, 500X,750X, 1000X y 2000X.	61
Figura 4.16 Microestructura del límite de fusión del recubrimiento Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb, 250X, 500X,750X, 1000X y 2000X.	62

Figura 4.17 Microestructura del centro del recubrimiento Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb, 250X, 500X,750X, 1000X y 2000X.	63
Figura 4.18 Microestructura del límite de fusión del recubrimiento 4.2, Fe-16Cr-2.2C-3Nb+2% peso La ₂ O ₃ , 250X, 500X, 750X, 1000X y 2000X.	64
Figura 4.19 Microestructura del centro del recubrimiento Fe-16Cr-2.2C-3Nb+2% peso La ₂ O ₃ 250X, 500X, 750X, 1000X y 2000X.	65
Figura 4.20 Microestructura del centro del recubrimiento Fe-14Cr-4.C-3.6Nb+7% peso La ₂ O ₃ , 250X, 500X, 750X, 1000X y 2000X.	66
Figura 4.21. Microestructura del centro del recubrimiento Fe-14Cr-4.C-3.6Nb+ 7% peso La ₂ O ₃ ., 250X, 500X,750X, 1000X y 2000X.	67
Figura 4.22. Las micrografías de SEM muestran el efecto de la adición de niobio en la microestructura del límite de fusión de los recubrimientos duros. 1000X.....	68
Figura 4.23. Las micrografías de SEM muestran el efecto de la adición de niobio en la microestructura de la parte central de los recubrimientos 1000 y 2000X. a) Fe-14cr-1.9C b) Fe-15Cr-1.7C-1.5Nb y c) Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb.	69
Figura 4.24. Análisis de imágenes mediante el software ImageJ.	70
Figura 4.25 Efecto de la adición de Nb en la fracción de área de carburos de niobio en los recubrimientos duros. Obtenido por medio del software ImageJ.	71
Figura 4.26 Efecto de la adición de niobio en el tamaño de célula dendrítica de los recubrimientos duros experimentales.....	72
Figura 4.27 Las micrografías de SEM muestran el efecto de la adición de La ₂ O ₃ en la microestructura de la parte central de los recubrimientos 1000 y 2000X. a) Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb y b) Fe-14Cr-4.C-3.6Nb+ 7% peso La ₂ O ₃	73
Figura 4.28 Las micrografías de SEM muestran el efecto de la adición de La ₂ O ₃ en la microestructura de la parte central de los recubrimientos a 1000 y 2000X. a) Fe-16Cr-2.2C-3Nb+2% peso La ₂ O ₃ , b) Fe-14Cr-2.6C-3.4Nb- 5% peso La ₂ O ₃ y c) Fe-14Cr-4.C-3.6Nb+ 7% peso La ₂ O ₃	74
Figura 4.29 Fracción de área de carburos de niobio, presentes en los recubrimientos duros adicionados con La ₂ O ₃ . Obtenidos por medio del software ImageJ.....	75
Figura 4.30 Efecto de la adición de La ₂ O ₃ en el tamaño de célula dendrítica en los recubrimientos duros. Obtenidos por medio del software ImageJ.	75
Figura 4.31 Análisis por EDX de fases en el límite de fusión del recubrimiento base Fe-14Cr-1.9C, matriz y carburos de cromo en recubrimiento duro.	78
Figura 4.32 Análisis por EDX de fases en el metal base del recubrimiento base Fe-14Cr-1.9C, matriz y límite de grano.	79
Figura 4.33 Análisis por EDX de fases presentes en la parte central del recubrimiento base Fe-14Cr-1.9C, a) matriz, b) carburos de cromo y c) carburos de niobio.	80
Figura 4.34 Magnificación de a) carburos de cromo y b) carburos de niobio y sus espectros EDX, en la parte central del recubrimiento duro base Fe-14Cr-1.9C.	81
Figura 4.35 Análisis por EDX de fases en el límite de fusión del recubrimiento Fe-15Cr-1.7C-1.5Nb, a) matriz, b) carburos de cromo y c) carburos de niobio en recubrimiento duro.	83

Figura 4-36. Análisis por EDX de fases en el metal base del recubrimiento Fe-15Cr-1.7C-1.5Nb, a) interfase, b) matriz y c) límite de grano.....	84
Figura 4.37 Análisis por EDX de fases presentes en la parte central del recubrimiento Fe-15Cr-1.7C-1.5Nb. a) carburos de cromo y b) carburos de Nb.	86
Figura 4.38 Análisis por EDX de fases en el límite de fusión del recubrimiento Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb, a) matriz, b) carburos de cromo y c) carburos de niobio en recubrimiento duro.	88
Figura 4.39 Análisis por EDX de fases en el metal base del recubrimiento duro Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb, a) matriz interfase, b) límite de fusión.	89
Figura 4.40 Análisis por EDX de fases presentes en la parte central del recubrimiento Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb, a) matriz, b) carburos de cromo y c) carburos de niobio.	91
Figura 4.41 Análisis por EDX de óxido dentro de carburo de niobio.	92
Figura 4.42 Micrografías y espectro EDX de carburos de niobio, en el centro de los recubrimientos, en los tres recubrimientos duros. A) Recubrimiento base Fe-14Cr-1.9C, b) recubrimiento Fe-15Cr-1.7C-1.5Nb y c) recubrimiento Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb. Todas las imágenes a 2000X.	97
Figura 4.43 Contenido semicuantitativo de niobio obtenido por análisis EDX, en los NbC de los recubrimientos duros.....	98
Figura 4.44 Diámetro de partícula de carburos de niobio en los recubrimientos duros.....	99
Figura 4.45 Análisis por EDX de fases en el límite de fusión del recubrimiento Fe-16Cr-2.2C-3Nb+2% peso La ₂ O ₃ , a) matriz, b) carburos de cromo y c) carburos de niobio en recubrimiento duro.	101
Figura 4.46 Análisis por EDX de fases en el metal base del recubrimiento Fe-16Cr-2.2C-3Nb+2% peso La ₂ O ₃ , a) matriz y b) límite de grano.	102
Figura 4.47 Análisis por EDX de fases presentes en la parte central del recubrimiento Fe-16Cr-2.2C-3Nb+2% peso La ₂ O ₃ a) matriz, b) carburos de cromo y c) carburos de Nb.	104
Figura 4.48 Análisis por EDX de fases en el límite de fusión del recubrimiento Fe-14Cr-2.6C-3.4Nb-5% peso La ₂ O ₃ , a) matriz, b) carburos de cromo y c) carburos de niobio en recubrimiento duro.	106
Figura 4.49 Análisis por EDX de fases en el centro del recubrimiento duro Fe-14Cr-2.6C-3.4Nb-5% peso La ₂ O ₃ , a) y b) carburo de niobio finos.	107
Figura 4.50 Análisis por EDX de fases del centro del recubrimiento duro Fe-14Cr-2.6C-3.4Nb-5% peso La ₂ O ₃ . .	108
Figura 4.51 Análisis por EDX de fases en el centro del recubrimiento Fe-14Cr-4.C-3.6Nb+ 7% peso La ₂ O ₃ , a) matriz, b) carburos de cromo y c) carburos de niobio.	110
Figura 4.52 Contenido de cromo en carburos de cromo de recubrimientos duros experimentales, obtenido por EDX.	114
Figura 4.53 Micrografías de SEM correspondientes a los recubrimientos duros a) Base: Fe-14Cr-1.9C, b) Fe-15Cr-1.7C-1.5Nb y c) Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb. 500X.....	115
Figura 4.54 Ejemplo de la medición de fracción de área de carburos de cromo y la fracción de área de carburos de niobio, utilizando el software ImageJ.....	116
Figura 4.55 Efecto de la adición de niobio en la fracción de área de carburos de cromo.....	116
Figura 4.56 Efecto de la adición de niobio en la fracción de área de carburos de niobio.....	117
Figura 4.57 Efecto de la adición de niobio sobre la fracción de área de matriz.....	118

Figura 4.58 Micrografías SEM de recubrimientos duros con adición de La_2O_3 , a) recubrimiento duro con 2%, b) 5% y c) 7%. 500X.	119
Figura 4.59 Ejemplo de imagen empleada para medición de la fracción de área de carburos, en muestra de recubrimiento duros observada al SEM a 500X, analizada con el Software ImageJ.	119
Figura 4.60 Efecto de la adición de óxido de lantano en la fracción de área de carburos de cromo.	120
Figura 4.61 Dureza de los recubrimientos duros base y con adición de niobio.	122
Figura 4.62 Dureza de recubrimientos duros base y con adición de óxido de lantano.	124
Figura 4.63 Fases a las que se les hizo medición de microdureza HV.	125
Figura 4.64 Microdureza de la matriz en el recubrimiento base y los recubrimientos con adición de niobio.	126
Figura 4.65 Microdureza de carburos de cromo en el recubrimiento base y los recubrimientos con adición de niobio.	126
Figura 4.66 Microdureza de la matriz en el límite de fusión del recubrimiento base y los recubrimientos con adición de niobio.	127
Figura 4.67 Microdureza de la matriz en el metal base del recubrimiento base y los recubrimientos con adición de niobio.	128
Figura 4.68 Microdureza de la matriz en los recubrimientos con adición de óxido de lantano.	129
Figura 4.69 Microdureza de carburos de cromo en los recubrimientos con adición de óxido de lantano.	130
Figura 4.70 Microdureza de la matriz en el límite de fusión de los recubrimientos con adición de óxido de lantano.	131
Figura 4.71 Microdureza de la matriz en el metal base de los recubrimientos con adición de óxido de lantano.	132
Figura 4.72 Desgaste de recubrimientos duros, expresado en pérdida en volumen, en función de la distancia de deslizamiento, para una carga aplicada de 7kg.	134
Figura 4.73 Desgaste de recubrimientos duros, expresado en pérdida en volumen, en función de la distancia de deslizamiento, para una carga aplicada de 10 kg.	135
Figura 4.74 Velocidad de desgaste de los recubrimientos duros, en función de la carga aplicada.	136
Figura 4.75 Imagen SEM recubrimiento base.	137
Figura 4.76 Imagen SEM recubrimiento alto niobio.	137
Figura 4.77 Perfil de desgaste de recubrimiento base.	137
Figura 4.78 Perfil de desgaste de recubrimiento 3.4% Nb.	137
Figura 4.79 Desgaste seco deslizante, expresando en pérdida de volumen, en función de la distancia de deslizamiento para una carga aplicada de 7 kg.	139
Figura 4.80 Desgaste seco deslizante, expresando en pérdida de volumen, en función de la distancia de deslizamiento para una carga aplicada de 10 kg.	140
Figura 4.81 Velocidad de desgaste en función de la carga aplicada.	141
Figura 4.82 Imagen SEM de recubrimientos. A) 3.2Nb, B) 2% La_2O_3 , C) 7% La_2O_3	142

Figura 4.83 Desgaste seco deslizante, expresando en pérdida de volumen, en función de la distancia de deslizamiento para una carga aplicada de 7 kg.....	144
Figura 4.84 Desgaste seco deslizante, expresando en pérdida de volumen, en función de la distancia de deslizamiento para una carga aplicada de 10 kg.....	145
Figura 4.85 Velocidad de desgaste en función de la carga aplicada.	146
Figura 4.86 a) Imagen de SEM a 2000 X del recubrimiento A1; b) Imagen de SEM a 2000 X del recubrimiento 3.4; c) Imagen de SEM a 2000 X del recubrimiento 6.4.....	147
Figura 4.87 a) Huella de micro arado recubrimiento Base., b) Huella de micro arado recubrimiento 3.2 Nb., c) Huella de micro arado recubrimiento 7% La ₂ O ₃	147

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Características de los procesos de soldadura utilizados para materiales hardfacing.....	16
Tabla 2.2. Trabajos de investigación previos.....	27
Tabla 3.1 Recubrimiento base Fe-Cr-C.....	31
Tabla 3.2 Recubrimiento base Fe-Cr-C-Nb.....	31
Tabla 3.3 Recubrimiento base Fe-Cr-C-Nb- La ₂ O ₃	31
Tabla 3.4. Factores experimentales y sus niveles.....	44
Tabla 4.1. Fe-Cr-C.....	47
Tabla 4.2. Fe-Cr-C-Nb 1 g de Fe-Nb.....	47
Tabla-4.3. Fe-Cr-C-Nb 2 g de Fe-Nb.....	48
Tabla 4.4. Fe-Cr-C-Nb 2 g de Fe-Nb 2 % de óxido de lantano añadido.....	48
Tabla 4.5. Fe-Cr-C-Nb 2 g de Fe-Nb 5% de óxido de lantano añadido.....	48
Tabla 4.6. Fe-Cr-C-Nb 2 g de Fe-Nb 7% de óxido de lantano añadido.....	48
Tabla 4.7. Resumen de fases obtenidas por EDX en límite de fusión de recubrimiento duro base Fe-14Cr-1.9C. 79	
Tabla 4.8. Resumen de composición química semicuantitativa de fases obtenida por análisis de EDX en el centro del recubrimiento duro base Fe-14Cr-1.9C.	81
Tabla 4.9. Resumen de composición química semicuantitativa de fases obtenida por análisis de EDX en el límite de fusión del recubrimiento duro Fe-15Cr-1.7C-1.5Nb.....	85
Tabla 4.10. Resumen de composición química semicuantitativa de fases obtenida por análisis de EDX en el centro del recubrimiento duro Fe-15Cr-1.7C-1.5Nb.	86
Tabla 4.11. Resumen de composición química semicuantitativa de fases obtenida por análisis de EDX en el límite de fusión del recubrimiento duro Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb.....	89

Tabla 4.12. Resumen de composición química semicuantitativa de fases obtenida por análisis de EDX en el centro del recubrimiento duro Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb.	92
Tabla 4.13. Resumen de análisis composición química semicuantitativa de las fases, realizado por EDX, en límite de fusión de los recubrimientos duros. La composición química se expresa en porcentaje en peso.	93
Tabla 4.14. Resumen de análisis composición química semicuantitativa de las fases, realizado por EDX, en centro de los recubrimientos duros. La composición química se expresa en porcentaje en peso.	94
Tabla 4.15. Resultados finales, comparación de la composición química semicuantitativa de fases en límite de fusión y centro del cordón, de los tres recubrimientos duros.	95
Tabla 4.16. Contenido semicuantitativo de niobio obtenido por análisis EDX, en los NbC de los recubrimientos duros.	98
Tabla 4.17. Diámetro de partícula de carburo de Nb, en los recubrimientos duros, medido con el Software ImageJ.	99
Tabla 4.18. Resumen de composición química semicuantitativa de fases obtenida por análisis de EDX en el límite de fusión del recubrimiento duro Fe-16Cr-2.2C-3Nb+2% peso La ₂ O ₃	102
Tabla 4.19. Resumen de composición química semicuantitativa de fases obtenida por análisis de EDX en el centro del recubrimiento duro Fe-16Cr-2.2C-3Nb+2% peso La ₂ O ₃	105
Tabla 4.20. Resumen de composición química semicuantitativa de fases obtenida por análisis de EDX en el límite de fusión y centro del recubrimiento duro Fe-14Cr-2.6C-3.4Nb-5% peso La ₂ O ₃	108
Tabla 4.21. Resumen de composición química semicuantitativa de fases obtenida por análisis de EDX en el centro del recubrimiento duro Fe-14Cr-4.C-3.6Nb+ 7% peso La ₂ O ₃	111
Tabla 4.22. Resumen de análisis composición química semicuantitativa de las fases, realizado por EDX, en límite de fusión y centro de los recubrimientos duros. La composición química se expresa en porcentaje en peso.	112
Tabla 4.23. Contenido semicuantitativo de fases por análisis EDX de los recubrimientos duros.	113
Tabla 4.24. Efecto de la adición de niobio en el porcentaje de fracción de área de carburos de cromo, de los recubrimientos duros.	116
Tabla 4.25. Efecto de la adición de niobio en el porcentaje de fracción de área de carburos de niobio de los recubrimientos duros.	117
Tabla 4.26. Efecto de la adición de óxido de lantano en el porcentaje de fracción de área de carburos en los recubrimientos duros.	120
Tabla 4.27. Dureza en recubrimiento base, niobio y oxido de lantano.	121
Tabla 4.28. FAC y dureza de recubrimientos duros con adición de Nb.	122
Tabla 4.29. FAC y dureza de recubrimientos duros con adición de La ₂ O ₃	123
Tabla 4.30. Tabla Dureza de fases en recubrimientos duros.	125
Tabla 4.31. Dureza de fases en recubrimientos duros.	129

CAPITULO 1 INTRODUCCION Y ANTECEDENTES.

1.1 INTRODUCCIÓN.

En la actualidad en la industria donde se llevan a cabo una variedad de procesos se presentan problemas en los mecanismos y piezas por desgaste que reducen su vida útil, traduciendo esto en un problema por el cambio continuo de piezas y reparación. Elevando costos de mantenimiento y producción por tiempos muertos al momento de detener máquinas para reemplazar piezas o mantenimiento.

Para contrarrestar estos problemas se ha optado por la opción de recargues o capas duras aplicados por medio de soldadura ya que son una opción más económica y ofrecen la posibilidad de mejorar las propiedades mecánicas a los materiales convencionales.

Existe una variedad de tipos de recubrimientos, procesos de soldadura y amplia gama de aleaciones, por lo tanto, la selección de los recubrimientos duros es muy importante para obtener los mejores resultados.

Una de las aleaciones de recubrimientos duros más comunes son las de base Fe, entre ellas las del tipo Fe-Cr-C, estas se han usado extensamente para aplicaciones a alta temperatura donde la resistencia al desprendimiento es de primordial importancia.

Investigaciones previas han mostrado el efecto positivo de adición de tierras raras (óxido de cerio) sobre la microestructura y propiedades mecánicas y tribológicas. A la fecha, son pocas las investigaciones que han analizado el comportamiento al desgaste de adición de tierras raras a las aleaciones base hierro.

Con lo antes mencionado nace la necesidad del estudio al comportamiento del desgaste seco deslizante de recubrimientos duros base Fe-Cr-C, con adición de niobio y tierras raras (óxido de lantano).

1.2 ANTECEDENTES.

Durante mucho tiempo se ha dedicado tiempo y esfuerzo al desarrollo de nuevas técnicas de recubrimientos duros, con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas; todo esto con la finalidad de aumentar la vida útil de piezas de máquinas que están sometidas a diferentes mecanismos de desgaste.

Es por eso que en este trabajo analizaremos aleaciones Fe-Cr-C elaboradas a partir de ferroaleaciones, con adición de niobio y óxido de lantano (tierra rara) por el proceso de soldadura manual de metal por arco (SMAW) con la técnica de colocación previa

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Las industrias tienen grandes pérdidas por desgaste de materiales metálicos durante los procesos de trabajo y requieren de técnicas eficientes de aplicación y materiales de gran resistencia al desgaste, que aporten mayor vida útil a sus piezas y equipos.

Por lo tanto, es necesario estudiar diversas aleaciones para recubrimientos duros, obtenidos a partir de ferroaleaciones, su microestructura, dureza y analizar el comportamiento al desgaste seco deslizante y a partir de los resultados obtenidos mostrar cual de todos ellos es el mejor.

1.4 PROYECTO EN GENERAL.

Elaboración de recubrimientos duros base Fe-Cr-C, a partir de ferroaleaciones, con adición de elementos aleantes, que proporciona una mayor resistencia al desgaste y sean adecuados para emplearse en la industria.

1.5 PROYECTO EN PARTICULAR.

Elaboración de recubrimientos duros base Fe-Cr-C con adición de niobio y de tierra rara óxido de lantano, aplicado mediante soldadura SMAW y evaluación de su resistencia al desgaste seco deslizante.

1.6 PREGUNTAS ACERCA DEL PROYECTO.

¿Qué porcentajes de ferroaleaciones se deben añadir para producir este recubrimiento?

¿Qué parámetros de soldadura son los adecuados para elaborar este recubrimiento?

¿Qué durezas se alcanzan en el recubrimiento obtenido?

¿Los recubrimientos duros son homogéneos en composición química, a lo largo del cordón de soldadura?

¿Qué resistencia al desgaste presentarán los recubrimientos duros experimentales Fe-Cr-C, obtenidos por ferroaleaciones, ¿con adiciones de niobio y óxido de lantano?

1.7 OBJETIVO GENERAL.

Elaborar recubrimientos duros base Fe-Cr-C a partir de ferroaleaciones, aplicados mediante el proceso SMAW, con la adición de niobio y tierra rara oxido de lantano y determinar su resistencia al desgaste seco deslizante.

1.8 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Obtener la mezcla de ferroaleaciones adecuada para producir un recubrimiento duro Fe-Cr-C.
- Obtener el procedimiento de soldadura para este recubrimiento.
- Determinar la homogeneidad química de este recubrimiento.
- Determinar la dureza del recubrimiento obtenido.
- Añadir Fe-Nb al recubrimiento duro Fe-Cr-C que dio mejor resultado y obtener un recubrimiento duro Fe-Cr-C-Nb.
- Analizar el efecto del contenido de niobio.
- Añadir oxido de lantano al recubrimiento Fe-Cr-C-Nb.
- Analizar el efecto de la adición de óxido de lantano.
- Hacer una caracterización metalúrgica completa de los recubrimientos duros obtenidos.
- Determinar la dureza y resistencia al desgaste de los recubrimientos obtenidos.
- Determinar el recubrimiento duro de mayor resistencia al desgaste y hacer la recomendación correspondiente.

1.9 JUSTIFICACIÓN.

Obtención de recubrimientos duros elaborados a partir de ferroaleaciones que presentan características microestructurales y comportamiento al desgaste para aplicaciones de desgaste severo.

1.10 HIPÓTESIS.

Es posible obtener recubrimientos duros Fe-Cr-C a partir de ferroaleaciones, depositándolos por soldadura, mediante el proceso SMAW.

La adición de Fe-Nb, así como oxido de lantano, al recubrimiento duro Fe-Cr-C modificará la microestructura, aumentará la dureza y resistencia al desgaste de los recubrimientos duros obtenidos.

CAPITULO 2. MARCO REFERENCIAL.

2.1 RECUBRIMIENTOS DUROS.

En muchos procesos industriales utilizados en ingeniería, ocurren problemas de desgaste severos que reducen considerablemente la vida útil de los diferentes elementos de las máquinas, lo que se traduce en un reemplazo continuo de estos elementos por elementos nuevos o reparados, lo que aumenta los costos de mantenimiento y produce pérdidas en producción debido a paradas continuas para reparación. Para contrarrestar los problemas anteriores de alguna manera, se han utilizado ciertos métodos que favorecen la conservación de los elementos. Una de las alternativas adoptadas ha sido el uso de rellenos o capas duras aplicadas mediante soldadura, ya que son una opción económica y ofrecen la posibilidad de obtener mejores propiedades de resistencia al desgaste que los materiales convencionales. La selección de recubrimientos duros es esencial para obtener los mejores resultados de servicio en las piezas a recuperar o proteger [1].

El uso de recubrimientos duros es una alternativa para proteger o recuperar elementos sujetos a desgaste; sin embargo, para garantizar un buen rendimiento, se debe gestionar cierto conocimiento sobre las condiciones de trabajo a las que serán sometidos, su composición química y microestructura, entre otros, para poder realizar una buena selección dentro del grupo de recubrimientos existentes [1].

Los recubrimientos duros y rellenos se pueden dividir en cinco clases de acuerdo con las condiciones de servicios, que nos permitirán elegir las mejores aleaciones para el trabajo. Estas son:

Clase I: Impacto severo.

Clase II: Abrasión muy severa.

Clase III: Corrosión, a menudo con abrasión, y frecuentemente a altas temperaturas de trabajo.

Clase IV: Abrasión severa con impacto moderado.

Clase V: Abrasión con impacto moderado a severo.

2.2 ALEACIONES DE RECUBRIMIENTO DURO.

Los revestimientos duros, aplicados mediante procesos de soldadura, se refieren a la unión de un aporte metálico sobre una base metálica para producir alguna propiedad a la superficie del material base. El propósito de esa aplicación es reducir el desgaste, la abrasión, impacto, la erosión, desgarramiento, o cavitación. Los materiales hardfacing pueden ser depositados por distintos métodos de soldadura [2].

Un revestimiento de soldadura, es una gruesa capa de metal que se aplica a una placa base acero al carbono o de baja aleación con el fin de proporcionar una superficie resistente al desgaste.

La selección de las aleaciones hardfacing se rige por la resistencia al desgaste y las consideraciones de costo, principalmente. Sin embargo, la fabricación y otros factores ambientales también deben ser considerados, tales como metal base, proceso de depósito, impacto, corrosión, oxidación y los requerimientos térmicos. Generalmente el material para depósitos metálicos está disponible como alambres, alambre tubular con núcleo de fundente (flux core wire), alambres tubulares o sólidos o con adiciones de fundente.

Una de las aleaciones de recubrimientos duros más comunes son las de base Fe, entre ellas las del tipo Fe-Cr-C., estas se han usado extensamente para aplicaciones a alta temperatura donde la resistencia al desprendimiento es de primordial importancia.

Estas aleaciones de recubrimientos duros base Fe-Cr-C son conocidas como uno de los materiales resistentes al desgaste con excelente propiedad integral y son ampliamente usadas en procesamiento de minerales, metalurgia y maquinaria industrial [3].

Otra forma de mejorar la resistencia al desgaste de las aleaciones Fe-Cr-C es para agregar elementos formadores de carburo muy fuertes como Nb, V, W y Ti en su composición con el fin de obtener carburos tipo MC muy duros, que son más duros, pero más finos que los carburos de cromo. En general, si hay uniforme distribución de estos carburos, y si están poco espaciados, los abrasivos no pueden penetrar eficazmente en la fase de matriz que conduce a mayor resistencia al desgaste y tenacidad [4].

Los efectos de la microestructura sobre la resistencia al desgaste de una aleación de revestimiento duro a base de Fe-Cr-C-Nb desarrollado para revestimientos de componentes sometidos a severo desgaste abrasivo por el proceso de soldadura por arco abierto. Se demostró que la aleación Fe-Cr-C-Nb presentaba una microestructura con una resistencia al desgaste mucho mejor que la aleación convencional Fe-Cr-C en esfuerzo bajo y alto. Esto se atribuyó a la presencia de carburos finos de NbC primario dispersos al azar en un eutéctico matriz γ / M_7C_3 . Estos carburos más duros se someten a un gradual desgaste abrasivo y, probablemente, permanezcan por más tiempo retenidos en la matriz eutéctica, protegiéndola de la acción de abrasivos partículas. Debido a su buena resistencia al desgaste y tenacidad

y su costo relativamente bajo, la aleación Fe–Cr–C–Nb puede ser un reemplazo exitoso del material de revestimiento duro más convencional para la rehabilitación de componentes sometidos a un severo desgaste abrasivo e impacto externo con el fin de extender su vida útil [4].

La fracción de menor volumen de carburo primario M_7C_3 de la aleación Fe–Cr–C–Nb también contribuye a su mejor desempeño, una vez que estos carburos grandes se sometan a micro fisuras y desconchado, que se quita fácilmente de la matriz; que facilitan la penetración de abrasivos en la matriz eutéctica [4].

El aumento del contenido de vanadio es beneficioso para mejorar la macrodureza y resistencia al desgaste adhesivo en comparación con la aleación sin vanadio. Se observó sin evidencia de grietas o porosidad y una reducción significativa en la pérdida de peso en las aleaciones que contienen más vanadio [5].

Normalmente, los materiales resistentes al desgaste se clasifican por tipo y contenido de aleación, que determina en gran parte sus propiedades. Estos materiales tienen estructuras de fases duras (carburos, boruros o fases intermetálicas) en una matriz endurecida hasta un nivel que depende de las propiedades de la aleación deseada.

En la selección de una aleación hardfacing, se deben seguir los siguientes pasos:

- Análisis de las condiciones de servicio para determinar el tipo de desgaste y la resistencia al medio ambiente que se requieren.
- Selección de varios tipos de aleaciones hardfacing.
- Análisis de la compatibilidad de aleaciones hardfacing con el metal base, tomando en consideración el esfuerzo térmico y un posible agrietamiento.
- Pruebas de campo de las capas duras.

- Selección de una aleación hardfacing óptima, considerando el costo y la vida útil.
- Selección de un proceso hardfacing para la producción de componentes de desgaste, considerando tasas de deposición, cantidad de dilución, depósito, eficiencia y costo total, incluido el costo de proceso y consumibles (electrodos).

Otros factores técnicos que intervienen en el proceso de selección de un hardfacing incluyen las propiedades del hardfacing y los requisitos de calidad, las características físicas de la pieza, las propiedades metalúrgicas de la aleación, la forma y la composición de la aleación hardfacing. En última instancia, las consideraciones económicas predominan y el costo es el factor determinante en el proceso final de selección.

El término “hardfacing” a veces se utiliza para describir procesos de soldadura, en el que el material de relleno (electrodo) y una pequeña cantidad de material base se funden.

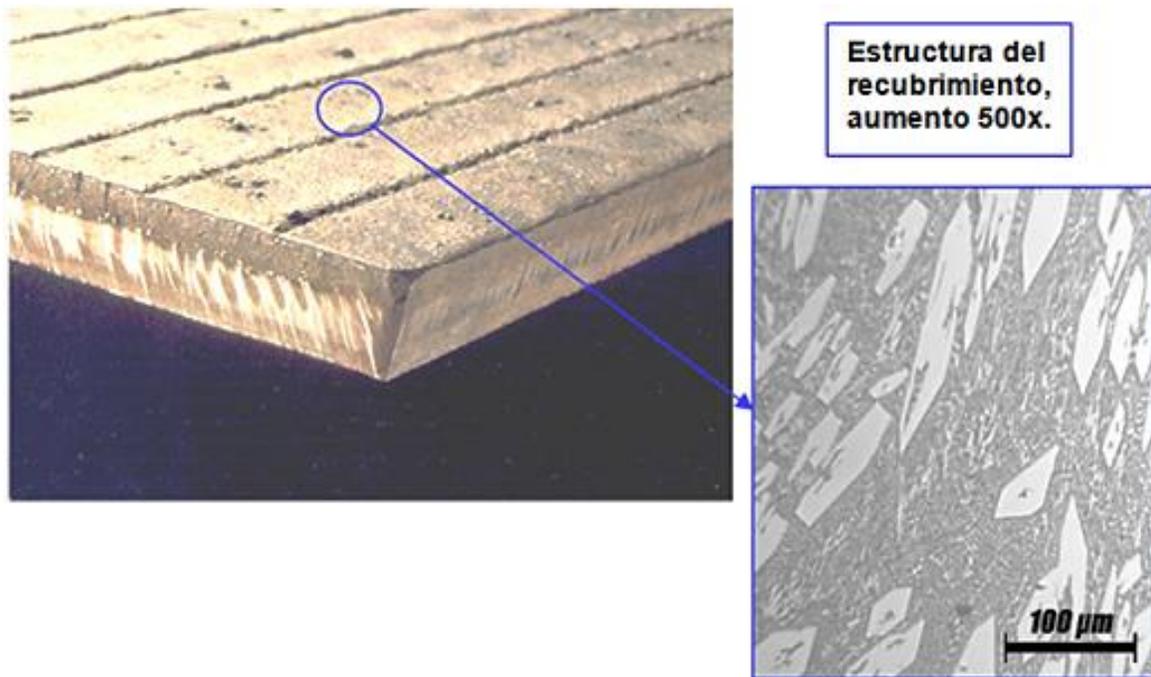


Figura 2.1 Estructura del recubrimiento a 500X.

2.3 ELEMENTOS ALEANTES.

2.3.1 Tierras raras.

Nuestro planeta está lleno de elementos químicos diferentes que componen todo lo que nos rodea. Algunos son muy conocidos como el cobre, oro y plata, mientras que otros son desconocidos, pero realmente útiles.

Las tierras raras son un impresionante conjunto de elementos, especialmente metales y minerales y, que hoy son muy codiciados para la fabricación de instrumentos tecnológicos.

Las tierras raras constituyen un grupo compuesto por 17 elementos. Su nombre se debe a que su extracción es bastante dispersa y no concentrada. En años recientes han ganado mucha importancia debido a sus excelentes propiedades de refinamiento de grano. El refinamiento de la estructura es generalmente conseguido por la tendencia de las tierras raras a promover un mayor número de sitios de nucleación con inclusión de finas partículas. La mayoría de las tierras raras que están comúnmente siendo usadas son el óxido de cerio y el óxido de lantano [6-12].

2.3.2 Elementos que forman parte de las tierras raras:

- Cerio.
- Lantano.
- Praseodimio.
- Neodimio.
- Prometio.
- Samario.
- Europico.
- Gadolinio.
- Terbio.
- Disprosio.
- Holmio.
- Erbio.
- Tulio.
- Iterbio.
- Lutecio.
- Escandio.
- Itrio.

Los elementos que forman las tierras raras son muy apreciados, razón por la que el tener yacimientos ricos en ellos es una gran ventaja para los países.

China, es el país que concentra la mayor cantidad de toneladas de tierras raras extraídas, quedándose con el 95% a nivel mundial. Rusia e India, cada una con un 2% y Malasia y Brasil con 0,5% respectivamente.

Dentro de las tierras raras, los elementos más cotizados son el Itrio, Neodimio, Europio e Iterbio. Considerados como más valiosos que el oro, hoy están escasos, ya que China, su mayor productor, bajó los niveles de extracción y exportación, como forma de evitar su agotamiento y, a la vez, minimizar los efectos que sus procesos provocan en el medio ambiente.

2.3.3 Efecto de las tierras raras en las propiedades tribológicas.

Investigaciones previas han mostrado el efecto positivo de adición de cerio sobre la microestructura y propiedades mecánicas y tribológicas [13].

A la fecha, muy pocos investigadores han analizado el comportamiento al desgaste de adición de tierras raras a las aleaciones base hierro.

2.4 CONDICIONES QUE ASEGURAN LA CALIDAD EN LOS RECUBRIMIENTOS DUROS.

Características de los procesos de soldadura utilizados para materiales hardfacing, se observan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Características de los procesos de soldadura utilizados para materiales hardfacing.

Proceso de soldadura	Modo de aplicación	Forma de la aleación	Dilución, %	Eficiencia del depósito, %
Arco Manual	Manual	Varilla recubierta,	10 - 20	65
		Varilla tubular		
Arco Abierto	Semiautomático	Alambre flux core	15 - 40	80 - 85
	Automático	Alambre flux core	15 - 40	80 - 85
TIG	Manual	Varilla, barra tubular	10 - 20	98 - 100
	Automático	Varias formas	10 - 20	98 - 100
Arco Sumergido	Automático	Varilla de alambre tubular	30 - 60	95
MIG	Semiautomático	Varilla de alambre tubular	10 - 40	90 - 95
	Automático	Varilla de alambre tubular	10 - 40	90 - 95
Laser	Automático	Polvo	1 - 10	95 - 85

2.4.1 Selección del proceso de soldadura.

La mayoría de los procesos de recubrimiento y relleno involucran fusión por soldadura, donde el metal de relleno y la superficie del metal base funden juntos y solidifican y luego resolidifican.

Los ciclos de calentamiento y enfriamiento son más rápidos por arco eléctrico, lo que significa que las tensiones térmicas sobre el metal base y el recubrimiento son muchos mayores, por lo tanto, son más susceptibles a fisuramiento [1].

2.4.2 Factores que influyen en la selección de un proceso de soldadura.



Figura 2.2 Factores para selección de proceso de soldadura.

En la mayoría de los trabajos se presentan más de uno de los tipos de desgaste, y por tal motivo la selección correcta de un electrodo de recubrimiento protector debe hacerse con criterio de la importancia e influencia de cada factor en el proceso de desgaste o deterioro de la pieza [1].

Existen diversos métodos para ejecutar una soldadura, dentro de ellos se destacan los métodos que utilizan arco eléctrico. A continuación, se muestra un esquema donde se representan estos procesos de soldadura [14] [15].

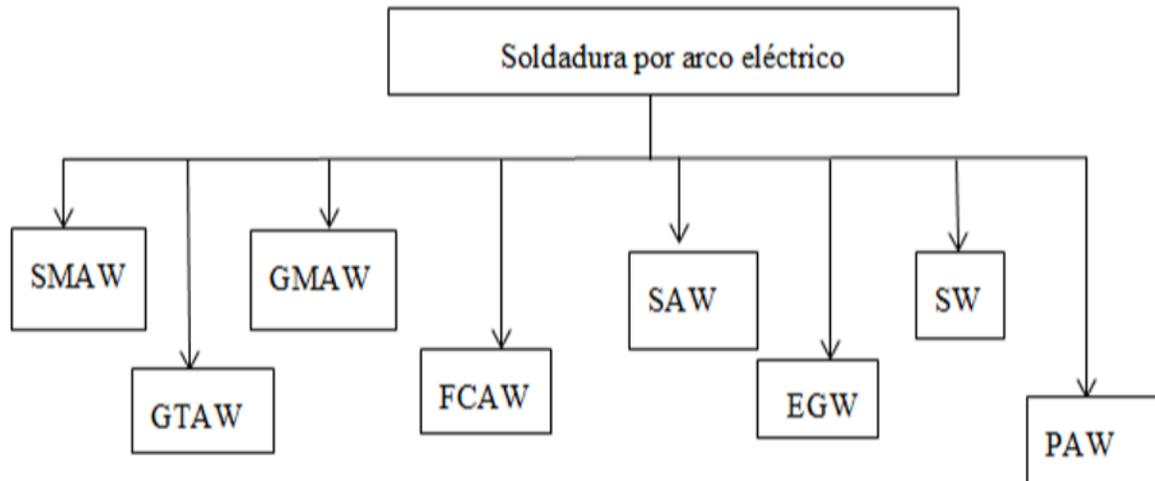


Figura 2.3 Procesos de soldadura por arco.

2.5 SOLDADURA POR ARCO DE METAL PROTEGIDO SMAW.

La soldadura por arco de metal protegido (Shielded Metal Arc Welding SMAW) es un proceso de soldadura por arco en el que se produce coalescencia de metales por medio del calor de un arco eléctrico que se mantiene entre la punta de un electrodo cubierto y la superficie del metal base en la unión que se está soldando [16].

El efecto del amperaje en la microestructura, la dureza y la resistencia al desgaste abrasivo de aleaciones para recubrimientos duros con base hierro, alto Cr y C muestran que al disminuir la entrada de calor se reduce el porcentaje de dilución y se promueve la formación de carburos primarios. La más alta resistencia al desgaste abrasivo se obtiene cuando la microestructura está compuesta de carburos primarios y una matriz eutéctica [17].

La temperatura generada por el arco en la punta del electrodo es de aproximadamente 3500 °C, que es más alta que la temperatura requerida para fundir la mayoría de los metales. El calor derretirá el metal base y el electrodo recubierto, creando una pileta líquida o fundida que se solidificará a medida que el electrodo se mueve a lo largo de la junta. En la soldadura de electrodos recubiertos, el amperaje se establece por el diámetro del electrodo y el tipo de recubrimiento, y el voltaje se establece por la longitud del arco [18].

La función del recubrimiento es proteger el metal fundido a través de la formación de gas y escoria, proporcionar desoxidante, elementos de aleación, promover la generación de arco y su estabilidad, determina la forma y la permeabilidad del cordón de soldadura y la posición de esta, transmite mayor o menor calor y determina la viscosidad y la fusión de la escoria [18].

Al usar una sola capa de recubrimiento por proceso SMAW se obtiene mucha dilución del material base dentro del recubrimiento y por ende dicho recubrimiento presenta características muy heterogéneas, estimulándose la formación de austenita proeutéctica y reduciéndose la resistencia al desgaste abrasivo [19].

La soldadura manual por arco eléctrico con electrodos revestido es la forma más común de soldadura.

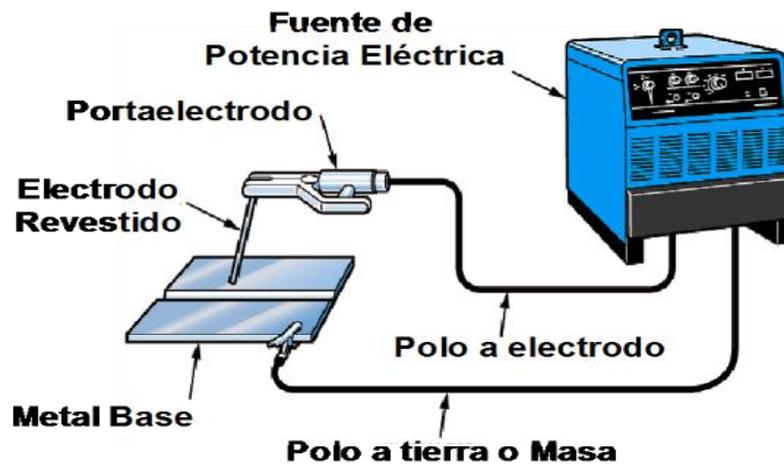


Figura 2.4 Soldadura por arco de metal protegido (SMAW).

2.1.6.1 Ventajas de la soldadura electrodo revestido:

- El equipo es relativamente sencillo, económico y portátil.
- Proceso simple, flexible y portable.
- El electrodo recubierto proporciona el metal de aporte y el mecanismo para proteger dicho metal y el metal de soldadura contra una oxidación perjudicial durante la soldadura.
- No se requiere protección con gas auxiliar ni un fundente granular.
- Se puede utilizar en áreas de acceso limitado.
- El proceso es menos sensible al viento y las corrientes de aire que los procesos de soldadura por arco protegidos con gas.
- El proceso es adecuado para la mayor parte de los metales y aleaciones de uso común [16] [18].

2.5.1 Tipos de electrodos:

- Celulósicos.
- Rutílicos.
- Básicos / Bajo Hidrogeno.
- Para combatir el desgaste.
- Aceros inoxidables.
- Fundición de Hierro.
- Bronce.
- Cobre.
- Aluminio.
- Corte [18].

2.5.2 Clasificación de los electrodos

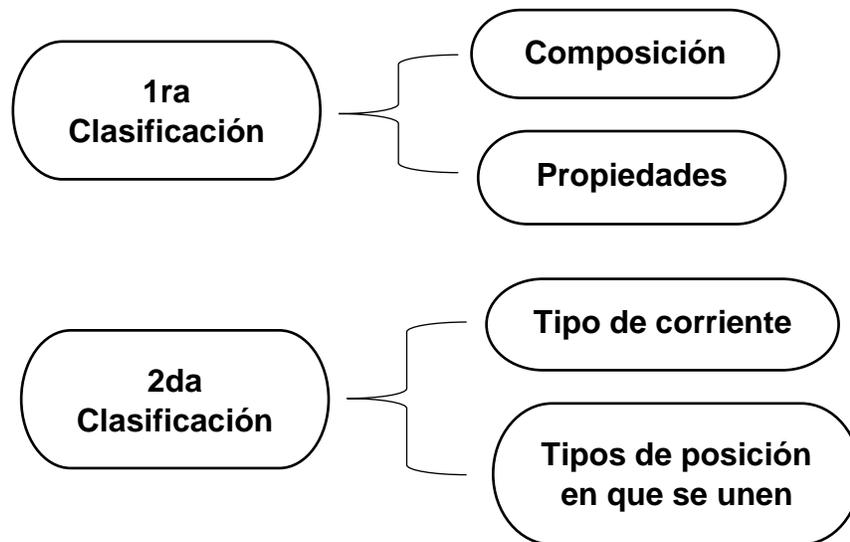


Figura 2.5 Clasificación de electrodos.

Para electrodos de acero al carbono para soldadura con arco, se usa un sencillo sistema de numeración para clasificar los electrodos donde:

- La “E” significa Electrodo
- Los 2 de 4 o 3 de 5 primeros dígitos indican la resistencia a la tracción en miles de libras por pulgada al cuadrado.
- El siguiente dígito indica la posición al soldar como sigue:
 - Todas las posiciones (1)
 - Posición plana y horizontal (2)
- El siguiente dígito indica las características de operación y del recubrimiento, por ejemplo 5, 6 u 8 que son dígitos para electrodos bajo hidrógeno [16].

2.6 DESGASTE

El desgaste se considera la pérdida de partículas metálicas de la superficie de una pieza por acción directa o por una combinación de varios factores; Algunos de estos factores son: abrasión, fricción metálica, adhesión, corrosión, cavitación, golpes e impactos. (Goenaga Pertuz, Mejía Ramos, Rojas Solano, Viaña Borja, & Niebles Núñez, 2007).

El estudio del desgaste y la fricción, constituyen uno de los últimos aspectos de la mecánica clásica que aún presenta interrogantes abiertos importantes. Bajo la óptica de la ingeniería, su importancia está en aumento, en función de las cargas impuestas a los componentes mecánicos y la disminución constante de las tolerancias permitidas en los procesos de fabricación (Mesa Grajales & Sinatora, 2003).

Los daños ocasionados por el desgaste de piezas en un equipo industrial, llevan continuamente a recambio de partes en la maquinaria, provocando tiempos de parada de la producción generalmente grandes (Mesa Grajales & Sinatora, 2003).

La forma en que un material es desgastado, su tiempo de vida útil y su reconstrucción, son temas en los cuales la industria y la academia deben pensar y estudiar con sumo cuidado ya que, debido a tal deterioro, las empresas invierten miles de millones de USD, cerca de un 3% del producto interno bruto (PIB) de los países industrializados y acentuándose mucho más en los países llamados del tercer mundo o subdesarrollados combatiendo dichos daños [20].

2.6.1 DESGASTE SECO DESLIZANTE ADHESIVO.

La naturaleza del desgaste hace que el desgaste adhesivo este siempre presente en mayor o menor grado en las uniones de rozamiento. En la práctica de ingeniería se conoce también con los nombres de: desgaste por frotamiento; rayado adhesivo; gripado; agarrotamiento; tales denominaciones se deben a la intensidad del desgaste, estados de las superficies desgastadas y tipos de elementos de máquina.

El desgaste adhesivo está presente en los siguientes elementos de máquinas: cojinetes de deslizamiento; transmisiones por engranes y tornillo sin-fin; guías de deslizamiento; levas; grupos pistón – aro -cilindro; etc.

2.6.2 Los factores que definen el desgaste adhesivo son:

- Condiciones de lubricación (seco o lubricado); abastecimiento de lubricante; calidad del lubricante.

- Compatibilidad metalúrgica (solubilidad mutua) de los materiales de la unión tribológica.
- Microgeometría superficial.
- Condiciones de trabajo: carga, velocidad y temperatura.

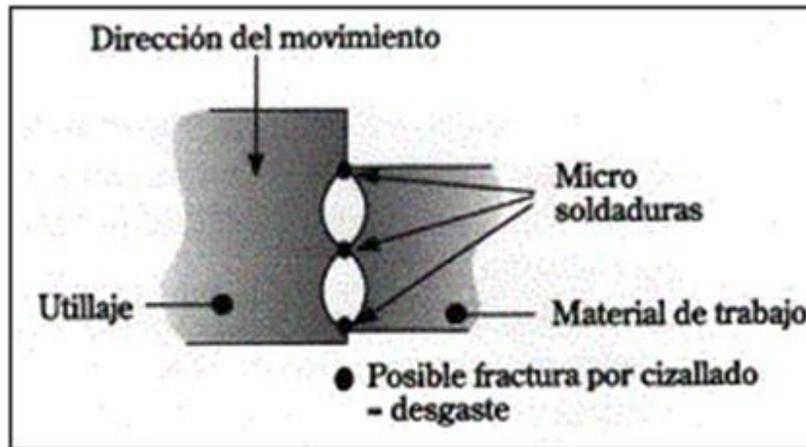


Figura 2.6 Desgaste seco deslizando.

2.7 PRUEBA DE DESGASTE PIN ON DISC.

La prueba tribológica Pin-on-Disk es un estudio basado en el comportamiento de dos probetas (pin y disco) cuando las mismas interactúan entre sí, friccionando una con la otra a razón de una velocidad constante y una carga aplicada [21].

Para la prueba de desgaste pin-on-disk, se requieren dos especímenes. Uno de ellos, un pasador con una punta redondeada, se coloca perpendicular al otro, generalmente un disco circular plano. Una bola, sostenida rígidamente, se usa a menudo como el espécimen del perno. La máquina de prueba hace girar la muestra de disco o la muestra de clavija alrededor del centro del disco. En cualquier caso, la trayectoria deslizando es un círculo en la superficie del disco. El plano del disco puede estar orientado horizontalmente o verticalmente [22].

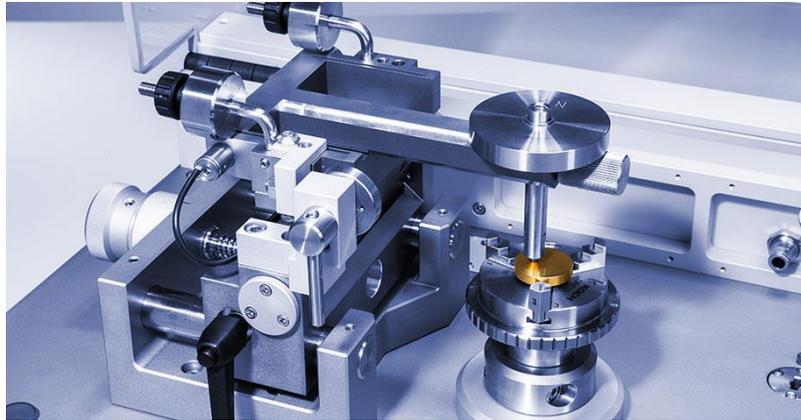


Figura 2.7 Maquina de prueba pin on disk.

La probeta en forma de pin se presiona sobre el disco con una carga específica, y dicha probeta, se encuentra sujeta a un dispositivo posicionado con contrapesos. Los reportes de desgaste se realizan en términos de pérdida de volumen en milímetros cúbicos. La pérdida de masa por desgaste se puede convertir en pérdida de volumen mediante la utilización de adecuados valores de densidad [22].

La cantidad de desgaste se determina midiendo las dimensiones lineales apropiadas de ambos especímenes antes y después de la prueba. Si se utilizan medidas lineales de desgaste, el cambio de longitud o el cambio de forma del pasador y el cambio de profundidad o forma de la pista de desgaste del disco (en milímetros) se determinan mediante cualquier técnica metrológica adecuada, como la medición electrónica de distancia o el perfilado del estilete. Las medidas lineales de desgaste se convierten en el volumen de desgaste (en milímetros cúbicos) usando relaciones geométricas apropiadas [23].

La cantidad de desgaste en cualquier sistema dependerá, en general, del número de factores del sistema tales como la carga aplicada, las características de la máquina, la velocidad de deslizamiento, la distancia de deslizamiento, el entorno y las propiedades del material.

El valor de cualquier método de prueba de desgaste consiste en predecir la clasificación relativa de las combinaciones de materiales.

Según la prueba y los parámetros empleados (lubricación, carga, presión, geometría de contacto, eliminación de desechos de desgaste y presencia de ambiente corrosivo), no hay seguro de que la prueba predecirá el índice de desgaste de un material dado en condiciones diferentes a las de la prueba [23].



Figura 2.8 Tribómetro PIN-DISCO.

2.8 TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN PREVIOS.

Tabla 2.2. Trabajos de investigación previos.

Título del artículo	Autores	Fecha de publicación	Descripción
Evaluación de la resistencia al desgaste abrasivo en Recubrimientos duros para aplicaciones en la industria minera.	Juan Carlos Gutiérrez, Lisys Margarita León Sevilla, Dairo Hernán Mesa Grajales, Alejandro Toro	2004	Muestra el estudio de recubrimientos duros de alto Cr y alto W comparados con un recubrimiento RFeCrA1 debido a su elevada resistencia a la abrasión. Relación entre dureza y resistencia al desgaste.
Recubrimientos duros: alternativa de recuperación en piezas afectadas por el desgaste.	Jennifer Paola Goenaga Pertuz, María Teresa Mejía Ramos, David Alejandro Rojas Solano, Karen Margarita Vlaña Borja, Enrique Esteban Nlebles Núñez	2007	Trata sobre el desgaste abrasivo presente en la mayoría de las industrias mineras, condiciones que aseguran la calidad de los recubrimientos y resultados de dilución en recubrimientos obtenidos.
Recuperación de piezas desgastadas con recubrimientos protectores.	José Luddey Marulanda, Gonzalo Trujillo S.	2007	Contiene una parte de antecedentes de los recubrimientos y tipos de desgastes presente en los materiales.
The effect of microstructure on abrasive wear of a Fe–Cr–C–Nb hardfacing alloy deposited by the open arc welding process.	E.O. Correa, N.G. Alcântara, L.C. Valeriano, N.D. Barbedo, R.R. Chaves	2015	Incluye información sobre la relación entre la resistencia al desgaste por abrasión y la microestructura de una aleación de revestimiento duro basada en Fe-Cr-C.
On the modeling of dry sliding adhesive wear parameters of vanadium additive iron-based alloys at elevated temperatures.	Yogesh Kumar Singla, D.K. Dwivedi, Navneet Arora	2015	Contiene información sobre la influencia del aumento de contenido de vanadio en la dureza y la resistencia al desgaste seco deslizante
Dry sliding adhesive wear characteristics of Fe-based hardfacing alloys with different CeO ₂ additives – A statistical analysis.	Yogesh Kumar Singla, Navneet Arora, D.K. Dwivedi	2016	Habla del efecto refinador en la microestructura y la resistencia al desgaste seco deslizante de la adición de óxido de cerio a recubrimientos base hierro.
Effect of Nb additive on wear resistance and tensile properties of the hypereutectic Fe-Cr-C hardfacing alloy.	Sha Liua, Zhijun Shia, Xiaolei Xingb, Xuejun Renc, Yefei Zhou, Qingxiang Yanga	2020	El recubrimiento Fe-26Cr-3.7C-1.2Nb muestra mejora de resistencia a la tensión y al desgaste medido por pruebas de desgaste recíproco con la adición de niobio. Efecto positivo en el refinamiento de carburos primarios.

CAPITULO 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

En esta sección se presentan los materiales y equipos utilizados para el desarrollo de esta tesis. Además, se describen las técnicas utilizadas para la caracterización de materiales.

Procedimiento de soldadura.

Voltaje: 26 Voltios DC

Amperaje: 160 amperes

Polaridad del electrodo: Positiva

Velocidad de avance: 3 a 5 mm/s

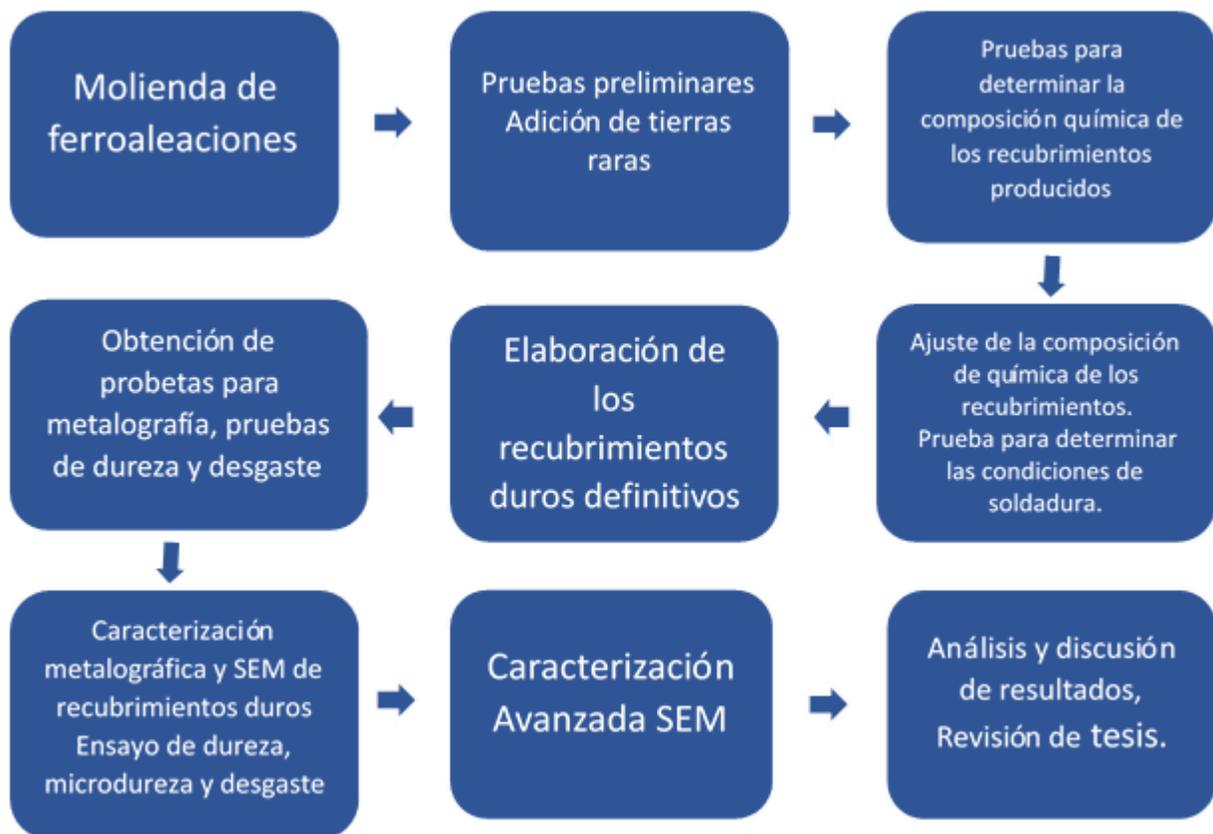
3.1 EQUIPOS, MATERIALES Y MÉTODOS.

- Máquina de soldar marca Infra.
- Espectrómetro de chispa OES.
- Máquina de desgaste por fricción.
- Fresadora manual.
- Sierra cinta cortadora de metal.
- Molino de bolas.
- Esmeriladora.

Materiales

- Ferroaleaciones base hierro-cromo-carbón.
- Ferroaleación hierro-niobio.
- Oxido de lantano.
- Placa de acero.
- Silicato de sodio.
- Electroodos 6013.
- Discos abrasivos de corte.
- Jeringa.
- Guantes.
- Mascarilla para gases.
- Tamiz no. 120.

3.2 DIAGRAMA DE FLUJO EXPERIMENTAL



3.3 MAPA CONCEPTUAL DE PROCESOS DE ELABORACIÓN DE RECUBRIMIENTOS DUROS.

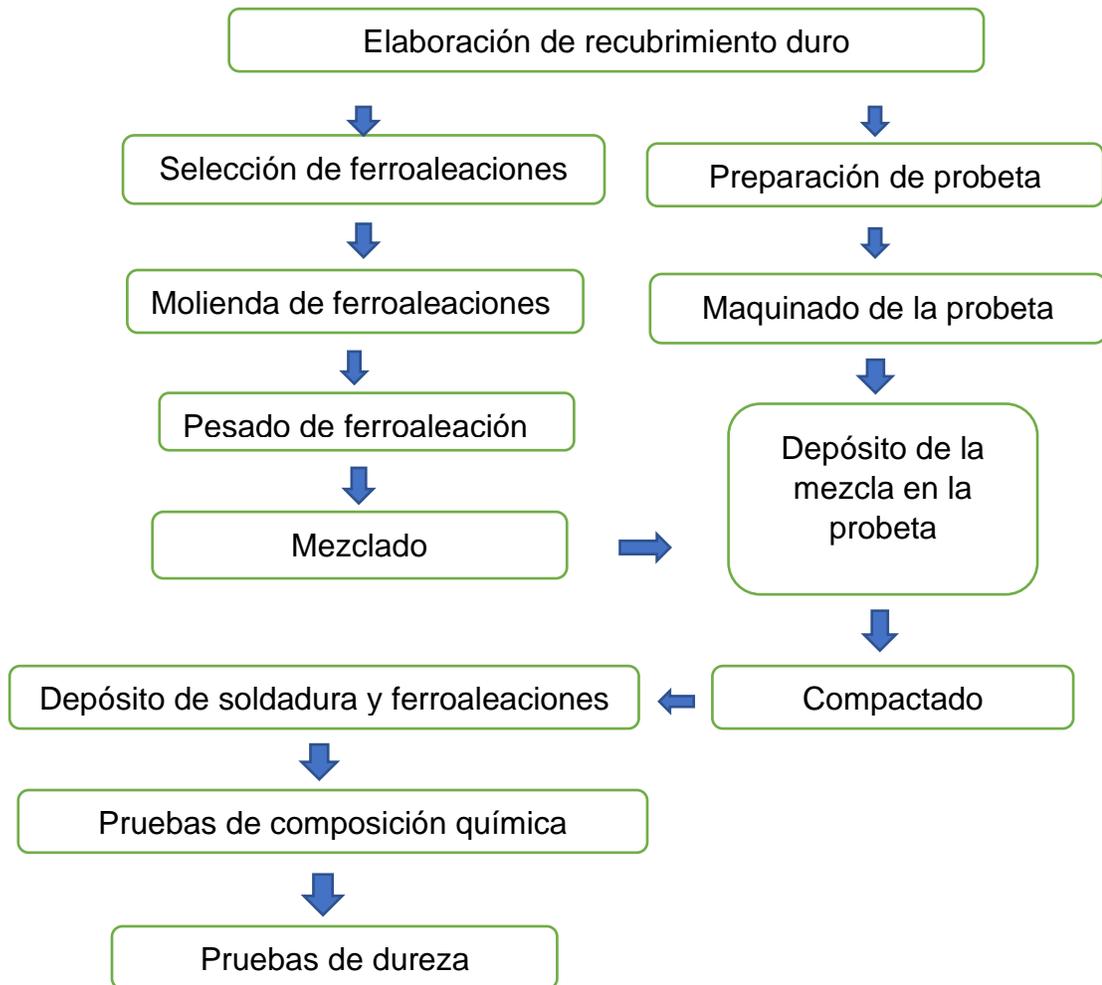


Figura 3.1 Elaboración de recubrimiento duro.

3.4 DISEÑO EXPERIMENTAL

Obtener la mezcla de ferroaleaciones adecuada para producir un recubrimiento duro.

Tabla 3.1 Recubrimiento base Fe-Cr-C

Mezcla	Fe-Cr alto C (g)	Limadura de hierro (g)	Silicato de sodio (ml)
1	3	7	4
2	5	5	2
3	7	3	4
4	10	0	4
5	10	0	2

Tabla 3.2 Recubrimiento base Fe-Cr-C-Nb

Mezcla	Fe-39.6Cr-5.4C (g)	Fe-66Nb(g)	Silicato de sodio (ml)
1	10	0	2
2	10	1	2
3	10	2	2

Tabla 3.3 Recubrimiento base Fe-Cr-C-Nb- La₂O₃

Mezcla	Fe-39.6Cr-5.4C (g)	Fe-66Nb(g)	La ₂ O ₃ (g)	La ₂ O ₃	Silicato de sodio (ml) (2.7 gramos = 2 ml)
1	15	2	0.4	2%	2
2	15	2	1	5%	2
3	15	2	1.5	7%	2

3.5 MOLIENDA DE FERROALEACIONES.

Para la molienda de ferroaleaciones se utilizó el molino de bolas marca MIXER/MILL 8000M (figura 3.2), el cual redujo el tamaño de las ferroaleaciones de unos centímetros a micras, prácticamente polvo como se muestra en las figuras 3.4.



Figura 3.2 Molino MIXER 8000M.



Figura 3.3 Molienda de ferroaleaciones.



Figura 3.4 Polvo de ferroaleación.

3.6 TAMAÑO DE PARTÍCULAS.

Para el tamaño de partícula se utilizó un tamiz número 120 que tiene una apertura de 125 micras, el cual da buenos resultados para la mezcla de ferroaleaciones

Tamiz			
N°.	Abertura	No.	Abertura
4	4,75mm	50	300µm
5	4,00mm	60	250µm
6	3,35mm	70	212µm
7	2,80mm	80	180µm
8	2,36mm	100	150µm
10	2,00mm	120	125µm
12	1,70mm	140	106µm
14	1,40mm	170	90µm
18	1,18mm	200	75µm
En seco.		En humedo.	

Figura 3.5 Tamaño de tamiz.



Figura 3.6 Tamices de laboratorio.

3.7 RANURADO DE PIEZA.

En la fresadora se procede a hacer ranura en el costado de la placa con un cortador vertical de $\frac{1}{4}$. Y una profundidad de 3 mm para hacer posteriormente el depósito de la mezcla de la ferroaleación.



Figura 3.7 Primer corte.

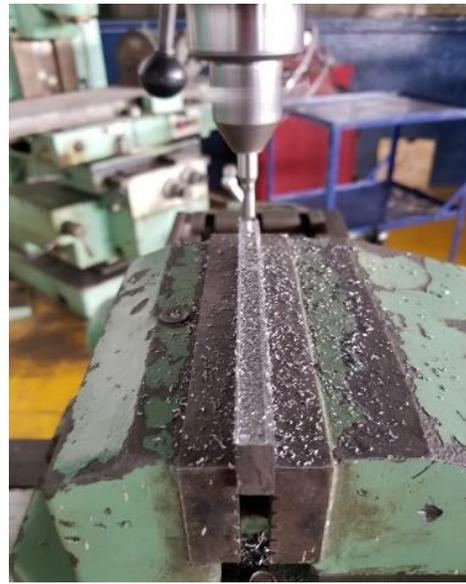


Figura 3.8 Segundo corte.

3.8 PREPARACIÓN DE LA FERROALEACIÓN.

Una vez molida la ferroaleación y tamizada hasta el tamaño de grano que se desea se prosigue a pesar en una báscula la cantidad necesaria de cada ferroaleación para poder combinar y obtener la mezcla deseada, para ser aglomerada se utilizó silicato de sodio y posteriormente se deposita sobre la ranura del metal base (figura 3.9 y 3.10), se deja secar por un día completo.



Figura 3.9 Depósito de la ferroaleación.



Figura 3.10 Secado de la ferroaleación.

3.9 INTEGRACIÓN DE FERROALEACIONES POR MEDIO DE SMAW.

3.9.1 Fundir la aleación en polvo con el electrodo 6013.

Antes de fundir la mezcla de ferroaleaciones se seca completamente con una parrilla eléctrica para eliminar la humedad en la mezcla. Seguidamente se funde por medio del proceso SMAW con electrodo 6013 con los parámetros de voltaje y amperaje predeterminados en la máquina.



Figura 3.11 Probeta con ferroaleación.



Figura 3.12 Probeta de recubrimiento.

3.9.2 Corte de probetas para prueba de chispa.

Para cortar las muestras se utilizó una esmeriladora de disco marca makita modelo 9554HN con disco de corte de 4½ pulgadas como la que se muestra a continuación, así como también se aprecian las muestras cortadas figura 3.14.

Para evitar el calentamiento al momento que se realizó el corte de las muestras se utilizó agua como lubricante mientras se mostraban para no modificar su estructura con el calentamiento.



Figura 3.13 Esmeriladora de disco.



Figura 3.14 Corte de muestras.

3.9.3 Espectrometría de emisión óptica (prueba de chispa).

La prueba de composición química de los recubrimientos se realizó con el espectrómetro de emisión por chispa marca BRUKER modelo Q4 TASMAN, el cual nos proporciona un método estándar para el análisis directo de muestras metálicas, de gran utilidad en fabricación y control de la producción en la industria del metal.

Esta técnica permite la determinación rápida y simultánea de muchos elementos químicos en aleaciones, incluyendo elementos ligeros como C, S, B y P, por lo que es complementaria con la espectrometría de fluorescencia de rayos X para análisis metalúrgicos.



Figura 3.15 Espectrómetro de chispa.

3.10 PRUEBAS DE DUREZA ROCKWELL HRC.

Se hicieron pruebas de dureza con el durómetro marca AFFRI modelo 206RT en escala Rockwell C con una carga de 150 kgf en cada una de las muestras para comparar su dureza en relación con las diferentes composiciones químicas obtenidas. En las siguientes figuras se observa el equipo utilizado para las pruebas y las marcas del indentador en el recubrimient



Figura 3.16 Durómetro Affri modelo 206RT.



Figura 3.17 Marcas de prueba de dureza.

3.11 MICROSCOPIA Y SEM.

3.11.1 Preparación de muestras para microscopia y SEM.

Las probetas obtenidas se sometieron a cuatro etapas de desbaste en lijas de SiC de granulometrías de 100, 220, 600, 1200 granos / pulgada, utilizando agua como lubricante. Para el acabado final se utilizó un paño de micro fibra y alúmina de 5 micras y nital al 2% para el ataque de las probetas.



Figura 3.18 Muestras sin encapsular.



Figura 3.19 Muestras encapsuladas en baquelita.

3.11.2 Equipo para microscopia óptica.

Para identificación del tipo de microestructura y tamaño de grano de cada una de las muestras se utilizó un microscopio óptico tipo metalográfico marca UNIMENT VERSAMET.



Figura 3.20 Microscopio óptico Uniment Versamet.

3.11.3 Microscopia electrónica de barrido.

El equipo utilizado para la caracterización del material fue un microscopio electrónico de barrido (SEM) modelo: JSM-6510LV, de tipo térmico de uso general y tiene una amplia gama de aplicaciones.

Integración EDS.

El análisis se puede iniciar desde la ventana SEM dado que el EDS también es un producto JEOL, el control se puede realizar desde una sola PC.

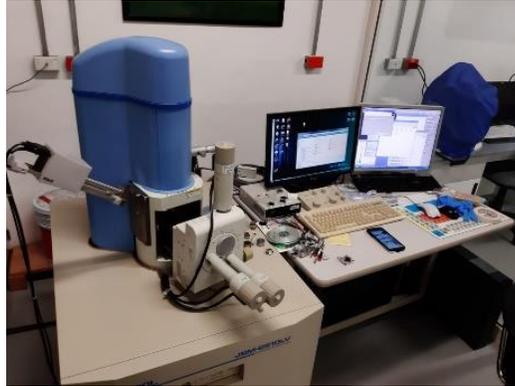


Figura 3.21 (SEM) modelo: JSM-6510LV.

3.12 MICRODUREZA.

Las pruebas de micro dureza se realizaron con un microdurómetro HMV-2T (Shimadzu) con capacidad de medir la dureza Vickers, Knoop y Brinell. La carga aplicada fue de 980.7 mN y el tiempo de exposición 15 segundos.



Figura 3.22 Microdurómetro HMV-2T (Shimadzu).

3.13 PRUEBA DE DESGASTE PIN ON DISC.

3.13.1 Maquinado de muestras para pruebas pin on disc.

Para el maquinado de los pines se utilizó un torno convencional modelo GH-1340A se puede apreciar a continuación en la figura 3.23. La parte del recubrimiento no se pudo maquinar en él; esto se realizó en un el esmeril de pedestal figura 3.24 para terminar de darle la forma al pin figura 3.25 para la prueba de desgaste.



Figura 3.23 Torno GH-1340A.



Figura 3.24 Esmeril de pedestal.



Figura 3.25 Pines para prueba de desgaste.

3.13.2 Rectificado de discos para la prueba de desgaste.

Por norma para la prueba pin on disc se realizó el rectificado de los discos figura 3.26, para obtener una rugosidad de 0.5 Ra, para ello se utilizó la maquina rectificadora de superficies planas la cual se puede apreciar en la siguiente figura 3.27. La dureza del disco de acero para herramienta tipo D-2 fue de 63 HRC.



Figura 3.26 Disco de acero D2.



Figura 3.27 Rectificadora de superficies planas.

3.13.3 Máquina de desgaste pin on disc.

La prueba de desgaste se realizó con dos cargas 7 kilogramos y 10 kilogramos a una velocidad de 400 RPM (100.53 M/S), durante 5 minutos cada prueba. A continuación, se muestra la pantalla de control figura 3.28, así como el pin sujetado y apoyado sobre el disco para la prueba figura 3.29 y se puede observar en la figura 3.30 la marca que deja el pin en el disco.



Figura 3.28 Pantalla de control maquina pin on disc.

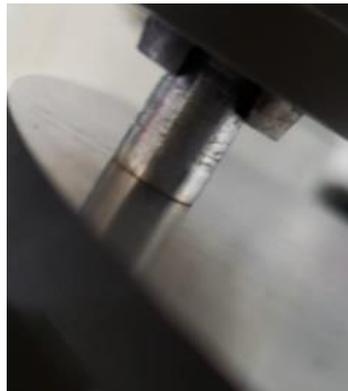


Figura 3.29 Pin perpendicular al disco.



Figura 3.30 Marca del pin en el disco.

3.13.4 Cálculo para distancia de deslizamiento:

Para un diámetro de deslizamiento de 8 cm.

Perímetro= $\pi \cdot (D)$: $3.1416 (8 \text{ cm}) = 25.13 \text{ cm} = \text{vuelta} = 1 \text{ Rev. /min}$

Si usamos una velocidad de 400 Rev. /min

$V = d/t \text{ (m/s)}$

$V = 400 \text{ vueltas/min} \times 25.13 \text{ cm/vuelta} = 10053.12 \text{ cm/min}$

$V = 100.53 \text{ m/min} = 1.67 \text{ m/s}$

$d = (100.53 \text{ m/min}) (5 \text{ min}) = 502.65 \text{ m}$

En cada una de las pruebas se pesó el pin antes y después para medir la pérdida de material luego de someterse a desgaste con una báscula de alta precisión marca SHIMADZU modelo AUW220D como se muestra a continuación.



Figura 3.31 Peso de pin antes de la prueba de desgaste.



Figura 3.32 Peso del pin después de la prueba de desgaste.

3.13.5 Factores experimentales y sus niveles de acuerdo a nuestros equipos de pin on disc.

Tabla 3.4. Factores experimentales y sus niveles

Velocidad V, m/s	1.67	1.67	1.67	1.67
Carga 1 P, kg	7	7	7	7
Carga 2 P, kg	10	10	10	10
Nb, % en peso	0	1.5	2.4	3.4
% adición de La ₂ O ₃	0	2%	N/A	7%
Distancia de deslizamiento (m)	500-2500	500-2500	500-2500	500-2500

CAPITULO 4. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

4.1 PRUEBAS PRELIMINARES.

a) Problemas de porosidad en los recubrimientos.

Uno de los principales problemas presentados, durante las pruebas preliminares en la elaboración de recubrimientos fue la falta de conductividad de la mezcla por lo tanto se cortaba el arco eléctrico formado por el electrodo quedando un cordón de soldadura incompleto figura 4.1a o poros en su interior ver figura 4.1b.

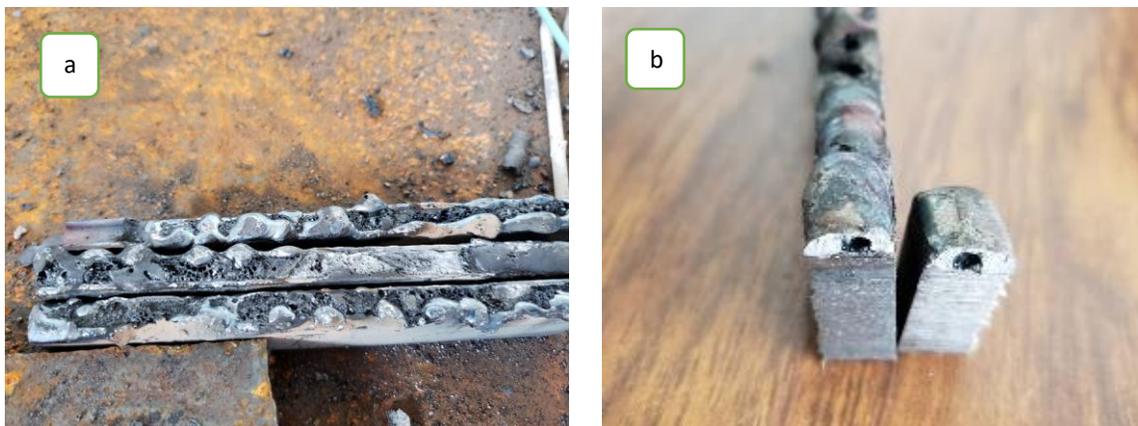


Figura 4.1 a) Falta de continuidad en el arco eléctrico del electrodo y b) problemas de porosidad en los recubrimientos.

Para tratar de solucionar este problema y no se cortará el arco eléctrico formado por el electrodo, una vez depositada la mezcla de las aleaciones se unían la ranura que de la parte superior tal como se muestra en la siguiente figura 4.2 a y b.

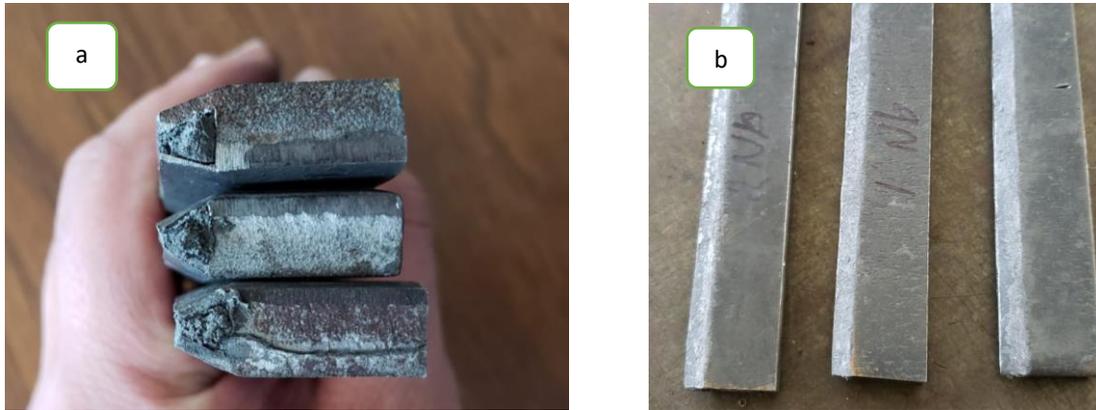


Figura 4.2 Unión de ranura del metal base a) vista frontal b) vista transversal

b) Problemas de falta de fusión.

Otro problema que se presentó en este trabajo fue la falta de fusión de los recubrimientos con el metal base como se aprecia en la siguiente figura 4.3 a. Para resolver este problema se aumentó la corriente de la máquina de 140 a 160 amperes obteniendo mejores resultados como se observa en la figura 4.3 b.

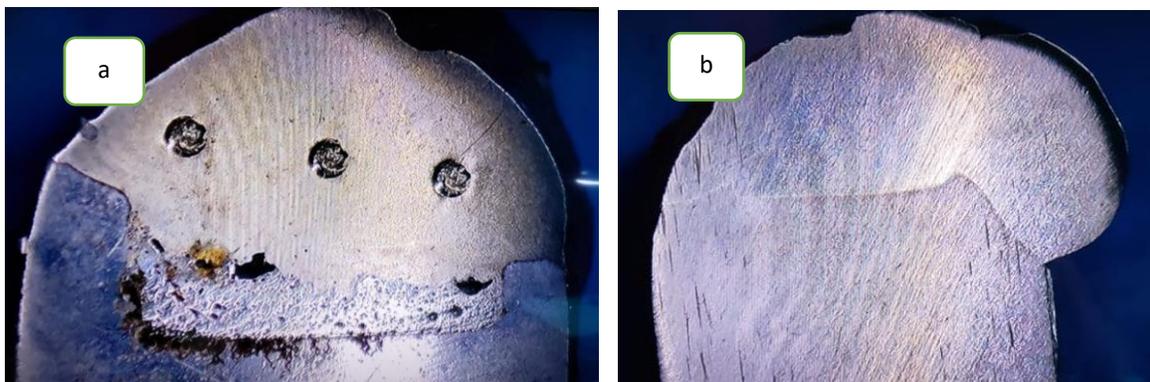


Figura 4.3 a) Recubrimiento con defecto de falta de fusión. b) recubrimiento sin defecto de fusión

4.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE RECUBRIMIENTOS DUROS EXPERIMENTALES.

Se seleccionan 2 muestras como se muestran a continuación con las siguientes composiciones y se muestran imágenes de cada una, así como el resultado de su dureza.

Se observó un buen resultado en la primera mezcla de Fe-Cr-C, teniendo buena cantidad de cromo y carbono dando como resultado una dureza de 51 HRC en ambas muestras.

Tabla 4.1. Fe-Cr-C

Aleación	Cr	C	Si	Nb	Fe
Fe-14cr-1.8c	14.55	1.89	0.76	0.43	Resto
Fe-14cr-1.9c	13.82	1.97	0.66	0.45	Resto

En la mezcla numero dos se puede apreciar que hubo retención de cromo y un 1.5 promedio de niobio, pero su dureza de 47 HRC fue menor que en el caso anterior 51 HRC a pesar de tener mayor porcentaje de cromo.

Tabla 4.2. Fe-Cr-C-Nb 1 g de Fe-Nb

Aleación	Cr	C	Si	Nb	Fe
Fe-15Cr-1.8C-1.5Nb	15.18	1.80	0.76	1.52	Resto
Fe-15Cr-1.7C-1.5Nb	14.65	1.73	0.87	1.47	Resto

En la mezcla tres se observa que la retención de cromo fue muy buena, pero se observó que un porcentaje de Nb mayor a 3 % presenta porosidad se puede observar en las siguientes figuras.

Tabla-4.3. Fe-Cr-C-Nb 2 g de Fe-Nb

Aleación	Cr	C	Si	Nb	Fe
Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb	18.11	1.89	1.18	3.26	Resto
Fe-17Cr-2.2C-3.4Nb	17.07	2.24	1.34	3.40	Resto

En la mezcla cuatro se utilizó la misma mezcla que en la tres, pero se añadió 0.4 gramos de óxido de lantano, se observó en las muestras que la porosidad en la parte del cordón se mantiene y también no hubo buena unión entre el recubrimiento y metal base.

Tabla 4.4. Fe-Cr-C-Nb 2 g de Fe-Nb 2 % de óxido de lantano añadido.

Aleación	Cr	C	Si	Nb	La ₂ O ₃	Fe
Fe-16.6Cr-2.2C-2.4Nb-0.09La	16.59	2.19	1.43	2.47	>0.096	Resto
Fe-16Cr-2.2C-3Nb-0.09La	16.06	2.26	1.45	2.97	0.087	Resto

En la mezcla 5 se observó que la unión entre el recubrimiento y metal base fue buena. La retención de cromo fue buena y su dureza es mejor que la mezcla 3 a pesar de tener 14% de cromo menor a 18.11% de cromo entonces su dureza se atribuyó al oxido de lantano o al niobio.

Tabla 4.5. Fe-Cr-C-Nb 2 g de Fe-Nb 5% de óxido de lantano añadido.

Aleación	Cr	C	Si	Nb	La ₂ O ₃	Fe
Fe-14.6Cr-2.6C-3.4Nb-0.09La	14.64	2.59	4.38	3.43	>0.096	Resto
Fe-14Cr-2.7C-3.3Nb-0.09La	14	2.72	3.02	3.26	>0.096	Resto

En la mezcla 6 se observó que no hubo buena unión entre el recubrimiento y metal base, su dureza es de 50 HRC a pesar de tener porosidad en el cordón sin embargo si no hay una buena unión entre recubrimiento y metal base se corre el riesgo de que se desprenda el recubrimiento duro.

Tabla 4.6. Fe-Cr-C-Nb 2 g de Fe-Nb 7% de óxido de lantano añadido.

Aleación	Cr	C	Si	Nb	La ₂ O ₃	Fe
Fe-14Cr-4.0C-3.6Nb-0.09La	14.59	3.95	5.84	3.60	>0.096	Resto
Fe-14Cr-4.2C-3.6Nb-0.09La	13.48	4.24	6.60	3.60	>0.096	Resto

4.3 MICROSCOPIA OPTICA.

En este apartado, se hace primeramente el análisis metalográfico de los recubrimientos duros experimentales, primero se detalla el recubrimiento base y luego se analiza la adición de niobio y posteriormente la adición de óxido de lantano. En general, se observa que la microestructura de los recubrimientos duros es del tipo dendrítico con la presencia de una red de carburos.

Recubrimiento base (Fe-14Cr-1.9C)

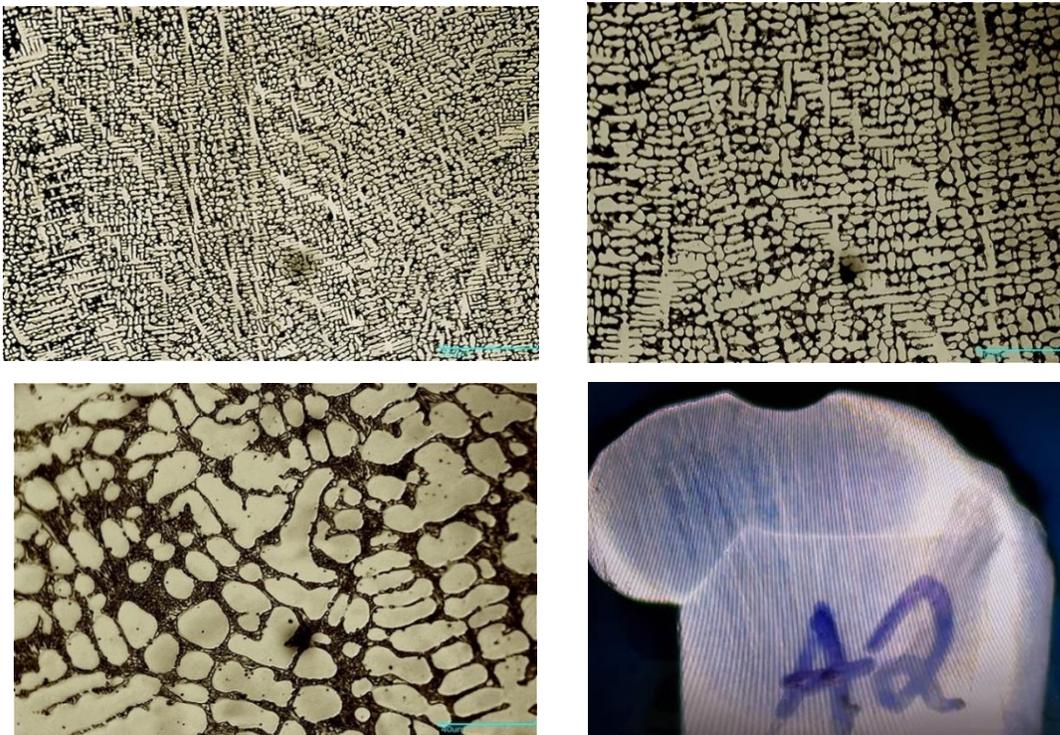


Figura 4.4 Micrografías ópticas del recubrimiento duro base a 100, 200, 500X e imagen macro de recubrimiento dura base.

4.3.1 Efecto de la adición de niobio.

El efecto que produce la adición de niobio sobre la microestructura del recubrimiento base se observó mediante microscopía óptica, los resultados se presentan en las figuras 4.5 a 4.7, a diversos aumentos.

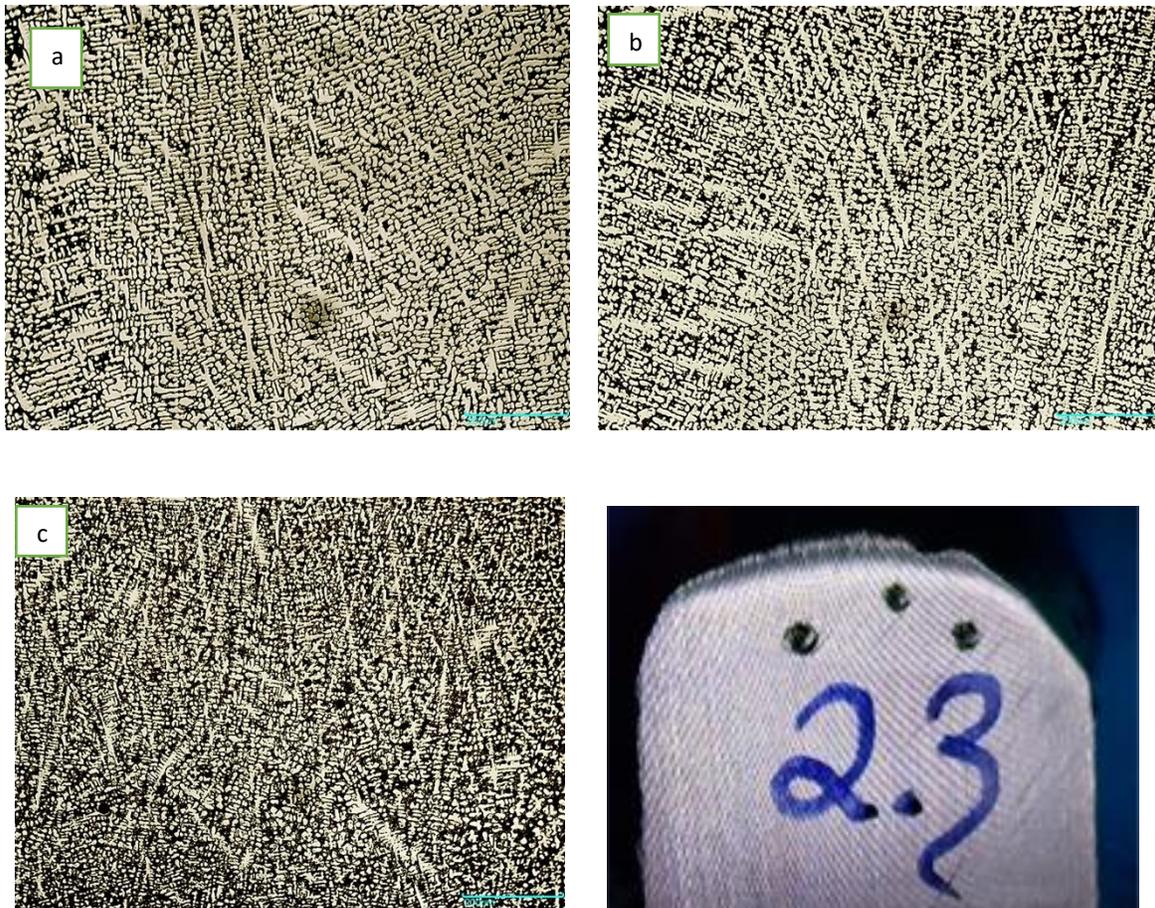


Figura 4.5 Micrografías de los recubrimientos duros, a) Fe-14Cr-1.9C. b) Fe-15Cr-1.7C-1.5Nb y c) Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb. 100 X. d) imagen macro de recubrimiento duro 1.5 Nb depositado.



Figura 4.6 Micrografías de los recubrimientos duros, a) Fe-14Cr-1.9C, b) Fe-15Cr-1.7C-1.5Nb y c) Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb. 200X. d) imagen macro de recubrimiento duro 1.5 Nb depositado.

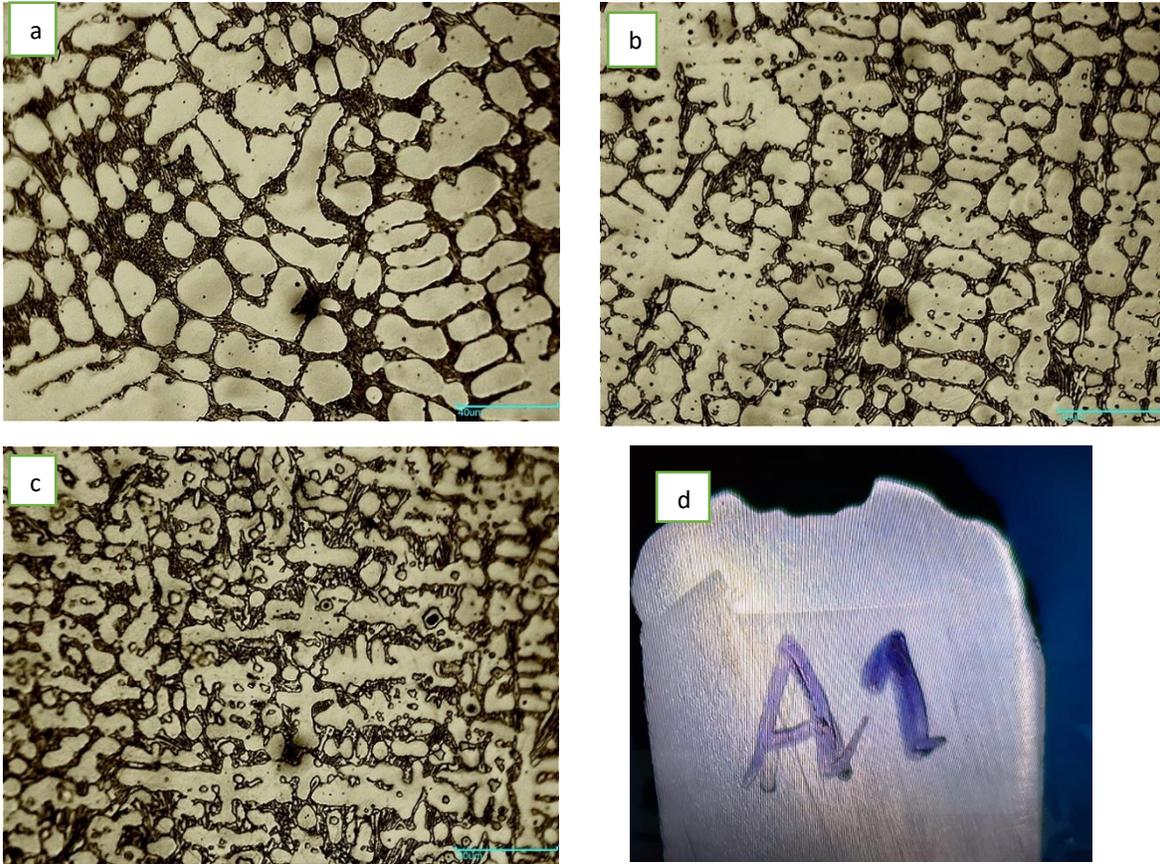


Figura 4.7 Micrografías de los recubrimientos duros, a) Fe-14Cr-1.9C, b) Fe-15Cr-1.7C-1.5Nb y c) Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb. 500X. d) imagen macro de recubrimiento duro base depositado.

Como se muestra en las figuras 4.7 a-c, la adición de Nb produjo un refinamiento microestructural, siendo máximo con una adición de 3.2% de Nb. Como se observa, el tamaño de grano de los recubrimientos se refinó con el incremento de niobio.

Se observa como la adición de Nb, ocasionó un refinamiento de la microestructura, reduciendo el espaciado intercarburos, aumentando con ello la fracción de área de carburos, FAC.

La reducción en el tamaño de grano, está asociado con la tendencia de elementos como vanadio y niobio para restringir el movimiento de los límites de los granos, que evita que los granos se vuelvan más gruesos, debido a su buena estabilidad térmica.

Investigadores han documentado resultados similares de refinamiento de grano con el incremento del contenido de vanadio y niobio [24], [25].

4.3.2 Efecto de la adición de óxido de lantano.

Al recubrimiento duro con mayor contenido de niobio, se le aplicaron diferentes cantidades de óxido de lantano para observar su efecto sobre la microestructura, dureza y comportamiento al desgaste. Las figuras siguientes muestran los resultados en la microestructura.

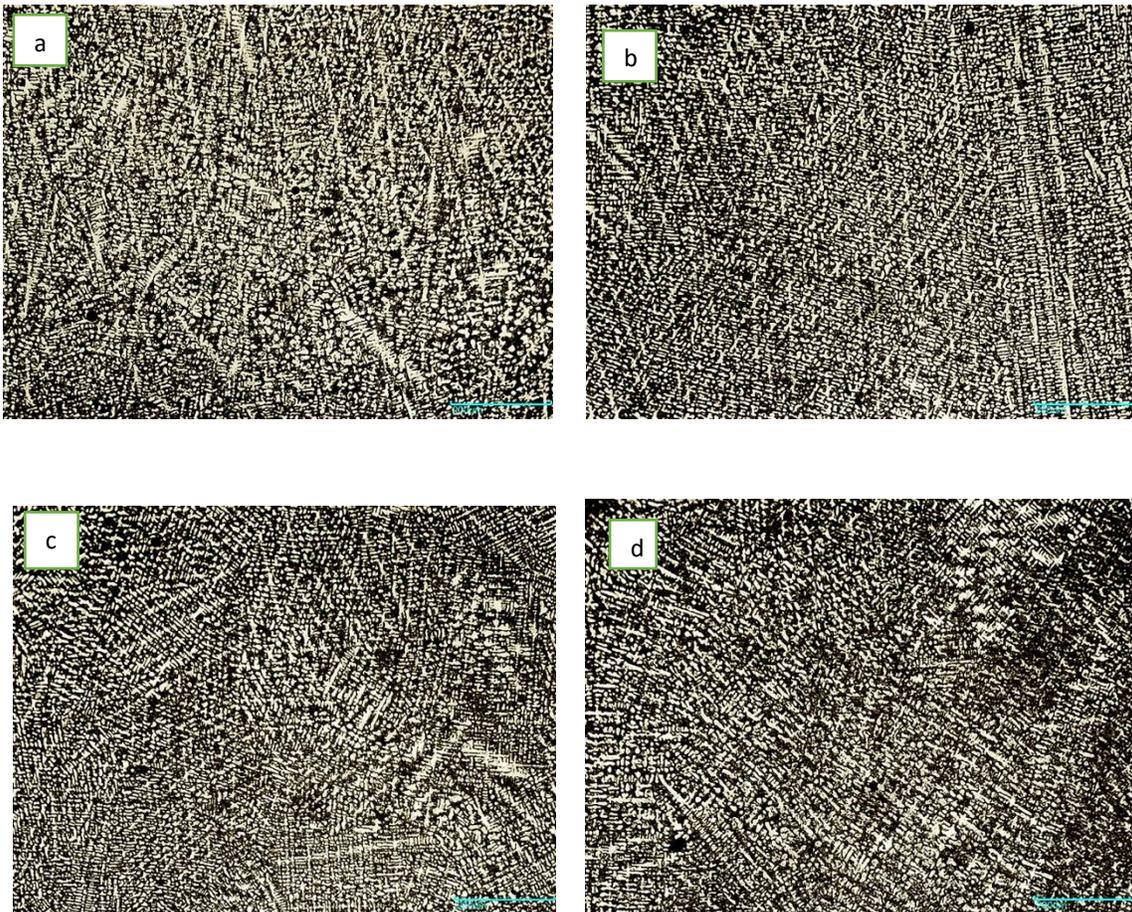


Figura 4.8 Micrográficas de recubrimientos duros, a) Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb, b) Fe-176Cr-2.2C-3Nb+2% peso La_2O_3 , c) Fe-14Cr-2.6C-3.4Nb- 5% peso La_2O_3 y d) Fe-14Cr-4.C-3.6Nb+ 7% peso La_2O_3 . 100X.

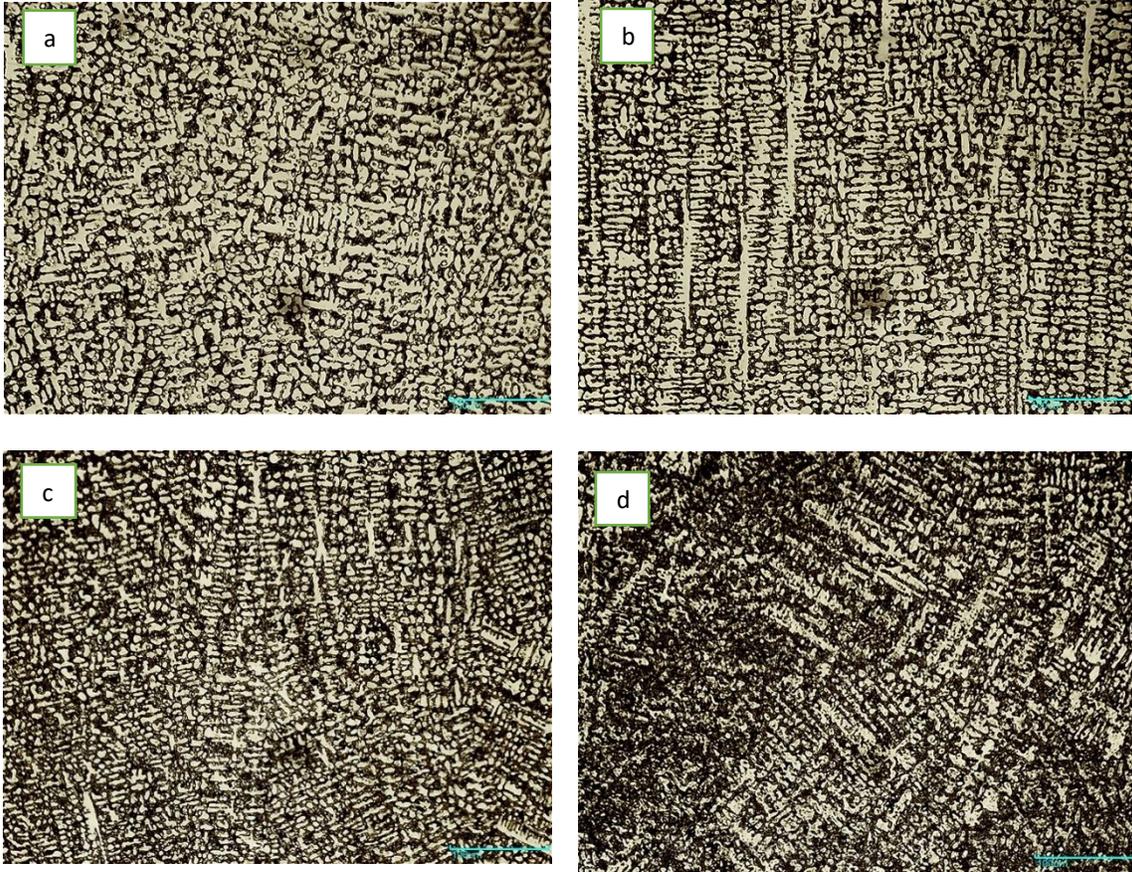


Figura 4.9 Micrografías de recubrimientos duros, a) Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb, b) Fe-176Cr-2.2C-3Nb+2% peso La_2O_3 , c) Fe-14Cr-2.6C-3.4Nb- 5% peso La_2O_3 y d) Fe-14Cr-4.C-3.6Nb+ 7% peso La_2O_3 . 200X.

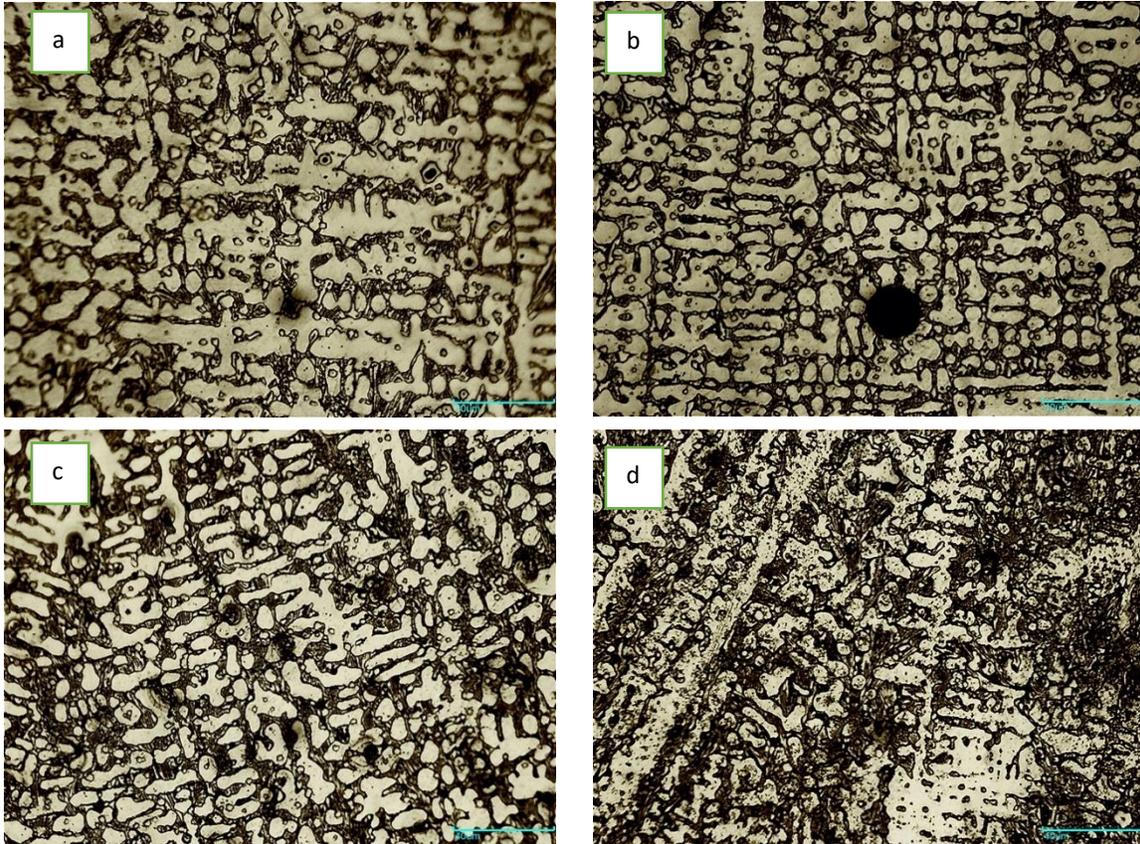


Figura 4.10 Micrografías de recubrimientos duros, a) Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb, b) Fe-176Cr-2.2C-3Nb+2% peso La_2O_3 , c) Fe-14Cr-2.6C-3.4Nb- 5% peso La_2O_3 y d) Fe-14Cr-4.C-3.6Nb+ 7% peso La_2O_3 . 500X.

En general, la adición de óxido de lantano produjo una modificación de la microestructura de los recubrimientos duros. Siendo obvia en comparación con la microestructura del recubrimiento duro con 3.2% de Nb. Figura 4.10 a-d, 500X.

En las figuras 4.10 b-d, se muestra el efecto de la adición de óxido de lantano. Es fácil observar que la adición de óxido de lantano produjo un refinamiento microestructural, así como una modificación de la red de carburos. Este refinamiento en la microestructura se asocia con la tendencia de los óxidos de tierras raras a actuar como núcleos heterogéneos de la austenita primaria.

Puede observarse que el refinamiento de la microestructura condujo al decremento del espaciado intercarburos, consecuentemente la fracción de área de carburos (FAC) se

incrementó. Las mediciones del FAC se presentan en el apartado de caracterización por microscopía electrónica.

4.3.3 Comparación microestructural entre los dos efectos, adición de niobio y adición de La_2O_3 .

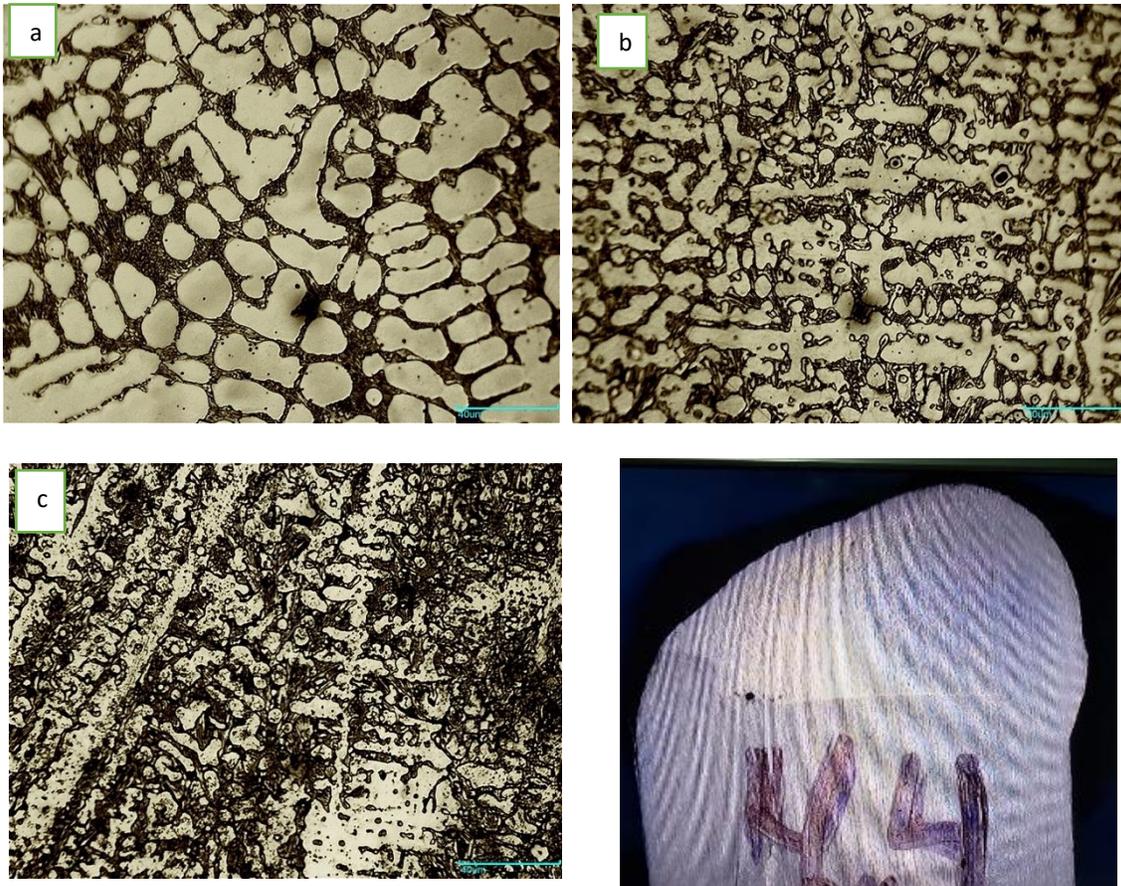


Figura 4.11 Micrografías ópticas de microestructuras de recubrimientos duros a 500X. a) recubrimiento base Fe-14Cr-1.9C, b) 3.2Nb y c) 3.2Nb+7% La_2O_3 .

Los resultados muestran que en los recubrimientos duros Fe-Cr-C, comparativamente, tanto la adición de niobio como la de óxido de lantano produjeron una microestructura refinada, el recubrimiento duro 3.2Nb+7% La_2O_3 presentó el mayor refinamiento de la microestructura.

4.4 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM).

Análisis del límite de fusión de los recubrimientos

Recubrimiento base Fe-14Cr-1.9C, límite de fusión

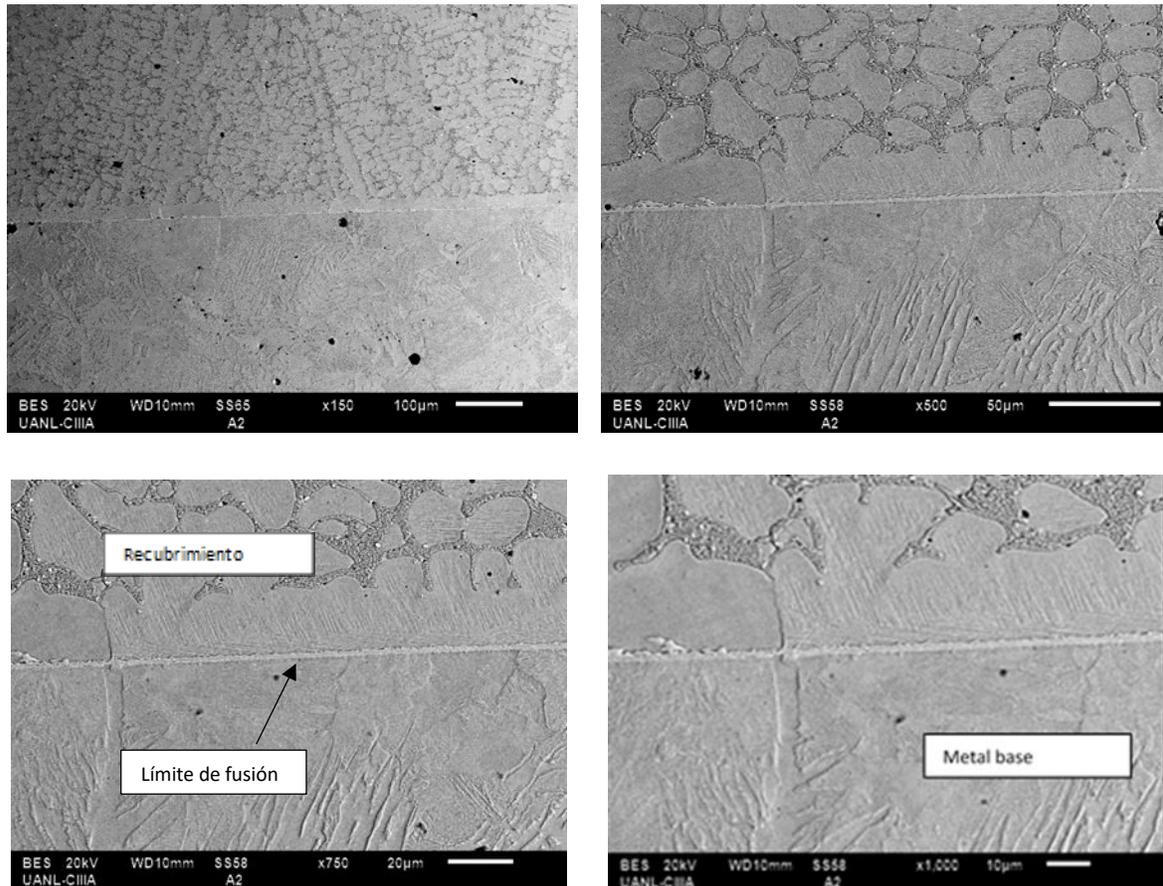
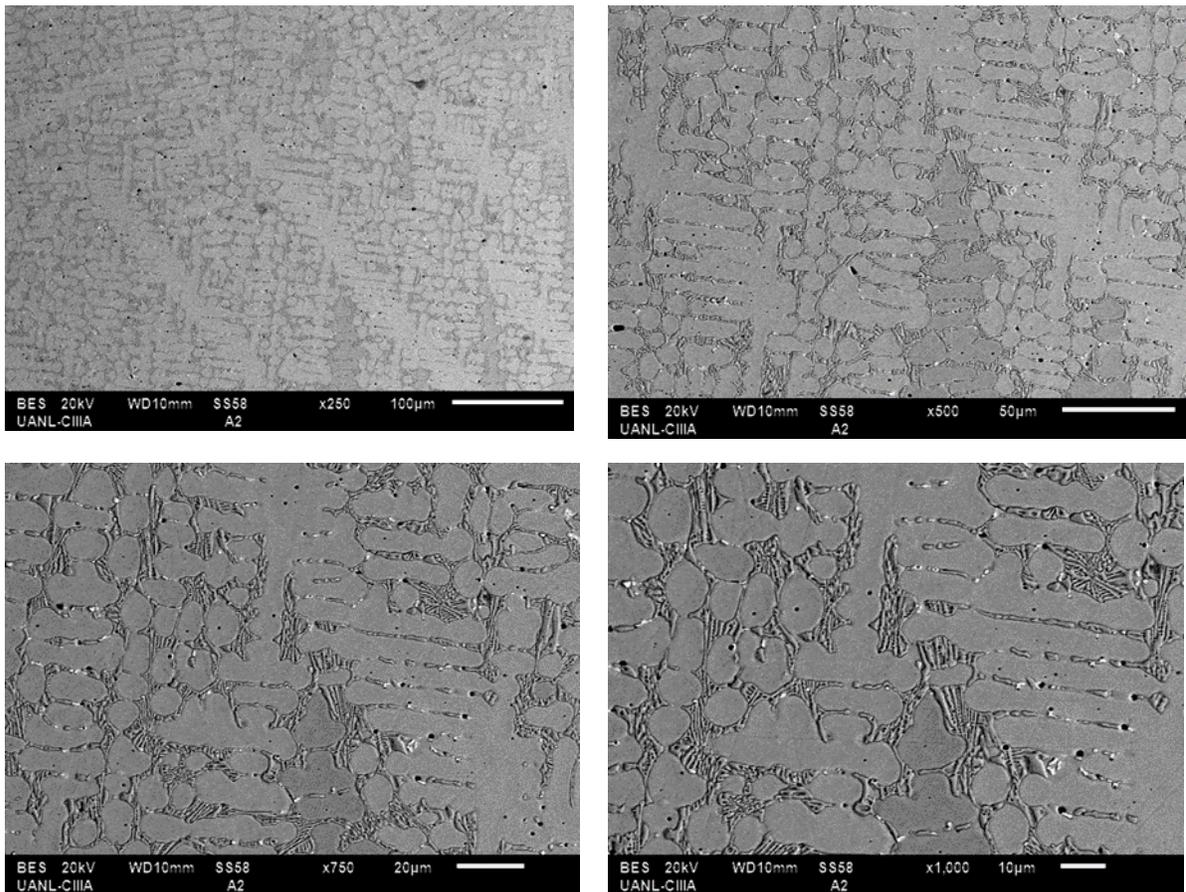


Figura 4.12 Microestructura del límite de fusión del recubrimiento base Fe-14cr-1.9C a diversos aumentos: 150x, 500x, 750x y 1000x.

La figura 4.12 muestra la región de interfase, entre el metal base de acero suave tipo 1018, el límite de fusión y el recubrimiento duro Fe-14Cr-1.9C, es claramente distinguible las diferentes microestructuras que los componen. El recubrimiento duro con una microestructura dendrítica con carburos de cromo en los límites de grano. El metal base cercano al límite de fusión presenta una microestructura de granos gruesos y otros de forma acicular.

Recubrimiento base Fe-14cr-1.9C, parte central



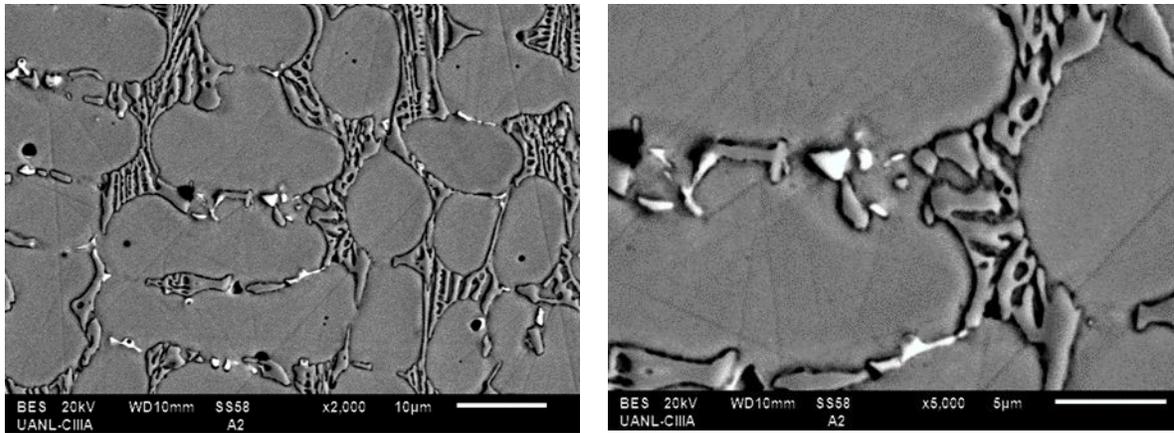


Figura 4.13 Microestructura de la parte central del recubrimiento duro base Fe-14cr-1.9C. a diversos aumentos: 250x, 500x, 750x, 1000x, 2000x y 5000x.

Como se mostró en la caracterización por microscopía óptica, el centro del recubrimiento duro, estuvo conformado por una red de carburos de cromo en una matriz dendrítica. En las micrográficas a 2000 y 5000X se pueden apreciar los carburos de niobio, color blanco brillante, mientras que los carburos de cromo son fibrosos y de color gris, vistos en imágenes de electrones retro-dispersados.

4.4.1 Recubrimientos con adición de Niobio.

Recubrimiento Fe-15Cr-1.7C-1.5Nb, límite de fusión.

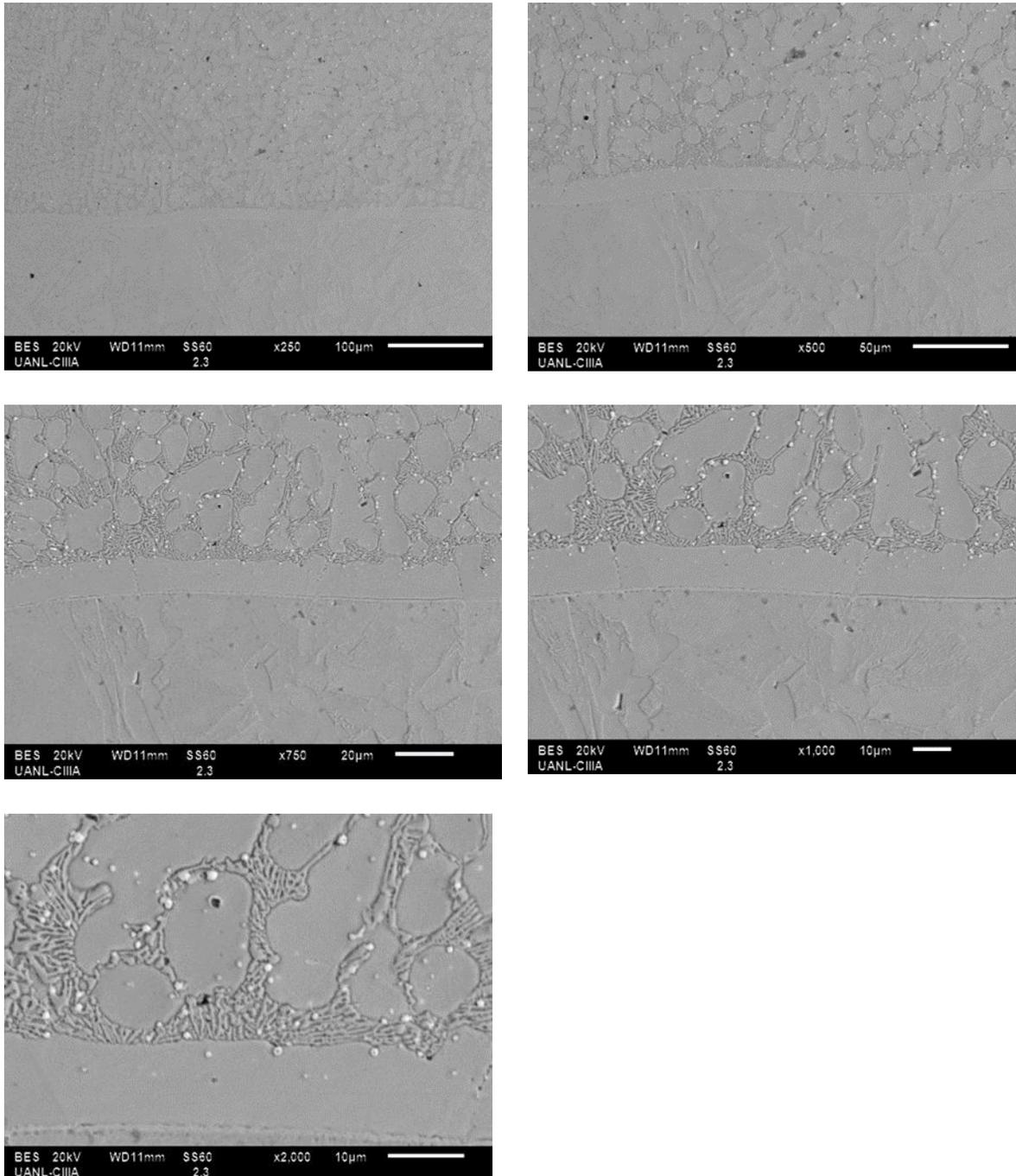


Figura 4.14 Microestructura del límite de fusión del recubrimiento Fe-15Cr-1.7C-1.5Nb, 250X, 500X,750X, 1000X y 2000X

Recubrimiento Fe-15Cr-1.7C-1.5Nb, parte central.

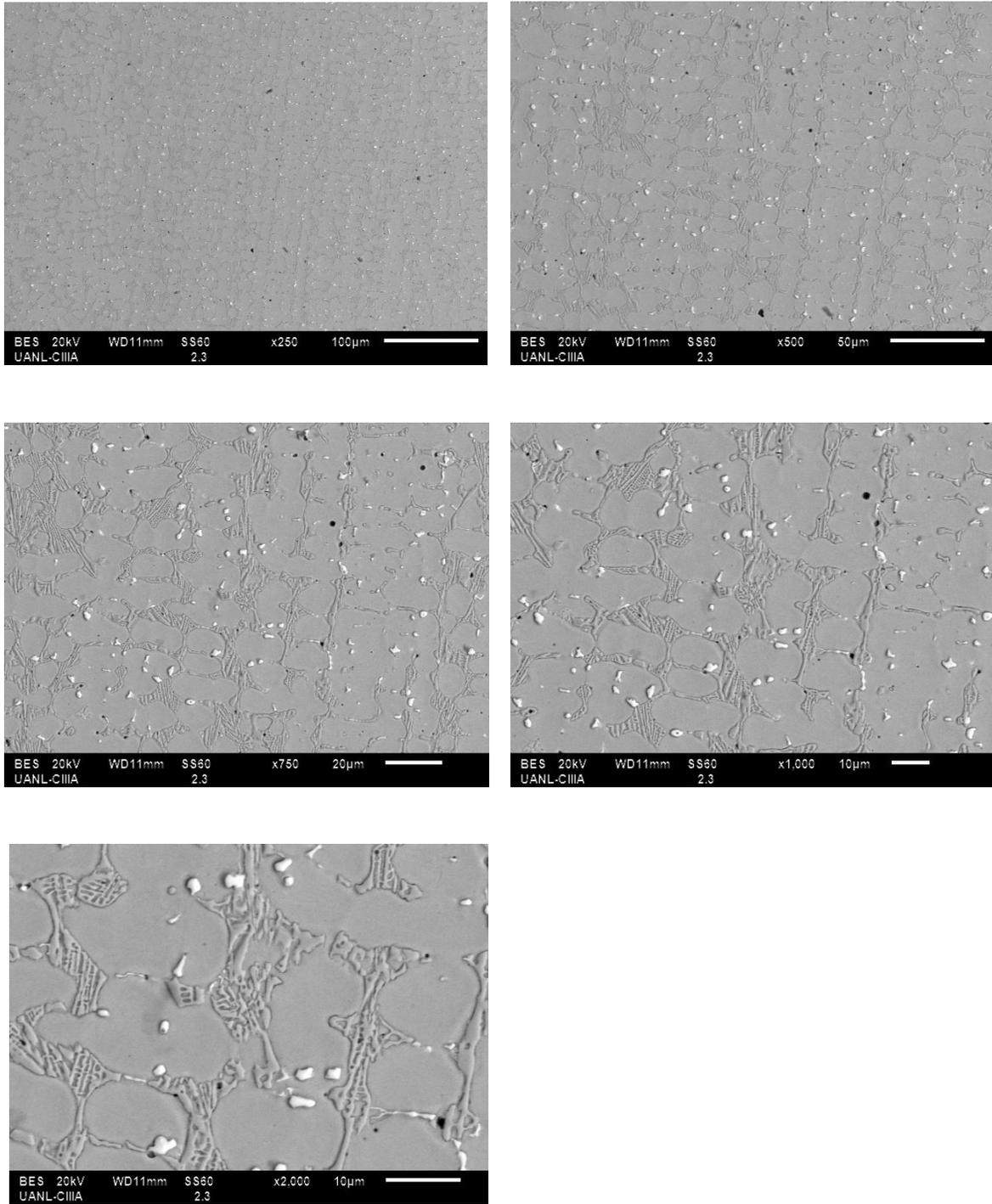


Figura 4.15 Microestructura del centro del recubrimiento Fe-15Cr-1.7C-1.5Nb, 250X, 500X,750X, 1000X y 2000X.

Recubrimiento Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb, límite de fusión.

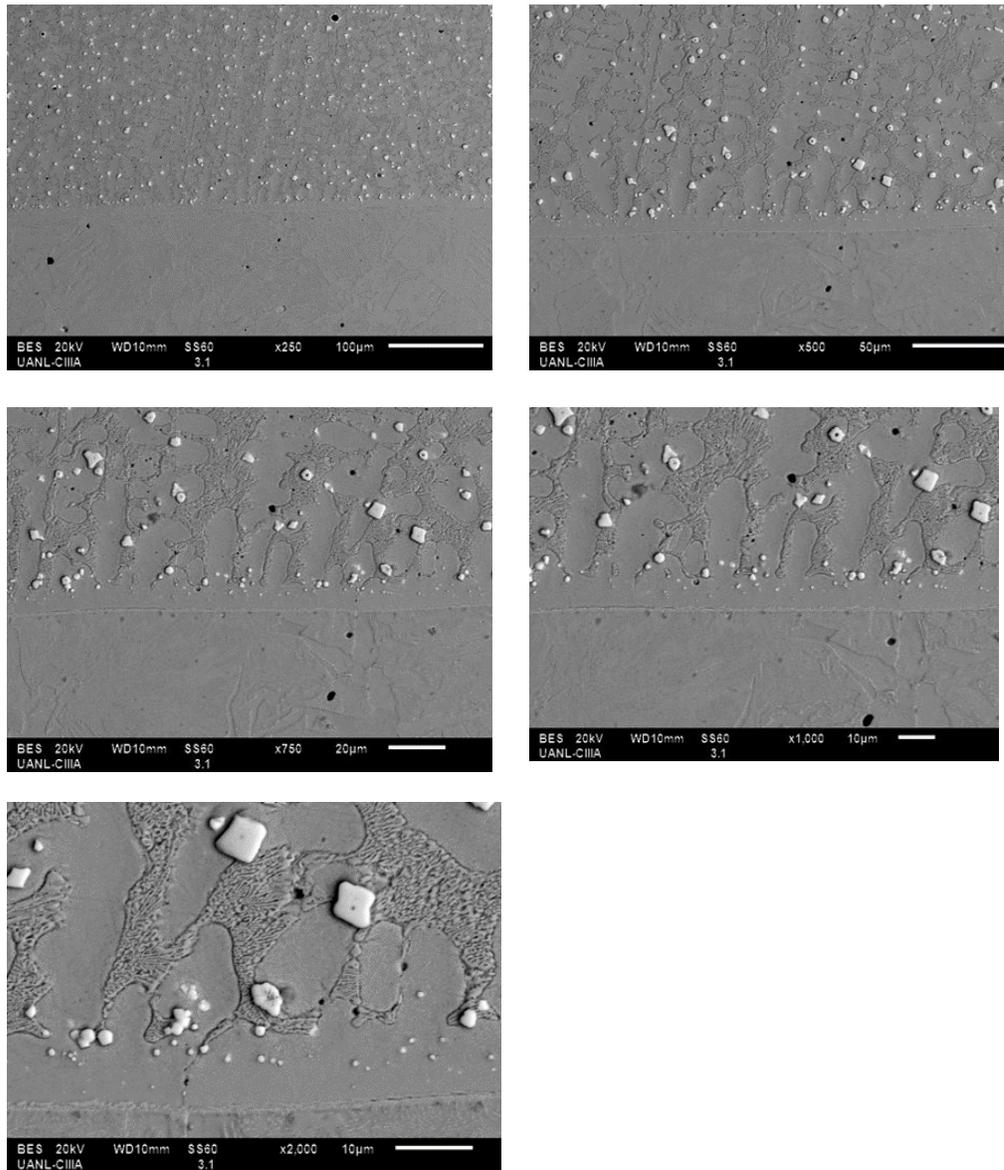


Figura 4.16 Microestructura del límite de fusión del recubrimiento Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb, 250X, 500X, 750X, 1000X y 2000X.

En esta condición, es notable la presencia de carburos de niobio, de color blanco brillante, en el recubrimiento duro, en particular cercanos al límite de fusión, que, con el incremento en el contenido de niobio, han aumentado su tamaño y distribución. De igual forma, se puede apreciar que a mayor tamaño su morfología es más irregular y angulada.

Recubrimiento Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb, parte central.

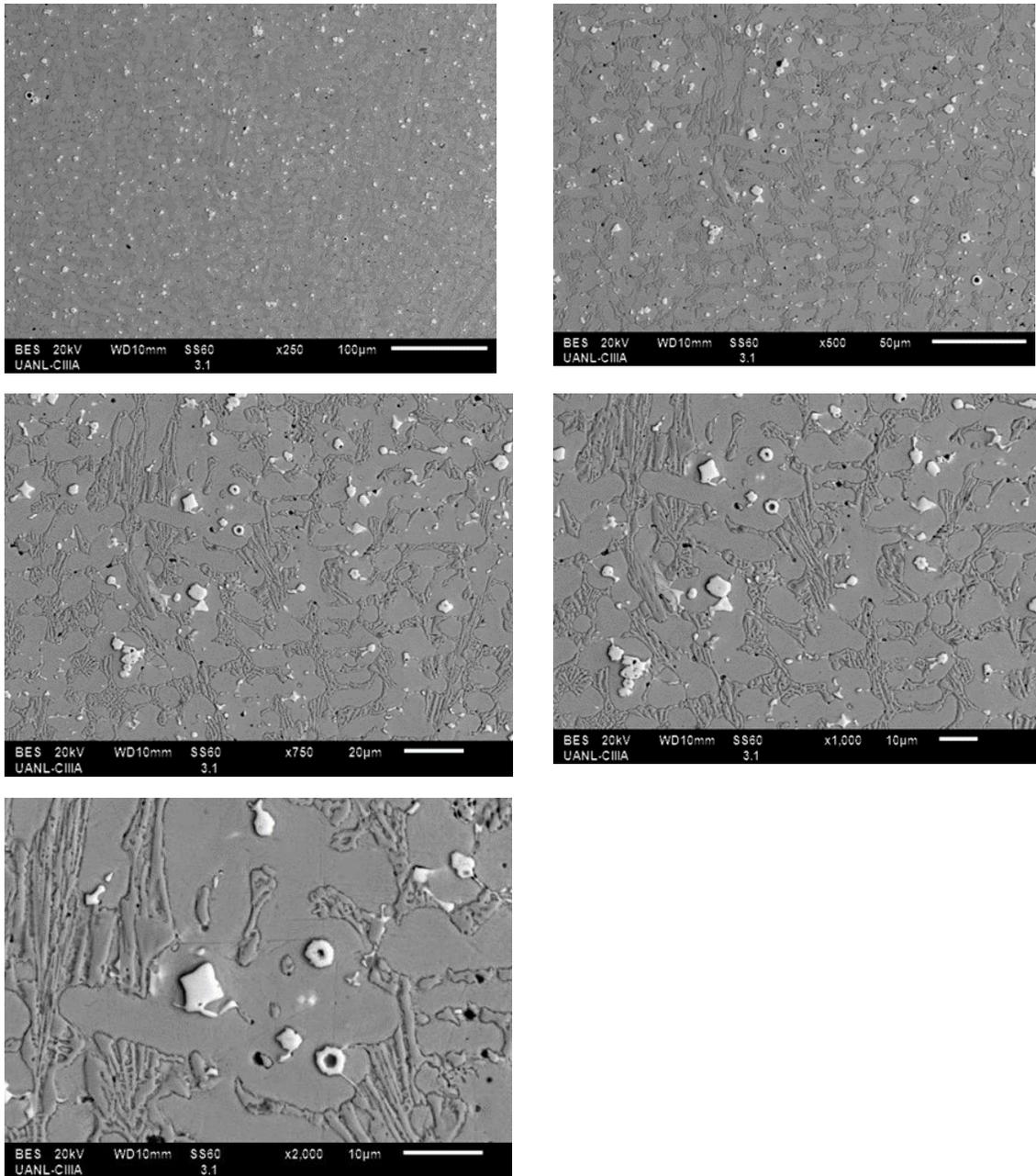


Figura 4.17 Microestructura del centro del recubrimiento Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb, 250X, 500X,750X, 1000X y 2000X.

Es importante observar que, en el centro del recubrimiento duro con alto niobio, se presentan carburos de niobio de diversos tamaños y morfología. Los carburos de cromo, grises y fibrosos, conservan su morfología con el incremento de niobio.

4.4.2 Recubrimientos con adición de óxido de lantano.

Recubrimiento Fe-16Cr-2.2C-3Nb+2% peso La_2O_3 , límite de fusión.

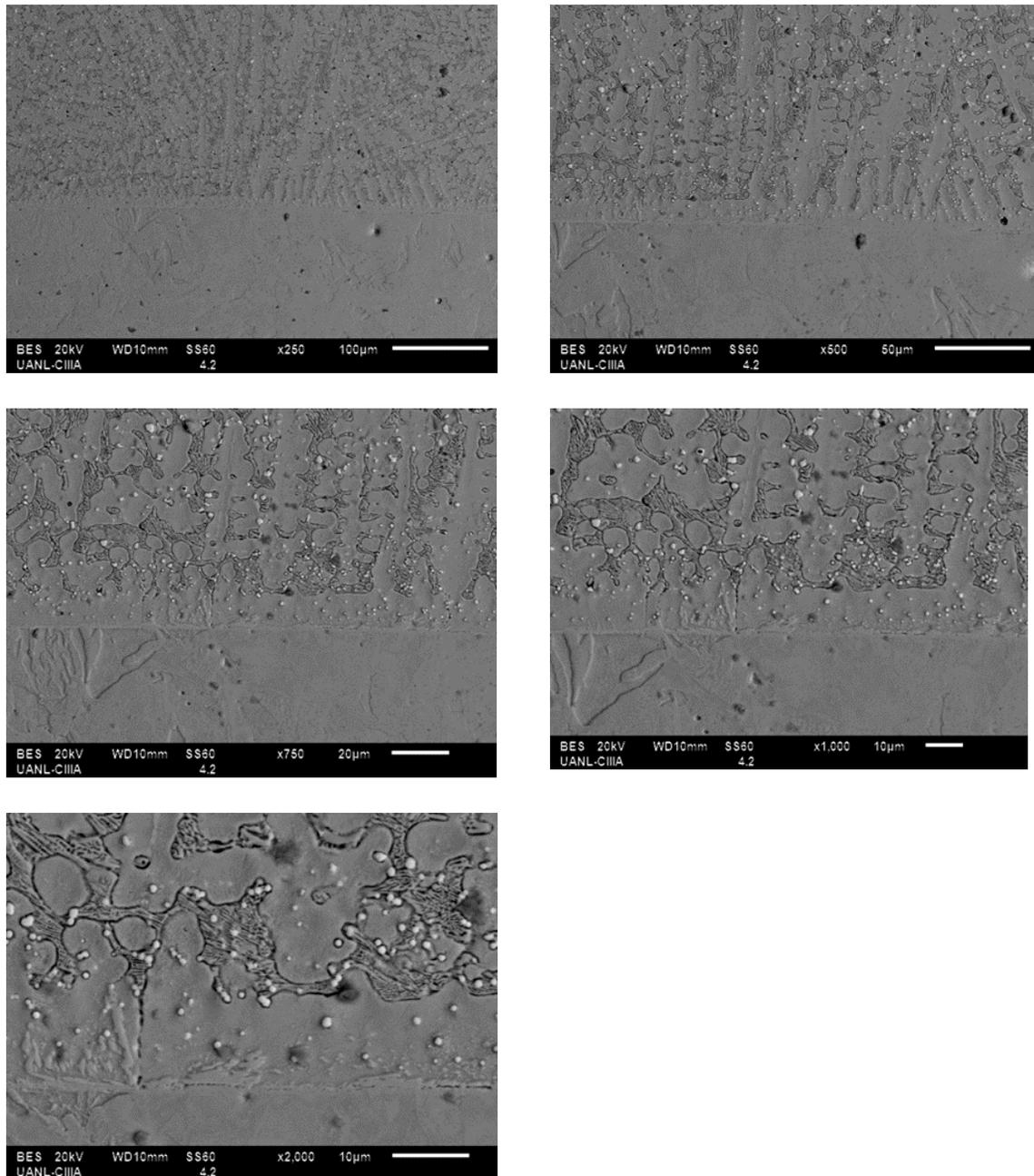


Figura 4.18 Microestructura del límite de fusión del recubrimiento 4.2, Fe-16Cr-2.2C-3Nb+2% peso La_2O_3 , 250X, 500X, 750X, 1000X y 2000X.

En este recubrimiento duro, se observa la presencia de carburos de niobio, de color blanco, finos en la zona de límite de fusión. Mientras que los carburos de cromo, de color gris, son fibrosos y finos.

Recubrimiento Fe-16Cr-2.2C-3Nb+2% peso La₂O₃, parte central.

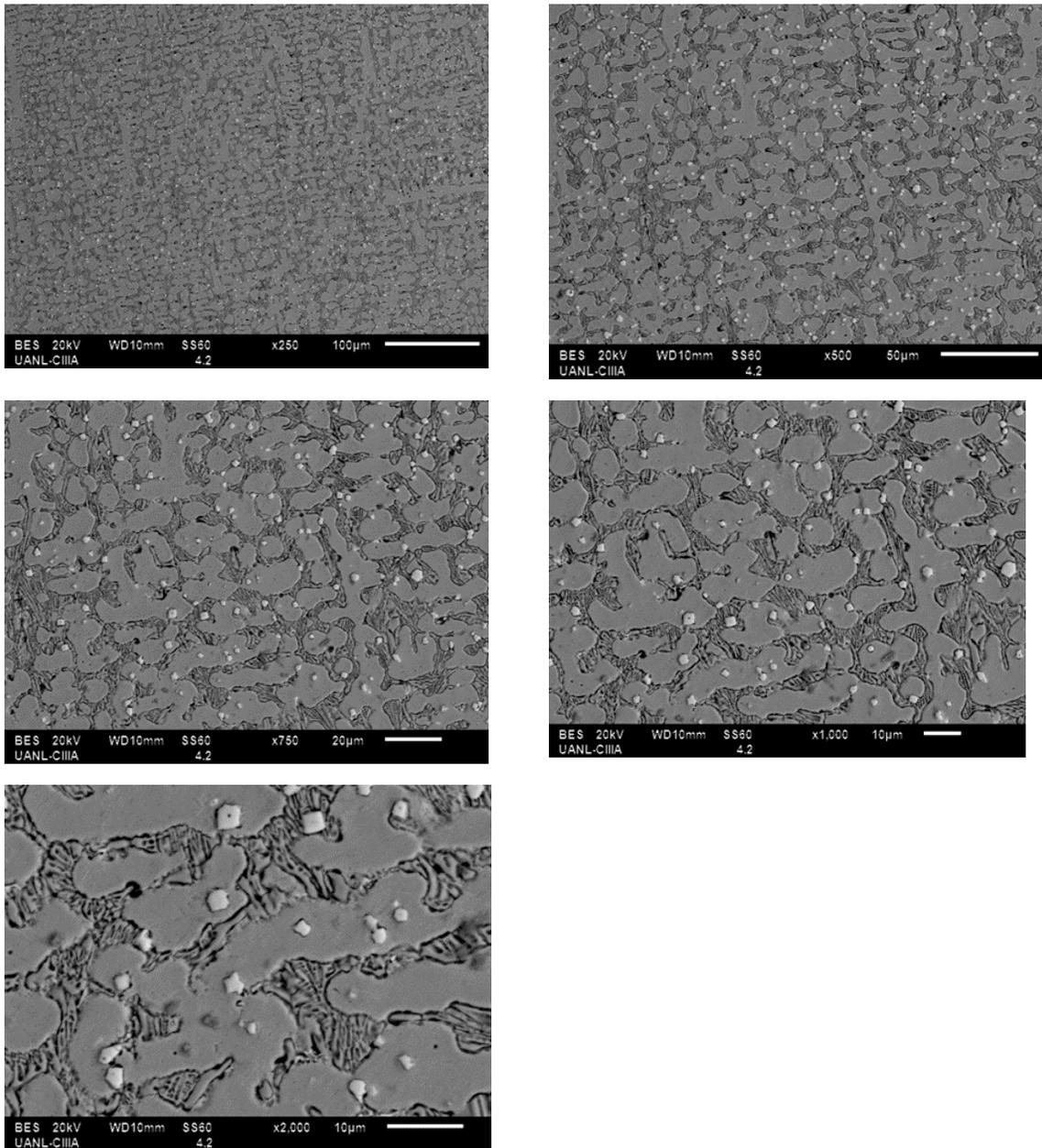


Figura 4.19 Microestructura del centro del recubrimiento Fe-16Cr-2.2C-3Nb+2% peso La₂O₃ 250X, 500X, 750X, 1000X y 2000X.

La micrografía de este recubrimiento duro, en su parte central, presenta una red de carburos de cromo, de color gris, revelados así por la técnica de electrones retro-dispersados, que son finos y fibrosos, Se observa también la presencia de carburos de niobio, de color blanco, finos y de diversas morfologías.

Recubrimiento Fe-14Cr-2.6C-3.4Nb- 5% peso La_2O_3 , parte central.

No se presenta aquí la microestructura del límite de fusión del recubrimiento pues el recubrimiento presentó falta de fusión.

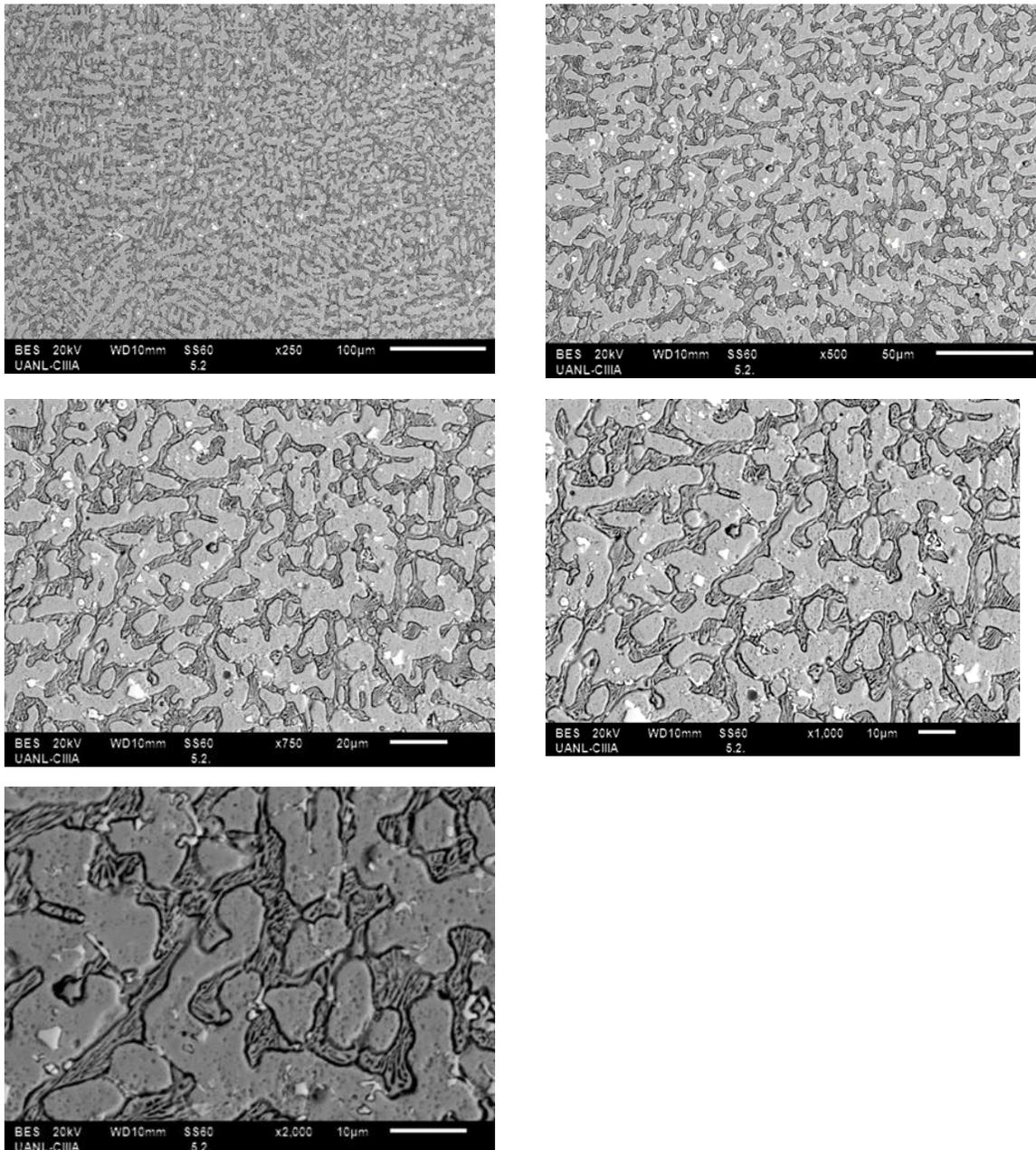


Figura 4.20 Microestructura del centro del recubrimiento Fe-14Cr-4.C-3.6Nb+7% peso La_2O_3 , 250X, 500X, 750X, 1000X y 2000X.

Recubrimiento Fe-14Cr-4.C-3.6Nb+ 7% peso La_2O_3 , parte central.

En este recubrimiento la fusión del recubrimiento en el metal base fue adecuada, sin embargo, no se presenta la microestructura del límite de fusión, por falla en el archivo digital de imágenes.

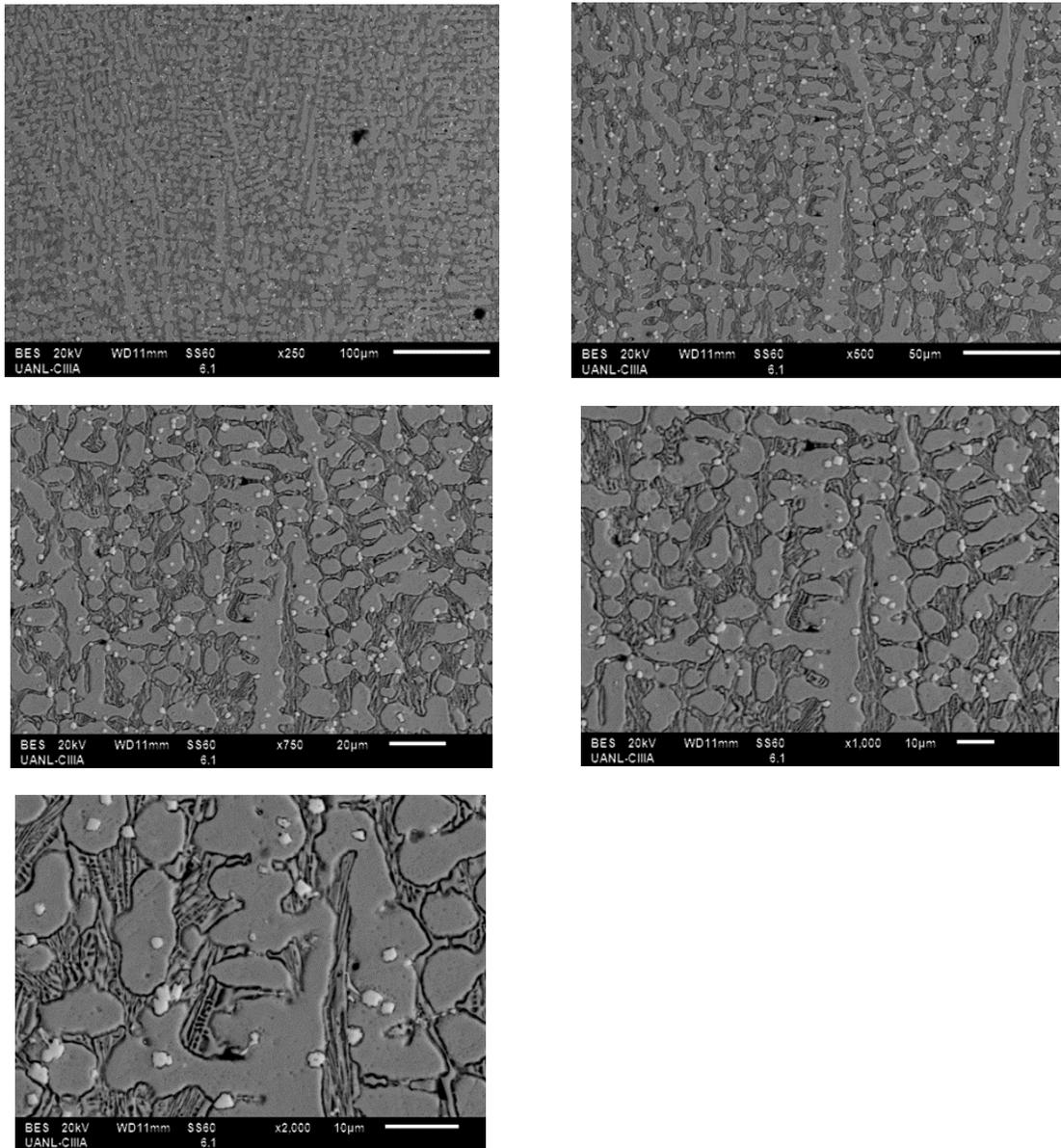


Figura 4.21. Microestructura del centro del recubrimiento Fe-14Cr-4.C-3.6Nb+ 7% peso La_2O_3 ., 250X, 500X, 750X, 1000X y 2000X.

Las micrografías de este recubrimiento en la parte central, muestran una red de carburos de cromo, en una matriz dendrítica con la presencia de carburos de niobio, de color blanco, bien distribuidos.

4.4.3 Efecto del niobio en cada una de las zonas de los recubrimientos duros experimentales.

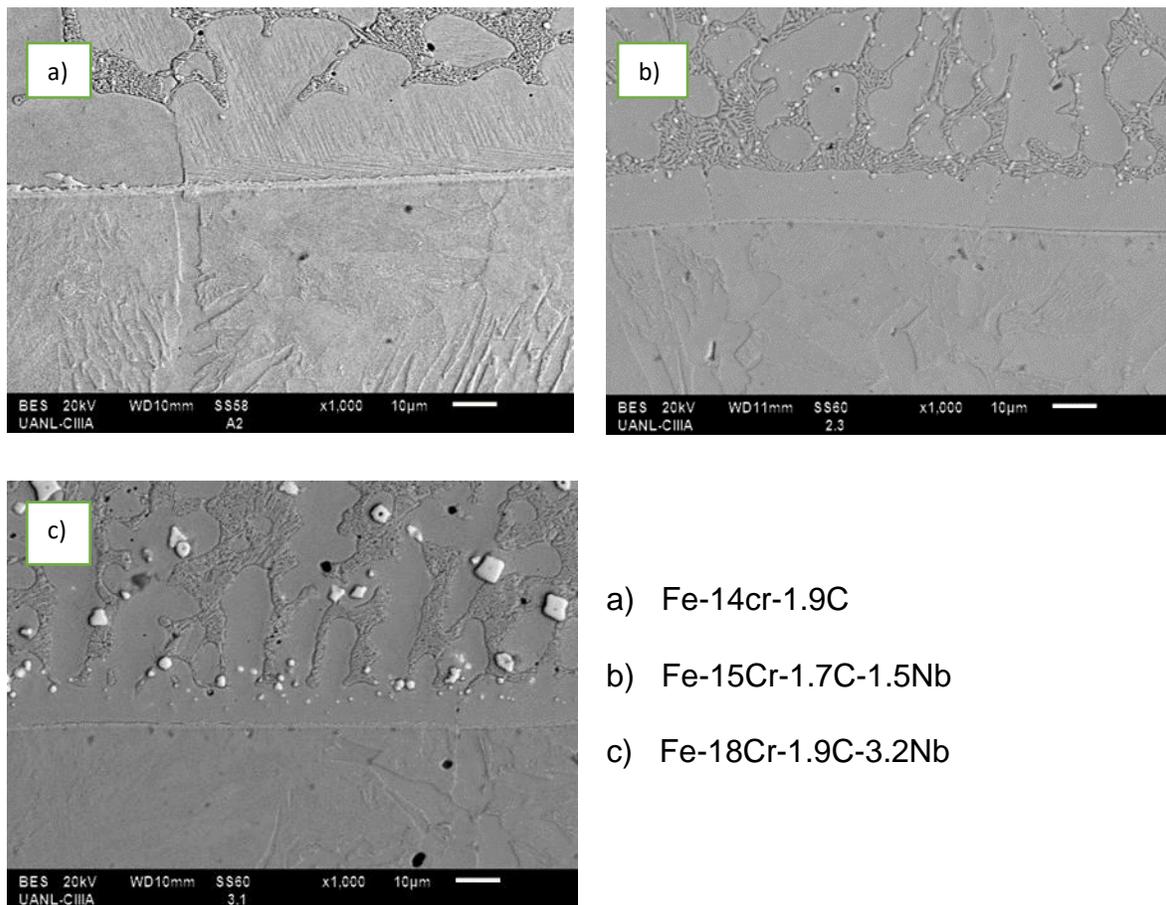


Figura 4.22. Las micrografías de SEM muestran el efecto de la adición de niobio en la microestructura del límite de fusión de los recubrimientos duros. 1000X

En estas micrografías, se aprecia que los recubrimientos duros con mayor contenido de niobio, presentan una mayor cantidad de carburos de niobio, de color blanco brillante, de tamaño mayor y de morfología irregular.

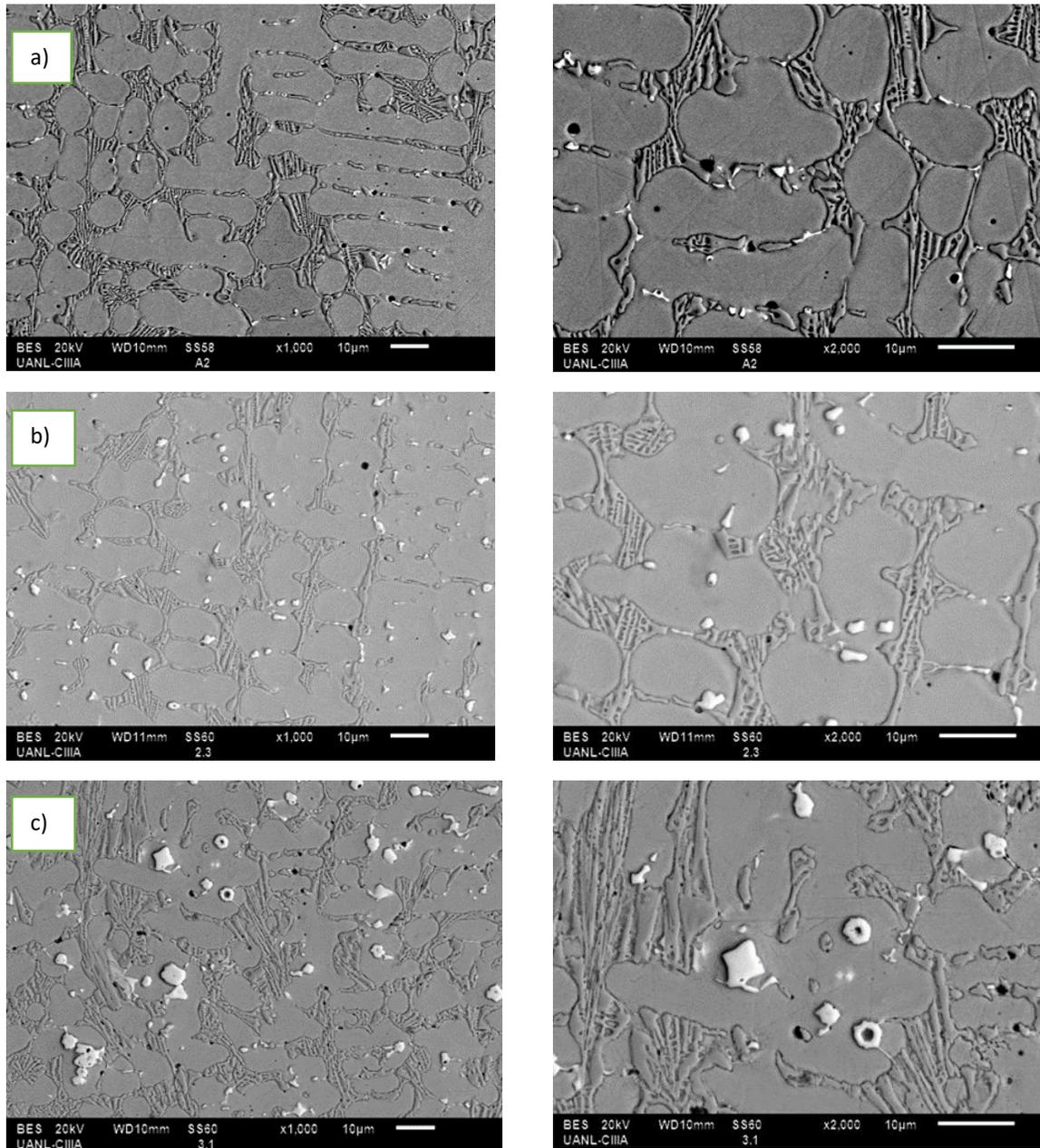


Figura 4.23. Las micrografías de SEM muestran el efecto de la adición de niobio en la microestructura de la parte central de los recubrimientos 1000 y 2000X. a) Fe-14Cr-1.9C b) Fe-15Cr-1.7C-1.5Nb y c) Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb.

Lo mismo ocurre en la parte central de los recubrimientos duros, a mayor adición de niobio, mayor número de carburos de niobio, aumentan en cantidad y tamaño, así mismo su morfología de vuelve más irregular y angulada. Figura 4.23c.

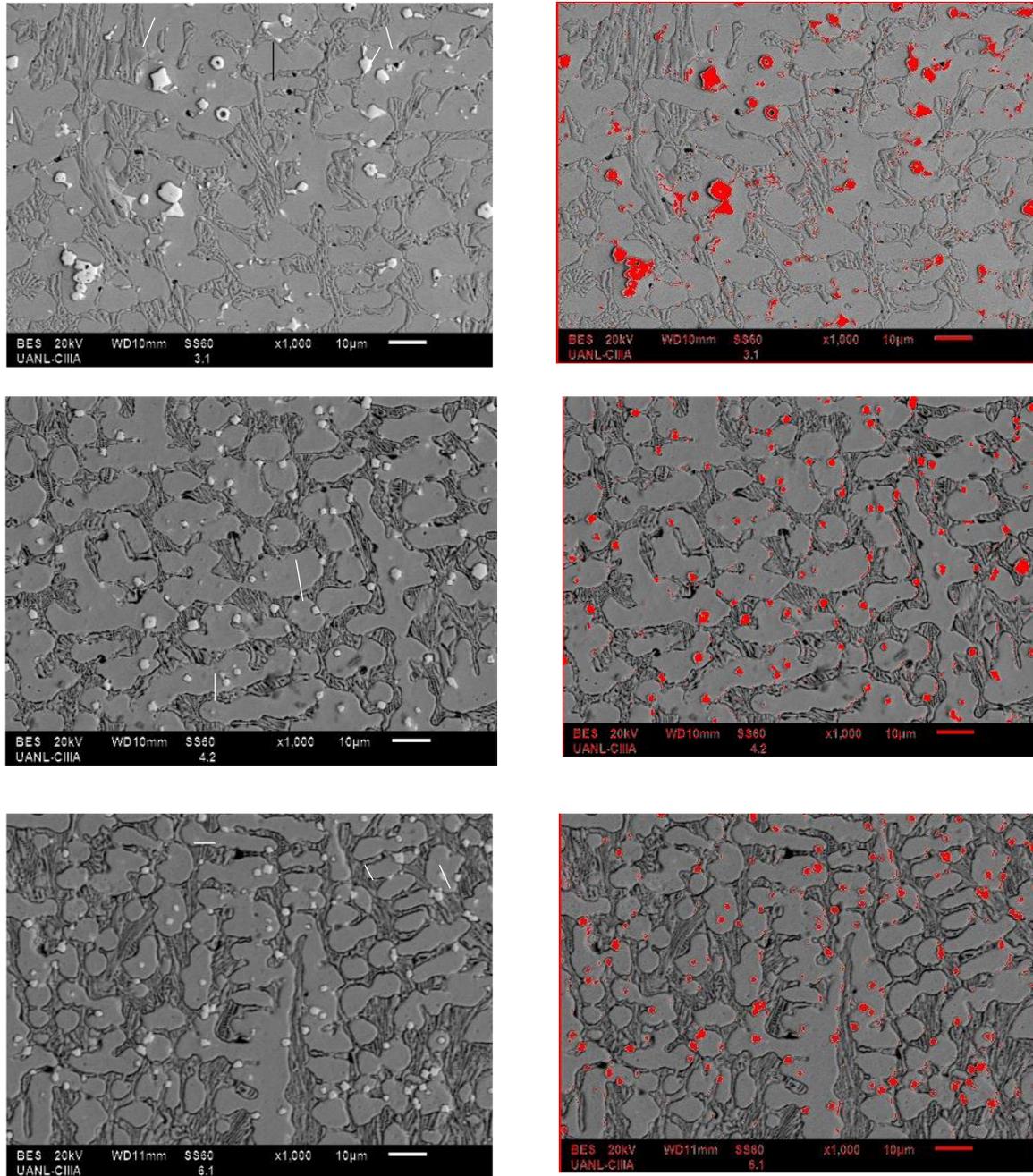


Figura 4.24. Análisis de imágenes mediante el software ImageJ.

La Figura 4.24 presenta ejemplos de las imágenes con la coloración de los carburos de niobio, con el uso del software ImageJ, para cuantificación de su fracción de área en porcentaje, así mismo se muestra la forma de medición del tamaño de célula dendrítica, *TCD*, de la matriz, con líneas en color blanco.

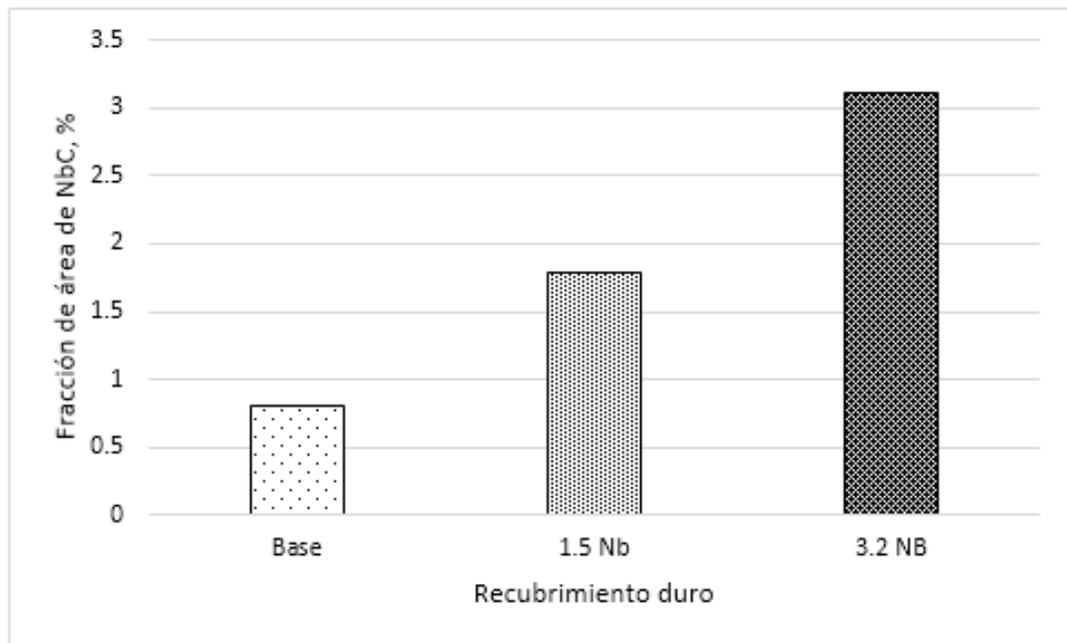


Figura 4.25 Efecto de la adición de Nb en la fracción de área de carburos de niobio en los recubrimientos duros. Obtenido por medio del software ImageJ.

La figura 4.25 muestra los resultados de la cuantificación de la fracción de área de carburos de niobio en los diferentes recubrimientos experimentales, es claro observar que: a mayor contenido de niobio, se incrementa su porcentaje. Mayor porcentaje de carburos de niobio seguramente incrementará la dureza del recubrimiento, esto se analizará en un apartado adelante.

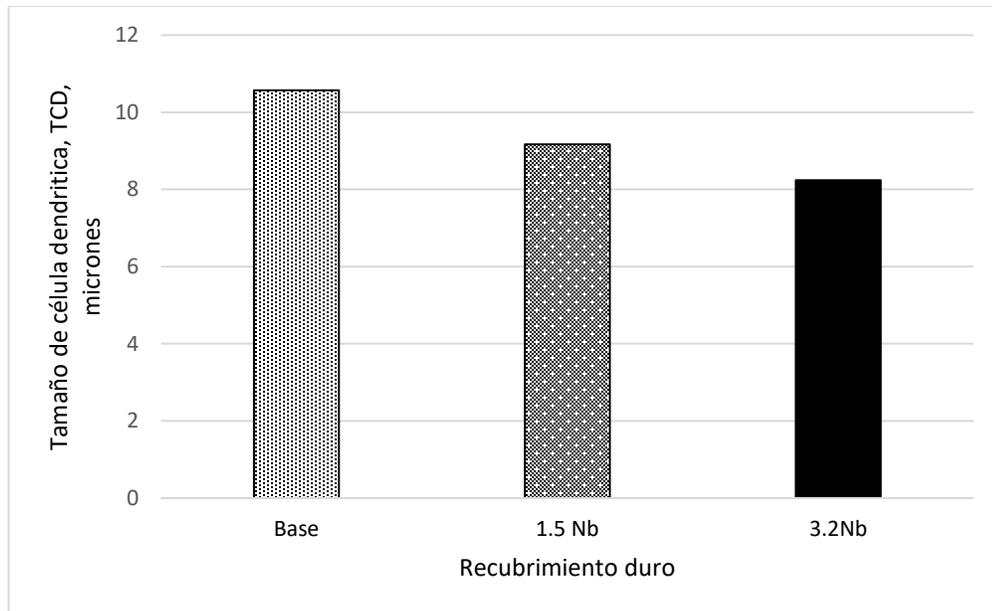


Figura 4.26 Efecto de la adición de niobio en el tamaño de célula dendrítica de los recubrimientos duros experimentales.

La figura anterior muestra que la adición de niobio redujo el tamaño de grano dendrítico, expresado aquí como tamaño de célula dendrítica TCD, debido a su efecto de refinamiento de la austenita primaria. Comúnmente mayor refinamiento de la microestructura ocasiona una mayor dureza y resistencia al desgaste.

4.4.4 Análisis del efecto del La_2O_3 en el recubrimiento Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb.

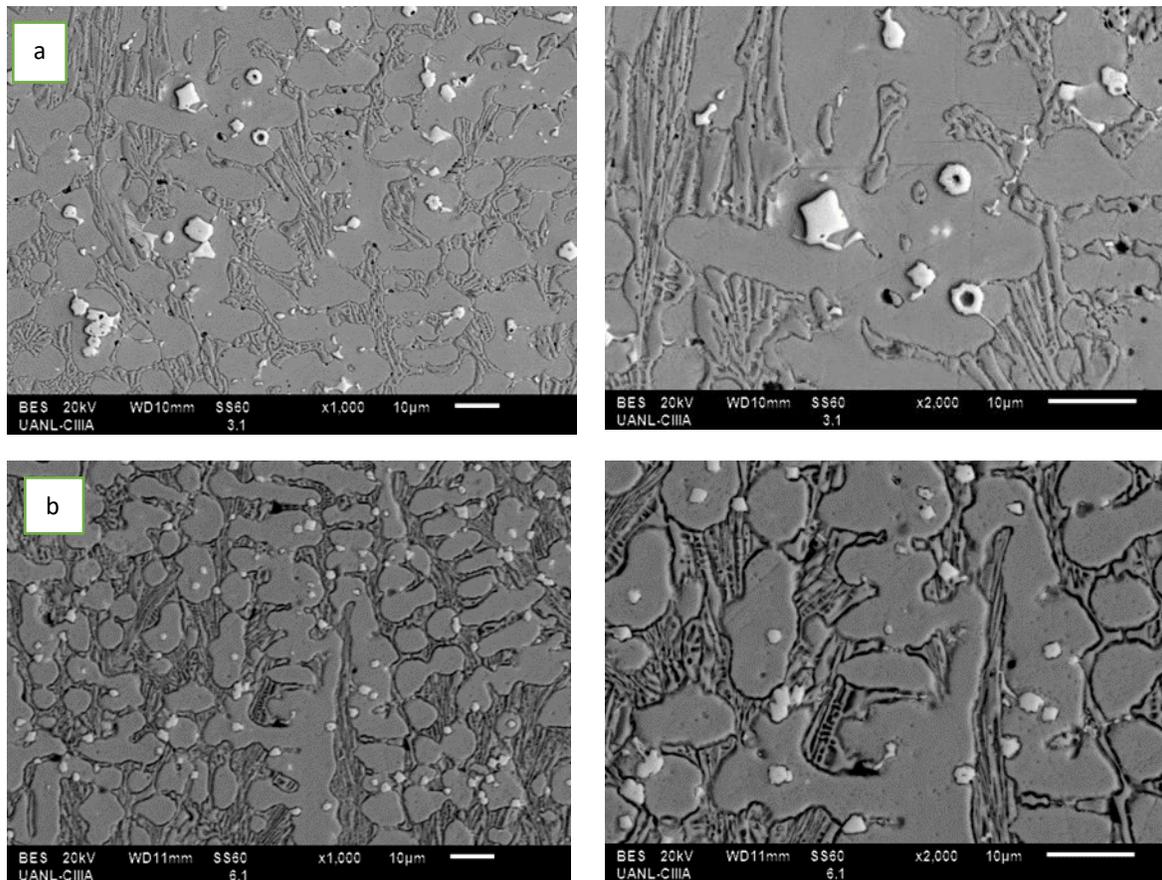


Figura 4.27 Las micrografías de SEM muestran el efecto de la adición de La_2O_3 en la microestructura de la parte central de los recubrimientos 1000 y 2000X. a) Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb y b) Fe-14Cr-4.C-3.6Nb+ 7% peso La_2O_3 .

Las micrografías anteriores, muestran claramente el efecto de la adición de óxido de lantano al recubrimiento duro Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb, presentando el recubrimiento duro con adición de 7%, una microestructura dendrítica es más fina, atribuible al efecto refinador del óxido de lantano sobre el tamaño de grano de la austenita primaria, [5]. Así mismo tiene un efecto sobre la morfología de los carburos de cromo, haciéndolos más finos y mejorando su distribución.

En general se puede mencionar que el óxido de lantano añadido refina la microestructura de los recubrimientos duros Fe-Cr-C-Nb.

Efecto del La_2O_3 en la zona central de los recubrimientos duros experimentales.

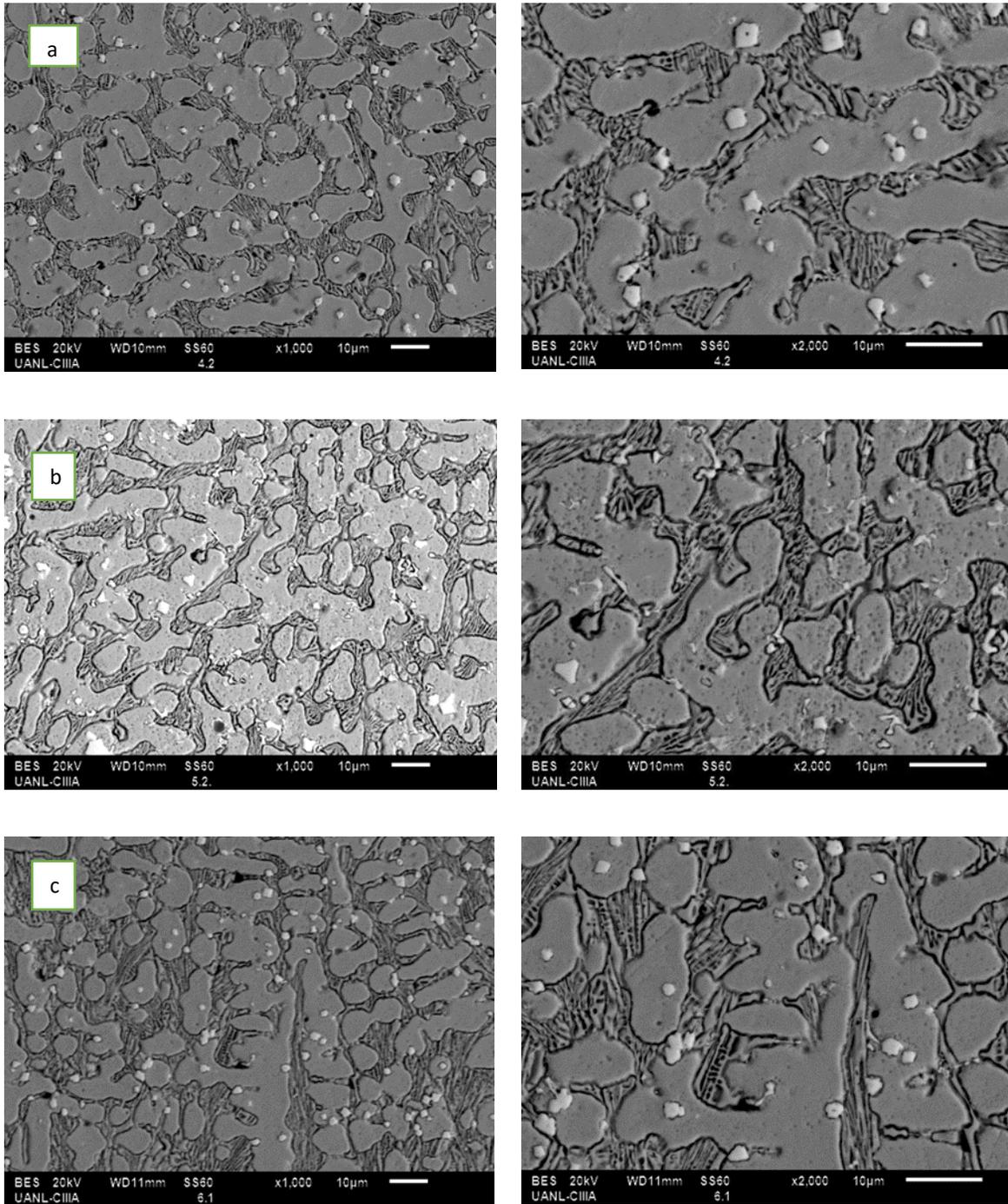


Figura 4.28 Las micrografías de SEM muestran el efecto de la adición de La_2O_3 en la microestructura de la parte central de los recubrimientos a 1000 y 2000X. a) Fe-16Cr-2.2C-3Nb+2% peso La_2O_3 , b) Fe-14Cr-2.6C-3.4Nb- 5% peso La_2O_3 y c) Fe-14Cr-4.C-3.6Nb+ 7% peso La_2O_3 .

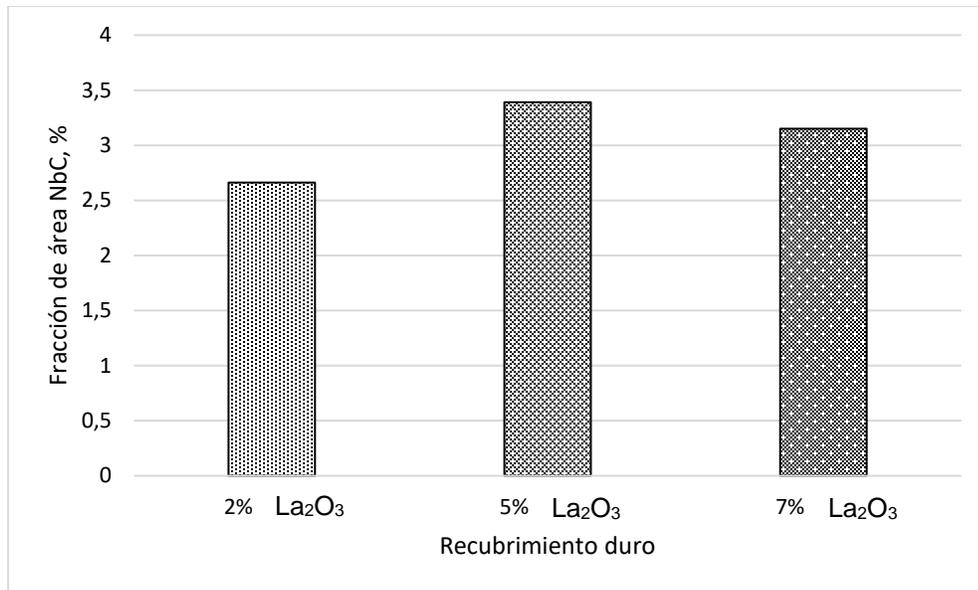


Figura 4.29 Fracción de área de carburos de niobio, presentes en los recubrimientos duros adicionados con La₂O₃. Obtenidos por medio del software ImageJ.

De los recubrimientos duros experimentales adicionados con óxido de lantano, se determinó la fracción de área de los carburos de niobio, los resultados muestran que se mantuvo entre 2.6 y 3.3 %.

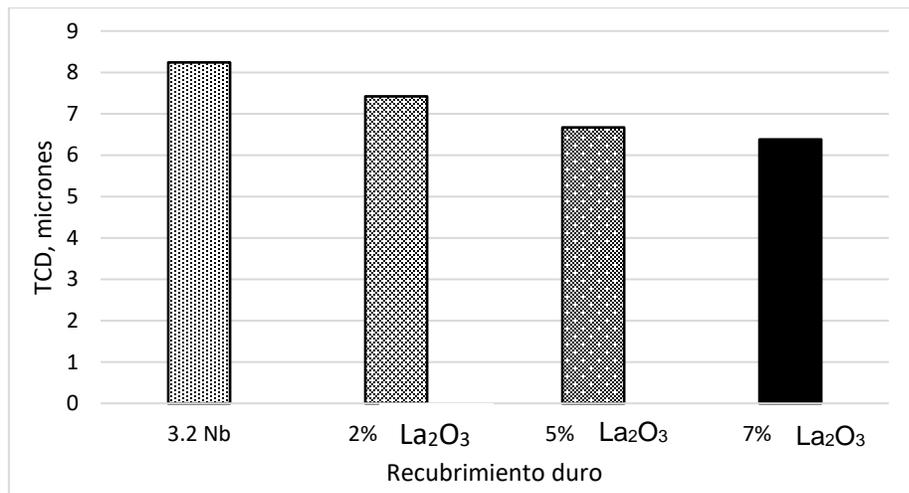


Figura 4.30 Efecto de la adición de La₂O₃ en el tamaño de célula dendrítica en los recubrimientos duros. Obtenidos por medio del software ImageJ.

La figura anterior muestra que, efectivamente, el La_2O_3 tiene un efecto notable sobre la microestructura de los recubrimientos duros, pues actúa como un refinador de grano de austenita primaria, mostrado aquí como tamaño de célula dendrítica, TDC. A mayor contenido de La_2O_3 ocasionó una microestructura más fina en el recubrimiento duro, lo que en teoría deberá elevar la dureza de las aleaciones y su resistencia al desgaste.

El refinamiento en la microestructura está asociado con la tendencia de los óxidos de las tierras raras para actuar como núcleos heterogéneos de la austenita primaria. Similares resultados se han reportado en la literatura para la adición de tierras raras [26-30].

Estos resultados coinciden con los obtenidos por Singla, en su investigación, donde analiza el efecto la adición de tierras raras, en el refinamiento del tamaño de grano austenítico de recubrimientos Fe-Cr-C. [5].

Observaciones generales:

El recubrimiento duro base, Fe-14Cr-1.9C, está formado por una red de carburos de cromo, fibroso, en una matriz dendrítica. Aun cuando no se añadió niobio a este recubrimiento, presentó una fracción de área de 0.8%, proveniente de las ferroaleaciones usadas.

La adición de niobio, en forma de ferroaleaciones, favoreció el refinamiento de la microestructura de los recubrimientos duros, a mayor contenido de niobio mayor reducción del tamaño de célula dendrítica. Así mismo, a mayor contenido de niobio, mayor fracción de área de carburos de niobio. Estos efectos sobre la microestructura seguramente modificarán su comportamiento mecánico, en particular la dureza y resistencia al desgaste.

Mayor contenido de niobio, ocasionó mayor número de carburos de niobio, los cuales aumentan en cantidad y tamaño, así mismo su morfología de vuelve más irregular y angulada.

En cuanto al efecto de la adición de óxido de lantano en el recubrimiento duro Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb, se observó que el La_2O_3 tiene un efecto notable sobre la microestructura de los recubrimientos duros, pues actúa como un refinador de grano de austenita primaria, a mayor contenido de La_2O_3 ocasionó una microestructura dendrítica más fina en el recubrimiento duro, lo que en teoría deberá elevar la dureza y resistencia al desgaste de las aleaciones. Así mismo, el La_2O_3 tiene un efecto sobre la morfología de los carburos de cromo, haciéndolos más finos y mejorando su distribución.

4.5 ESPECTROSCOPIA DE ENERGÍA DISPERSIVA DE RAYOS X (EDX) MEB.

4.5.1 Caracterización de fases de recubrimientos duros con niobio

Análisis de fases en límite de fusión de los recubrimientos

Recubrimiento base, Fe-14Cr-1.9C

Caracterización de fases en el límite de fusión.

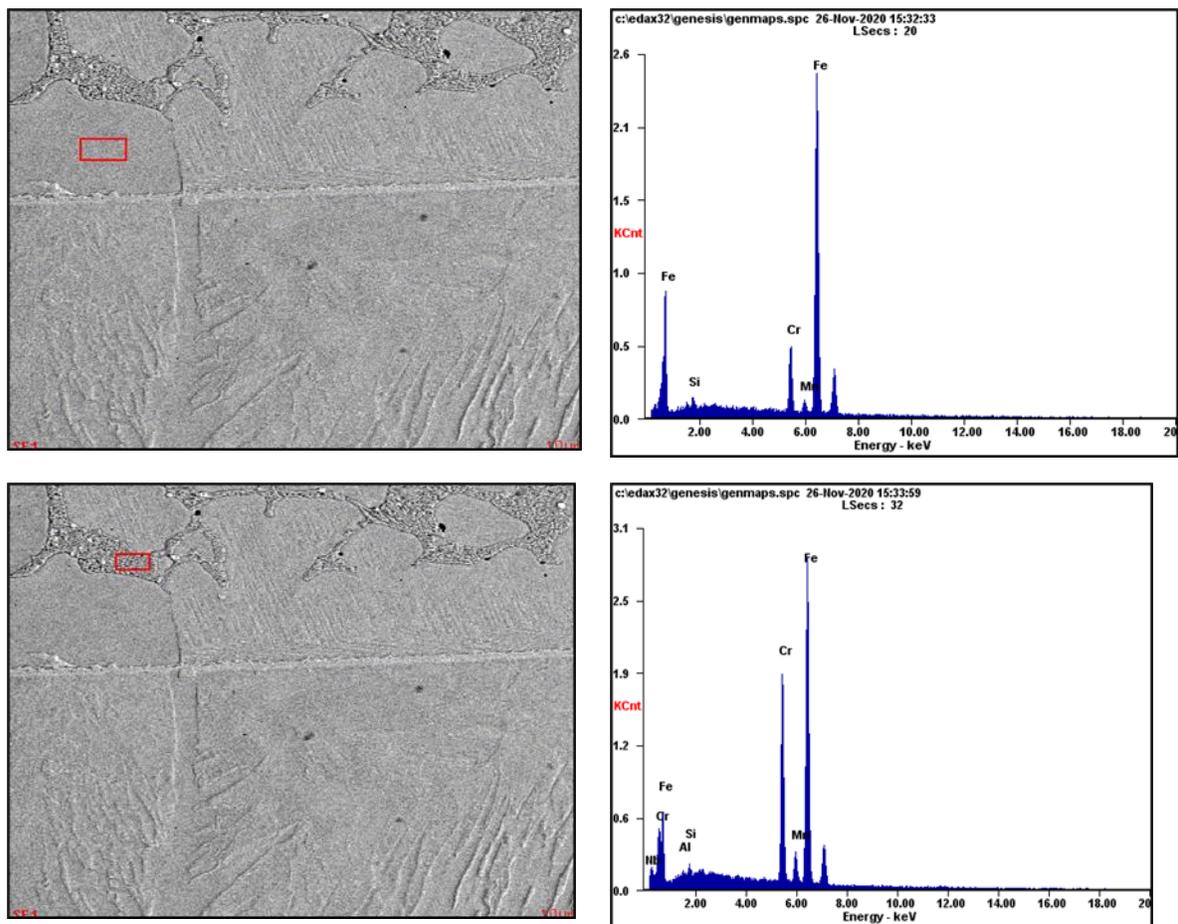


Figura 4.31 Análisis por EDX de fases en el límite de fusión del recubrimiento base Fe-14Cr-1.9C, matriz y carburos de cromo en recubrimiento duro.

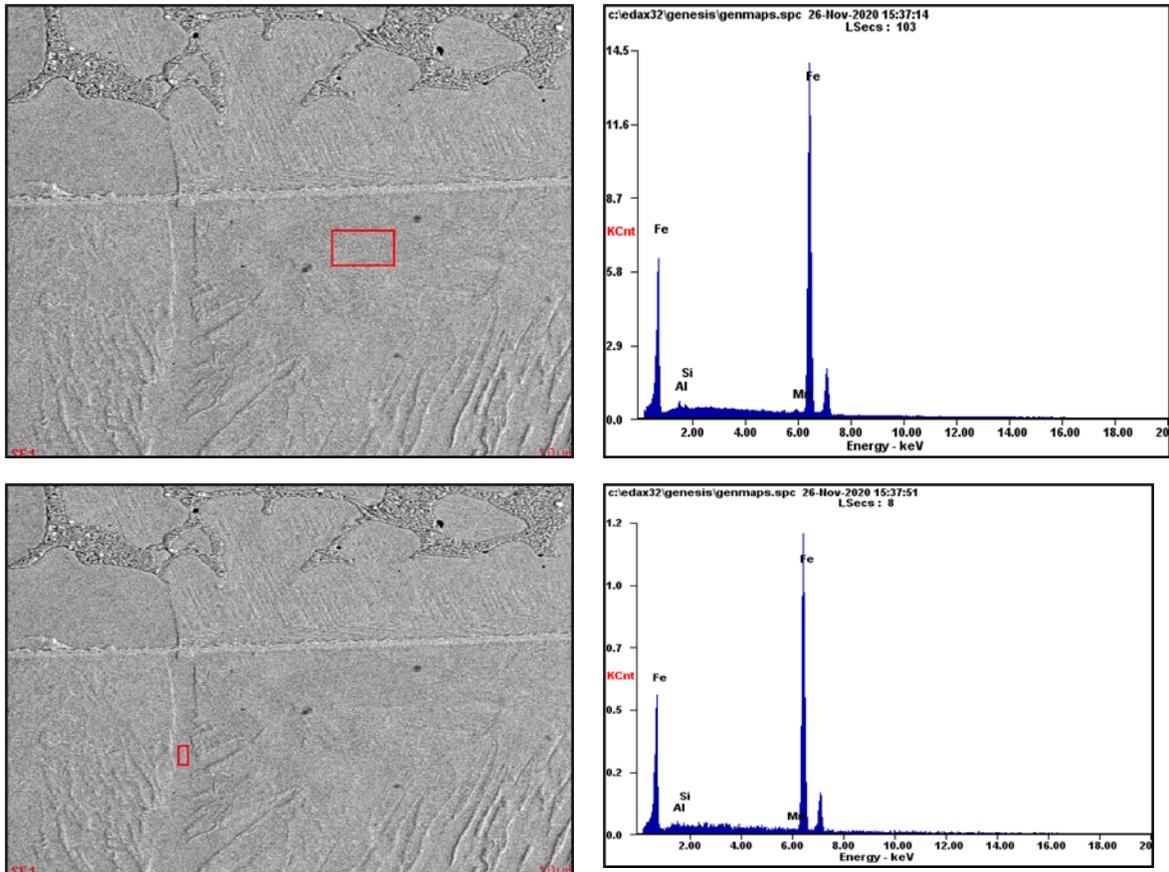


Figura 4.32 Análisis por EDX de fases en el metal base del recubrimiento base Fe-14Cr-1.9C, matriz y límite de grano.

Tabla 4.7. Resumen de fases obtenidas por EDX en límite de fusión de recubrimiento duro base Fe-14Cr-1.9C.

Localización	Fase	Composición semicuantitativa, % en peso
Recubrimiento duro	Matriz	87Fe-1Mn-10Cr-1Si
	Carburo de cromo	69Fe-1.6Mn-26Cr-1Nb
Metal base	Matriz	97Fe-1.4Mn-0.39Si
	Límite de grano	97Fe-1.1Mn-0.68Si

Los resultados muestran que los carburos de cromo contienen porcentajes altos de cromo a diferencia de la matriz que los contiene. En el caso de la matriz del metal base, esta no contiene cromo.

Caracterización de fases en el centro del recubrimiento duro.

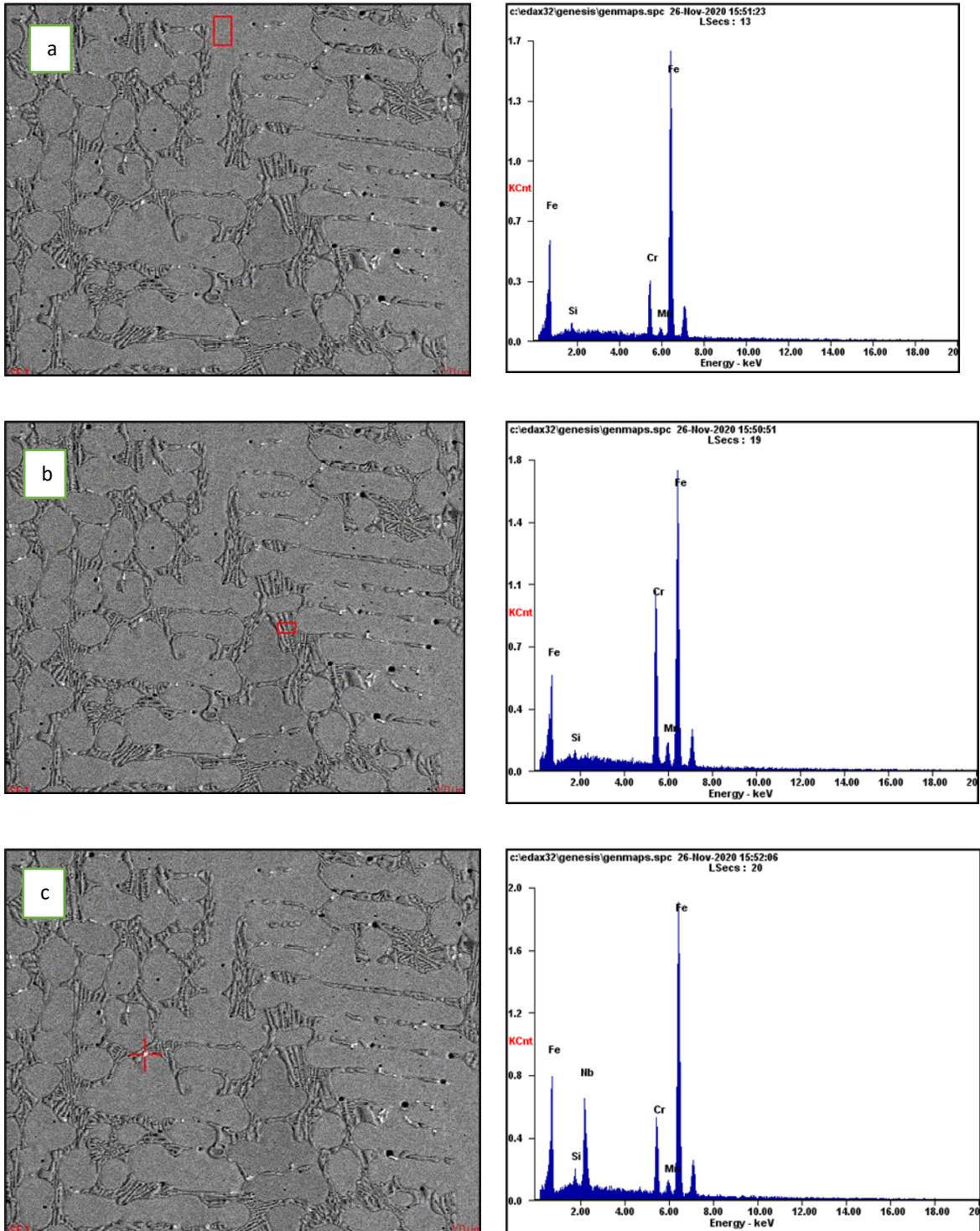


Figura 4.33 Análisis por EDX de fases presentes en la parte central del recubrimiento base Fe-14Cr-1.9C, a) matriz, b) carburos de cromo y c) carburos de niobio.

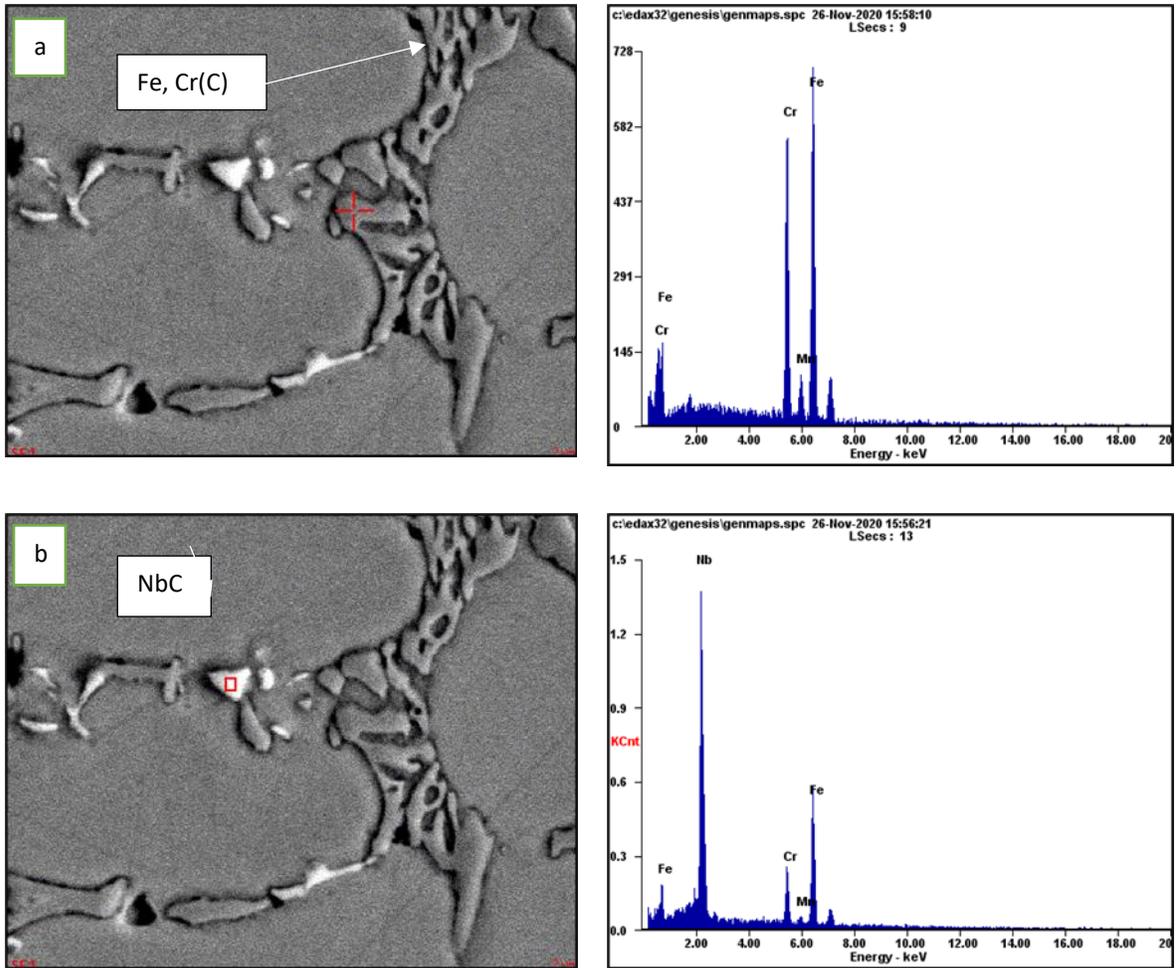


Figura 4.34 Magnificación de a) carburos de cromo y b) carburos de niobio y sus espectros EDX, en la parte central del recubrimiento duro base Fe-14Cr-1.9C.

Tabla 4.8. Resumen de composición química semicuantitativa de fases obtenida por análisis de EDX en el centro del recubrimiento duro base Fe-14Cr-1.9C.

Localización	Fase	Composición semicuantitativa, % en peso
Recubrimiento duro	Matriz	86Fe-1.2Mn-10Cr-1Si
	Carburo de cromo	72Fe-1.3Mn-25Cr-1Si
		64Fe-1.8Mn-33.84Cr
	Carburo de niobio	69Fe-1.3Mn-11Cr-16Nb-0.9Si
		34.8Fe-1Mn-10Cr-54Nb
		51Fe-1.4Mn-10Cr-37Nb

Los resultados del análisis por EDX muestran que, en el recubrimiento base, zona central se presentaron carburos de cromo y carburos de niobio en la matriz. El contenido de niobio, procede de las ferroaleaciones empleadas.

Los carburos de cromo variaron su contenido semicuantitativo entre 25 y 33% en peso, mientras que los carburos de niobio, su contenido semicuantitativo de niobio varió entre 16 y 54% en peso.

Recubrimiento duro Fe-15Cr-1.7C-1.5Nb,
Caracterización de fases en el límite de fusión.

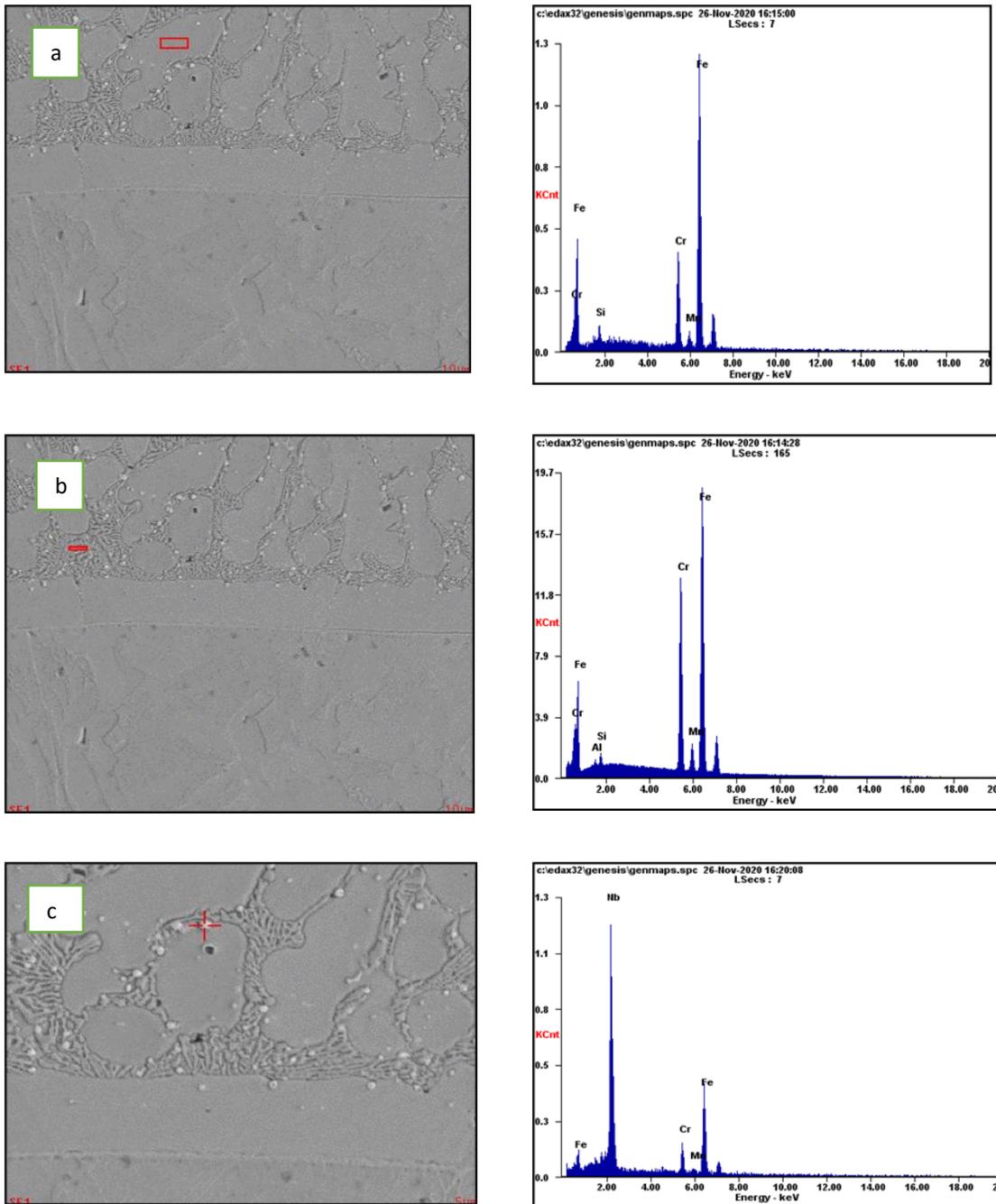


Figura 4.35 Análisis por EDX de fases en el límite de fusión del recubrimiento Fe-15Cr-1.7C-1.5Nb, a) matriz, b) carburos de cromo y c) carburos de niobio en recubrimiento duro.

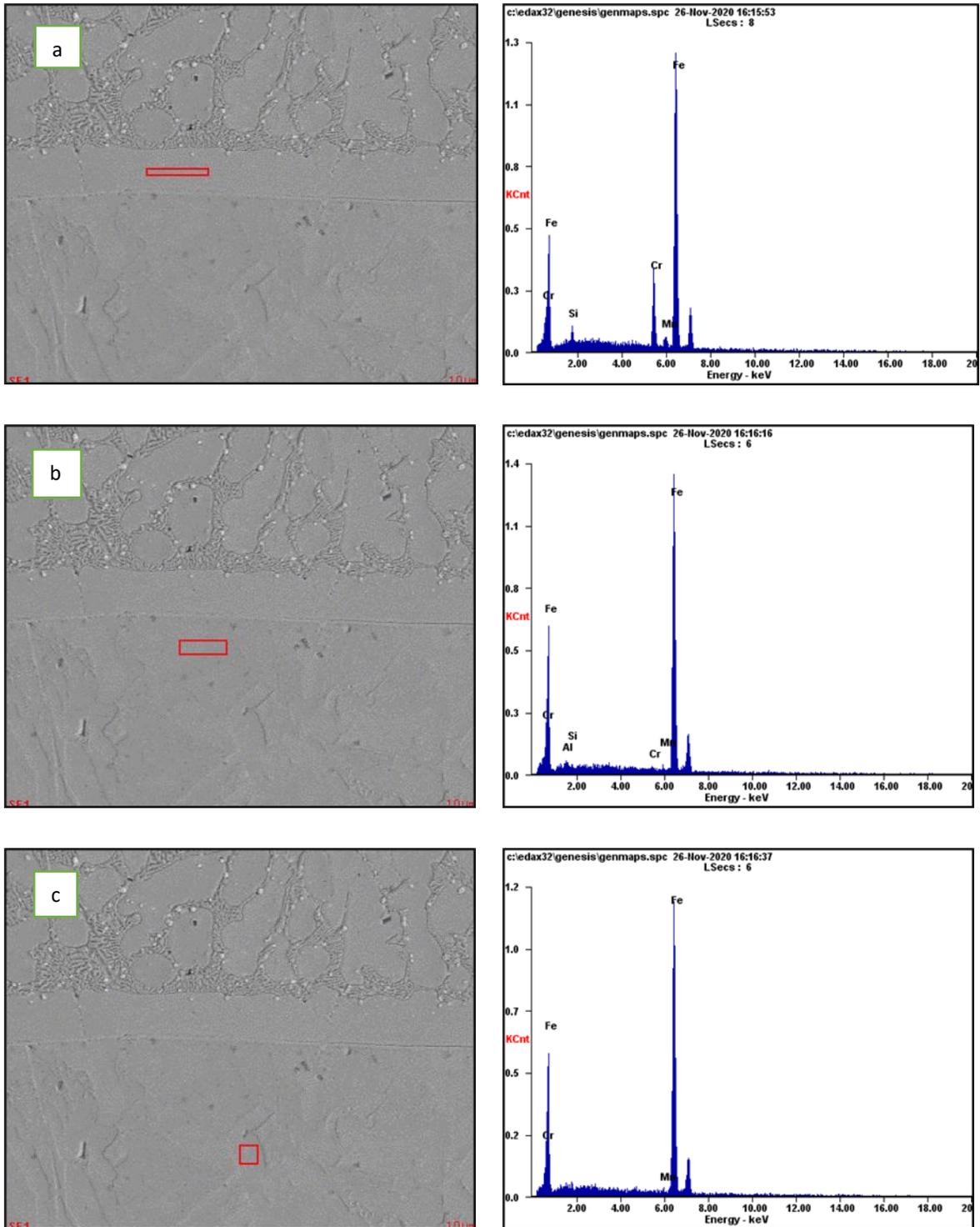


Figura 4-36. Análisis por EDX de fases en el metal base del recubrimiento Fe-15Cr-1.7C-1.5Nb, a) interfase, b) matriz y c) límite de grano.

Tabla 4.9. Resumen de composición química semicuantitativa de fases obtenida por análisis de EDX en el límite de fusión del recubrimiento duro Fe-15Cr-1.7C-1.5Nb.

Localización	Fase	Composición semicuantitativa, % en peso
Recubrimiento duro	Matriz	79.8Fe-1.5Mn-16.52Cr-2.01Si
	Carburo de cromo	68Fe-1.4Mn-28Cr-1Si
	Carburo de Niobio	32.4Fe-1Mn-7Cr-58Nb
Interfase	matriz	85Fe1.1Mn-11.7Cr-1.9Si
Metal base	matriz	95Fe-1.3Mn-0.8Cr-0.79Si

Los resultados muestran que la matriz del recubrimiento duro posee un 16% en peso de cromo, mientras que los carburos de cromo alcanzan un 28 % en peso de cromo, mientras que el contenido de niobio en los carburos de niobio es del 58 % en peso.

Dato interesante es la composición química de la interfase, donde se muestra el efecto de la dilución del recubrimiento en el metal base, pues el contenido de cromo alcanzó un 11.7% en peso. Mientras que la matriz en el metal base presentó un muy bajo contenido de cromo, 0.8% en peso.

Caracterización de fases en el centro del recubrimiento duro

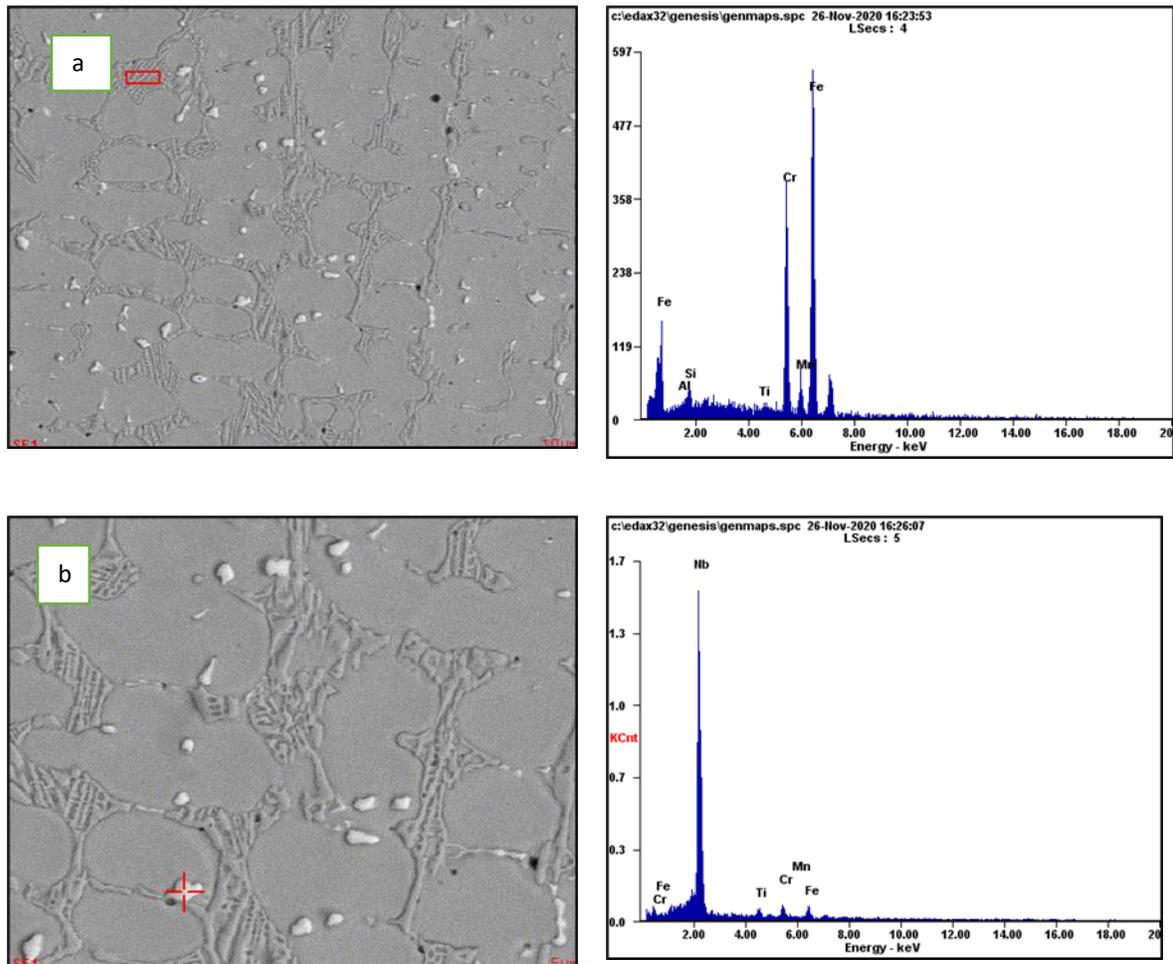


Figura 4.37 Análisis por EDX de fases presentes en la parte central del recubrimiento Fe-15Cr-1.7C-1.5Nb. a) carburos de cromo y b) carburos de Nb.

Tabla 4.10. Resumen de composición química semicuantitativa de fases obtenida por análisis de EDX en el centro del recubrimiento duro Fe-15Cr-1.7C-1.5Nb.

Localización	Fase	Composición semicuantitativa
Recubrimiento duro	Matriz	No se hizo análisis
	Carburo de cromo	67Fe-1.8Mn-28Cr-1.3Si
		64Fe-1.8Mn-33.84Cr
	Carburo de niobio	9.6Fe-0.6Mn-4.7Cr-2.2Ti-81.4Nb
5.4Fe-0.5Mn-3.9Cr-2.1Ti-79Nb-8.5C 14Fe-0.9Mn-5Cr-1.7Ti-76Nb		

Los resultados del análisis por EDX muestran que, en el recubrimiento base, zona central se presentaron carburos de cromo y carburos de niobio en la matriz.

Los carburos de cromo variaron su contenido semicuantitativo entre 28 y 33% en peso, mientras que los carburos de niobio, su contenido semicuantitativo de niobio varió entre 76 y 81 % en peso.

Recubrimiento duro, Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb.

Caracterización de fases en el límite de fusión.

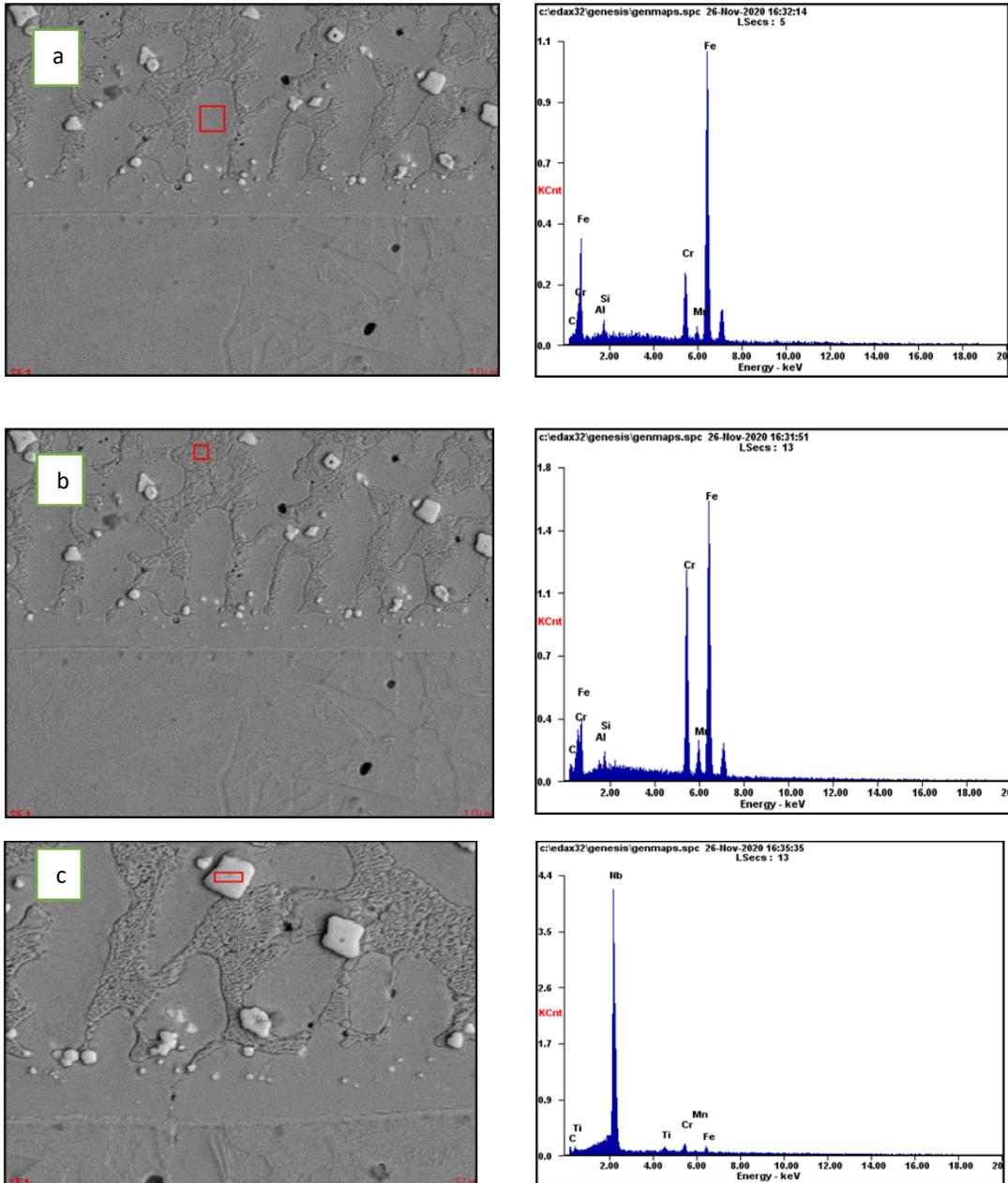


Figura 4.38 Análisis por EDX de fases en el límite de fusión del recubrimiento Fe-18Cr-1.9C3.2Nb, a) matriz, b) carburos de cromo y c) carburos de niobio en recubrimiento duro.

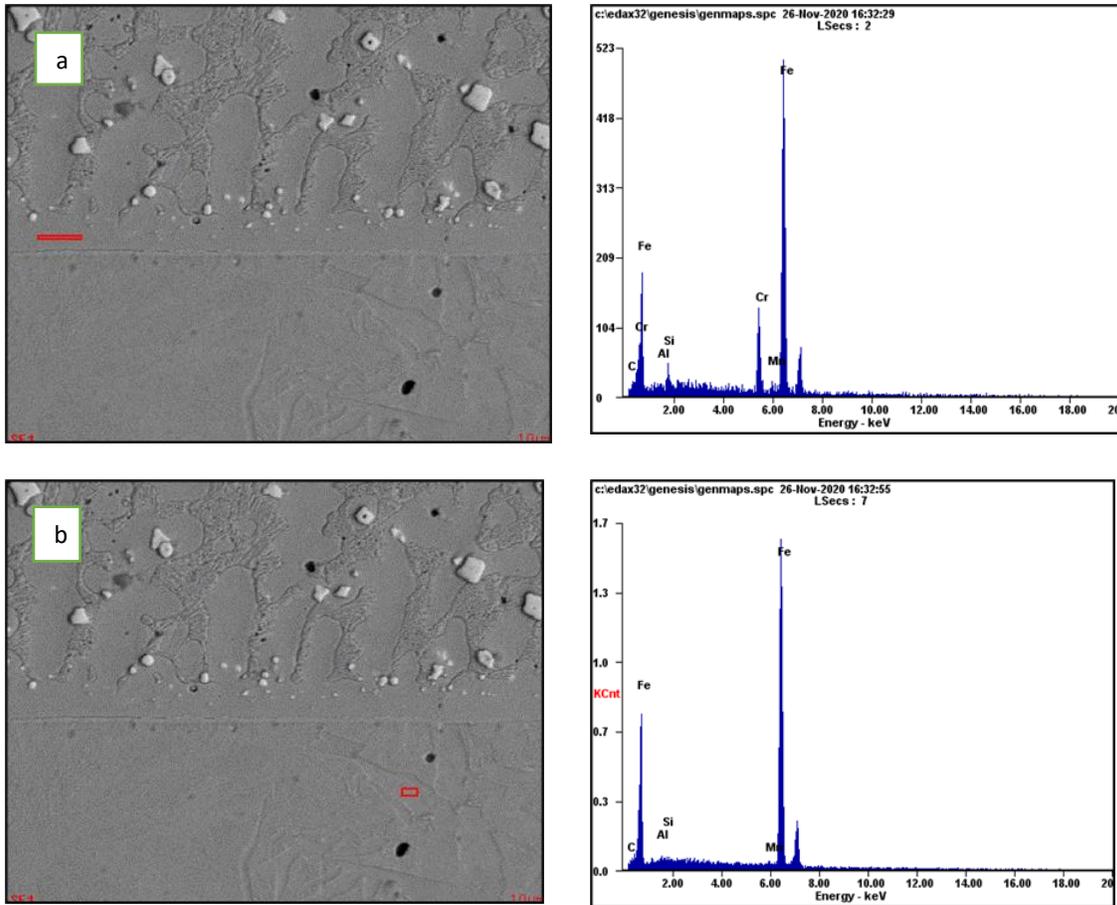


Figura 4.39 Análisis por EDX de fases en el metal base del recubrimiento duro Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb, a) matriz interfase, b) límite de fusión.

Tabla 4.11. Resumen de composición química semicuantitativa de fases obtenida por análisis de EDX en el límite de fusión del recubrimiento duro Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb.

Localización	Fase	Composición semicuantitativa, % en peso
Recubrimiento duro	Matriz	79Fe-1Mn-12Cr-1.7Si
	Carburo de cromo	61.8Fe-1.7Mn-27Cr-1.5Si-1Al
	Carburo de Niobio	3.2Fe-0.5Mn-3.8Cr-2Ti-82Nb-7C
Interfase	Matriz	79Fe-1.4Mn-11.9Cr-1.9Si-4.8C
Metal base	Matriz	92Fe-1.1Mn-0.6Cr-0.79Si-1Al-4C

Los resultados muestran que, en el límite de fusión, la matriz del recubrimiento duro posee un 12% en peso de cromo, mientras que los carburos de cromo alcanzan un 27 % en peso de cromo, mientras que el contenido de niobio en los carburos de niobio es del 82 % en peso.

Dato interesante es la composición química de la matriz interfase, donde se muestra el efecto de la dilución del recubrimiento en el metal base, pues el contenido de cromo alcanzó un 11.9% en peso. Mientras que la matriz en el metal base presentó un muy bajo contenido de cromo, 0.6% en peso.

Caracterización de fases en el centro del recubrimiento duro.

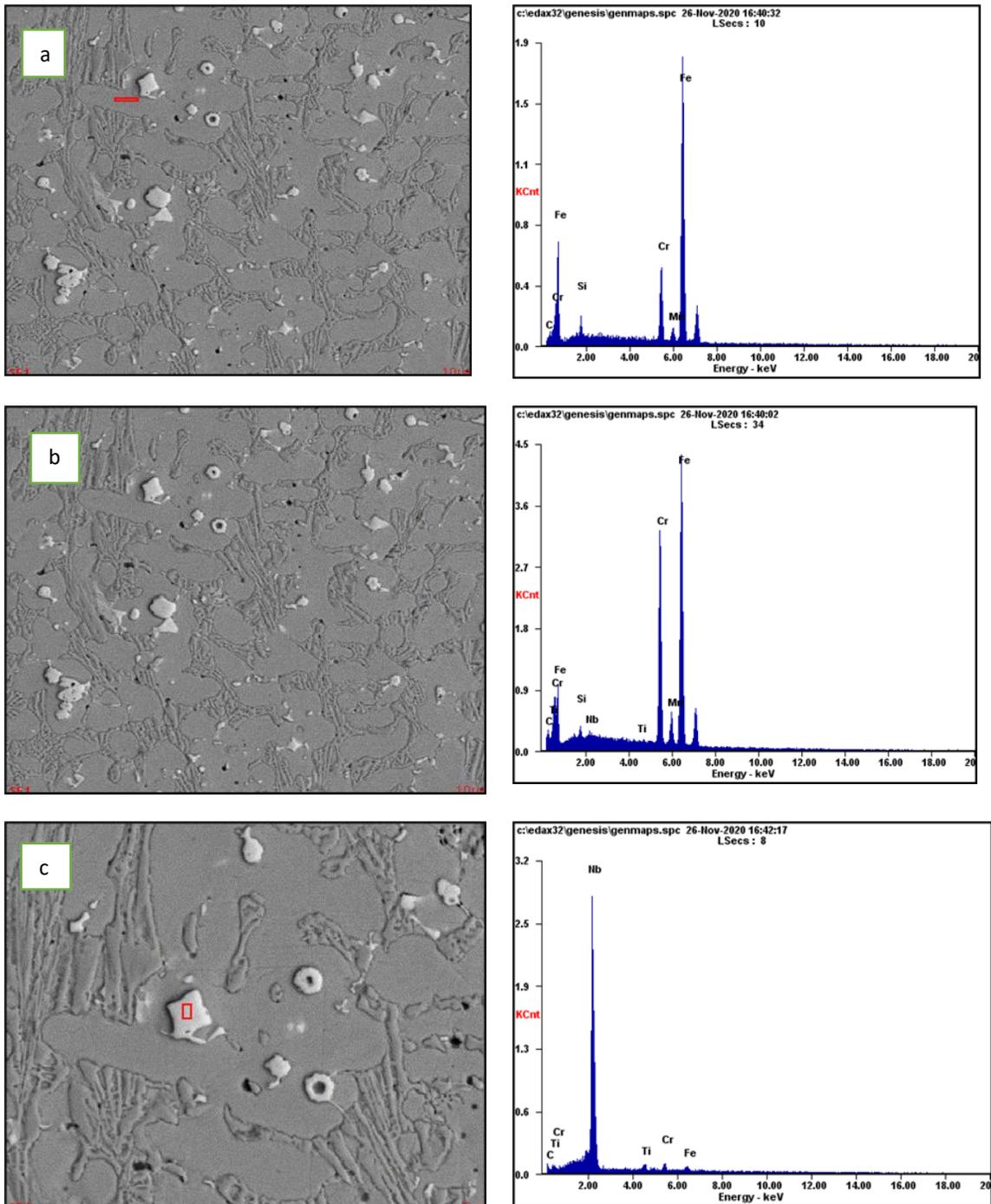


Figura 4.40 Análisis por EDX de fases presentes en la parte central del recubrimiento Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb, a) matriz, b) carburos de cromo y c) carburos de niobio.

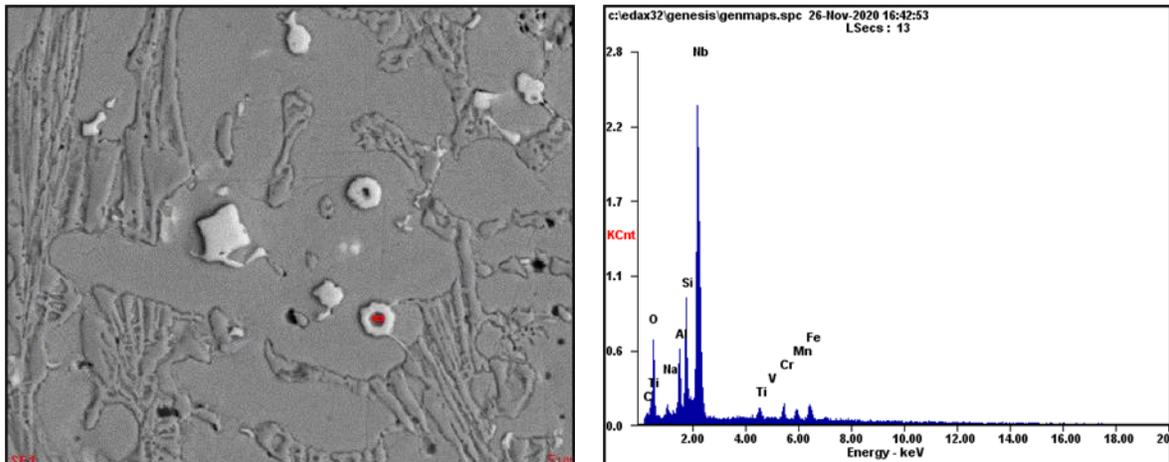


Figura 4.41 Análisis por EDX de óxido dentro de carburo de niobio.

Tabla 4.12. Resumen de composición química semicuantitativa de fases obtenida por análisis de EDX en el centro del recubrimiento duro Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb.

Localización	Fase	Composición semicuantitativa
Recubrimiento duro	Matriz	79Fe-1Mn-12Cr-1.7Si-4.4C
	Carburo de cromo	62Fe-1.5Mn-28Cr-1.3Si-6C
	Carburo de niobio	3.3Fe-3.3Cr-2.2Ti-83.5Nb

Los resultados del análisis por EDX muestran que, en el recubrimiento base, zona central se presentaron carburos de cromo y carburos de niobio en la matriz.

Los carburos de cromo mostraron un contenido semicuantitativo entre 28% en peso, mientras que los carburos de niobio, su contenido semicuantitativo de niobio fue de 83 % en peso. Bastante consistente, respecto de los resultados anteriores.

Evaluación del comportamiento de fases en diversos recubrimientos duros con niobio.

De los análisis la composición química semicuantitativa de las fases en los recubrimientos duros con niobio, se hizo un resumen y se muestra en las tablas siguientes, se separa el análisis por zonas: una la del límite de fusión y otra la de la zona centro de recubrimiento duro.

Tabla 4.13. Resumen de análisis composición química semicuantitativa de las fases, realizado por EDX, en límite de fusión de los recubrimientos duros. La composición química se expresa en porcentaje en peso.

Localización	Fase	Recubrimiento duro			Observaciones
		Base Fe-14Cr-1.9C	Fe-15Cr-1.7C-1.5Nb	Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb	
Recubrimiento duro	Matriz	87Fe-1Mn-10Cr-1Si	79.8Fe-1.5Mn-16.52Cr-2.01Si	79Fe-1Mn-12Cr-1.7Si	(79-87)Fe-1Mn-(10-16)Cr-(1-2)Si
	Carburo de cromo	69Fe-1.6Mn-26Cr-1Nb	68Fe-1.4Mn-28Cr-1Si	61.8Fe-1.7Mn-27Cr-1.5Si-1Al	(62-69)Fe-1.6Mn-(26-28)Cr-1.5Si-1Al
	Carburo de niobio	—————	32.4Fe-1Mn-7Cr-58Nb	3Fe-0.5Mn-3.8Cr-2.1Ti-82Nb	16-82Nb Mayor adición de niobio, hace carburos más ricos en Nb.
Interfase	Matriz	—————	85Fe-1.1Mn-11.7Cr-1.9Si	79Fe-1.4Mn-11.9Cr-1.9Si-4.8C	(79-85)Fe-1.4Mn-11.9Cr-1.9Si-4.8C
Metal base	Matriz	97Fe-1.4Mn-0.39Si	95Fe-1.3Mn-0.8Cr-0.79Si	92Fe-1.1Mn-0.6Cr-0.79Si-1Al-4C	(92-97)Fe-1.1Mn-0.6Cr-0.79Si-1Al-4C

Tabla 4.14. Resumen de análisis composición química semicuantitativa de las fases, realizado por EDX, en centro de los recubrimientos duros. La composición química se expresa en porcentaje en peso.

Localización	Fase	Recubrimiento duro			Observaciones
		Base Fe-14Cr-1.9C	Fe-15Cr-1.7C-1.5Nb	Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb	
Recubrimiento duro	Matriz	86Fe-1.2Mn-10Cr-1Si	No se hizo análisis	79Fe-1Mn-12Cr-1.7Si-4.4C	(79-86)Fe-1Mn-(10-12)Cr-1.7Si-4.4C
	Carburo de cromo	72Fe-1.3Mn-25Cr-1Si 64Fe-1.8Mn-33.84Cr	67Fe-1.8Mn-28Cr-1.3Si 64Fe-1.8Mn-33.84Cr	62Fe-1.5Mn-28Cr-1.3Si-6C	(62-72)Fe-1.5Mn-(25-28)Cr-1.3Si-6C 64Fe-1.8Mn-33.84Cr
	Carburos de niobio	69Fe-1.3Mn-11Cr-16Nb-0.9Si 34.8Fe-1Mn-10Cr-54Nb 51Fe-1.4Mn-10Cr-37Nb	5.4Fe-0.5Mn-3.9Cr-2.1Ti-79Nb-8.5C	3.3Fe-3.3Cr-2.2Ti-83.5Nb	16-83Nb Mayor adición de niobio hace carburos más ricos en Nb.

Tabla 4.15. Resultados finales, comparación de la composición química semicuantitativa de fases en límite de fusión y centro del cordón, de los tres recubrimientos duros.

Localización	Fase	Resultado final	
		Límite de fusión	Centro del recubrimiento
	Matriz	79Fe-1Mn-(10-16)Cr-(1-2)Si	(79-86)Fe-1Mn-(10-12)Cr-1.7Si-4.4C
Recubrimiento duro	Carburo de cromo	(62-69)Fe-1.6Mn-27Cr-1.5Si-1Al	(62-72)Fe-1.5Mn-(25-28)Cr-1.3Si-6C
	Carburos de niobio	Mayor adición de niobio hace carburos más ricos en Nb. Reduce contenido de hierro.	
Interfase	Matriz	(79-85)Fe-1.4Mn-11.9Cr-1.9Si-4.8C	-----
Metal base	Matriz (muy poco Cr, a diferencia de la matriz en recubrimiento).	(92-97)Fe-1.1Mn-0.6Cr-0.79Si-1Al-4C	-----

Los resultados del análisis de fases por EDX, mostraron que, para los tres recubrimientos, la composición química semicuantitativa de la matriz fue semejante en el límite de fusión como en el centro de recubrimiento, (79-86)Fe-1Mn-(10-12)Cr-1.7Si-4.4C.

Lo mismo ocurrió con la composición química semicuantitativa de los carburos de cromo, (62-72)Fe-1.5Mn-(25-28)Cr-1.3Si-6C.

Es decir, la matriz y los carburos de cromo se mantuvieron estables con la adición de niobio, lo que no ocurrió con los carburos de niobio. Un mayor contenido de niobio en el

recubrimiento duro ocasionó un mayor contenido de niobio en sus carburos, mientras que reduce su contenido de Fe.

La matriz interfase mostró una composición química semicuantitativa cercana a la matriz en el recubrimiento duro. En cambio, la matriz en límite de fusión, en la parte del metal base, presentó un contenido de hierro, manganeso y silicio semejante a la matriz, pero con un mínimo contenido de cromo, (92-97)Fe-1.1Mn-0.6Cr-0.79Si-1Al-4C.

Modificación de la composición química de los carburos de niobio con la adición de ferroaleación de niobio en el recubrimiento.

Debido a los resultados mostrados en el apartado de análisis por EDX de los recubrimientos duros, se analizó con detalle el contenido de niobio en sus carburos, conforme se incrementó la adición de ferroaleación con niobio.

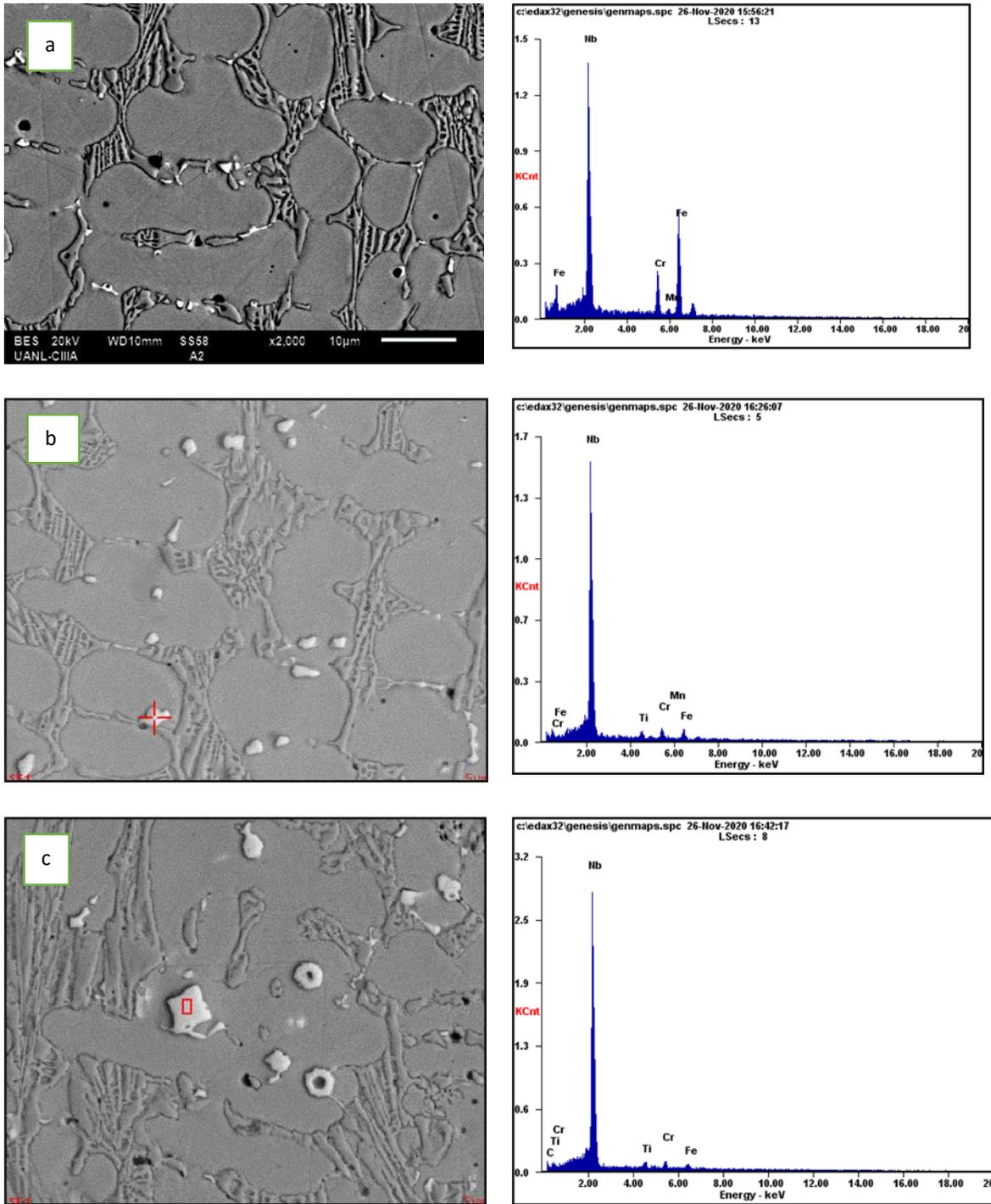


Figura 4.42 Micrografías y espectro EDX de carburos de niobio, en el centro de los recubrimientos, en los tres recubrimientos duros. A) Recubrimiento base Fe-14Cr-1.9C, b) recubrimiento Fe-15Cr-1.7C-1.5Nb y c) recubrimiento Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb. Todas las imágenes a 2000X.

El análisis por EDX de los recubrimientos mostró mayor contenido de niobio en sus carburos, conforme se incrementó la adición de ferroaleación con Nb. En los espectros se muestra mayor número de conteos en el pico del Nb, figura anterior, así mismo, se puede apreciar fácilmente que el tamaño de los carburos de Nb también aumentó.

El cambio ocurrido en el contenido semicuantitativo de niobio en los NbC se presenta en la tabla y figura siguientes.

Tabla 4.16. Contenido semicuantitativo de niobio obtenido por análisis EDX, en los NbC de los recubrimientos duros.

Recubrimiento duro	% en peso niobio en NbC
Base	37-54
1.5Nb	76-79
3.2Nb	82-83

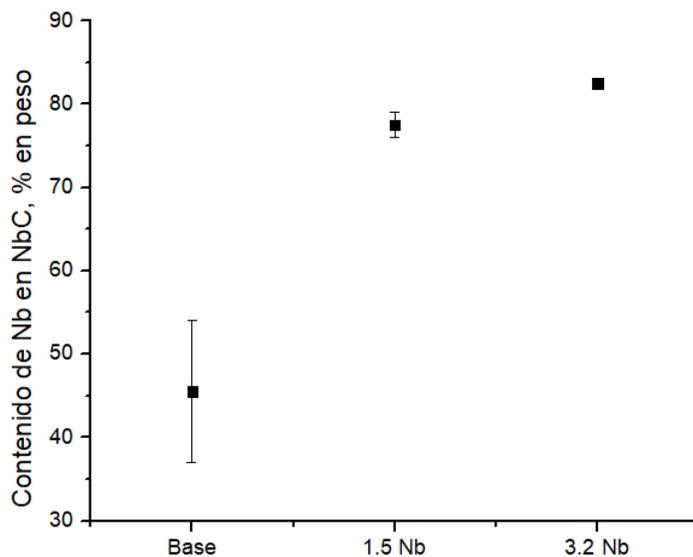


Figura 4.43 Contenido semicuantitativo de niobio obtenido por análisis EDX, en los NbC de los recubrimientos duros.

Los resultados constatan que, a mayor adición de niobio en forma de ferroaleación en los recubrimientos duros, mayor el contenido de niobio en sus carburos de niobio.

Por otra parte, se hicieron mediciones del tamaño de partículas de carburos de niobio, los resultados se presentan en la tabla y figura siguientes.

Tabla 4.17. Diámetro de partícula de carburo de Nb, en los recubrimientos duros, medido con el Software ImageJ.

Recubrimiento duro	Diámetro de partícula NbC, micrones
Base	0.4-1.4
1.5Nb	0.6-2.0
3.2Nb	1.1-4.6

*en los carburos alargados se midió la parte transversal.

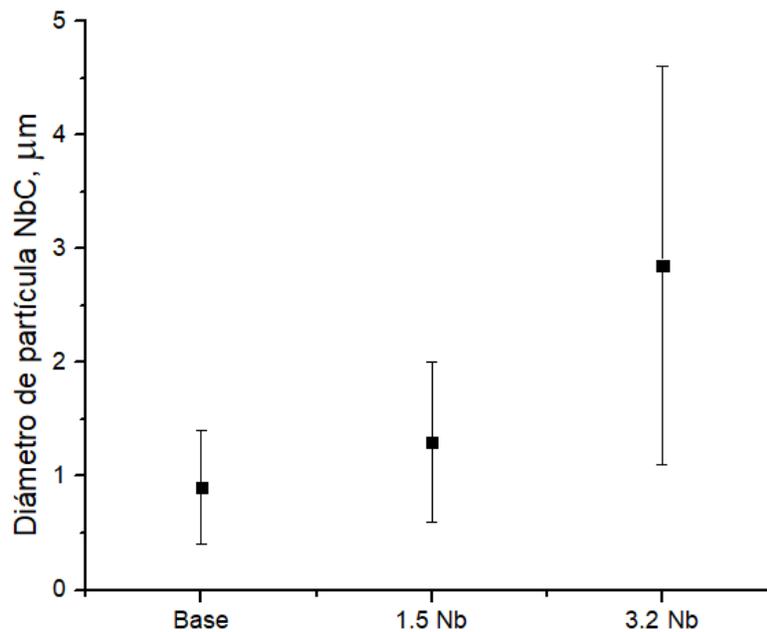


Figura 4.44 Diámetro de partícula de carburos de niobio en los recubrimientos duros.

Los resultados mostraron que, a mayor adición de niobio en forma de ferroaleación, mayor es su tamaño de partícula, expresado aquí como diámetro, así mismo a mayor adición mayor es su variación en tamaño.

A manera de conclusión se puede mencionar que la matriz en límite de fusión y centro del recubrimiento son semejantes en su composición química y bastante estables con la adición de niobio en los recubrimientos. Lo mismo ocurrió con los carburos de cromo.

Existencia de carburos de niobio en el recubrimiento base, producto del contenido mínimo en las ferroaleaciones empleadas.

Mayor contenido de ferroaleación con niobio produjo mayor cantidad y mayor tamaño de partículas de carburos de niobio. A mayor contenido de niobio en forma de ferroaleación, mayor contenido de niobio en sus carburos. Estos carburos, sin duda son de gran relevancia para la dureza de los recubrimientos, así como para la resistencia al desgaste de ellos.

4.5.2 Caracterización de fases de recubrimientos duros con óxido de lantano.

Análisis de fases en límite de fusión de los recubrimientos

Recubrimiento duro Fe-16Cr-2.2C-3Nb+2% peso La_2O_3 ,

Caracterización de fases en el límite de fusión.

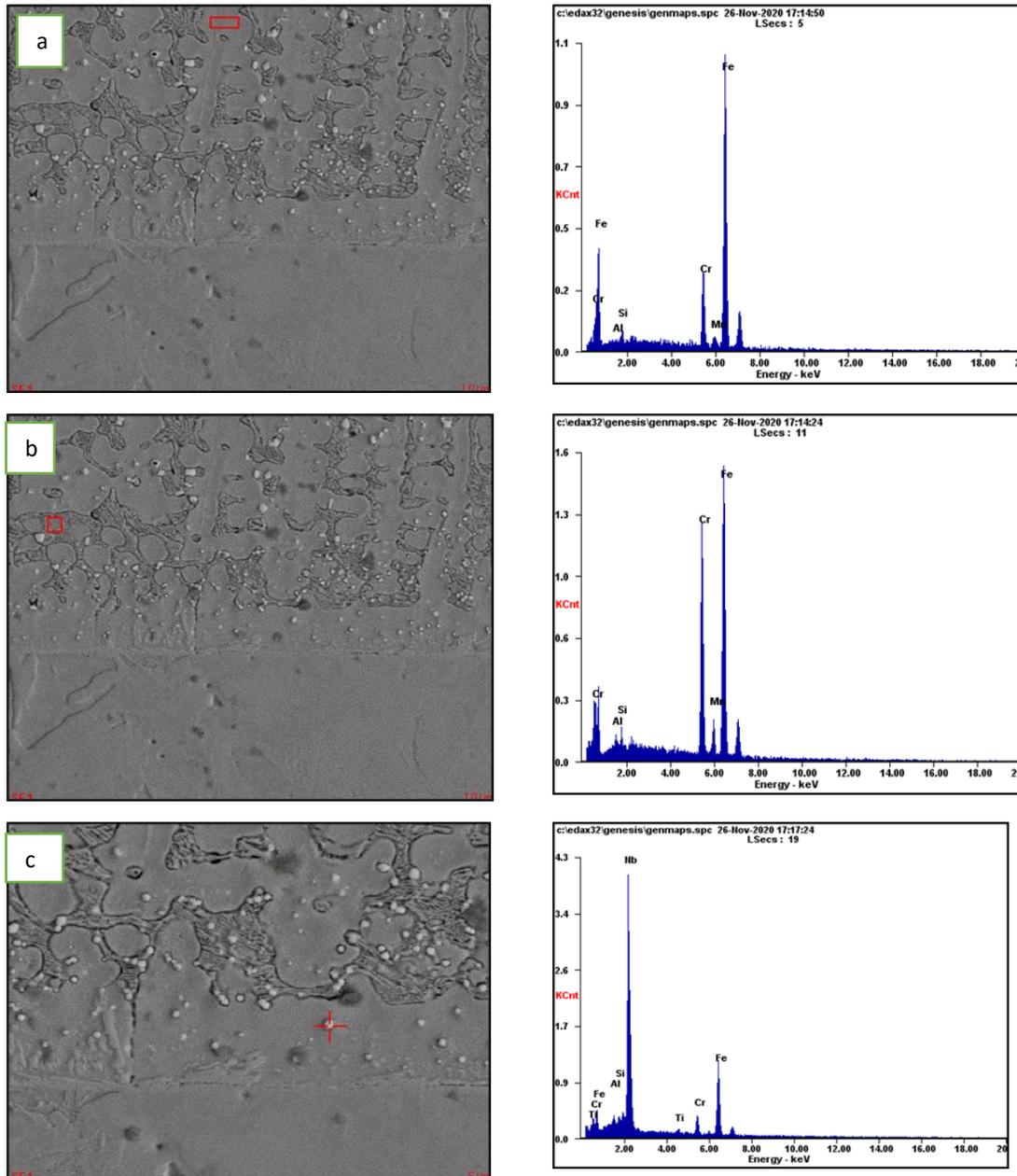


Figura 4.45 Análisis por EDX de fases en el límite de fusión del recubrimiento Fe-16Cr-2.2C-3Nb+2% peso La_2O_3 , a) matriz, b) carburos de cromo y c) carburos de niobio en recubrimiento duro.

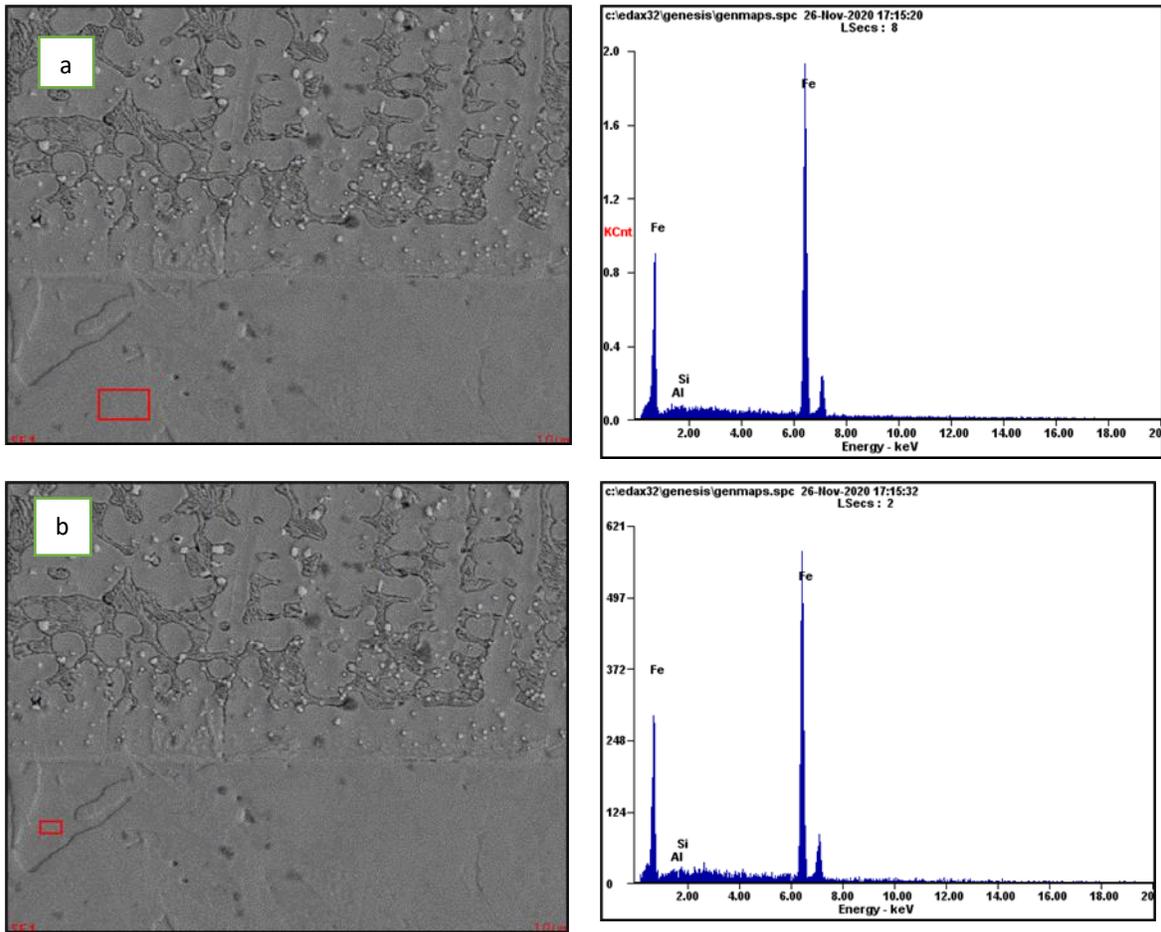


Figura 4.46 Análisis por EDX de fases en el metal base del recubrimiento Fe-16Cr-2.2C-3Nb+2% peso La_2O_3 , a) matriz y b) límite de grano.

Tabla 4.18. Resumen de composición química semicuantitativa de fases obtenida por análisis de EDX en el límite de fusión del recubrimiento duro Fe-16Cr-2.2C-3Nb+2% peso La_2O_3 .

Localización	Fase	Composición semicuantitativa, % en peso
Recubrimiento duro	Matriz	83.3Fe-1.28Mn-12.8Cr-1.84Si
	Carburo de cromo	64Fe-1.78Mn-30Cr-1Si
	Carburo de Niobio	28Fe-5.3Cr-0.99Ti-63.3Nb-1Si-1Al
Metal base	matriz	98Fe- 0.76Si-1Al

Los resultados muestran que la matriz del recubrimiento duro posee aproximadamente un 13 % en peso de cromo, mientras que los carburos de cromo alcanzan un 30 % en peso, por otra parte, el contenido de niobio en los carburos de niobio es del 63 % en peso.

Caracterización de fases en el centro del recubrimiento duro

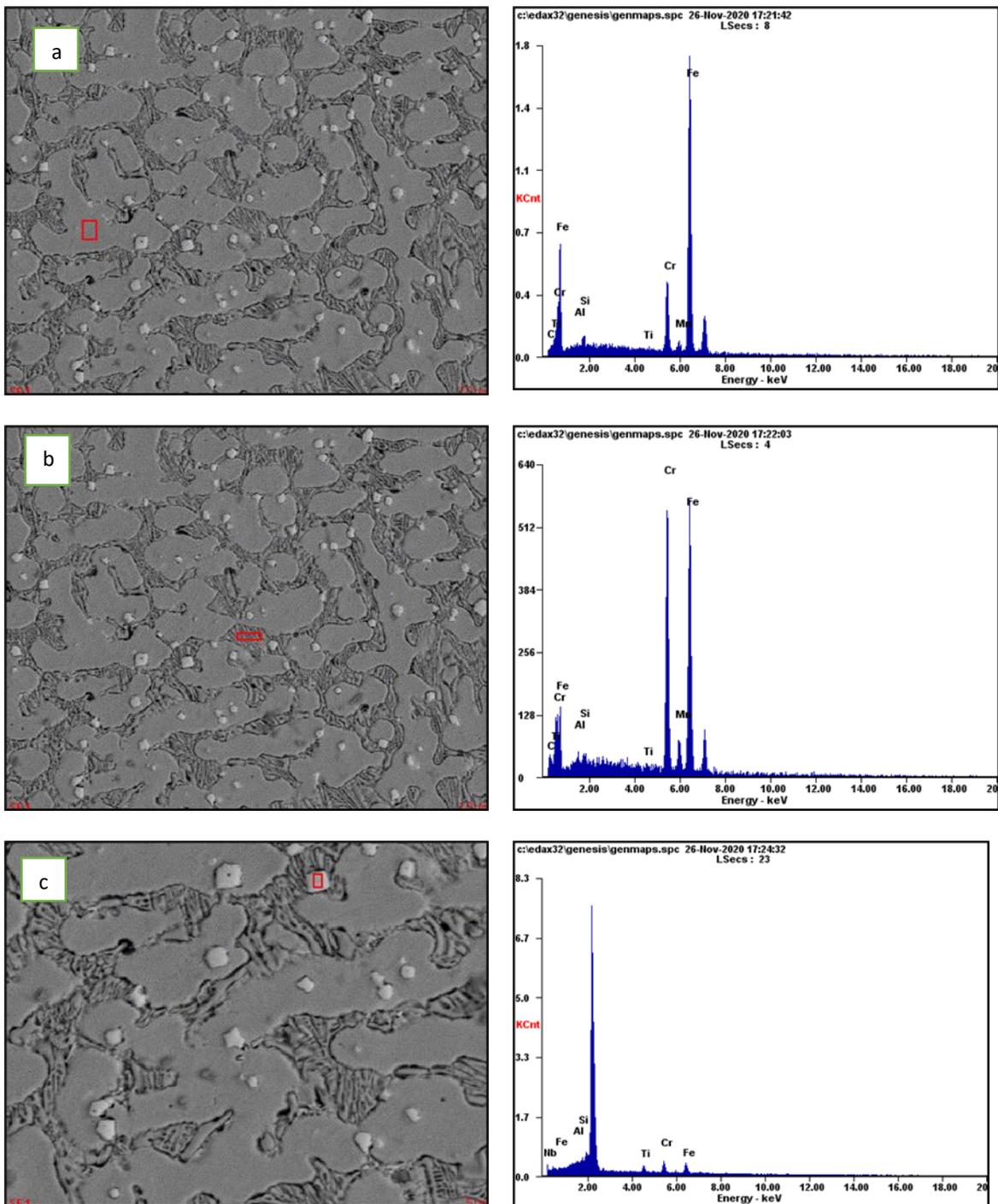


Figura 4.47 Análisis por EDX de fases presentes en la parte central del recubrimiento Fe-16Cr-2.2C-3Nb+2% peso La_2O_3 a) matriz, b) carburos de cromo y c) carburos de Nb.

Tabla 4.19. Resumen de composición química semicuantitativa de fases obtenida por análisis de EDX en el centro del recubrimiento duro Fe-16Cr-2.2C-3Nb+2% peso La₂O₃.

Localización	Fase	Composición semicuantitativa
Recubrimiento duro	Matriz	4.6C-80Fe-1.3Mn-11.6Cr-1.74Si
	Carburo de cromo	7.5 C-55Fe-1.6Mn-32.7Cr-1.1Si
	Carburo de niobio	5.6Fe-4.5Cr-2Ti-87Nb

Los resultados del análisis por EDX muestran que, en el recubrimiento con 2% peso La₂O₃, zona central se presentaron carburos de cromo y carburos de niobio en la matriz.

Los carburos de cromo presentaron un contenido semicuantitativo aproximado de 33% peso Cr, mientras que los carburos de niobio, su contenido semicuantitativo de niobio fue de 87% en peso.

Recubrimiento duro, Fe-14Cr-2.6C-3.4Nb+5% peso La_2O_3 .

Caracterización de fases en el límite de fusión.

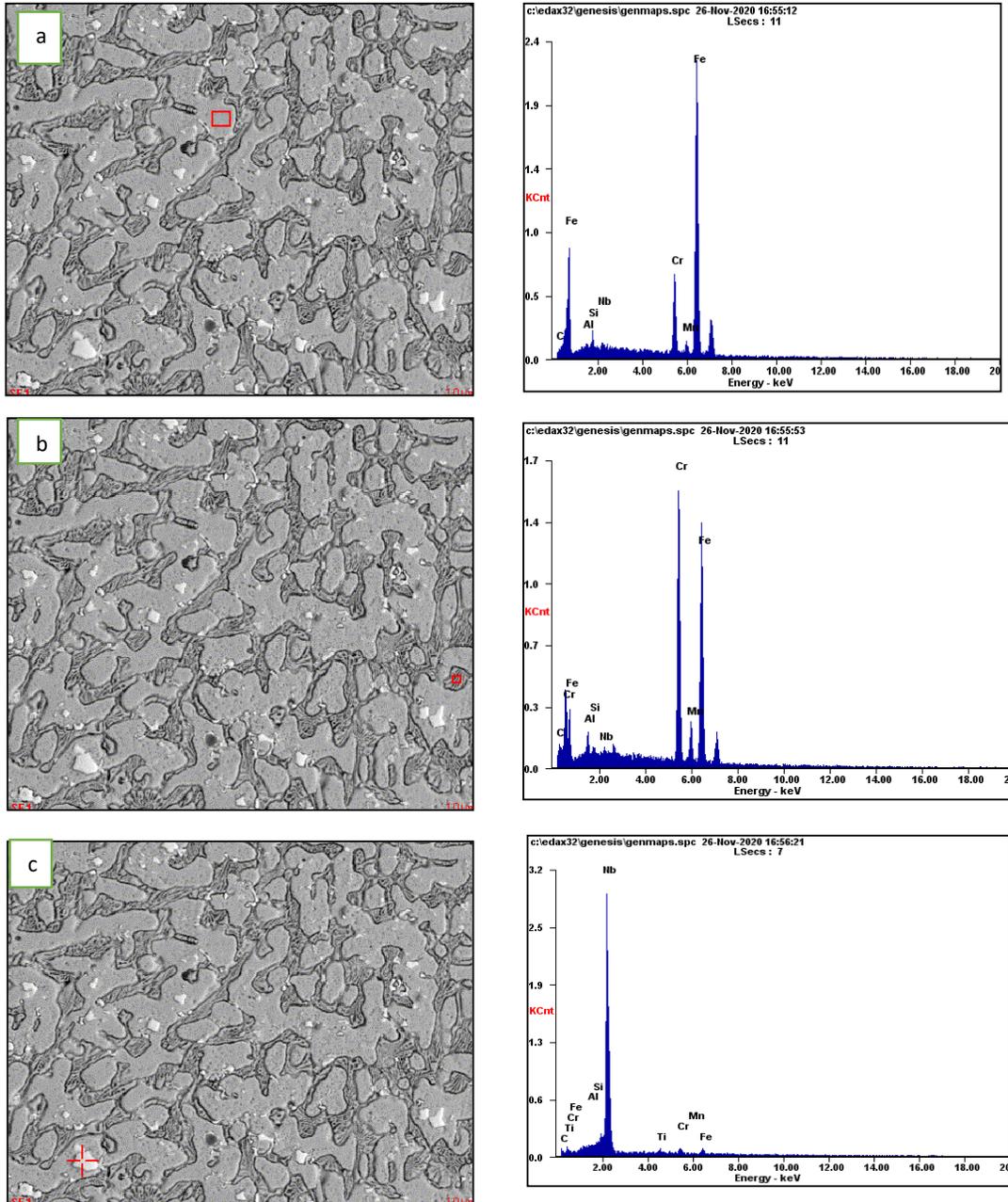


Figura 4.48 Análisis por EDX de fases en el límite de fusión del recubrimiento Fe-14Cr-2.6C-3.4Nb-5% peso La_2O_3 , a) matriz, b) carburos de cromo y c) carburos de niobio en recubrimiento duro.

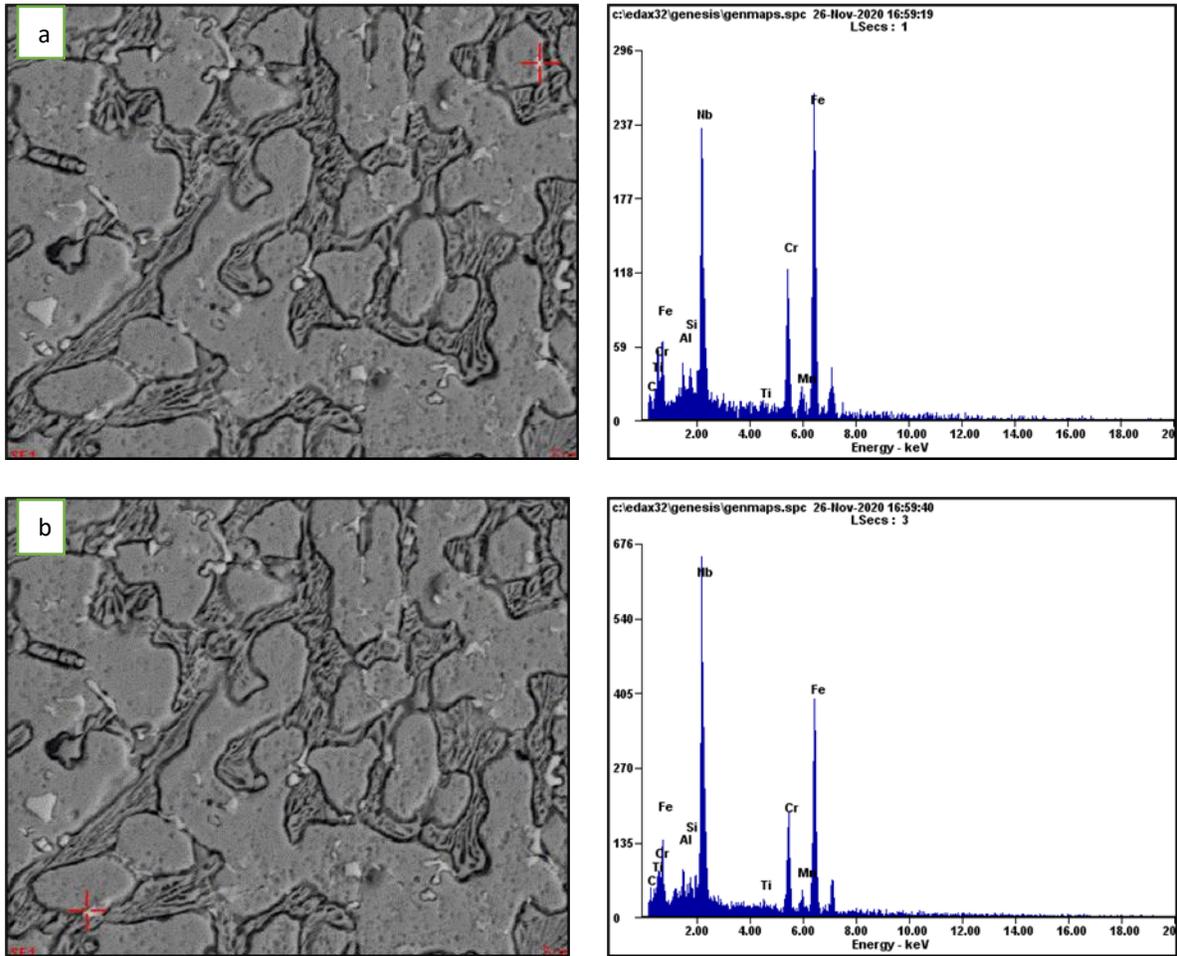


Figura 4.49 Análisis por EDX de fases en el centro del recubrimiento duro Fe-14Cr-2.6C-3.4Nb-5% peso La_2O_3 , a) y b) carburo de niobio finos.

Estos carburos presentaron una composición semicuantitativa diferente de los carburos de niobio en el centro de la matriz dendrítica. Quizá debido a la cercanía con los carburos de cromo.

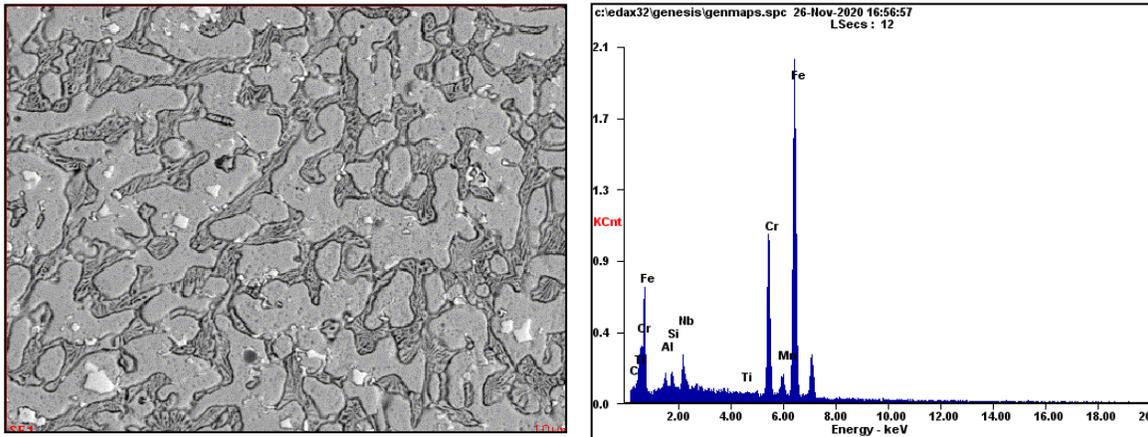


Figura 4.50 Análisis por EDX de fases del centro del recubrimiento duro Fe-14Cr-2.6C-3.4Nb-5% peso La₂O₃.

Se hizo un EDX de la región central del recubrimiento tratando de encontrar la presencia del óxido de lantano, a través de algún pico de lantano. Pero en análisis no mostró su presencia, solo en la microestructura se observó un efecto en la modificación de la morfología de los carburos de cromo.

Tabla 4.20. Resumen de composición química semicuantitativa de fases obtenida por análisis de EDX en el límite de fusión y centro del recubrimiento duro Fe-14Cr-2.6C-3.4Nb-5% peso La₂O₃.

Localización	Fase	Composición semicuantitativa, % en peso	
Recubrimiento duro	Matriz	79Fe-1.2Mn-12.3Cr-1.6Si	
	Carburo de cromo	8C-48Fe-1.7Mn-37Cr-0.82Si-2.16Al	
	Carburo de Niobio	7.5C-3.3Fe-0.4Mn-2.8Cr-1.5Ti-83Nb	
	Carburos de niobio finos		46Fe-0.9Mn-14.2Cr-28Nb-14-1.1Si-6.7C
			38Fe-1.3Mn-11.7Cr-37Nb-0.74Si-1.5Al-9C

Los resultados muestran que, en el límite de fusión y centro, la matriz del recubrimiento duro posee un 12% en peso de cromo, mientras que los carburos de cromo alcanzan un 37 % en peso de cromo, mientras que el contenido de niobio en los carburos de niobio es del 83 % en peso.

Mediante el análisis por EDX de una región amplia del centro del recubrimiento duro, se buscó la presencia de partículas con algún contenido de lantano, no se encontró ninguna. Tampoco el análisis del área general mostró su presencia. Seguramente debido a su resolución submicroscópica y a su presencia en un contenido mínimo.

Sin embargo, como se mencionó en el análisis por microscopía electrónica, la adición de óxido de lantano modificó la morfología de los carburos de cromo, así como redujo el tamaño de célula dendrítica y aumentó la dureza y microdureza de los recubrimientos.

Dato interesante es la presencia de carburos de niobio finos en la matriz dendrítica, con presencia importante de cromo, quizá debido a la cercanía con los carburos de cromo.

Al parecer a mayor contenido de óxido de lantano, se presentaron carburos de niobio más finos, tal como se mostró en el análisis de microscopía electrónica.

La presencia de aluminio se debe a las ferroaleaciones empleadas para la elaboración de los recubrimientos.

Recubrimiento duro, Fe-14Cr-4.C-3.6Nb+ 7% peso La₂O₃.

Caracterización de fases en el centro del recubrimiento.

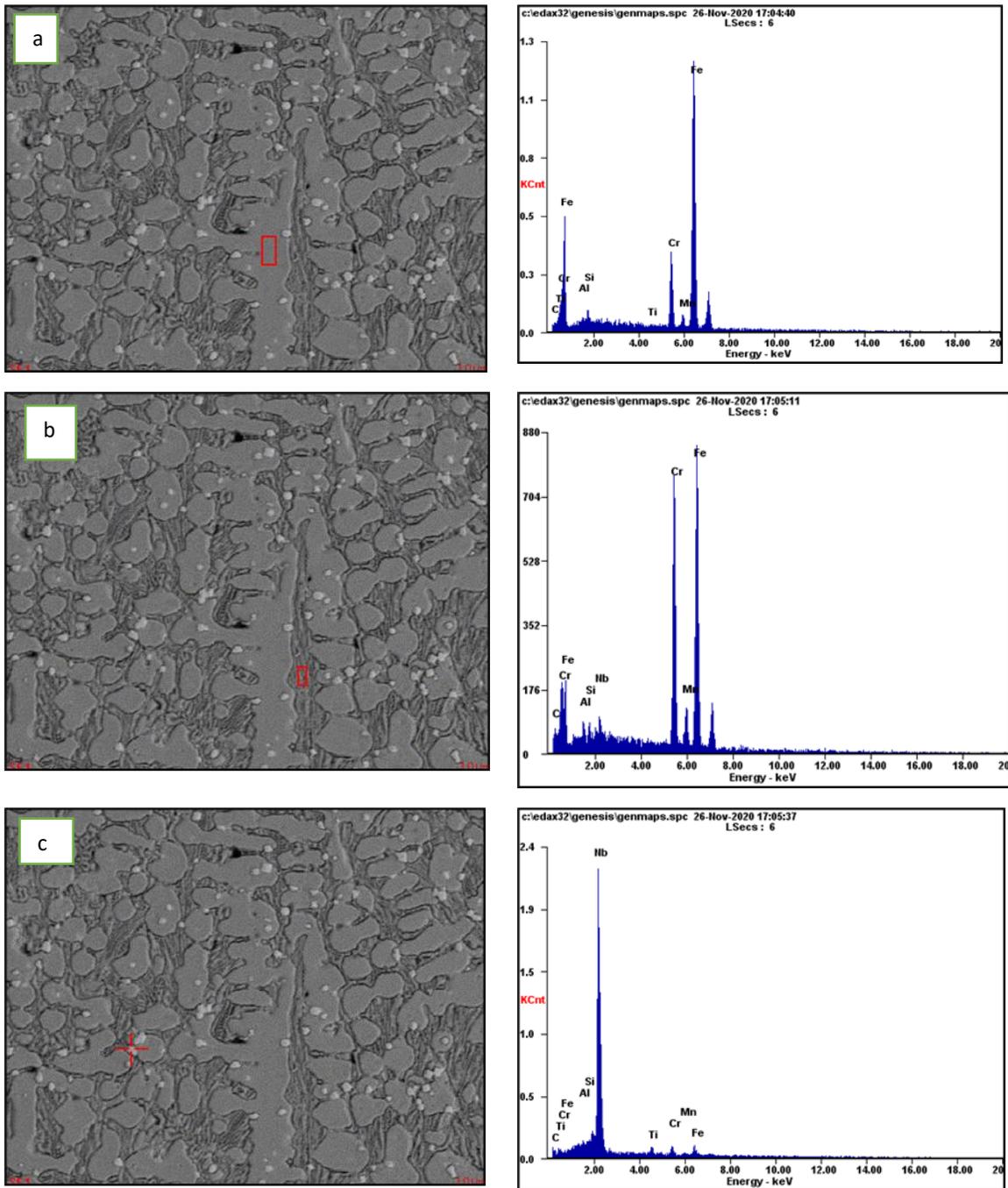


Figura 4.51 Análisis por EDX de fases en el centro del recubrimiento Fe-14Cr-4.C-3.6Nb+ 7% peso La₂O₃, a) matriz, b) carburos de cromo y c) carburos de niobio.

Tabla 4.21. Resumen de composición química semicuantitativa de fases obtenida por análisis de EDX en el centro del recubrimiento duro Fe-14Cr-4.C-3.6Nb+ 7% peso La₂O₃.

Localización	Fase	Composición semicuantitativa, % en peso
Recubrimiento duro	Matriz	77Fe-1.38Mn-12.8Cr-1.9Si
	Carburo de cromo	54Fe-1.8Mn-31Cr-1.2Si
		4.4Fe-3.1Cr-2.15Ti-78.8Nb-1Si-0.5Al
	Carburo de Niobio	7.5Fe-4.4Cr-1.98Ti-84.6Nb-1Si
		7.5Fe-4.7Cr-2.3Ti-83.7Nb-0.7Si

Los resultados muestran que la matriz del recubrimiento duro posee aproximadamente un 13 % en peso de cromo, mientras que los carburos de cromo alcanzan un 30 % en peso, por otra parte, el contenido de niobio en los carburos de niobio varió entre del 78 y 84 % en peso.

Evaluación del comportamiento de fases en diversos recubrimientos duros con óxido de lantano.

De los análisis la composición química semicuantitativa de las fases en los recubrimientos duros con óxido de lantano, se hizo un resumen y se muestra en la tabla siguiente.

Tabla 4.22. Resumen de análisis composición química semicuantitativa de las fases, realizado por EDX, en límite de fusión y centro de los recubrimientos duros. La composición química se expresa en porcentaje en peso.

Localización	Fase	Recubrimiento duro			Observaciones
		Fe-16Cr-2.2C-3Nb+2% peso La ₂ O	Fe-14Cr-2.6C-3.4Nb-5% peso La ₂ O ₃ .	Fe-14Cr-4.C-3.6Nb+ 7% peso La ₂ O ₃	
Recubrimiento duro	Matriz	83.3Fe-1.2Mn-12.8Cr-1.8Si	79Fe-1.2Mn-12.3Cr-1.6Si	77Fe-1.38Mn-12.8Cr-1.9Si	(77-83)Fe-1.2Mn-12.7Cr-1.8Si
	Carburo de cromo	64Fe-1.78Mn-30Cr-1Si	8C-48Fe-1.7Mn-37Cr-0.82Si-2.16Al	54Fe-1.8Mn-31Cr-1.2Si	(48-64)Fe-1.7Mn-(30-37)Cr-1Si-1Al
	Carburo de niobio	5.6Fe-4.5Cr-2Ti-86Nb-0.6Si 28Fe-5.3Cr-0.99Ti-63.3Nb-1Si-1Al	7.5C-3.3Fe-0.4Mn-2.8Cr-1.5Ti-83Nb Otros NbC finos 6.7C-46Fe-0.9Mn-14.2Cr-28Nb-14-1.1Si 9C-38Fe-1.3Mn-11.7Cr-37Nb-0.74Si-1.5Al	4.4Fe-3.1Cr-2.15Ti-78.8Nb-1Si-0.5Al 7.5Fe-4.4Cr-1.98Ti-84.6Nb-1Si 7.5Fe-4.7Cr-2.3Ti-83.7Nb-0.7Si	(4.4-7.5)Fe-(3.1-4.5)Cr-(1.5-2)Ti-(79-83)Nb Otros con menores cantidades de Nb.
Metal base	Matriz	98Fe-0.76Si-1Al			

Los resultados del análisis de fases por EDX, mostraron que la composición química semicuantitativa de la matriz en los recubrimientos duros fue (77-83) Fe-12Mn-12.7Cr-1.8Si.

Mientras que la composición química semicuantitativa de los carburos de cromo, (48-64)Fe-1.7Mn-(30-37)Cr-1Si-1Al, en tanto los carburos de niobio mostraron una composición de (4.4-7.5)Fe-(3.1-4.5)Cr-(1.5-2)Ti-(79-83)Nb.

Comparación de la composición química semicuantitativa de las fases presentes en ferroaleaciones con niobio y óxido de lantano.

Con el propósito de analizar las composiciones químicas semicuantitativas de las fases presentes en los recubrimientos duros experimentales, se elaboró la tabla siguiente.

Tabla 4.23. Contenido semicuantitativo de fases por análisis EDX de los recubrimientos duros.

Recubrimiento			
Fase	Recubrimientos duros Fe-Cr-C con Nb	Recubrimientos duros Fe-Cr-C con óxido de lantano	Resultado final
Matriz	(79-86)Fe-1Mn-(10-12)Cr-1.7Si-4.4C	(77-83)Fe-1.2Mn-12.7Cr-1.8Si	(77-86)Fe-1.1Mn-11Cr-1.7Si
Carburos de cromo	(62-72)Fe-1.5Mn-(25-28)Cr-1.3Si-6C	(48-64)Fe-1.7Mn-(30-37)Cr-1Si-1Al	Recubrimientos con óxido de lantano presentaron mayor contenido de cromo.
Carburos de niobio	3.3Fe-3.3Cr-2.2Ti-83.5Nb (se consideró la de alto Nb)	(4.4-7.5)Fe-(3.1-4.5)Cr-(1.5-2)Ti-(79-83)Nb	(3.3-7.5)Fe-(3.3-4.5)Cr-1.5-2Ti-(79-83)Nb

De la tabla anterior, se desprende que la matriz y los carburos de niobio se mantuvieron bastante estables, sin embargo, en los recubrimientos duros con la adición de óxido de lantano, los carburos de cromo presentaron un contenido mayor de cromo.

Es notable el efecto que en general, tiene la adición de óxido de lantano sobre la composición química semicuantitativa de los carburos de cromo, tal como lo muestra la tabla anterior y la figura siguiente.

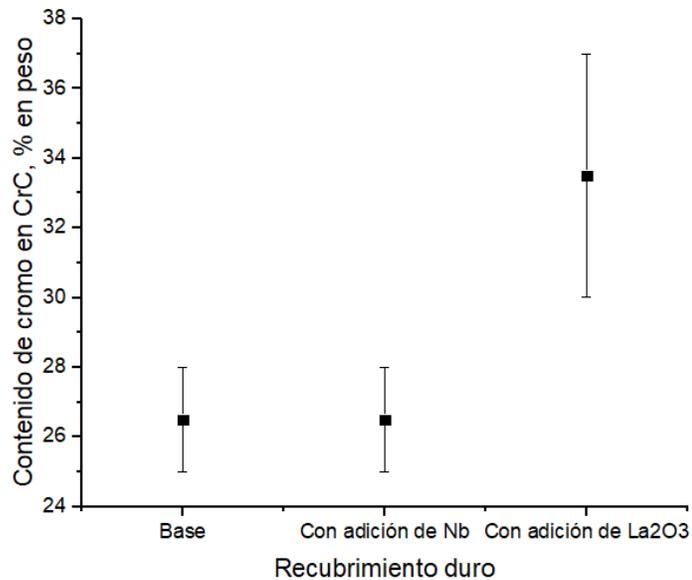


Figura 4.52 Contenido de cromo en carburos de cromo de recubrimientos duros experimentales, obtenido por EDX.

Esto se suma a los resultados del análisis por microscopía electrónica donde se muestra que la adición de óxido de lantano modificó la fracción de área de carburos de cromo, aumentándola, y su morfología. Lo cual ocasionó un notable incremento en la dureza de estos recubrimientos.

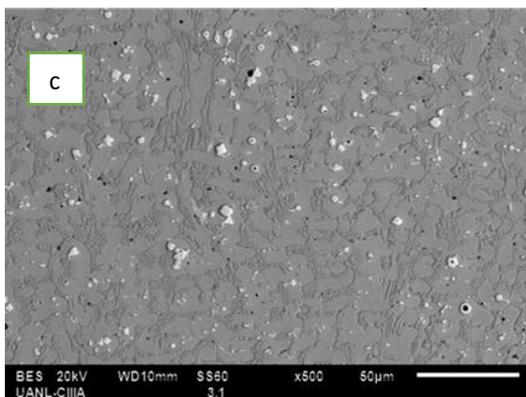
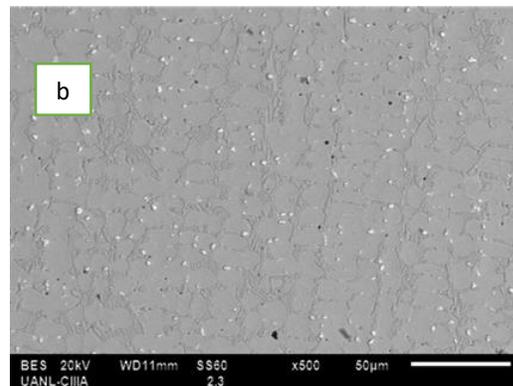
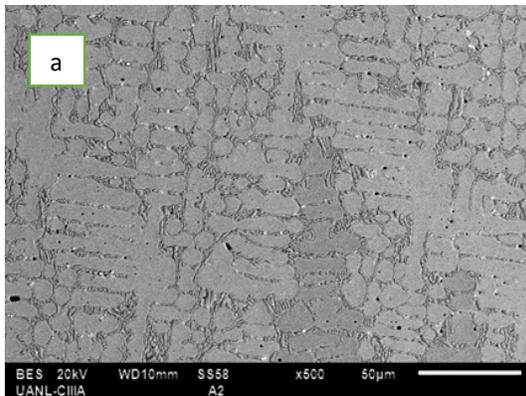
4.6 CARACTERIZACIÓN DE FRACCIÓN DE AREA DE CARBUROS.

4.6.1 Recubrimientos base y Niobio

La caracterización de los recubrimientos también se hizo mediante microscopía electrónica de barrido. Figuras 4.53 a 4.57.

Se observa como la adición de Nb, ocasionó un refinamiento de la microestructura, reduciendo el espaciado intercarburos, aumentando con ello la fracción de área de carburos, FAC. Esto se muestra cuantitativamente en la tabla 4.24 y figura 4.55. Consecuentemente, la fracción de área de la fase matriz se redujo. Figura 4.57.

El porcentaje de FAC tanto de cromo como de niobio, fue medido usando el Software Image J, mientras que la fracción de área de la matriz se obtiene en consecuencia.



Base FAC=22.34%

Hcarb:42-46 HRC 43-49HRC.

1.5 Nb FAC=22.88%

Hcarb: 42-55 HRC 46-49 HRC.

3.2Nb FAC=26.7 %

Hcarb: 54-60HRC 49-54HRC.

Figura 4.53 Micrográficas de SEM correspondientes a los recubrimientos duros a) Base: Fe-14Cr-1.9C, b) Fe-15Cr-1.7C-1.5Nb y c) Fe-18Cr-1.9C-3.2Nb. 500X.

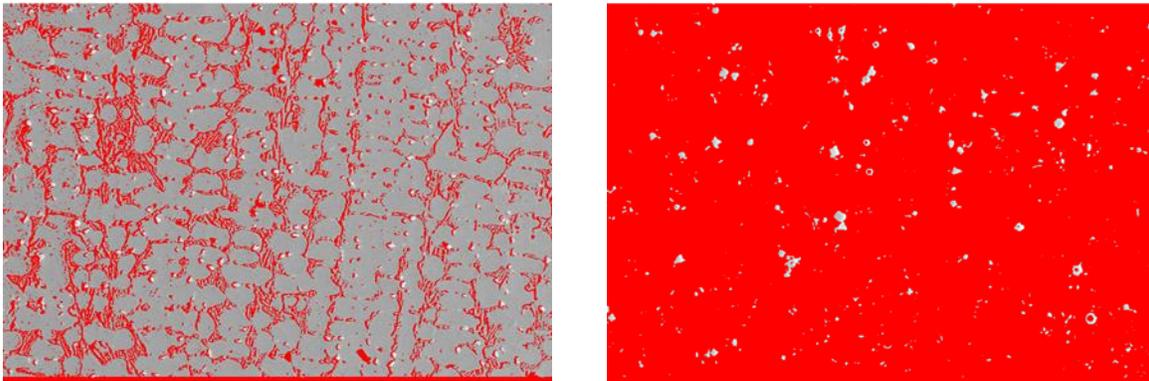


Figura 4.54 Ejemplo de la medición de fracción de área de carburos de cromo y la fracción de área de carburos de niobio, utilizando el software ImageJ.

Tabla 4.24. Efecto de la adición de niobio en el porcentaje de fracción de área de carburos de cromo, de los recubrimientos duros.

Nb (% peso)	Fracción de área de carburos de cromo (%)
0	22.34
1.5Nb	22.88
3.2Nb	26.70

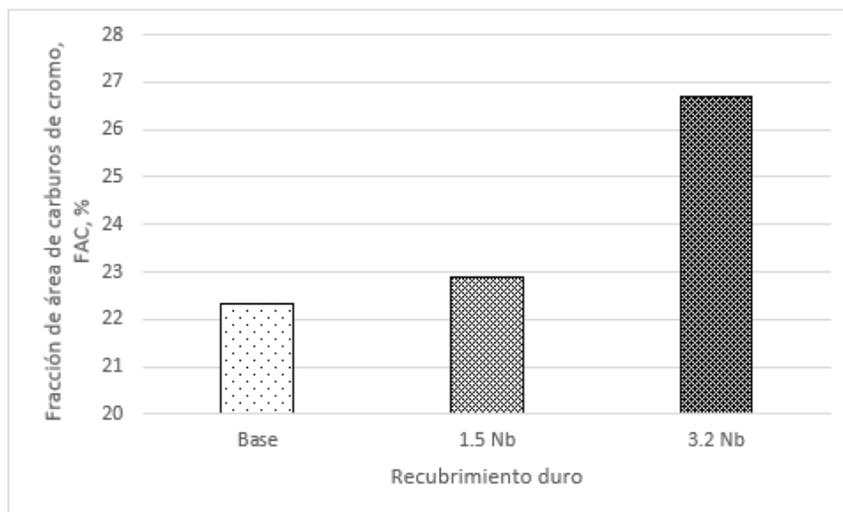


Figura 4.55 Efecto de la adición de niobio en la fracción de área de carburos de cromo.

Para complementar la caracterización se determinó la fracción de área de carburos de niobio. Aun cuando en el recubrimiento base no se añadieron ferroaleaciones para incrementar el contenido de niobio, este recubrimiento presentó una cantidad pequeña de niobio, proveniente de las aleaciones maestras empleadas. La caracterización avanzada mediante SEM y EDX, así lo comprobaron. Esto podría ser relevante para el comportamiento del recubrimiento en el desgaste.

Tabla 4.25. Efecto de la adición de niobio en el porcentaje de fracción de área de carburos de niobio de los recubrimientos duros.

Nb (% peso)	Fracción de área de carburos de niobio (%)
0	0.80
1.5Nb	1.78
3.2Nb	3.11

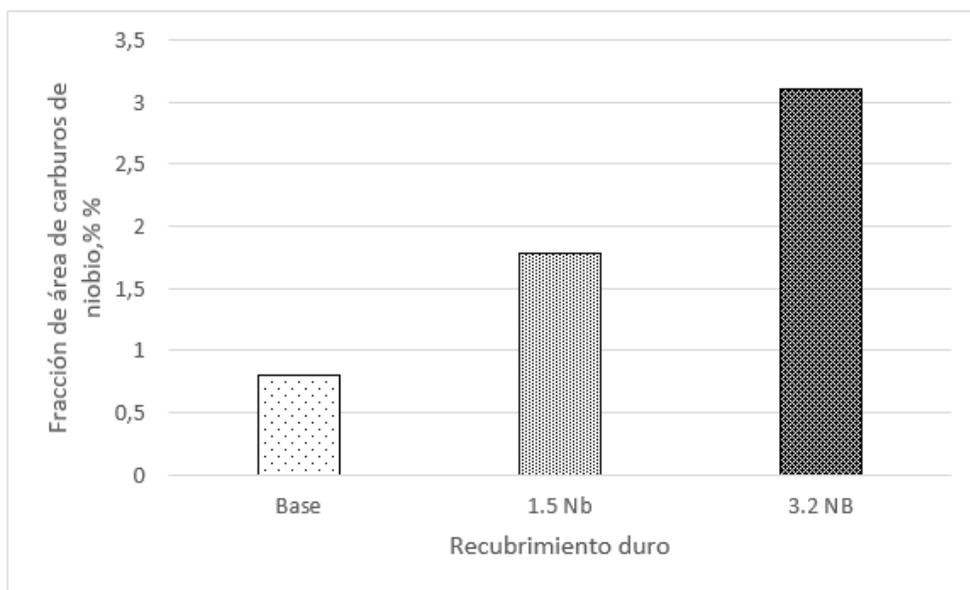


Figura 4.56 Efecto de la adición de niobio en la fracción de área de carburos de niobio.

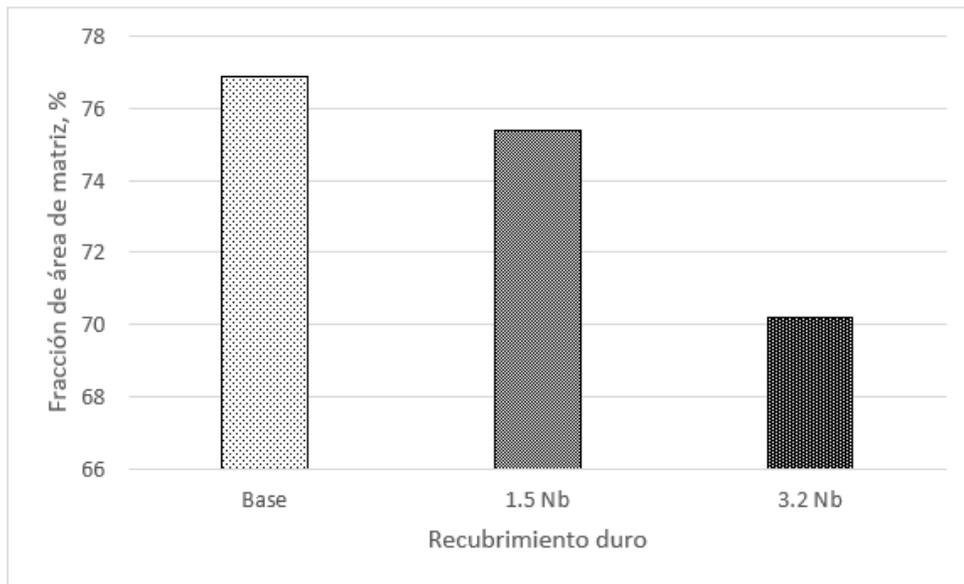
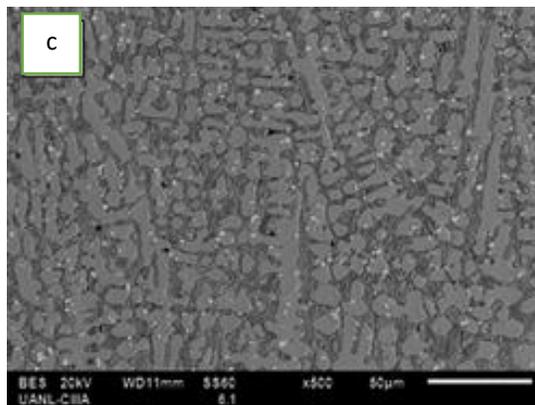
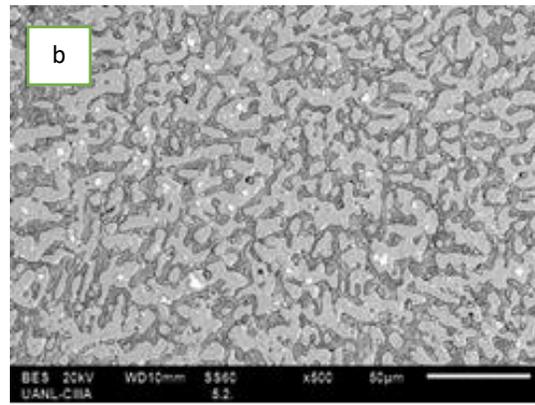
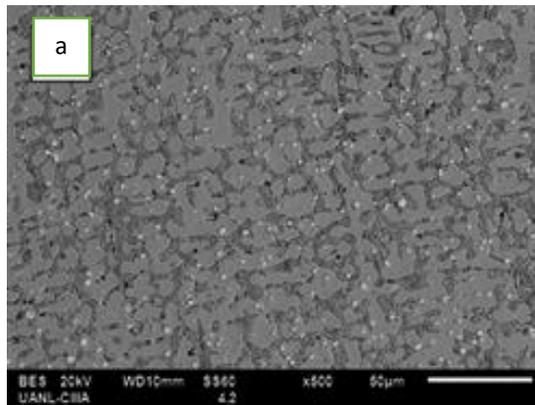


Figura 4.57 Efecto de la adición de niobio sobre la fracción de área de matriz.

En suma, con la adición de niobio, se observó un incremento en la fracción de área de carburos tanto de cromo como de niobio, así como una reducción en la fracción de área de la matriz de los recubrimientos. Todos estos cambios microestructurales, modifican la dureza de los recubrimientos y su resistencia al desgaste.

4.6.2 Recubrimientos adición de La_2O_3



2% La_2O_3 FAC= 30.64%

Hcarb: 45-49; Macro 47-52 HRC

5% La_2O_3 FAC= 34.82%

Hcarb: 46-50; 47-53 HRC

7% La_2O_3 FAC= 38.38%

Hcarb: 59-62; 57-58 HRC

Figura 4.58 Micrografías SEM de recubrimientos duros con adición de La_2O_3 , a) recubrimiento duro con 2%, b) 5% y c) 7%. 500X.



Figura 4.59 Ejemplo de imagen empleada para medición de la fracción de área de carburos, en muestra de recubrimiento duros observada al SEM a 500X, analizada con el Software ImageJ.

El análisis microestructural muestra que con la adición de La_2O_3 , se ocasiona un refinamiento de la microestructura, reduciendo el espaciado intercarburos, aumentando con ello la fracción de área de carburos de cromo, FAC. Esto se muestra cuantitativamente en la tabla 4.26 y figura 4.60.

El porcentaje de área de carburos fue medido usando el Software ImageJ, tal como se aprecia en la figura 4.59.

Tabla 4.26. Efecto de la adición de óxido de lantano en el porcentaje de fracción de área de carburos en los recubrimientos duros.

La_2O_3 (% peso añadido)	Fracción de área de carburos de cromo (%)
2	30.64
5	34.82
7	38.88

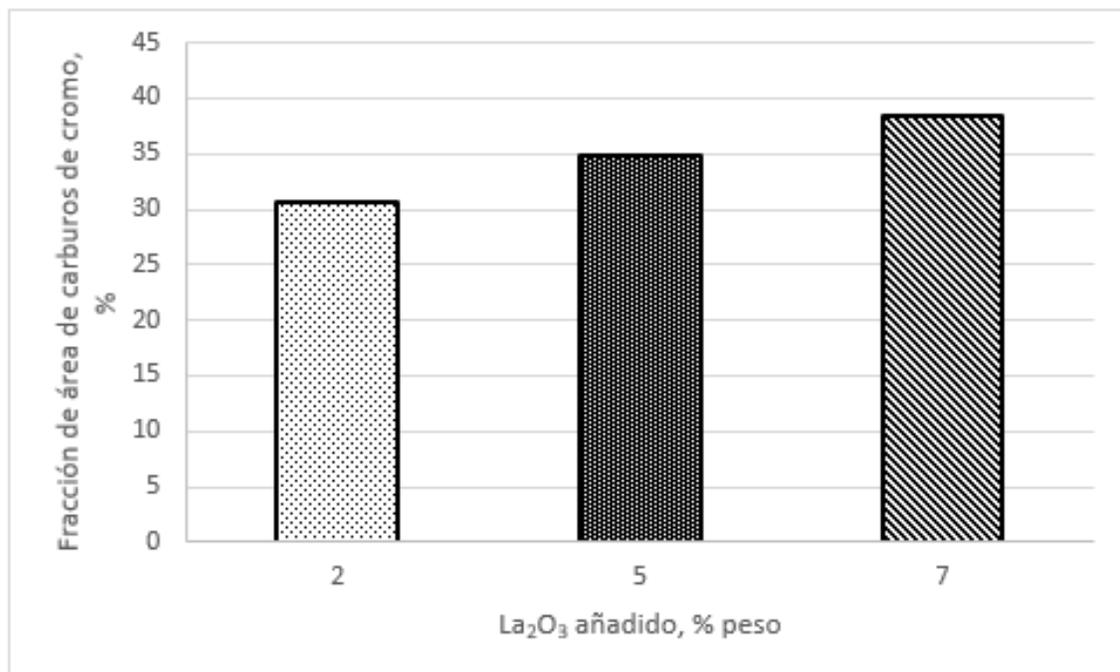


Figura 4.60 Efecto de la adición de óxido de lantano en la fracción de área de carburos de cromo.

Los resultados del incremento del FAC con el refinamiento de grano están en acuerdo con las observaciones de Hao y Singla quienes estudiaron la influencia de las tierras raras y vanadio y establecieron que se debe al decremento en el espaciado intercarburos [6], [31].

4.7 DUREZA

A continuación, se puede observar en la tabla los diferentes resultados de durezas en cada muestra. En algunas se probaron 2 o 3 veces y otras se les hicieron prueba por cada lado y al final se promediaron dando los resultados que se muestran a continuación.

Tabla 4.27. Dureza en recubrimiento base, niobio y oxido de lantano.

RECUBRIMIENTO	DUREZA ROCKWELL HRC			
	PRUEBAS			PROMEDIO
Base	50	52		51
	49	52	52	51
1.5Nb	47	49		48
	47	47		47
3.2 Nb	52	54	50	44
	50	54	47	49
2% La ₂ O ₃	48	49	57	51
5% La ₂ O ₃	49	51	50	50
7% La ₂ O ₃	58	57		57

4.8 RELACIÓN DE DUREZA CONTRA FRACCIÓN DE ÁREA DE CARBUROS (FAC).

Tabla 4.28. FAC y dureza de recubrimientos duros con adición de Nb.

Recubrimiento duro	FAC Cr(C), %	FAC NbC, %	Dureza, HRC
Base	22.34	0.80	43-49
1.5Nb	22.88	1.78	46-49
3.2Nb	26.70	3.11	49-54

La tabla anterior, muestra que, a mayor refinamiento de la estructura obtenida con la adición de Nb, ocurrió también el incremento del porcentaje de fracción de área de carburos de cromo, lo que, a su vez incrementó la dureza de la aleación de los recubrimientos duros. Mayor contenido de niobio, mayor dureza de recubrimiento. Figura 4.61.

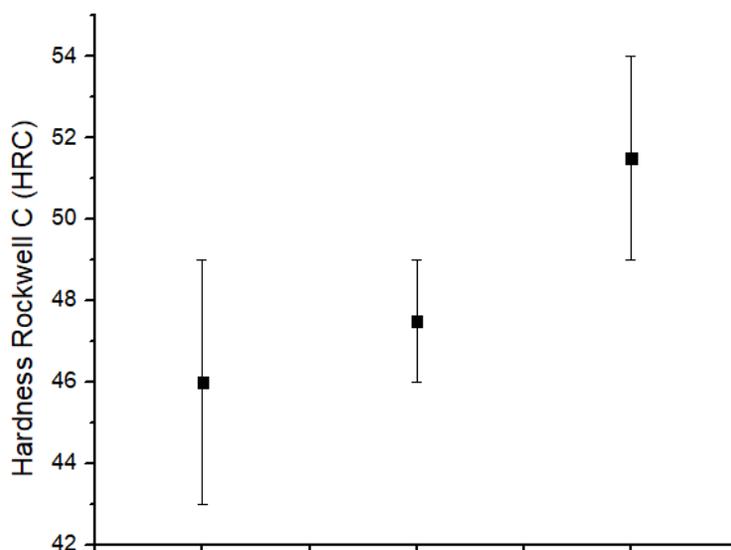


Figura 4.61 Dureza de los recubrimientos duros base y con adición de niobio.

De los resultados y discusión, puede concluirse que la adición de 3.2 % de niobio es efectiva para producir refinamiento de grano e incrementar la dureza de las aleaciones para recubrimientos duros base Fe-Cr-C. Los recubrimientos duros obtenidos con adición

de niobio por medio de ferroaleaciones presentaron una dureza en el rango de 46-54 HRC tabla 4.27. Para tener una referencia con la dureza de electrodos comerciales, se hizo una prueba con los electrodos Conomang y Durmatic H-10, aplicándolos en el mismo sustrato y con los parámetros eléctricos que señala el fabricante. Para estos recubrimientos se obtuvo una dureza en el rango de 38-48 HRC.

Es preciso mencionar que esta prueba con electrodos comerciales no es parte sustancial de este trabajo y solo se probó como referencia a considerar en los resultados de esta investigación.

Tabla 4.29. FAC y dureza de recubrimientos duros con adición de La_2O_3 .

La_2O_3 (% peso añadido)	FAC, %	Dureza, HRC
2	30.64	47-52
5	34.82	47-53
7	38.88	57-58

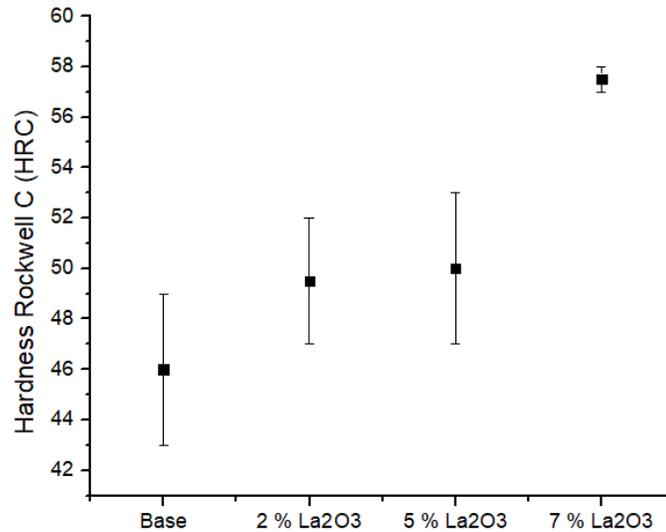


Figura 4.62 Dureza de recubrimientos duros base y con adición de óxido de lantano.

El cambio en la dureza está directamente influenciado por el refinamiento de la estructura de grano. Figuras con micrografías de SEM muestras observadas a 500X. Adicionalmente, la mayor fracción de área de carburos, tablas FAC para Nb y óxido lantano, también contribuye en incrementar la dureza de los recubrimientos duros.

Las observaciones de incremento en la dureza con adición de tierras raras son similares a los resultados reportados en literatura previa [32-35]. En el cual, se ha establecido que, con la adición de tierras raras, el refinamiento de tamaño de grano de la austenita primaria de los recubrimientos duros puede mejorarse, consecuentemente la dureza también puede mejorarse.

De los resultados y discusión, puede concluirse que la adición de hasta 7% de óxido de lantano es efectiva para producir refinamiento de grano e incrementar la dureza de las aleaciones para recubrimientos duros base Fe-Cr-C.

En un estudio realizado por Singla et al, la dureza de los recubrimientos duros Fe-Cr-C obtenidos a partir de ferroaleaciones, con adición de óxido de cerio, alcanzaron valores de dureza entre 42 y 58 HRC, semejantes a los obtenidos aquí con adición de óxido de lantano [13].

4.9 MICRODUREZA.

4.9.1 Microdureza recubrimientos duros Fe-Cr-C con Nb.

De los recubrimientos duros experimentales se determinó la microdureza de las fases presentes. La microdureza de los carburos de niobio no se determinó debido a su tamaño pequeño. La figura siguiente muestra la zona de mediciones.

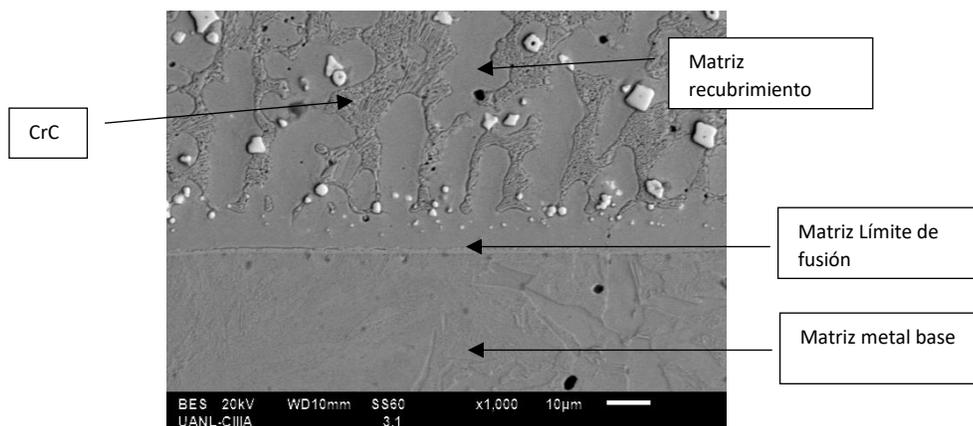


Figura 4.63 Fases a las que se les hizo medición de microdureza HV.

Los resultados se presentan en la tabla siguiente. Las mediciones se hicieron en dureza Vickers y se convirtieron en dureza Rockwell C y Rockwell B.

La dureza de la matriz metal base, acero 1018., se presenta en HRB.

Tabla 4.30. Tabla Dureza de fases en recubrimientos duros.

Recubrimiento duro	Dureza de matriz, HRC	Dureza de Cr(C) HRC	Dureza de matriz en límite de fusión, HRC	Dureza de matriz en metal base, HRB
Base	41-43	42-46	26-28	78-88
1.5Nb	43-46	42-55	27-29,	75-78
3.2Nb	50-53	54-61	25-28	75-81

Las figuras siguientes muestran el comportamiento de la microdureza en las fases dependiendo del recubrimiento.

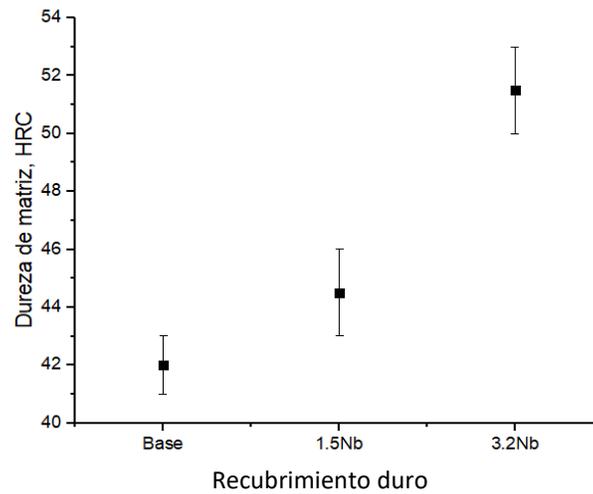


Figura 4.64 Microdureza de la matriz en el recubrimiento base y los recubrimientos con adición de niobio.

Los resultados muestran que el recubrimiento duro con mayor adición de niobio presentó una matriz con mayor dureza (50-53 HRC). Mayor adición de niobio en el recubrimiento favoreció el incremento en la dureza en la matriz. El incremento en la dureza de la matriz se atribuye al endurecimiento por solución sólida con la adición de niobio.

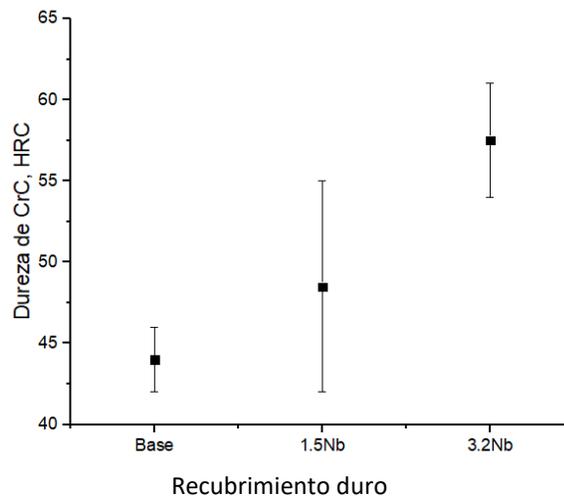


Figura 4.65 Microdureza de carburos de cromo en el recubrimiento base y los recubrimientos con adición de niobio.

Los resultados muestran que el recubrimiento duro con mayor adición de niobio presentó carburos de cromo con mayor dureza (54 a 61 HRC). Mayor adición de niobio en el recubrimiento favoreció el incremento en la dureza de los carburos de cromo. Este se puede atribuir a la presencia de una matriz endurecida por solución de niobio, lo que a su vez contribuye al incremento en la dureza de los carburos de cromo que están depositados en esa matriz endurecida.

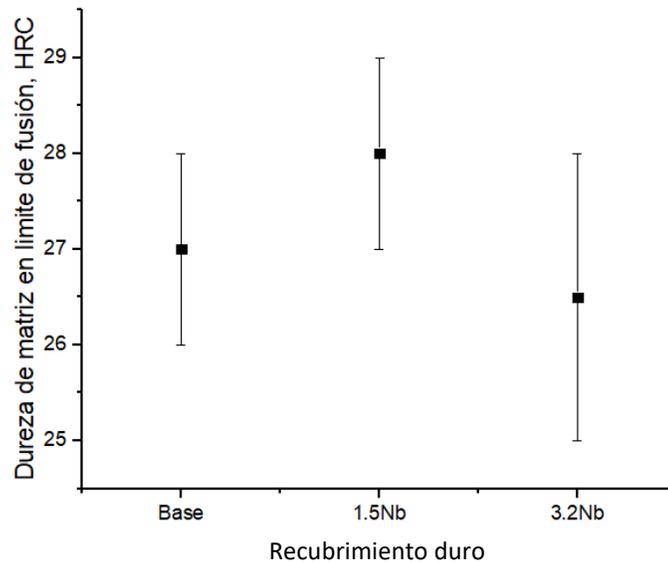


Figura 4.66 Microdureza de la matriz en el límite de fusión del recubrimiento base y los recubrimientos con adición de niobio.

Así mismo se determinó la microdureza de la matriz en el límite de fusión, Figura 4.63, los resultados muestran que en general, esta dureza se mantuvo constante en un promedio de 27 a 28 HRC. Aun cuando el recubrimiento duro con 3.2 % Nb presentó mayor variación.

Para tener un panorama completo de la dureza de las zonas que conforman el recubrimiento duro, se analizó la microdureza de la matriz en el acero base, llamado metal base.

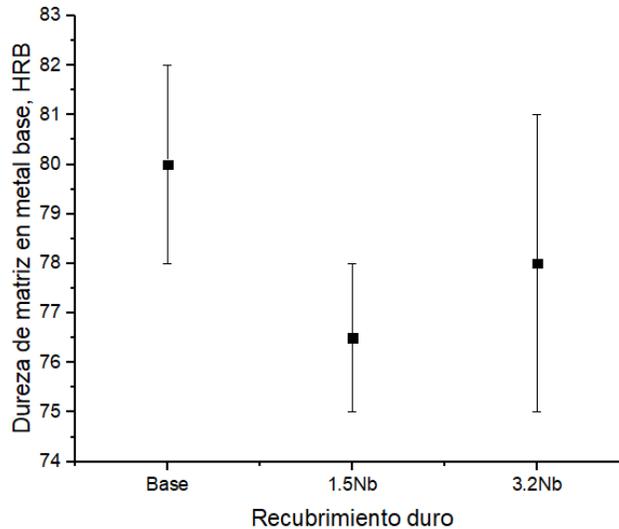


Figura 4.67 Microdureza de la matriz en el metal base del recubrimiento base y los recubrimientos con adición de niobio.

En general, la dureza de la matriz en el metal base fue entre 78 y 82 HRB. La mayor dureza es de un punto cercano al límite de fusión.

Resultados sobresalientes:

En general, se puede mencionar que los carburos de cromo y la matriz del recubrimiento duro base presentan microdurezas elevadas, 42-46 HRC, y 41-43 HRC, respectivamente. Esto demuestra que es posible la elaboración de recubrimientos duros Fe-Cr-C a partir de ferroaleaciones.

Mayor adición de niobio en los recubrimientos favorece el incremento en la dureza de la matriz por el mecanismo de endurecimiento por solución sólida y consecuentemente en la dureza de los carburos de cromo depositados en ella.

La dureza de la matriz en el límite de fusión prácticamente permanece constante con un valor promedio de 27 HRC, en esta zona se presenta una dilución del recubrimiento duro y el metal base, de ahí el valor de la dureza. Por otra parte, la dureza de la matriz, del metal base, tiene un valor de 78 HRB.

4.9.2 Microdureza recubrimientos duros Fe-Cr-C con La₂O₃.

De los recubrimientos duros experimentales con adición de óxido de lantano se determinó también la microdureza de las fases presentes.

Los resultados se presentan en la tabla siguiente. Las mediciones se hicieron en dureza Vickers y se convirtieron en dureza Rockwell C y Rockwell B.

La dureza de la matriz metal base, acero 1018, se presenta en HRB.

Tabla 4.31. Dureza de fases en recubrimientos duros.

Recubrimiento duro	Dureza de matriz, HRC	Dureza de Cr(C), HRC	Dureza de matriz en límite de fusión, HRC	Dureza de matriz en metal base, HRB
2% La ₂ O ₃	43-47	45-49	24-25	78-85
5% La ₂ O ₃	47-51	46-50	27-30	69-75
7% La ₂ O ₃	45-53	59-62	29-30	71-78

Las figuras siguientes muestran el comportamiento de la microdureza en las fases dependiendo del recubrimiento.

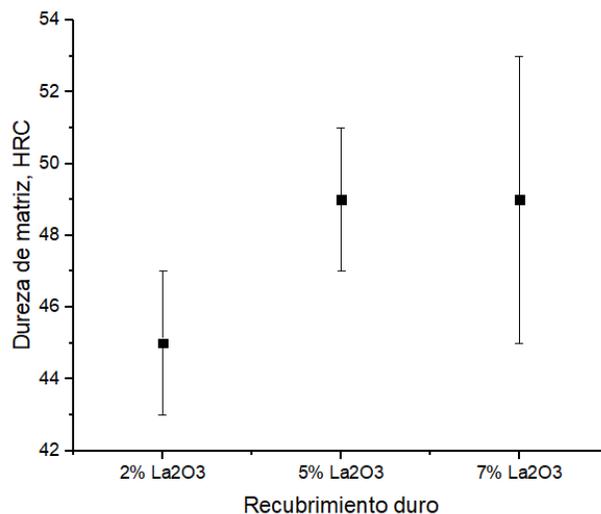


Figura 4.68 Microdureza de la matriz en los recubrimientos con adición de óxido de lantano.

Los resultados muestran que el recubrimiento duro con mayor adición de óxido de lantano presentó una matriz con mayor dureza (45-53 HRC). Mayor adición de óxido de lantano en el recubrimiento favoreció el incremento en la dureza en la matriz. El incremento en la dureza de la matriz se atribuye a un posible endurecimiento por solución sólida.

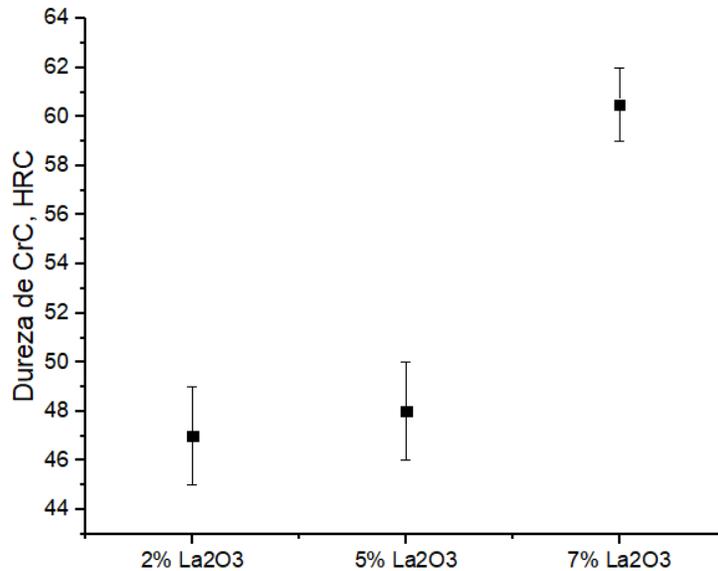


Figura 4.69 Microdureza de carburos de cromo en los recubrimientos con adición de óxido de lantano.

Los resultados muestran que el recubrimiento duro con mayor adición de óxido de lantano presentó carburos de cromo con mayor dureza (59 a 62 HRC). Mayor adición de óxido de lantano en el recubrimiento favoreció el incremento en la dureza de los carburos de cromo. Este se puede atribuir a la presencia de una matriz endurecida por solución sólida y a la modificación de la morfología de los carburos de cromo con la adición de óxido de lantano.

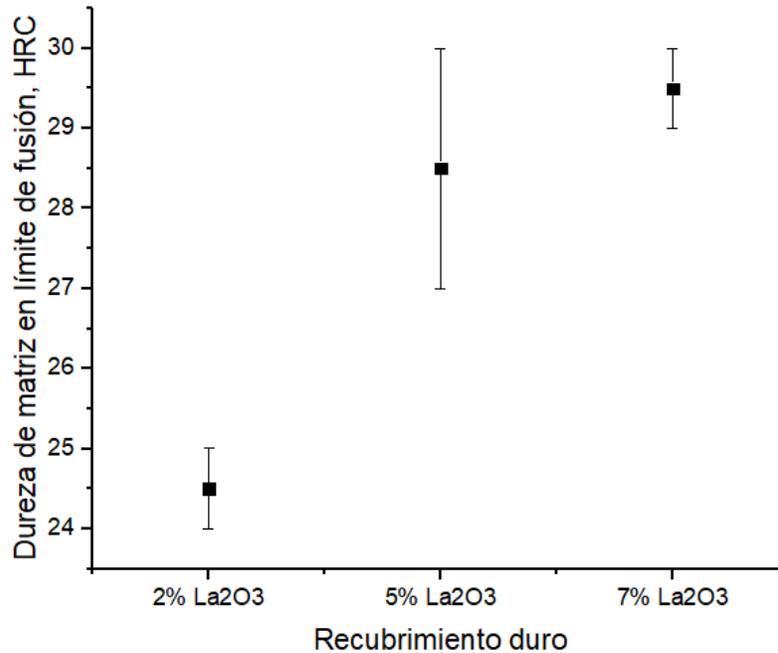


Figura 4.70 Microdureza de la matriz en el límite de fusión de los recubrimientos con adición de óxido de lantano.

Así mismo se determinó la microdureza de la matriz en el límite de fusión, Figura 4.70, los resultados muestran que la adición de óxido de lantano favoreció el incremento en la microdureza de la matriz en esta zona, alcanzando un valor máximo de 29-30 HRC para la adición de 7% La₂O₃. Lo anterior atribuible a la dilución en esta zona.

Para tener un panorama completo de la dureza de las zonas que conforman el recubrimiento duro, se analizó la microdureza de la matriz en el acero base, llamado metal base.

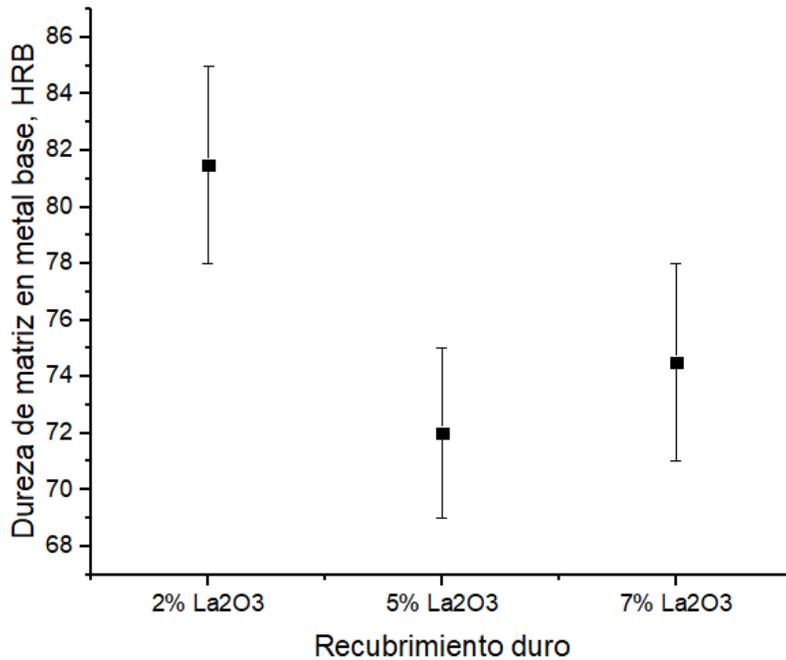


Figura 4.71 Microdureza de la matriz en el metal base de los recubrimientos con adición de óxido de lantano.

En general, la dureza de la matriz en el metal base fue entre 69 y 85 HRB. La de menor dureza es de una zona más alejada al límite de fusión.

Resultados sobresalientes:

En general, se puede mencionar que los carburos de cromo y la matriz del recubrimiento duro con adición de 7% La₂O₃ presentan microdurezas elevadas 59-62 HRC y 45-53HRC, respectivamente, muy superiores a las alcanzadas por las mismas fases con adición de niobio (42-46 HRC, y 41-43 HRC). Esto demuestra el efecto favorable de la adición de este óxido en el incremento en la microdureza de las fases, lo que resulta conveniente en la manufactura de recubrimientos duros Fe-Cr-C a partir de ferroaleaciones.

Mayor adición de óxido de lantano en los recubrimientos favorece el incremento en la dureza de la matriz por el mecanismo de endurecimiento por solución sólida y consecuentemente en la dureza de los carburos de cromo depositados en ella. Así mismo el efecto sobre la modificación de la morfología de los carburos de cromo parece favorecer su dureza.

La dureza de la matriz en el límite de fusión se incrementó con la adición de óxido de lantano, seguramente debido a la dilución con el metal base.

Por otra parte, la dureza de la matriz en el metal base, fue entre 69 y 85 HRB.

4.10 DESGASTE SECO DESLIZANTE DE RECUBRIMIENTOS DUROS EXPERIMENTALES.

4.10.1 Desgaste en recubrimientos duros, base y Nb.

Los resultados de la prueba de desgaste del recubrimiento base y de recubrimientos duros con dos contenidos de niobio (1.5% y 3.2% en peso) en la prueba pin on disc, con una carga de 7 kilogramos se muestra en la figura 4.72.

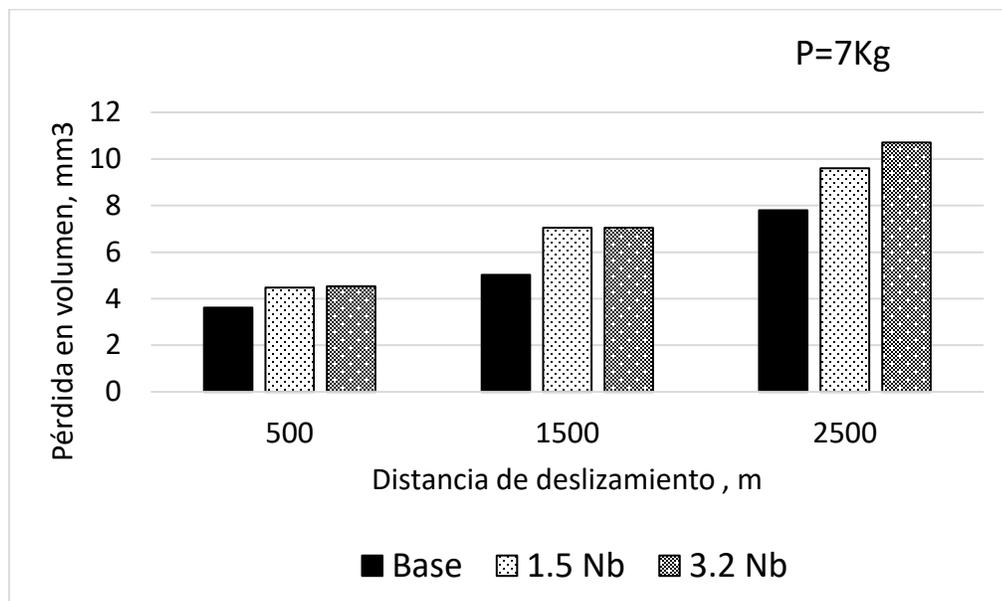


Figura 4.72 Desgaste de recubrimientos duros, expresado en pérdida en volumen, en función de la distancia de deslizamiento, para una carga aplicada de 7kg.

Se muestra la pérdida de material expresada en volumen (mm^3) en función de la distancia deslizada, en un rango de 500, 1500, 2500 metros. Se observa que en cada una de las distancias de deslizamiento el que tuvo menor desgaste fue la aleación base, mientras las que tienen contenido de niobio se mantienen por encima en pérdida de volumen respecto al recubrimiento base, en los 2500 metros de deslizamiento se observa como el recubrimiento con alto Nb es el que obtuvo mayor pérdida en volumen.

En la figura 4.73, se observó el desgaste de los recubrimientos base y con adición de niobio, como en el caso anterior pero con una carga de 10 kilogramos, en este caso el recubrimiento base sigue siendo el que tiene menor pérdida en volumen respecto a los que de contenido de niobio, la pérdida en volumen en esta ocasión para el recubrimiento base fue menor que con la carga de 7 kilogramos, esto se lo atribuimos al efecto de endurecimiento por deformación y en el caso de alto contenido de niobio observamos que a una distancia de deslizamiento de 2500 metros se incrementa la pérdida en volumen, esto se lo atribuimos a la eliminación del carburo que actúa como un tercer cuerpo y da lugar a marcas de abrasión profundas en la superficie Figura 4.78. La microestructura juega un papel clave en determinar el rendimiento del desgaste de las aleaciones [13].

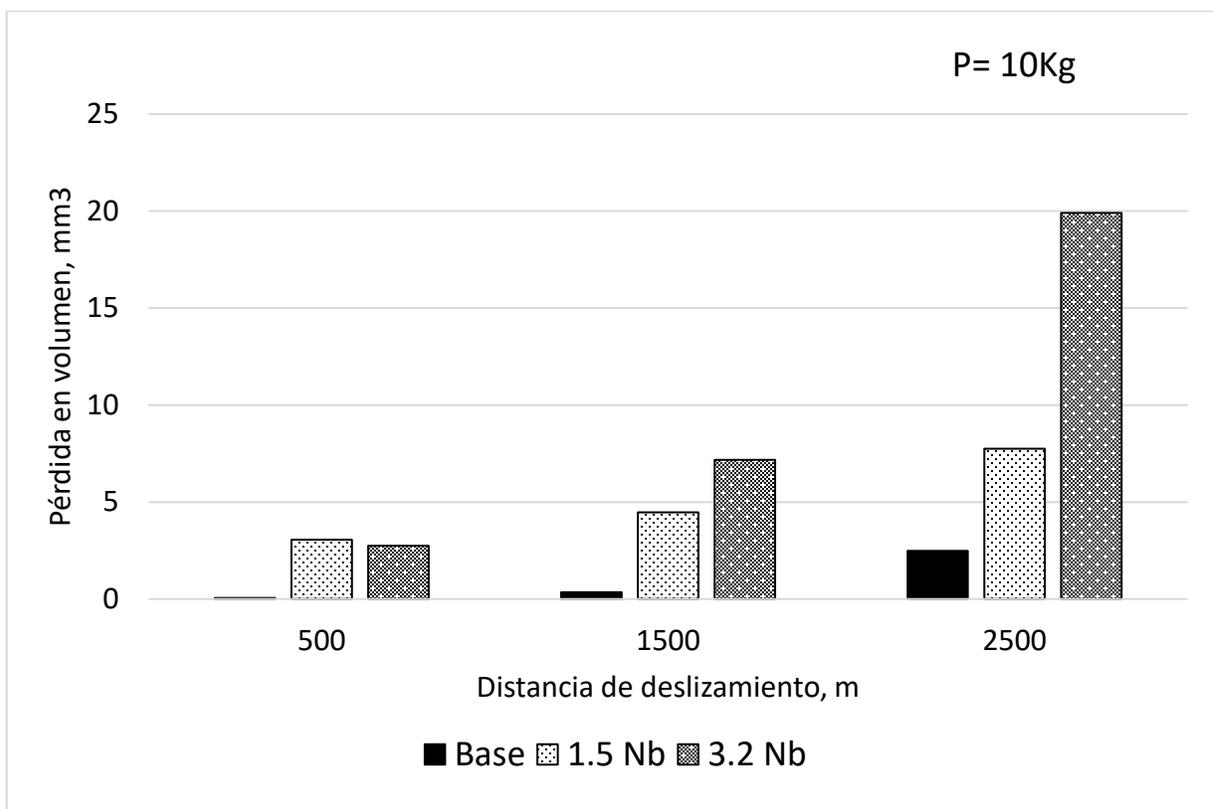


Figura 4.73 Desgaste de recubrimientos duros, expresado en pérdida en volumen, en función de la distancia de deslizamiento, para una carga aplicada de 10 kg.

En la siguiente figura 4.74, se observó la velocidad de desgaste en g/km de los recubrimientos respecto a la carga de 7 y 10 kilogramos, en los recubrimientos base y con 1.5 % de niobio la velocidad de desgaste disminuyó a mayor carga esto debido al

endurecimiento por deformación plástica, mientras que el recubrimiento alto niobio aumento considerablemente su velocidad de desgaste con una carga de 10 kilogramos, debido al tamaño de grano de los carburos de niobio, figura 4.76. Los cuales al desprenderse actúan como desgaste abrasivo dejando marcas de surcos de arado profundas, Figura 4.78.

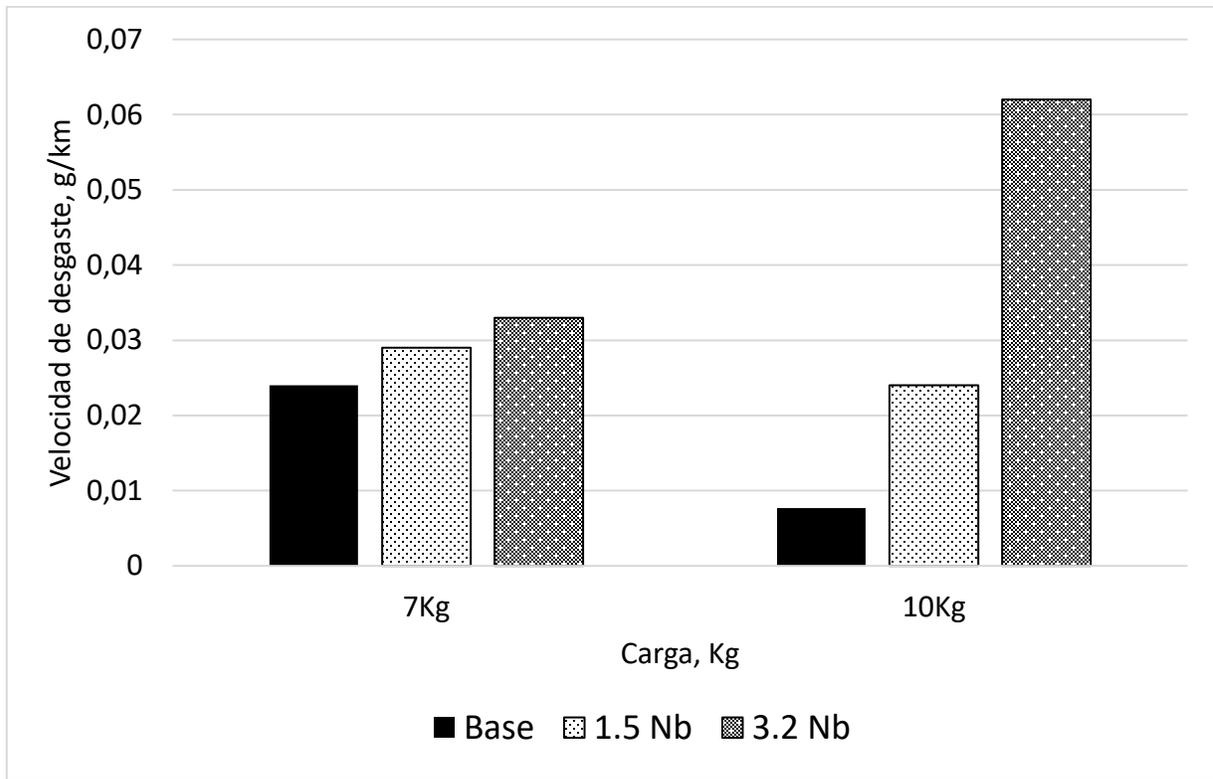


Figura 4.74 Velocidad de desgaste de los recubrimientos duros, en función de la carga aplicada.

Las siguientes micrografías son una ampliación de imagen en SEM a 2000X del recubrimiento base, Figura 4.75, y el recubrimiento con alto niobio, Figura 4.76, en el cual se observaron partículas blancas de mayor tamaño que son los carburos de niobio los cuales son más propensos a desprenderse de la matriz, los cuales actúan como un tercer cuerpo en el desgaste y da lugar a marcas de abrasión profundas en la superficie, como ya se mencionó anteriormente, Figura 4.78.

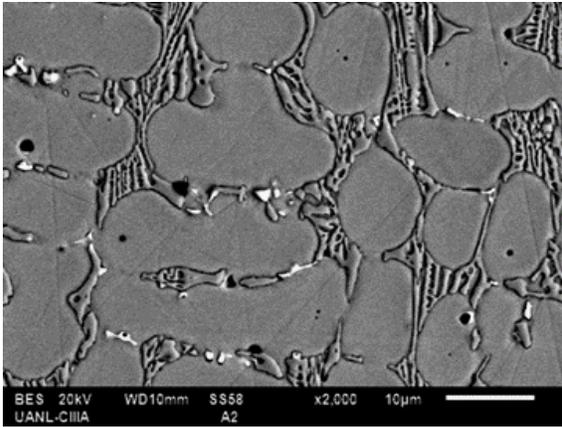


Figura 4.75 Imagen SEM recubrimiento base.

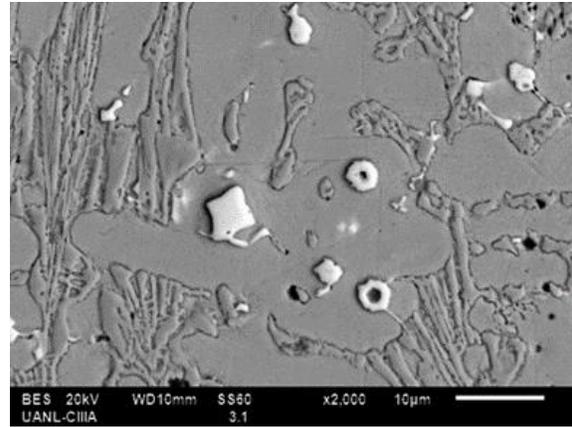


Figura 4.76 Imagen SEM recubrimiento alto niobio.

En el recubrimiento con alto Nb Figura 4.78 se nota la diferencia en la profundidad del surco de en el desgaste abrasivo a comparación al recubrimiento base.

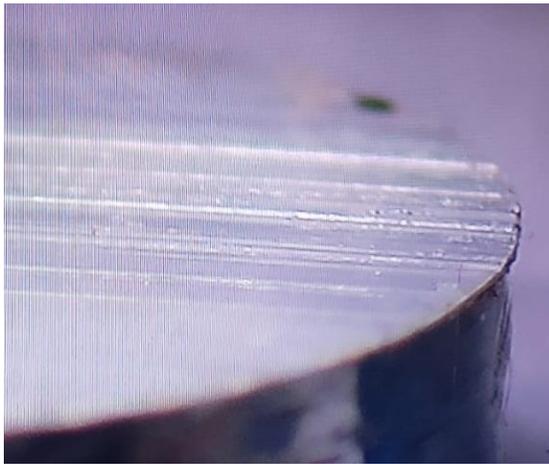


Figura 4.77 Perfil de desgaste de recubrimiento base.



Figura 4.78 Perfil de desgaste de recubrimiento 3.4% Nb.

La dureza solo es un indicador aproximado de la predicción de desgaste y la microestructura de los recubrimientos duros es más importante en la resistencia al desgaste en este caso en particular, el tamaño de carburo de Nb ocasionó un desgaste abrasivo con surcos de arado de gran profundidad lo cual originó aumento en la velocidad de pérdida de material.

La fracción de área de carburo (FAC) va relacionada con la dureza, pero no su resistencia al desgaste seco deslizante, el desgaste que se presenta está más relacionado con su microestructura, relación matriz- tamaño y morfología de partículas de carburos, que solo con el refinamiento de grano.

4.10.2 Desgaste en recubrimientos duros, Nb y adición de La_2O_3

Los resultados de la prueba de desgaste del recubrimiento base con adición de Nb y adición de dos contenidos de óxido de lantano (2% y 7%) se observan en la Figura 4.79.

Al igual que en caso del recubrimiento base en comparación con el niobio tenemos la relación de los recubrimientos base con Nb y diferentes adiciones de lantano (2% y 7%), se observó que los recubrimientos con adición de La_2O_3 a una carga de 7 kilogramos van disminuyendo su pérdida en volumen conforme recorren mayor distancia de deslizamiento en comparación al recubrimiento sin La_2O_3 , la mejora en la resistencia al desgaste se atribuye a la alta dureza causada por el aumento la fracción de área de carburo (FAC), que resiste la deformación plástica y la delaminación. Los resultados coinciden con la documentación de Shule et al. [36] y Dogan et al. [37].

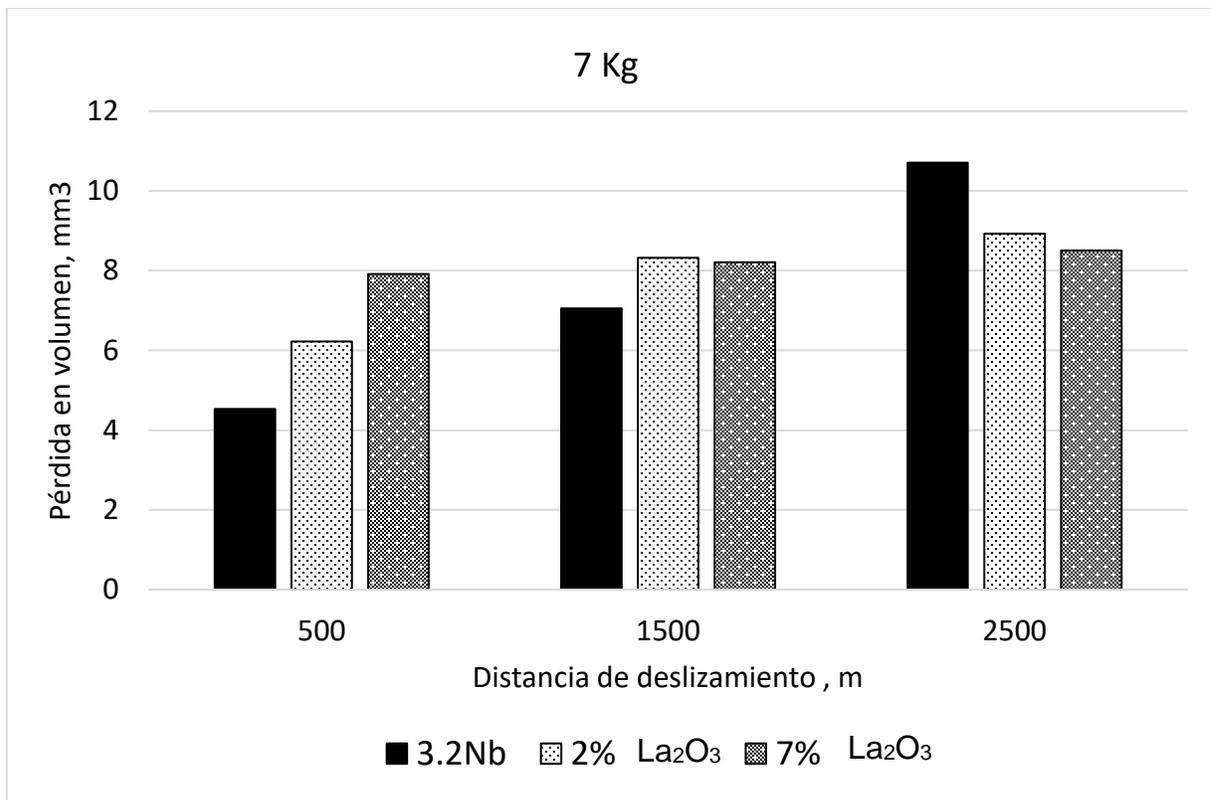


Figura 4.79 Desgaste seco deslizante, expresando en pérdida de volumen, en función de la distancia de deslizamiento para una carga aplicada de 7 kg.

En la siguiente figura se muestra el comportamiento de los recubrimientos con una carga de 10 kilogramos, en este caso se observó que el recubrimiento que presentó mayor pérdida de volumen a mayor deslizamiento fue el recubrimiento de bajo contenido (2%) de La₂O₃, esto fue provocado por un desgaste abrasivo de mayor profundidad que en los otros recubrimientos el cual se debe al desprendimiento de carburos a mayores cargas y estos a su vez actúan como un tercer cuerpo provocando mayor desgaste en la superficie del recubrimiento.

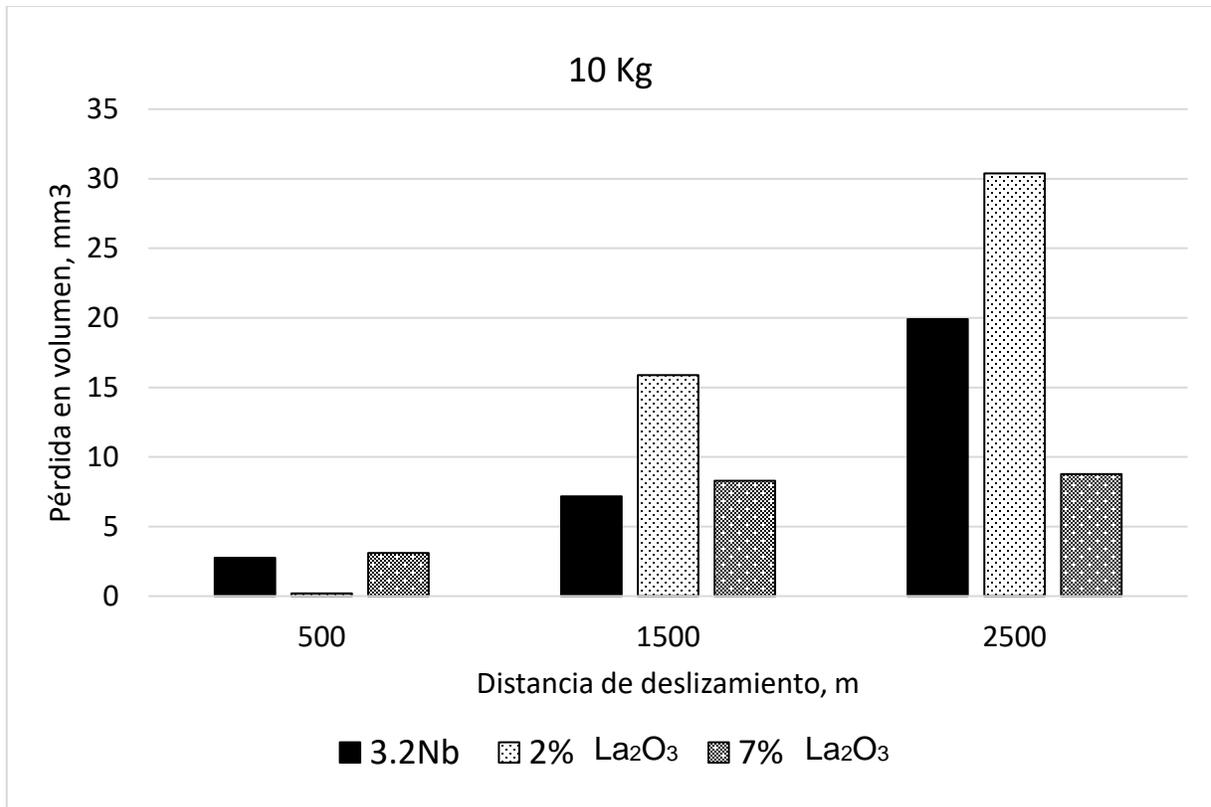


Figura 4.80 Desgaste seco deslizante, expresando en pérdida de volumen, en función de la distancia de deslizamiento para una carga aplicada de 10 kg.

El recubrimiento 2% La₂O₃ al tener mayor FAC=30.64% y menor dureza (45-49 HRC) en la zona de los carburos que el recubrimiento 3.4 (FAC=26.70% y dureza = 54-60 HRC) se deduce que no hay una buena unión entre los carburos y la matriz en el recubrimiento 2% de La₂O₃, por lo tanto, de lo anterior se puede concluir que después del micro arado, micro corte y posteriormente remoción de partículas que quedaron sin soporte son los mecanismos predominantes en el desgaste.

La figura 4.81 muestra la velocidad de desgaste (mg/m) de los recubrimientos respecto a cargas de 7 y 10 kilogramos en la cual podemos observar que la velocidad de desgaste en los recubrimientos con adición de La_2O_3 es menor gracias al FAC, mientras que a una carga de 10 kilogramos se observó que el recubrimiento con (7%) La_2O_3 mejoró la resistencia al desgaste, gracias al refinamiento en el tamaño de partículas de carburos de niobio los cuales se pueden ver en la fig.4.82 a, b y c.

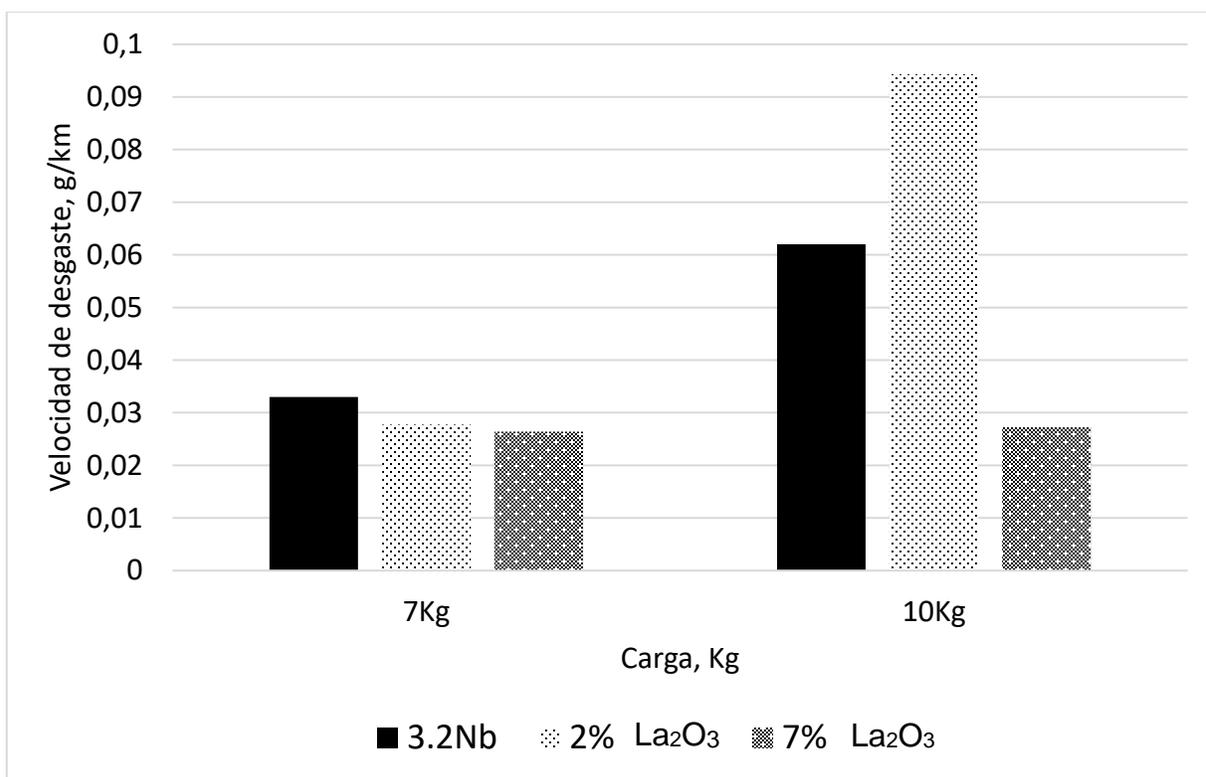


Figura 4.81 Velocidad de desgaste en función de la carga aplicada.

En las siguientes imágenes de SEM a 2000 X se puede observar el refinamiento de partículas más notorio en los carburos de Nb (granos blancos), también se ve el refinamiento en los carburos de cromo y en la matriz.

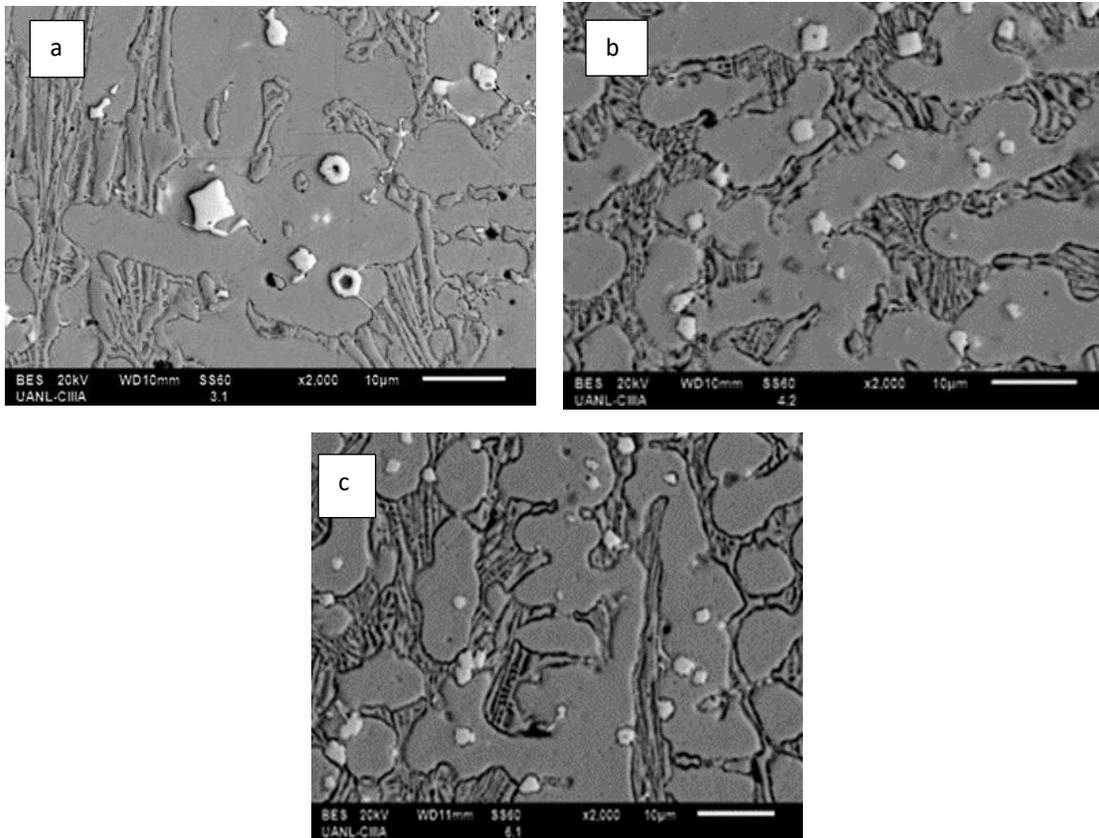


Figura 4.82 Imagen SEM de recubrimientos. A) 3.2Nb, B) 2%La₂O₃, C) 7%La₂O₃.

Se puede observar que el recubrimiento 2% de La₂O₃ a pesar de tener menor tamaño de partícula tuvo mayor desgaste que el recubrimiento 3.2Nb, y como tiene menor dureza en los carburos a pesar de tener mayor FAC esto solo quiere decir: se asume que no hay una buena cohesión o unión entre los carburos y la matriz por eso hubo mayor desprendimiento de material al momento del desgaste.

De los resultados obtenidos, se puede concluir de los resultados obtenidos que el refinamiento de grano en la estructura en el metal es clave en la resistencia al desgaste cuya función es resistir la deformación plástica, así como es importante la cohesión entre carburos y la matriz. Por otra parte, la fracción de área de carburo va más relacionada con la dureza, pero esta es solo un indicador de predicción de resistencia al desgaste.

Se puede observar, el que con la adición de La_2O_3 hay un refinamiento de los carburos de Nb, así como un cambio en su morfología, de una forma cuadrada comienzan a redondearse a medida que su tamaño disminuye y también se puede observar que hay una mejor distribución carburos de Nb con 7% de La_2O_3 .

La adicción de La_2O_3 muestra un refinamiento en la estructura en general del recubrimiento, así como también un cambio en la forma de la estructura de los carburos de Cr los cuales de una forma alargada comienzan a tomar forma redonda y se nota también un refinamiento en la matriz del recubrimiento.

4.10.3 Comparación de desgaste de recubrimientos duros, base y con adiciones de Nb y La₂O₃.

En la siguiente figura 4.83 se muestra la gráfica de los resultados de la prueba de desgaste de los recubrimientos donde se observó el comportamiento de su pérdida de volumen (mm³) a 2500 metros de deslizamiento, el recubrimiento base y alto (7%) La₂O₂ son los que presentaron menor pérdida de volumen.

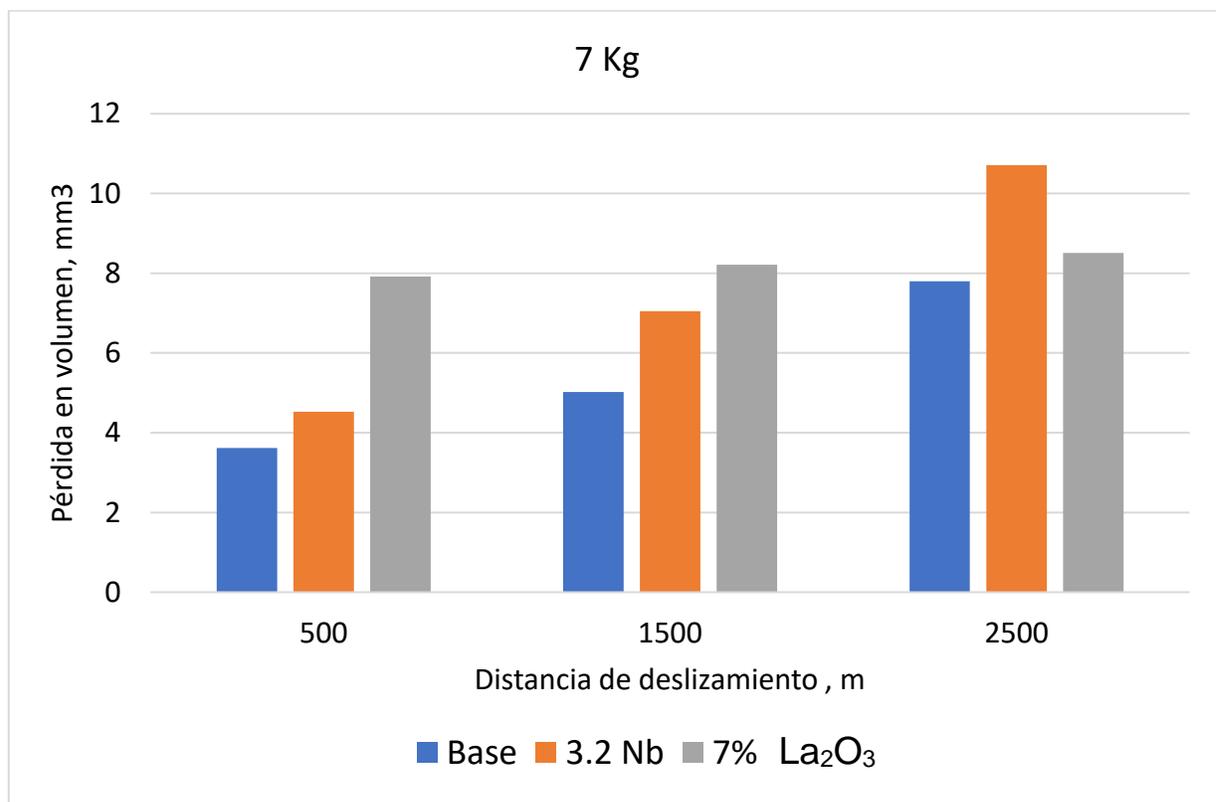


Figura 4.83 Desgaste seco deslizante, expresando en pérdida de volumen, en función de la distancia de deslizamiento para una carga aplicada de 7 kg.

En el siguiente gráfico se observó que con una carga de 10 kilogramos el recubrimiento base es el que menor pérdida de volumen tiene a lo largo de la distancia de deslizamiento, en el caso del recubrimiento 3.2Nb su tamaño de carburos de Nb fue lo que le ocasionó que el desprendimiento de los mismos, aumentaran la pérdida de volumen con la

abrasión profunda de micro arado, por otra parte el recubrimiento 7%La₂O₃ obtuvo mayor FAC, más dureza y mayor refinamiento, aun así no es tan bueno como el recubrimiento base a una carga de 10 kilogramos. Debido a que el recubrimiento base posee una estructura con buena unión de carburos de cromo y matriz.

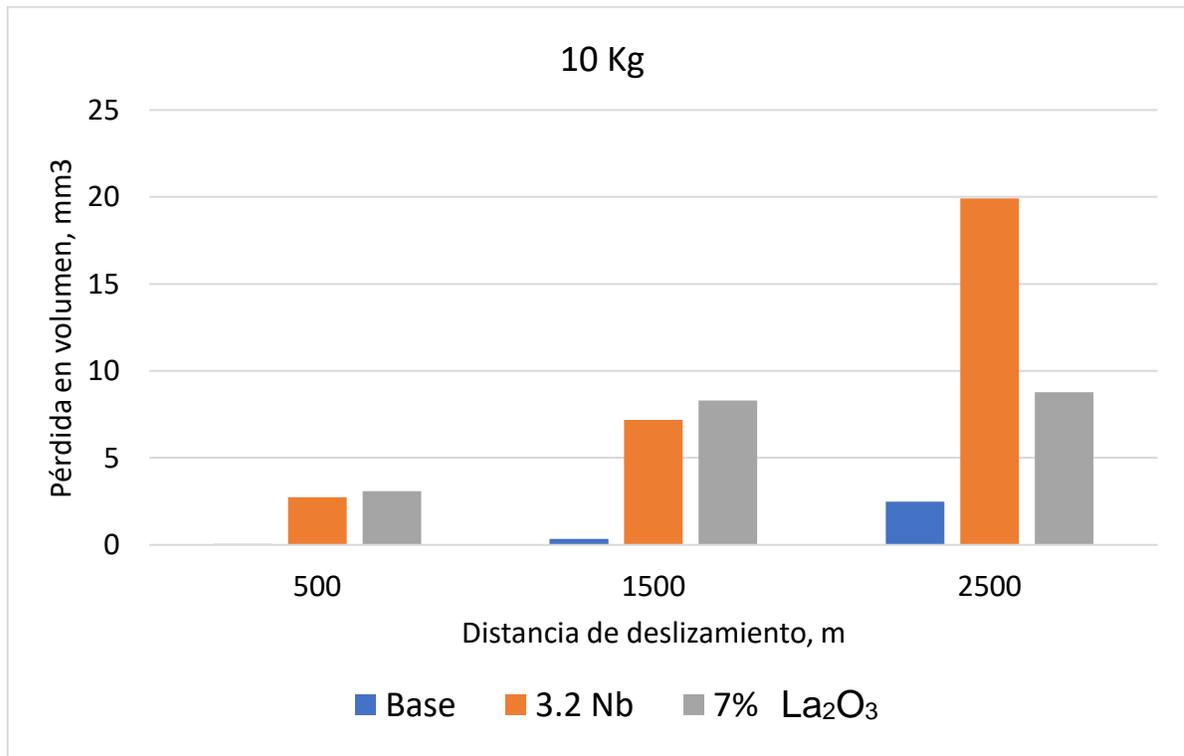


Figura 4.84 Desgaste seco deslizante, expresando en pérdida de volumen, en función de la distancia de deslizamiento para una carga aplicada de 10 kg.

En la siguiente grafica tenemos la velocidad de desgaste (g/km) respecto a una carga aplicada de 7 kilogramos y 10 kilogramos, con la carga de 7 kilogramos y 10 kilogramos se puede ver que el refinamiento en la estructura (Figura 4.86 a, b y c) del recubrimiento 7% de La₂O₃ bajó su velocidad de desgaste respecto al recubrimiento 3.2Nb que obtuvo mayor velocidad de desgaste por su formación de gran tamaño de carburos de Nb (Figura 4.86 b) los cuales al desprenderse de la matriz del recubrimiento van dejando huellas de micro arado de mayor profundidad Figura 4.87b. y las huellas de micro arado del recubrimiento 7% de La₂O₃ son menores, Figura 4.87c, con una superficie parecida a la del recubrimiento base, Figura 4.87a.

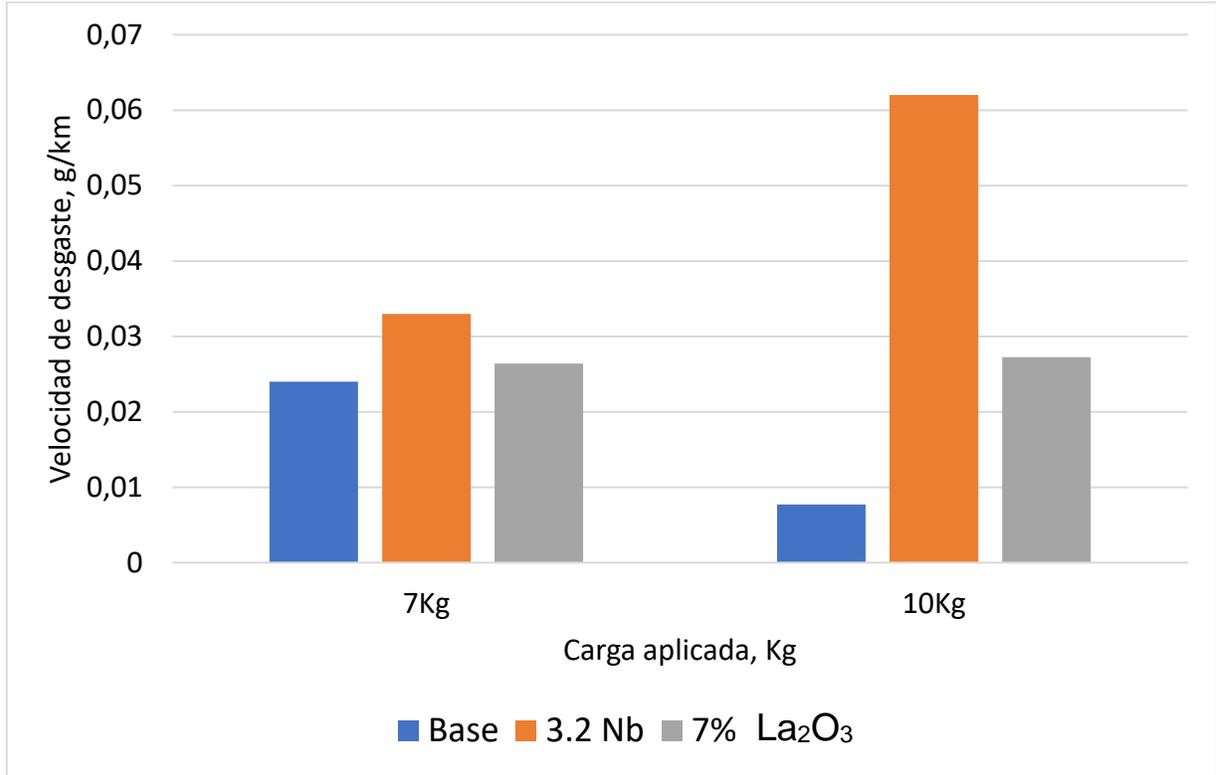


Figura 4.85 Velocidad de desgaste en función de la carga aplicada.

A continuación, se muestran imágenes de los recubrimientos base, 3.2Nb y 7%La₂O₃ respectivamente en los cuales podemos notar un cambio en su estructura como es el refinamiento, así como un aumento en fracción de área de carburos.

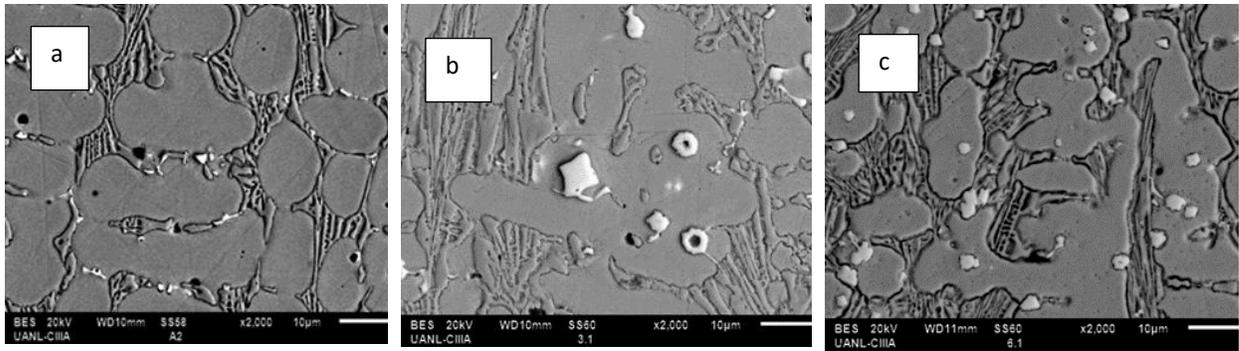


Figura 4.86 a) Imagen de SEM a 2000 X del recubrimiento A1; b) Imagen de SEM a 2000 X del recubrimiento 3.4; c) Imagen de SEM a 2000 X del recubrimiento 6.4.

Se muestra en seguida las imágenes de las marcas de micro arado por el desgaste abrasivo en las cuales se puede ver fácilmente donde hubo mayor profundidad y desgaste en la superficie del recubrimiento.



Figura 4.87 a) Huella de micro arado recubrimiento Base., b) Huella de micro arado recubrimiento 3.2 Nb., c) Huella de micro arado recubrimiento 7% La_2O_3 .

De los resultados se puede concluir que el tamaño de partícula de los carburos de Niobio afectó directamente en el desgaste seco deslizante ya que este actuó como un tercer elemento en el desgaste abrasivo provocando un micro surco de arado de mayor tamaño en la superficie de desgaste como fue en el caso del recubrimiento 3.2 % de Nb, así como también este mismo se vio afectado por partículas de carburo de niobio muy irregulares.

El desgaste en el recubrimiento 7% de La_2O_3 disminuyó porque el tamaño y forma de los carburos de niobio fue menor y estos poseen una forma más redondeada esta forma hace que el desgaste abrasivo sea menos severo y por lo tanto haya una menor pérdida de volumen en el desgaste.

Se recomiendan recubrimientos con alto porcentaje de lantano, del orden de 7 % para cargas menores a 7 kilogramos, para cargas mayores se recomienda el recubrimiento base, el cual con cargas mayores presenta mayor resistencia al desgaste, para cualquier distancia de deslizamiento.

CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

La técnica empleada para la elaboración de recubrimientos duros permitió la obtención de recubrimientos duros Fe-(14-17)Cr-(1-2)C. En general, los recubrimientos duros experimentados tienen una microestructura que contiene una matriz austenítica, dendrítica, con un eutéctico de carburos de cromo y austenita.

Recubrimiento base. El recubrimiento duro base presentó una microestructura dendrítica con un eutéctico (carburos de cromo y austenita). Adicionalmente, en su microestructura se observó la presencia de carburos de niobio muy pequeños, en el orden de 0.5-1.5 μ , en una fracción de área de 0.8%, proveniente seguramente, de las ferroaleaciones. La dureza alcanzada por el recubrimiento base fue en el rango de 43-49 HRC.

Recubrimientos con Nb. La adición de niobio al recubrimiento duro Fe-Cr-C produjo un refinamiento de la microestructura, reduciendo el espaciado inter-carburos, aumentando con ello la fracción de área de carburos. Se observa que, a mayor adición de niobio en forma de ferroaleación en los recubrimientos duros, aumentó la cantidad, el tamaño y la distribución de los carburos de niobio, asimismo, los resultados constatan un mayor contenido de niobio en sus carburos de niobio, revelado por el análisis de EDX.

El refinamiento de la microestructura obtenida con la adición de niobio, así como el incremento del porcentaje de fracción de área de carburos de cromo, incrementó la dureza de la aleación de los recubrimientos duros. Mayor adición de niobio en el recubrimiento favoreció el incremento en la dureza en la matriz (endurecimiento por solución sólida) y el incremento en la dureza de los carburos de cromo. La dureza alcanzada por el recubrimiento con 3.2% de niobio fue en el rango de 49-54 HRC.

Recubrimientos con óxido de lantano. Su adición produjo un refinamiento de la microestructura, reduciendo el espaciado intercarburos, aumentando la fracción de área de carburos de cromo (FAC), además de una modificación del eutéctico (carburos de cromo más austenita). Así mismo, la adición de óxido de lantano (La_2O_3) al recubrimiento duro Fe-Cr-C-Nb, resultó beneficioso para el refinamiento de los carburos de niobio y la modificación de su forma a una más redondeada. El análisis por EDX mostró que, en los recubrimientos duros con la adición de óxido de lantano, los carburos de cromo presentaron un contenido mayor de cromo.

El incremento en la dureza fue directamente influenciado por el refinamiento de la estructura de grano, así como a la mayor fracción de área de carburos, ocurrida tanto en las adiciones de niobio como de óxido de lantano.

Mayor adición de óxido de lantano en el recubrimiento duro favoreció el incremento en la dureza en la matriz, atribuible a un posible endurecimiento por solución sólida. Así mismo se produjo un incremento en la dureza de los carburos de cromo en el eutéctico. Este se puede atribuir a la presencia de una matriz endurecida por solución sólida y a la modificación de la morfología de los carburos de cromo. La dureza alcanzada por el recubrimiento con adición de 7% de La_2O_3 fue en el rango de 57-58 HRC.

Pruebas de desgaste. Los resultados de la prueba de desgaste del recubrimiento base y de dos recubrimientos con contenidos de niobio (1.5% y 3.4% en peso) a una distancia de deslizamiento de 2500 metros, con carga aplicada de 10 kgf, mostraron que el recubrimiento duro base, presentó el menor desgaste, expresado por la menor pérdida de volumen (2.49 mm^3) y menor velocidad de desgaste (0.0077 g/km).

Mientras que el recubrimiento con 3.4% en peso de niobio presentó el mayor desgaste, con un aumento considerable de su pérdida en volumen de 19.91 mm^3 y una velocidad de desgaste de 0.062 g/km para una carga de 10 kg, debido a mayor carga, mayor tamaño de carburos de niobio, en el orden de $1\text{-}4.7 \mu$ y a su morfología angulada, los cuales al desprenderse actuaron como partículas abrasivas, produciendo un desgaste abrasivo severo, dejando en la superficie de desgaste marcas de arado profundas.

Aún cuando la adición de óxido de lantano fue beneficioso y produjo un refinamiento de la microestructura, mayor fracción de área de carburos, refinamiento de partículas de carburos de niobio y mayor dureza, su desgaste fue mayor al del recubrimiento base y menor al del recubrimiento con niobio. Lo anterior, debido a que aún preserva partículas de carburo de niobio gruesas y angulares. El recubrimiento con adición de 7% de La_2O_3 presentó una pérdida de volumen de 8.78 mm^3 y una velocidad de desgaste de 0.027 g/km .

5.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda para próximos trabajos probar con parámetros de voltaje y corriente mayores para evitar la presencia de porosidad y de falta de fusión entre metal base y recubrimiento. Otros trabajos ya han utilizado mayores parámetros por ejemplo en el trabajo de E.O. Correa et al. [4]; en el cual también se obtuvieron buenos resultados. En nuestro caso utilizamos la corriente máxima que suministraba el equipo para soldar que fueron 160 amperes los cuales mejoraron la unión entre metal base y recubrimiento, que con menor corriente no se pudo lograr.

Se recomienda manejar un control específico de las cantidades niobio menores a 3.2% niobio, ya que esta cantidad tuvo un efecto negativo en la resistencia al desgaste seco deslizante. Para trabajos futuros se recomienda partir del bajo contenido de niobio como lo fue el caso del recubrimiento base (Fe-14Cr-1.8C-0.4Nb) y a partir de este contenido, añadir óxido de lantano, para analizar su influencia.

Para ampliar más esta investigación se recomienda una identificación de fases por DRX y por otro lado también la caracterización de la superficie desgastada por medio de SEM.

BIBLIOGRAFIA

- [1] J. P. Goenaga Pertuz, M. T. Mejía Ramos, D. A. Rojas Solano, K. M. Viaña Borja y E. E. Niebles Núñez, «Recubrimientos duros: alternativa de recuperación en piezas afectadas por el desgaste,» *PROSPECTIVA*, pp. 69-77, 2007.
- [2] E. A. Chandia Cruces, *Estudio del control de la dilucion en el recargue de soldadura en el proceso hardfacing*, Santiago, 2014.
- [3] Y. Zhou, Y. Yang, Y. Qi, Y. Jiang, J. Yang y X. Ren, «Influence of La₂O₃ addition on microstructure and wear resistance of Fe-Cr-C cladding formed by arc surface welding,» *J Rare Earths* 30, pp. 1069-1074, 2012.
- [4] E. Correa, N. Alcantara, L. Valeriano, N. Barbedo y R. Chaves, «The effect of microstructure on abrasive wear of a Fe-Cr-C-Nb hardfacing alloy deposited by the open arc welding process,» *Surface & Coatings Technology*, pp. 1-6, 2015.
- [5] Y. Kumar Singla, D. Dwivedi y N. Arora, «On the modeling of dry sliding adhesive wear parameters of vanadium additive iron-based alloys at elevated temperatures,» *Surface & Coatings Technology* 283, pp. 223-233, 2015.
- [6] F. Hao, D. Li, T. Dan, X. Ren, B. Liao y Q. Yang, «Effect of rare earth oxides on the morphology of carbides in hardfacing metal of high chromium cast iron,» *J Rare Earths*, nº 29, pp. 168-172, 2011.
- [7] F. Hao, B. Liao, D. Li, L. Liu, T. Dan y X. Ren, «Effects of rare earth oxide on hardfacing metal microstructure of medium carbon steel and its refinement mechanism,» *J Rare Earths*, nº 29, pp. 609-613, 2011.
- [8] J. Yang, J. Tian, F. Hao, T. Dan, X. Ren y Y. Yang, «Microstructure and wear resistance of the hypereutectic Fe-Cr-C alloy hardfacing metals with different La₂O₃ additives,» *Appl Surf Sci*, nº 289, pp. 437-444, 2014.
- [9] «Effect of Ti additive on (Cr,Fe)₇C₃ carbide in arc surfacing layer and its refined mechanism,» *Appl Surf Sci*, nº 258, pp. 6653-6659, 2012.
- [10] Y. Hou, Y. Wang, Z. Pan y L. Yu, «influence of rare earth nanoparticles and inoculants on performance and microstructure of high chromium cast iron,» *J Rare Earths*, nº 30, pp. 283-288, 2012.
- [11] J. Yang, F. Hao, D. Li, Y. Zhou, X. Ren y Y. Yang, «Effect of RE oxide on growth dynamics of primary austenite grain in hardfacing layer of medium-high carbon steel,» *J Rare Earths*, nº 30, pp. 814-819, 2012.
- [12] Y. Wang, J. Chen, J. Yang, F. Hao, T. Dan y Y. Yang, «Effect of La₂O₃ on granular bainite microstructure and wear resistance of hardfacing layer metal,» *J Rare Earths*, nº 32, pp. 83-89, 2014.
- [13] Y. Kumar Singla, N. Arora y D. Dwivedi, «Dry sliding adhesive wear characteristics of Fe-based hardfacing alloys with different CeO₂ additives – A statistical analysis,» *Tribology International* 105, pp. 229-240, 2017.
- [14] M. A. Santana Ramírez, Obtención de fundente aglomerado para el recargue, mediante SAW, utilizando mezclas pirometalúrgicas en su conformación, Santa Clara, 2017.
- [15] R. O'Brien, Manual de Soldadura, 8va ed., USA: American Welding Society, 2005.

- [16] H. B. Hernandez Cano, «Supervisión de Estructuras de Concreto y de Acero,» 28 Enero 2013. [En línea]. Available: <https://sites.google.com/site/construyetuingenio2013/5-procesos-de-soldadura-y-corte/5-1-soldadura-por-arco-de-metal-protegido-smaw>. [Último acceso: 20 Mayo 2020].
- [17] H. I. Monsalve Gil, D. A. Mena Herrera y J. E. Giraldo Barrada, «efecto del amperaje en las propiedades de recubrimientos duros resistentes a la abracion aplicados por soldadura,» *Redalyc*, pp. 151-163, 2004.
- [18] O. Kjellberg, «Centro de conocimiento ESAB,» 2012. [En línea]. Available: https://www.esab.com.ar/ar/sp/education/blog/proceso_soldadura_electrodo_revestido.cfm.
- [19] J. C. Gutierrez, L. M. Leon Sevilla, D. H. Mesa Grajales y A. toro, «EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE ABRASIVO EN RECUBRIMIENTOS DUROS PARA APLICACIONES EN LA INDUSTRIA MINERA,» *Scientia et Technica*, nº 25, pp. 149-154, 2004.
- [20] L. M. León Sevilla, J. C. Gutierrez Pineda y A. Toro, «RELACION MICROESTRUCTURA RESISTENCIA AL DESGASTE DE RECUBRIMIENTOS DUROS RICOS EN CROMO Y TUNGSTENO APLICADOS POR SOLDADURA ELECTRICA (SMAW),» *Redalyc*, pp. 165-171, 2004.
- [21] E. J. García Brito, J. De los Santos, J. L. Soto Trinidad, H. A. De los Santos Villamán y C. E. Abreu de Láncer, «Diseño de Elementos de una Maquina Pin-on-Disc,» de *innovation in Engineering, Tecnology and Edication for Competitiveness and Prosperity*, Cancún, México, 2013.
- [22] R. Fuentes y G. De la Rosa, «MEDICION DEL DESGASTE DE MATERIALES CON EL METODO PIN EN DISCO,» *Naturaleza y Tecnología*, p. 3, 2016.
- [23] D. Avila, *PRUEBA DE DESGASTE PIN ON DISC*, Sinaloa, 2020.
- [24] X. Qi, Z. Jia, Q. Yang y Y. Yang, «Effects of vanadium additive on structure property and tribological performance of high chromium cast iron hardfacing metal,» *Surface and Coatings Technology*, vol. 205, pp. 5510-5514, 2011.
- [25] S. Liu, Z. Shi, X. Xing, X. Ren, Y. Zhou y Q. Yang, «Effect on Nb additive on wear resistance and tensile properties of the hypereutectic Fe-Cr-C hardfacing alloy,» *Materials Today Communications* 24, pp. 01-08, 2020.
- [26] D. Li, Y. Yang, L. Liu, J. Zhang y Q. Yang, «Effects of RE oxide on the microstructure of harding metal of the large gear,» *Mater Sci Eng A* 509, pp. 94-97, 2009.
- [27] F. Hao, D. Li, T. Dan, X. Ren, B. Liao y Y. Yang, «Effect or rare earth oxides on the morphology of carbides in hardfacing metal of high chromium cast iron,» *J Rare Earths* 29, pp. 168-172, 2011.
- [28] J. Yang, J. Tian, F. Hao, T. Dan, X. Ren y Y. Yang, «Microstructure and wear resistance of the hypereutectic Fe-Cr-C alloy hardfacing metals with different La₂O₃ additives,» *Appl Surf Sci* 289, pp. 437-444, 2014.
- [29] Y. Hou, Y. Wang, Z. Pan y L. Yu, «Influence of rare earth nanoparticles and inoculants on performance oand microstructure of high chromium cast iron,» *J Rare Earths* 30, pp. 283-288, 2012.
- [30] Y. Wang, J. Chen, J. Yang, F. Hao, T. Dan y Y. Yang, «Effect of La₂O₃ on granular bainite microstructure and wear resistance of hardfacing layer metal,» *J Rare Earths* 32, pp. 83-89, 2014.

- [31] Y. Singla, D. Dwivedi y N. Arora, «On the modeling of dry sliding adhesive wear parameters of vanadium additive iron-based alloys at elevated temperatures,» *Surf Coat Technol*, nº 283, pp. 223-233, 2015.
- [32] X. Shule, Y. U. Shengfu, D. Yu, D. Minghui y Y. Lu, «Effect of cerium on abrasive wear behaviour of harfacing alloy,» *J. Rare Earths* 30, pp. 69-73, 2012.
- [33] J. Yang, J. Tian, F. Hao, T. Dan, X. Ren y Y. Yang, «Microstructure and wear resistance of the hypereutectic Fe-Cr-C alloy hardfacing metals with different La_2O_3 additives,» *Appl Surf Sci* 289, pp. 437-444, 2014.
- [34] X. Hou, B. Zhao, J. Yang, X. Xing, Y. Zhou y Y. Yang, «Fe-0.4 wt%Cr-6.5 wt%Cr hardfacing coating: microstructures and wear resistance with La_2O_3 additive,» *Appl Surf Sci* 317, pp. 312-318, 2014.
- [35] J. Yang, P. Zhang, Y. Zhou, X. Xing, X. Ren y Y. Yang, «Mechanical properties of the hardfacing alloys with different La_2O_3 additives and the mechanism analysis by first-principles calculations,» *Mater Sci Eng A* 591, pp. 82-89, 2014.
- [36] X. Shule, Y. Shengfu, D. Yu, D. Minghui y Y. Lu, «Effect of cerium on abrasive wear behaviour of harfacing alloy,» *J Rare Earths*, nº 30, pp. 69-73, 2012.
- [37] H. Dogan, F. Findik y O. Ahmet, «Comparative study of wear mechanism of surface treated AISI 316L stainless steel,» *Ind Lubr tribol*, nº 55, pp. 76-83, 2003.