



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

EVALUACIÓN TRIBOLÓGICA DE ALTERNATIVAS AL ACERO CROMADO POR ASPERSIÓN TÉRMICA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL MECÁNICA

VALENTINA BELÉN MORALES POBLETE

PROFESOR GUÍA:
RUBÉN FERNÁNDEZ URRUTIA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ANDREAS ROSENKRANZ
ALI AKBARIFAKHRABADI

SANTIAGO DE CHILE
2023

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL MECÁNICA
DE LA INGENIERÍA
POR: VALENTINA BELÉN MORALES POBLETE
FECHA: 2023
PROF. GUÍA: RUBÉN FERNÁNDEZ URRUTIA

EVALUACIÓN TRIBOLÓGICA DE ALTERNATIVAS AL ACERO CROMADO POR ASPERSIÓN TÉRMICA

El proceso de cromado por galvanoplastia implica depositar una capa de cromo en una superficie mediante electrólisis, mejorando su dureza y resistencia a la abrasión. Sin embargo, los riesgos para la salud asociados con el cromado de acero han llevado a la prohibición de esta práctica en diversos lugares. Por ende, se están explorando alternativas que ofrezcan propiedades comparables al acero cromado mediante nuevas técnicas de recubrimiento, siendo las técnicas de aspersión térmica con Cermets como materiales de recubrimiento las opciones más prometedoras.

En esta memoria se realiza una evaluación tribológica y comparación del desgaste por abrasión de acero cromado con respecto a recubrimientos NiCr- Cr_3C_2 depositados por Cold Spray (CS) y WC-Co-Cr mediante Proyección Térmica de Alta Velocidad (HVOF). Se evalúa la resistencia a la abrasión, los coeficientes de fricción y las tasas de desgaste, caracterizando la microestructura a través de Difracción de Rayos-X (XRD) y estudiando el comportamiento a la abrasión mediante Microscopía Electrónica de Barrido y Espectroscopia de Rayos X (SEM/EDS), además de realizar ensayos tribológicos en un tribómetro.

Se obtuvo que los recubrimientos por HVOF presentan una mejor cohesión entre partículas, al proyectarse semifundidos, mientras que las partículas en estado sólido proyectadas por CS pueden generar porosidades o grietas. A pesar de esto, se observó que la proyección por CS tuvo buena adhesión con el recubrimiento de Cr, convirtiéndola en la mejor opción para restaurar acero cromado dañado. Además, se obtuvo una dureza similar entre los recubrimientos de NiCr- Cr_3C_2 y Cr, siendo el WC-Co-Cr más duro que ambos.

En relación a las pruebas tribológicas, estas indicaron abrasión por tercer cuerpo en el recubrimiento de WC-Co-Cr. Al estudiar las pistas de desgaste producidas en los ensayos tribológicos, se observó un mayor volumen desgastado para WC-Co-Cr, seguido por Cr y, finalmente, NiCr- Cr_3C_2 .

En última instancia, al comparar las alternativas, se concluye que el recubrimiento de NiCr- Cr_3C_2 depositado por CS es la opción más adecuada tanto para restaurar recubrimientos como para reemplazar el acero cromado. Con durezas similares y un rendimiento superior en resistencia a la abrasión, al ser un recubrimiento de cerme, se posiciona como la elección óptima.

Agradecimientos

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a las personas que han sido parte fundamental de mi formación. A mis queridos padres, Fabiola y Pedro, les agradezco por creer en mí, amarme y brindarme la educación que me ha permitido llegar hasta aquí. A mi abuela Zule, cuyo apoyo constante y desinteresado ha sido una motivación. A mi amiga Nathaly, que ha sido mi compañera a lo largo de todas las etapas de mi vida.

Agradezco también a esos amigos de la facultad que llegaron de manera inesperada, pero que se han mantenido a mi lado hasta el día de hoy, con los cuales he compartido estudio, éxitos y fracasos. A aquellos que surgieron al final de esta etapa y han contribuido a mi desarrollo tanto emocional como profesional. A todos quienes han escuchado mis preocupaciones y me han brindado palabras de apoyo o simplemente compañía.

Un agradecimiento especial a Natalia e Isaac; no podría haber llegado hasta aquí sin ustedes. Sus consejos y compañía son invaluable para mí, y sus hijas son un regalo que me ha ayudado a crecer y disfrutar de los pequeños momentos.

Gracias a todos mis profesores, cuyo conocimiento y orientación me han ayudado en mi formación académica y personal, en especial al Profesor Rubén que ha estado siempre dispuesto a escuchar inquietudes académicas e incluso anécdotas. Además, quisiera reconocer a los compañeros cuyas investigaciones contribuyeron al desarrollo de esta memoria.

También quiero expresar mi gratitud por todos los momentos, desde los días tranquilos en los que podía acostarme en el pasto sin preocupaciones hasta aquellos en los que deseaba que las 23:59 nunca llegaran. Agradezco cada cambio inesperado que ha ocurrido en estos 7 años, ya que cada uno de ellos ha contribuido a mi crecimiento y aprendizaje.

Por último, agradezco a Dios por este viaje extraño y gratificante, en el que he sentido su compañía y aliento en cada paso del camino. Su guía ha sido fundamental en este proceso de crecimiento y aprendizaje.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo General	2
1.1.2. Objetivos Específicos	2
1.2. Alcances	2
2. Antecedentes	3
2.1. Cromado	3
2.2. Aspersión térmica	4
2.2.1. Cold Spray (CS)	4
2.2.1.1. Velocidad crítica	5
2.2.1.2. Adhesión	6
2.2.1.3. Porosidad	6
2.2.2. Proyección térmica de alta velocidad (HVOF)	6
2.3. Cermets	7
2.4. Tribología	8
2.4.1. Fricción	8
2.4.2. Desgaste	8
2.5. Tribómetro	9
2.5.1. Interferómetro de luz blanca (WLI)	9
2.6. Microscopio electrónico de barrido (SEM)	10
2.6.1. Espectroscopia de Rayos X de dispersión de energía (EDS)	10
2.7. Difractómetro de rayos X (XRD)	11
3. Metodología	12
3.1. Muestras seleccionadas	12
3.1.1. Muestra 1	12
3.1.2. Muestra 2	13
3.2. Trabajo experimental	13
3.2.1. Preparación de muestras	13
3.2.2. Caracterización del recubrimiento	16
3.2.2.1. XRD	16
3.2.2.2. Dureza	17
3.2.2.3. SEM	17
3.2.3. Pruebas tribológicas	18
3.2.4. Caracterización de la pista de desgaste	19
3.2.4.1. WLI	19

3.2.4.2. SEM/EDS	20
3.3. Análisis de resultados	20
3.3.1. Mountains Lab	20
4. Resultados y Discusiones	23
4.1. Caracterización del recubrimiento	23
4.1.1. SEM	23
4.1.1.1. Muestra 1	23
4.1.1.2. Muestra 2	25
4.1.2. XRD	27
4.1.2.1. Muestra 1	27
4.1.2.2. Muestra 2	28
4.1.3. Dureza	30
4.2. Ensayos tribológicos	31
4.2.1. Parámetros experimentales	31
4.2.2. Contracuerpo Acero E52100	32
4.2.3. Contracuerpo de Alúmina	33
4.3. Análisis de Desgaste y Características Tribológicas	35
4.3.1. SEM	35
4.3.2. EDS	36
4.3.3. Profundidades máximas de desgaste	42
4.3.4. Volúmenes de desgaste	44
5. Conclusiones	46
Bibliografía	48
Anexo A. Detalle COF Pruebas Tribológicas	51
Anexo B. Detalle Espectros EDS	55
Anexo C. Detalle Profundidad Máxima y Volumen desgastado	58

Índice de Tablas

3.1.	Parámetros tribológicos.	19
4.1.	Microdureza Vickers recubrimiento NiCr-CrC por CS.	30
4.2.	Microdureza Vickers recubrimiento Cr por Galvanoplastia.	30
4.3.	Microdureza Vickers recubrimiento WC-Co-Cr por HVOF.	31
4.4.	Componentes en partículas, recubrimiento NiCr-CrC, bola Acero E52100.	37
4.5.	Componentes en partículas, recubrimiento NiCr-CrC, bola Alúmina	38
4.6.	Componentes en partículas, recubrimiento Cr, bola Acero E52100	39
4.7.	Componentes en partículas, recubrimiento Cr, bola Alúmina	40
4.8.	Componentes en partículas, recubrimiento WC-Co-Cr, bola Acero E52100.	41
4.9.	Componentes en partículas, recubrimiento WC-Co-Cr, bola Alúmina	42

Índice de Ilustraciones

2.1.	Esquema simple del proceso de galvanoplastia [6].	3
2.2.	Comparación de distintos procesos de aspersión térmica en relación a la temperatura del gas y la velocidad de la partícula [8].	4
2.3.	Diagrama esquemático del proceso Cold Spray (CS) [8].	5
2.4.	Efecto de la velocidad crítica en la eficiencia de la deposición [9].	5
2.5.	Esquema de la porosidad en la deposición [11].	6
2.6.	Diagrama esquemático del proceso de aspersión térmica HVOF [5].	7
2.7.	Diagrama de cuerpo libre interacción fuerzas [13].	8
2.8.	Ilustración de desgaste abrasivo: (a) Entre una superficie blanda y una dura (b) Entre dos cuerpos y con partículas abrasivas libres (tercer cuerpo) entre ellos [13].	9
2.9.	Tribómetro Multifuncional Rtec MFT-5000 [15].	10
2.10.	Diagrama esquemático de SEM con EDS [18].	11
3.1.	Diagrama resumen de metodología.	12
3.2.	Muestra 1 cortada.	13
3.3.	Muestra 2 cortada.	13
3.4.	Barra muestra 1 sin preparación.	14
3.5.	Muestras para XRD.	14
3.6.	Muestras metalográficas encapsuladas.	15
3.7.	Proceso de pulido semiautomático.	16
3.8.	Muestra encapsulada pulido espejo.	16
3.9.	Muestra encapsulada ingresando a cámara de vacío.	18
3.10.	Proceso de pruebas tribológicas.	19
3.11.	Cambio de superficie tras nivelar.	21
3.12.	Pista de desgaste escalada.	21
3.13.	Pista de desgaste seleccionada.	22
3.14.	Perfil de desgaste y área desgastada.	22
4.1.	Recubrimiento NiCr-CrC por CS	24
4.2.	Recubrimiento de Cr por Galvanoplastia.	24
4.3.	Zona de interfaz sustrato (Acero AISI 4340) - recubrimiento, Cr y NiCr-CrC. .	25
4.4.	Recubrimiento WC-Co-Cr por HVOF	26
4.5.	Zona de interfaz sustrato (Acero 4340) - recubrimiento, Cr y WC-Co-Cr. . . .	26
4.6.	Patrón de difracción recubrimiento NiCr-CrC por CS (muestra 1).	27
4.7.	Patrón de difracción recubrimiento Cr por galvanoplastia.	28
4.8.	Patrón de difracción recubrimiento NiCr-CrC por CS (muestra 2).	29
4.9.	Patrón de difracción recubrimiento WC-Co-Cr por HVOF.	29
4.10.	Pista de desgaste recubrimiento WC-Co-Cr, 0.8 [N], 30 [min].	32
4.11.	COF de los distintos recubrimientos con Bola de Acero E52100.	33
4.12.	COF de los distintos recubrimientos con Bola de Alúmina.	34

4.13.	Pista en recubrimiento de NiCr-CrC por CS	35
4.14.	Pista en recubrimiento de Cr por Galvanoplastia	36
4.15.	Pista en recubrimiento de WC-Co-Cr por HVOF	36
4.16.	Punto de medición para EDS pista recubrimiento NiCr-CrC, bola E52100. . .	37
4.17.	Punto de medición para EDS pista recubrimiento NiCr-CrC, bola Alúmina. . .	38
4.18.	Puntos de medición para EDS pista recubrimiento Cr, bola Acero E52100 . . .	39
4.19.	Puntos de medición para EDS pista recubrimiento Cr, bola Alúmina	40
4.20.	Punto de medición para EDS pista recubrimiento WC-Co-Cr, bola Acero E52100.	41
4.21.	Punto de medición para EDS pista recubrimiento WC-Co-Cr, bola Alúmina. .	42
4.22.	Profundidad máxima de hueco promedio.	43
4.23.	Volumen promedio de hueco.	45
A.1.	COF recubrimiento NiCr-CrC, bola Acero E52100.	51
A.2.	COF recubrimiento Cr, bola Acero E52100.	52
A.3.	COF recubrimiento WC-Co-Cr, bola Acero E52100.	52
A.4.	COF recubrimiento NiCr-CrC, bola Alúmina.	53
A.5.	COF recubrimiento Cr, bola Alúmina.	53
A.6.	COF recubrimiento WC-Co-Cr, bola Alúmina.	54
B.1.	Espectro pista recubrimiento NiCr-CrC, bola E52100	55
B.2.	Espectro pista recubrimiento NiCr-CrC, bola Alúmina.	55
B.3.	Espectros pista recubrimiento Cr, bola Acero E52100	56
B.4.	Espectros pista recubrimiento Cr, bola Alúmina	56
B.5.	Espectro pista recubrimiento WC-Co-Cr, bola Acero E52100	56
B.6.	Espectro pista recubrimiento WC-Co-Cr, bola Alúmina.	57
C.1.	Profundidades máximas ensayos NiCr-CrC, bola Acero E52100	58
C.2.	Profundidades máximas ensayos NiCr-CrC, bola Alúmina.	59
C.3.	Profundidades máximas ensayos Cr, bola Acero E52100	59
C.4.	Profundidades máximas ensayos Cr, bola Alúmina.	60
C.5.	Profundidades máximas ensayos WC-Co-Cr, bola Acero E52100	60
C.6.	Profundidades máximas ensayos WC-Co-Cr, bola Alúmina.	61
C.7.	Volumen desgastado ensayos NiCr-CrC, bola Acero E52100	61
C.8.	Volumen desgastado ensayos NiCr-CrC, bola Alúmina.	62
C.9.	Volumen desgastado ensayos Cr, bola Acero E52100	62
C.10.	Volumen desgastado ensayos Cr, bola Alúmina.	63
C.11.	Volumen desgastado ensayos WC-Co-Cr, bola Acero E52100	63
C.12.	Volumen desgastado ensayos WC-Co-Cr, bola Alúmina.	64

Capítulo 1

Introducción

A lo largo del tiempo, la industria ha desarrollado diversos procesos para mejorar las propiedades mecánicas de los materiales y satisfacer mejor sus necesidades. Uno de estos procesos es el cromado, que implica recubrir un sustrato depositando una capa de cromo en su superficie. Generalmente se lleva a cabo mediante galvanoplastia, utilizando una corriente eléctrica para transferir iones de un ánodo a un cátodo a través de un medio acuoso electrolítico, logrando la adhesión de partículas de cromo en la superficie del material (cátodo) [1].

A pesar de los beneficios en cuanto propiedades mecánicas obtenidos mediante el cromado de acero, que incluyen un aumento de dureza y resistencia a la abrasión y corrosión, estudios indican que el contacto con la piel o la inhalación de vapores de Cromo hexavalente (Cr VI) durante el proceso de galvanoplastia incrementan los riesgos de cáncer al los pulmones, estómago, entre otros [2]. Es por ello que su práctica ha sido restringida fuertemente en algunos países dada su toxicidad [3]. Sin embargo, el cromado de acero se sigue llevando a cabo dada la necesidad que hay de este material en distintos campos como lo son el automotriz, naval y aeroespacial.

De este modo, se están explorando alternativas de recubrimiento que permitan obtener propiedades similares al acero cromado evitando la exposición al Cr VI. Entre ellas se encuentran las técnicas de aspersión térmica; Cold Spray (CS) y la Proyección térmica de alta velocidad (HVOF). Se busca que al usar estas técnicas en conjunto con materiales adecuados permitan reemplazar el proceso de cromado en su totalidad o lograr que los aceros ya cromados puedan ser restaurados de manera segura.

El CS es un proceso de manufactura aditiva que consiste en impactar partículas de polvo en estado sólido sobre una superficie mediante un flujo de gas a velocidad supersónica. El material particulado es depositado y consolidado en base a deformación plástica, generando piezas recubiertas que son principalmente usadas en el industria aeroespacial [4]. Por otro lado, el HVOF consiste en atomizar materiales fundidos o semifundidos sobre una superficie a través una corriente de gas, requiere velocidad supersónica y temperaturas más altas, variando las propiedades mecánicas de la pieza gracias al recubrimiento producido [5].

En el desarrollo de este trabajo de título, se llevará a cabo una evaluación de alternativas al acero cromado por aspersión térmica. Utilizando recubrimientos compuestos por materiales Cermets, los cuales, al incorporar tanto una fase metálica como cerámica, exhiben notables

propiedades de dureza y resistencia a la abrasión. Los recubrimientos estudiados incluirán NiCr- Cr_3C_2 depositados mediante la Cold Spray (CS), y WC-Co-Cr depositados mediante Proyección Térmica de Alta Velocidad (HVOF). Estos serán comparados con muestras de acero cromado obtenido mediante el proceso de galvanoplastia.

Para realizar esta evaluación, se iniciará con la caracterización de los recubrimientos mediante técnicas como microscopía electrónica de barrido (SEM), difracción de rayos X (XRD) y ensayos de microdureza Vickers. A continuación, se llevarán a cabo ensayos tribológicos diseñados para analizar el comportamiento de los recubrimientos frente al desgaste.

Posteriormente, se realizará una segunda etapa de caracterización de las muestras después de pasar por los ensayos mencionados, usando SEM, XRD y Interferómetro de luz blanca (WLI). Esto permitirá comprender el estado inicial de las muestras y cómo este afecta en su rendimiento frente al desgaste. De este modo, se explorarán en las propiedades mecánicas de los recubrimientos, proporcionando una visión integral de su desempeño y sus posibles ventajas en comparación con el acero cromado.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Realizar una evaluación tribológica y comparación del desgaste por abrasión de acero cromado con respecto a recubrimientos NiCr- Cr_3C_2 hechos por Cold Spray (CS) y WC-Co-Cr depositado por Proyección térmica de alta velocidad (HVOF).

1.1.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar la microestructura de los recubrimientos de Cr por galvanoplastia, NiCr- Cr_3C_2 por Cold Spray y WC-Co-Cr por HVOF, a través de difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido.
- Evaluar el coeficiente de fricción (COF) de los recubrimientos.
- Estudiar el comportamiento a la abrasión en los recubrimientos, a través de microscopía electrónica de barrido.
- Evaluar la resistencia a la abrasión de los recubrimientos, a través de tasas de desgaste.

1.2. Alcances

Este estudio se realizará en recubrimientos ya depositados sobre Acero AISI 4340 de Cr por galvanoplastia, NiCr- Cr_3C_2 por Cold Spray y WC-Co-Cr por HVOF, disponibles en el Departamento de Ingeniería Mecánica y se centrará en pruebas metalográficas y tribológicas.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Cromado

El cromado consiste en depositar una capa de cromo en la superficie de un material; plástico o metal, a través de un proceso de electro-deposición llamado galvanoplastia. Como se observa en la Fig 2.1, durante este proceso se requiere de un ánodo, un cátodo, corriente eléctrica y un medio acuoso electrolítico por donde transiten los iones desde el ánodo al cátodo. Además, el medio acuoso debe ser rico en partículas de cromo de modo que se adhieran a la superficie de la pieza (cátodo) una vez que se aplique la corriente eléctrica [1].

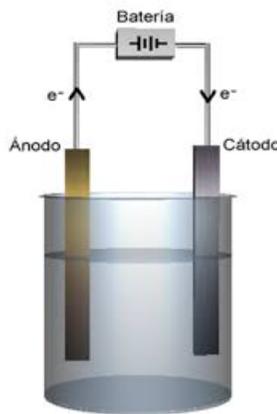


Figura 2.1: Esquema simple del proceso de galvanoplastia [6].

Este proceso no solo produce recubrimientos que aumentan la resistencia a la corrosión y la abrasión, sino que también produce un cambio en el acabado superficial de la pieza creando un brillo uniforme. De este modo, existen recubrimientos delgados; con un espesor $0,5 \mu\text{m}$ a $5 \mu\text{m}$, dedicados principalmente a la estética y recubrimientos gruesos; con un espesor del $8 \mu\text{m}$ y $250 \mu\text{m}$ dedicados al aumento de la dureza y resistencia a la corrosión [7]. Las excelentes propiedades del acero cromado lo han posicionado como un material altamente demandado en el campo de la ingeniería, sus aplicaciones van desde lo decorativo a lo estructural .

Sin embargo, la exposición al cromo hexavalente (Cr VI) que se usa para obtener acero cromado es dañino para la salud; la inhalación de vapores, partículas o emanaciones, su ingesta o el contacto con la piel o los ojos puede llegar a producir cáncer de pulmones, estómago, seno nasal, entre otros. Es por ello que el uso de Cr VI se ha restringido, incluso

la Unión Europea ha prohibido su uso desde el 2006 [3]. Si bien se ha buscado reemplazar el Cr VI con Cr III dado su menor grado de toxicidad, los recubrimientos resultantes han presentado un menor rendimiento que los de Cr IV. Por otro lado, el proceso de cromado es altamente ineficiente en términos de restauración de piezas, puesto que considera el quitar todo el recubrimiento para poder cromar nuevamente si se ha dañado una parte de dicha pieza, independiente de su tamaño [2].

2.2. Aspersión térmica

La aspersión térmica hace referencia a aquellos procesos que consideran la acción de la energía cinética y térmica para realizar un recubrimiento en un cierto material base o sustrato, depositando partículas generalmente en forma de polvo sobre la superficie del sustrato. Durante este proceso, el material particulado es acelerado a velocidades supersónicas y proyectado hacia una superficie limpia donde impacta e interacciona mecánicamente, adhiriéndose a la superficie. El resultado obtenido depende del tipo de aspersión térmica realizada, puesto que para cada una varían las velocidades y temperaturas, como se observa en la Fig 2.2.

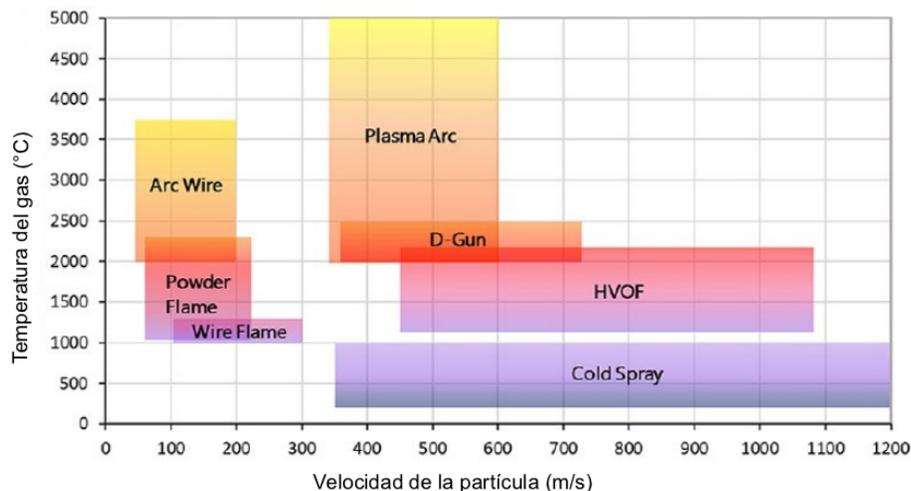


Figura 2.2: Comparación de distintos procesos de aspersión térmica en relación a la temperatura del gas y la velocidad de la partícula [8].

La aspersión térmica posee gran versatilidad en relación a los materiales que puede proyectar y las superficies que puede recubrir, dado que se puede utilizar cualquier material que sea capaz de fundirse sin descomponerse. Las propiedades mecánicas propias del sustrato se mantienen constantes a pesar de que el material proyectado se encuentre a altas temperaturas al momento de impactar, puesto que al sustrato se mantiene a temperatura ambiente [9].

2.2.1. Cold Spray (CS)

Consiste en proyectar un material hacia un sustrato a alta velocidad, manteniendo temperaturas relativamente bajas. En esta técnica el material proyectado corresponde a partículas de entre $5 \mu\text{m}$ a $50 \mu\text{m}$ de diámetro que no llegan a fundirse, por lo que se mantienen como partículas en estado sólido hasta impactar en el sustrato. Como se observa en la Fig 2.3, el material de recubrimiento que se encuentra en un contenedor se inyecta en un haz de gas

inerte y caliente a alta presión, el cual generalmente corresponde nitrógeno, helio o aire. Este haz le entrega energía cinética y aporte térmico que lo acelera hasta impactar con el sustrato a velocidad supersónica de entre $300-1200 \frac{m}{s}$, produciendo que las partículas se deformen plásticamente al momento del impacto, adhiriéndose a la superficie y formando el recubrimiento [4].

Uno de los beneficios de CS es evitar oxidaciones que disminuyan la adherencia por el paso de las partículas por el estado líquido, de modo que es posible proyectar materiales metálicos altamente reactivos [9].

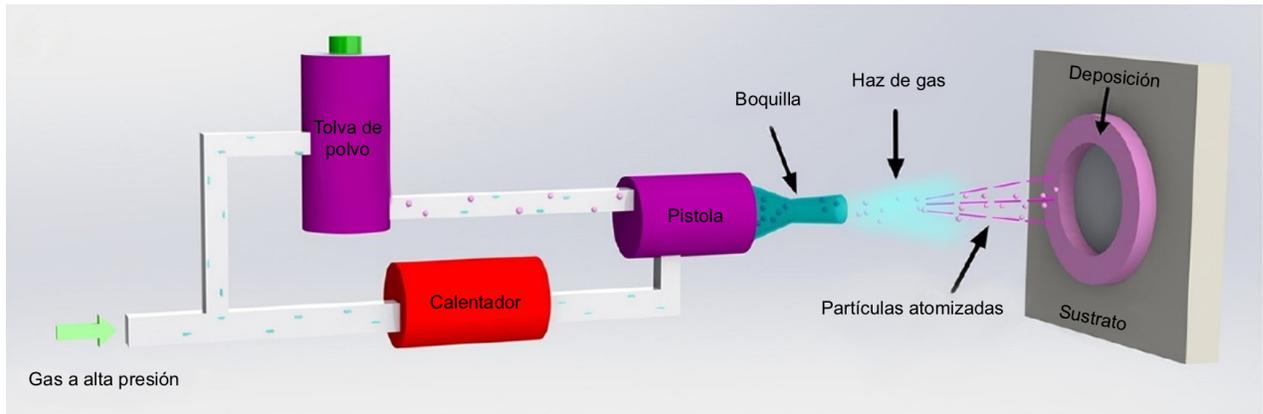


Figura 2.3: Diagrama esquemático del proceso Cold Spray (CS) [8].

2.2.1.1. Velocidad crítica

Para que se produzca una correcta deposición en cuanto a adhesión, es necesario que se supere una cierta velocidad crítica, la cual depende de las propiedades termomecánicas del polvo y del sustrato, también de la morfología y tamaño de partícula. Como se observa en la Fig 2.4, por debajo de la velocidad crítica, las partículas que impactan generan solamente una erosión del sustrato (zona de abrasión); mientras que por encima de la velocidad crítica (zona deposición), las partículas exhiben una deposición mejorada hasta un máximo que puede superar el 95 % [9].

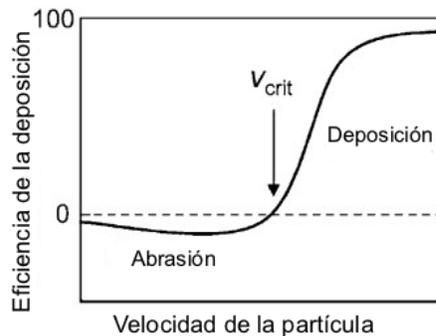


Figura 2.4: Efecto de la velocidad crítica en la eficiencia de la deposición [9].

2.2.1.2. Adhesión

La unión de las partículas con el sustrato se produce cuando hay un contacto estrecho entre ambos, logrando que las partículas en estado sólido sufran deformación plástica en el momento de la deposición y rompan con la capa superficial de óxido del sustrato. Las altas presiones también propician dicha unión. De este modo, CS presenta ventajas por sobre la deposición a alta temperatura, como evitar la oxidación o el estrés térmico residual [10].

2.2.1.3. Porosidad

Como se observa en la Fig 2.5, la porosidad hace referencia a la proporción de volumen de espacios vacíos respecto al volumen de control. Se debe tener en cuenta la porosidad cuando se producen recubrimientos, puesto que puede perjudicar las propiedades mecánicas y disminuir la resistencia a la corrosión. La porosidad de los recubrimientos es afectada por la temperatura, presión y el tamaño de las partículas impactadas [11].

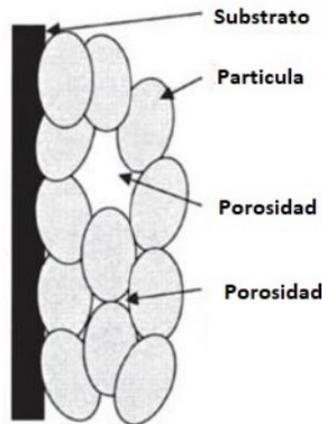


Figura 2.5: Esquema de la porosidad en la deposición [11].

2.2.2. Proyección térmica de alta velocidad (HVOF)

El HVOF, se basa en acelerar partículas de un material de recubrimiento a través de un haz de gases, el cual corresponde una combinación de oxígeno y gases combustibles que se sitúan en una cámara de combustión, creando una mezcla altamente presurizada. De este modo, combinando presiones elevadas, alto flujo de gas y altas temperaturas de combustión, se produce un haz de gas supersónico a la salida, con las partículas llegando a velocidades de hasta $1000 \frac{m}{s}$ y temperaturas de aproximadamente $2000 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Las velocidades extremas proporcionan energía cinética que ayuda a producir recubrimientos que son densos y muy bien adheridos. Como se observa en la Fig 2.6, utiliza combustión confinada y una boquilla de diámetro pequeño para dirigir el haz de gases con las partículas fundidas hacia la superficie del sustrato.

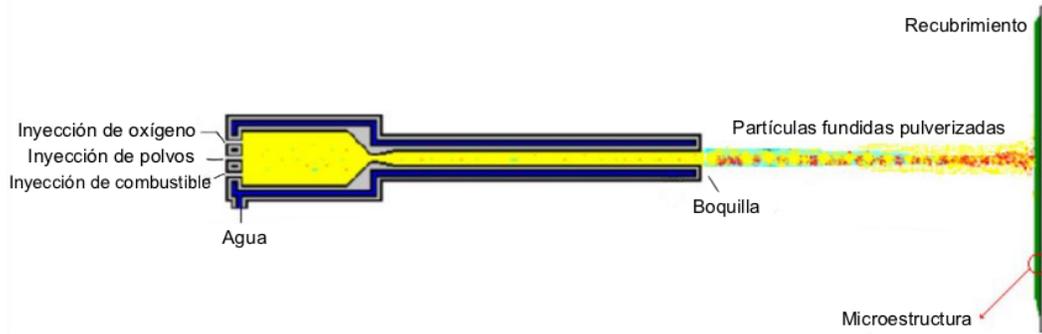


Figura 2.6: Diagrama esquemático del proceso de aspersión térmica HVOF [5].

Los recubrimientos HVOF presentan menor porosidad, mayor densidad y mayor fuerza de adherencia en comparación con otros procesos de aspersión térmica, lo que los hace atractivos para muchas aplicaciones de resistencia al desgaste y la corrosión. Estos recubrimientos tienen ventajas ambientales en comparación con los recubrimientos formados electro-químicamente.

Como se observa en la Fig 2.2, las temperaturas que alcanza el HVOF son las más bajas luego del Cold Spray. Esto es porque en HVOF no se requiere que las partículas estén completamente fundidas para formar recubrimientos de alta calidad puesto que las partículas que golpean la superficie del sustrato poseen una muy alta energía cinética. Esta es una ventaja para los recubrimientos de tipo Cermet de carburo y ahí es donde este proceso realmente sobresale, puesto que las altas temperaturas pueden causar descarburación y reducción de las propiedades útiles de los recubrimientos de Cermet [5].

2.3. Cermets

Los materiales Cermets son compuestos que presentan tanto fase de refuerzo relacionada con las cerámicas como fase aglomerante relacionada con los metales, de modo que presentan una alta dureza y tenacidad. Las fases cerámicas contemplan carburos, nitruros, óxidos y carbonitruros de titanio, entre otros, mientras que las aleaciones de níquel, cobalto, entre otras, se usan como aglomerante. Gracias a sus propiedades; como lo es su buena resistencia al desgaste y alta dureza, se suelen utilizar para hacer recubrimientos que protejan del desgaste, la abrasión y erosión. Así también su estabilidad térmica permite que puedan funcionar en entornos con temperaturas de hasta 900 °C.

Los Cermets como $\text{NiCr-Cr}_3\text{C}_2$ se suelen aplicar como recubrimientos sobre un metal base, mejorando sus propiedades mecánicas. Para la deposición de Cermets se prefieren los procesos de aspersión térmica, pero las altas temperaturas de algunos de estos procesos recubrimiento; donde las temperaturas ascienden a 3000°C, pueden provocar descarburación y reducción de las propiedades útiles de los recubrimientos. Por ello se propone el uso de CS o HVOF como método de aspersión, pues evitan, en menor o mayor medida, los problemas relacionados a la temperatura, minimizando la probabilidad de descarburación [12].

2.4. Tribología

La tribología es la ciencia que estudia la interacción de las superficies en movimiento relativo. De este modo, considera propiedades como la fricción y el roce que se produce entre los cuerpos. En el caso de los recubrimientos, las propiedades del material recubierto suelen ser diferentes a las de los materiales que lo componen, por lo que deben estudiarse de modo independiente.

2.4.1. Fricción

La fricción es la resistencia al movimiento que se produce cuando un cuerpo se mueve mientras está en contacto con otro, por lo que se produce como una respuesta y no es una propiedad del material. Como se observa en la Fig 2.7, se produce una fuerza que va en dirección contraria al movimiento conocida como fuerza de fricción (F).

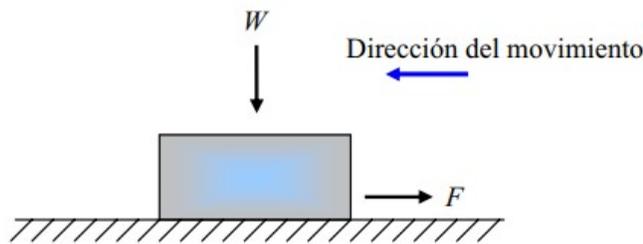


Figura 2.7: Diagrama de cuerpo libre interacción fuerzas [13].

La relación entre la fuerza de fricción (F) y la carga normal (W), se conoce como coeficiente fricción (COF) y se representa con la letra μ . Su valor depende de las condiciones de operación, como lo es la temperatura, humedad, acabado superficial, entre otras. Cabe destacar que es independiente de la velocidad de deslizamiento.

2.4.2. Desgaste

Como resultado del movimiento relativo de una superficie contra otra, se puede llegar a remover material de uno de los cuerpos produciendo desgaste. El material que se quita puede ser expulsado o transferido de una superficie a la otra.

Si bien existen varios tipos de desgaste, el desgaste abrasivo se conoce como su forma más común. Donde el contacto se produce entre un cuerpo duro y uno más blando. Al deslizar uno sobre el otro, las asperezas de la superficie dura generan daño por deformación plástica en la superficie más blanda. Como se observa en la Fig 2.8.b, en algunos casos este tipo de desgaste se produce a través de partículas duras que se encuentran libres entre los dos cuerpos y pueden producir desgaste tanto en una como en las dos superficies. Este tipo de desgaste abrasivo se conoce como abrasión por tercer cuerpo [13].

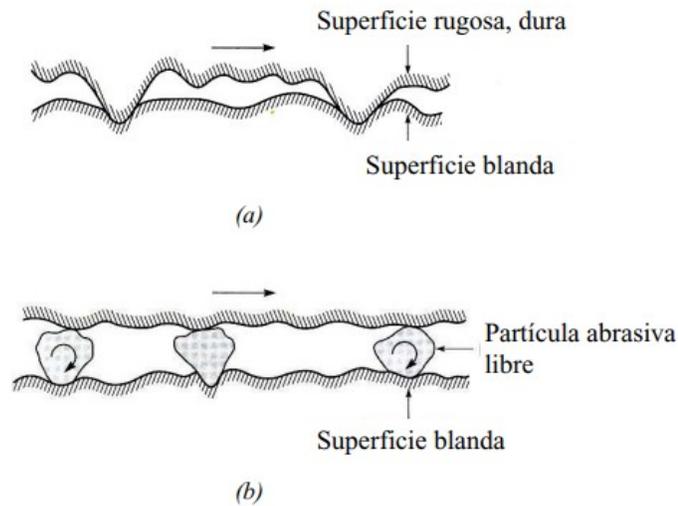


Figura 2.8: Ilustración de desgaste abrasivo: (a) Entre una superficie blanda y una dura (b) Entre dos cuerpos y con partículas abrasivas libres (tercer cuerpo) entre ellos [13].

2.5. Tribómetro

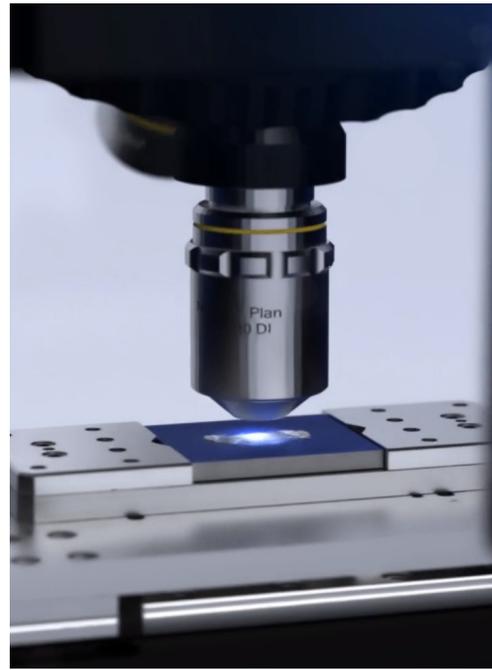
Un tribómetro es un dispositivo diseñado específicamente para llevar a cabo ensayos tribológicos al aplicar una carga normal sobre un sustrato utilizando una bola como contracuerpo, generando así un movimiento relativo entre ambas superficies de contacto, como se aprecia en la Fig 2.9.a. Este equipo, al realiza movimientos lineales cíclicos, deja una pista de desgaste sobre el sustrato con la cual se obtiene información sobre fricción, desgaste y propiedades mecánicas [14].

2.5.1. Interferómetro de luz blanca (WLI)

El interferómetro de luz blanca, también denominado WLI (por sus siglas en inglés), se emplea para analizar la topografía superficial de las muestras objeto de estudio. Este dispositivo hace uso de haces de luz con diversas longitudes de onda, que, al reflejarse y combinarse, dan origen a interferencias constructivas y destructivas en diversos puntos de la muestra, creando un patrón de interferencia con información sobre su morfología. De esta manera, el interferómetro posibilita la medición precisa de parámetros tales como longitudes, espesores, entre otros [15].



(a) Tribómetro



(b) Interferómetro de luz blanca

Figura 2.9: Tribómetro Multifuncional Rtec MFT-5000 [15].

2.6. Microscopio electrónico de barrido (SEM)

El microscopio electrónico de barrido (SEM) es una herramienta que permite examinar detalladamente la superficie de distintas muestras. El SEM emplea un haz de electrones en lugar de luz para obtener una visión de la superficie estudiada. Este haz barrido se dirige sobre la muestra, interactuando con su superficie. Durante esta interacción, se generan electrones secundarios que son detectados y utilizados para formar imágenes de alta resolución de la topografía tridimensional de la muestra. De esta forma, se obtiene información detallada sobre la morfología y estructura superficial de los materiales analizados en el laboratorio [16].

2.6.1. Espectroscopia de Rayos X de dispersión de energía (EDS)

La espectroscopia de rayos X por dispersión de energía (EDS) es una técnica utilizada en conjunto con el microscopio electrónico de barrido (SEM) para detectar y analizar la composición química de los materiales. Cuando se escanea la superficie de la muestra mediante el enfoque del haz de electrones por SEM, se produce la interacción de los electrones con los átomos de la muestra, lo que genera una emisión de rayos X característicos. Estos rayos X son registrados por el detector de EDS, que mide sus energías. Esta información permite identificar los elementos químicos presentes en la muestra y determinar sus respectivas concentraciones, lo que ofrece una visión completa de la composición química de los materiales analizados [17].

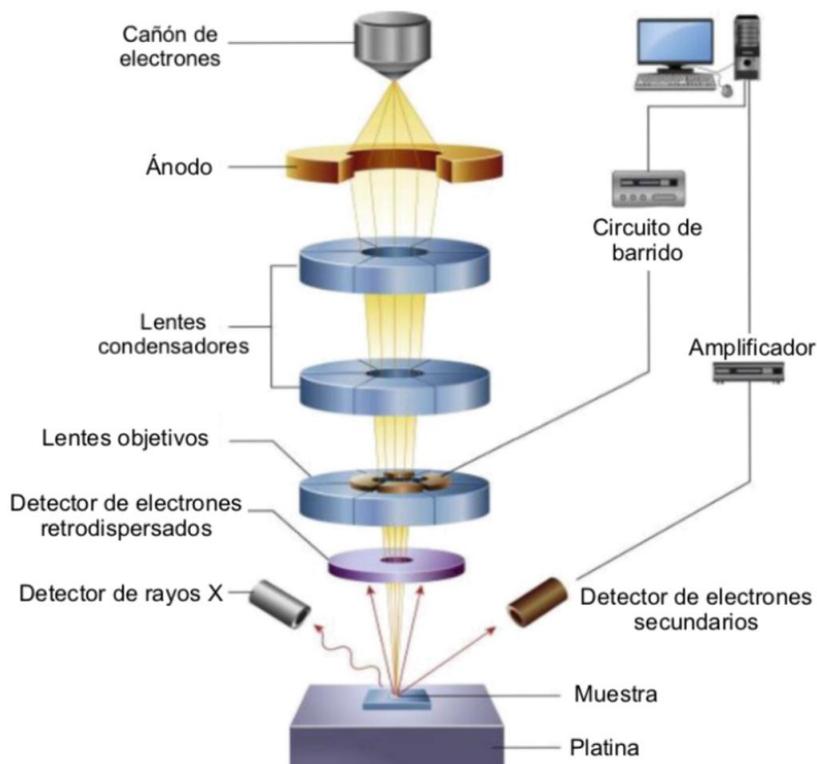


Figura 2.10: Diagrama esquemático de SEM con EDS [18].

2.7. Difractómetro de rayos X (XRD)

El difractómetro de rayos X es una herramienta usada para entender la estructura cristalina de una muestra. Cuando se expone la muestra a rayos X, los átomos dispersan estos rayos de manera única debido a la forma en que están dispuestos en su estructura cristalina. Esta dispersión crea un patrón específico de difracción que, al ser medido y analizado, revela la disposición precisa de los átomos en la muestra. En esencia, el difractómetro permite identificar la estructura cristalina de los materiales, proporcionando información detallada sobre su composición química y propiedades [18].

Capítulo 3

Metodología

Para cumplir los objetivos propuestos se dispone de una metodología enfocada en ensayos tribológicos para los distintos recubrimientos a estudiar, considerando equipos de caracterización que permitirán observar el estado inicial de las muestras y los resultados finales luego de los ensayos.

A continuación, en la Fig. 3.1, se observa un diagrama resumen con los principales hitos a cumplir para llevar a cabo el estudio propuesto.

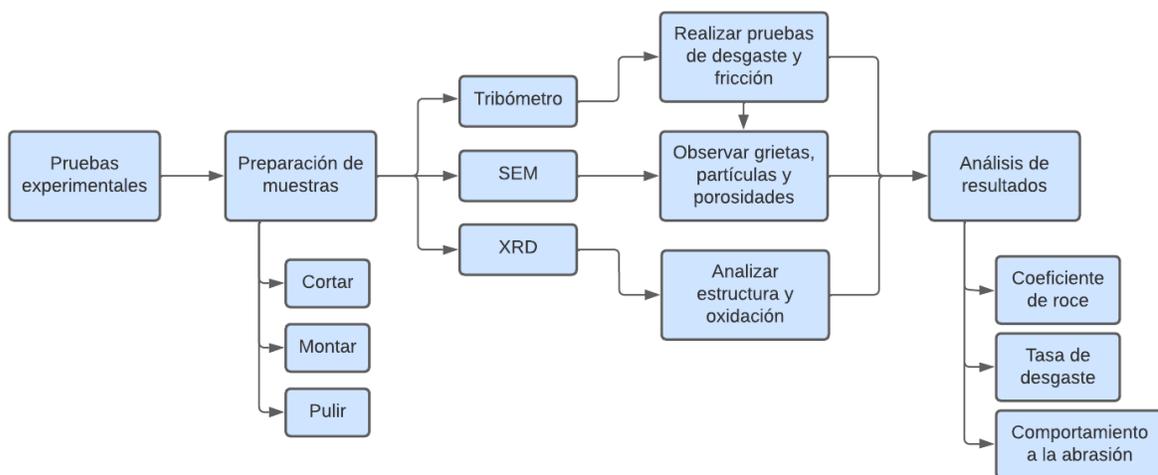


Figura 3.1: Diagrama resumen de metodología.

3.1. Muestras seleccionadas

Para realizar las pruebas experimentales, se seleccionaron dos muestras a estudiar. Con ellas se podrá analizar las propiedades tribológicas y la interacción entre los recubrimientos depositados por distintas técnicas.

3.1.1. Muestra 1

Como se ve en la Fig. 3.2, se trata de acero AISI 4340 con recubrimiento de Cr en los extremos y NiCr-Cr₃C₂ en el centro depositado por CS, el cual en adelante será llamado

recubrimiento NiCr-CrC por simplicidad.



Figura 3.2: Muestra 1 cortada.

3.1.2. Muestra 2

Como se aprecia en la Fig. 3.3, consiste en acero AISI 4340 con recubrimiento de WC-Co-Cr en los extremos depositados por HVOF y NiCr-CrC en el centro depositado por CS.



Figura 3.3: Muestra 2 cortada.

3.2. Trabajo experimental

3.2.1. Preparación de muestras

Para los distintos procesos de caracterización de las muestras se realizaron diferentes preparaciones de materiales.

- Recepción de las Muestras:

1. Se recibieron las muestras en forma de barras, cada una con una longitud aproximada de 15 cm.
2. Las barras fueron limpiadas con acetona y papel absorbente.

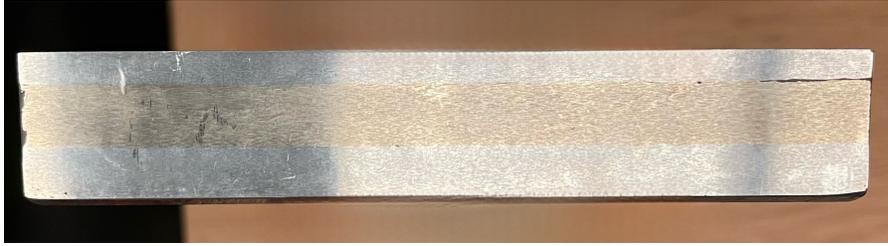


Figura 3.4: Barra muestra 1 sin preparación.

- Preparación para Pruebas Tribológicas:
 1. Utilizando una tronzadora equipada con un disco de corte abrasivo de la marca Presi, se procedió a cortar las barras en trozos de 25 mm de longitud.
 2. Se utilizaron dos de los trozos resultantes, uno de cada muestra (1 y 2). Estos se sumergieron en etanol y se sometieron a limpieza ultrasónica durante 5 minutos. Posteriormente, se destinaron directamente para la realización de las pruebas tribológicas.
- Preparación para Pruebas de Dureza:
 1. Para esta prueba se cortaron dos trozos de de 25 mm, uno de cada muestra (1 y 2), limpiados con etanol y papel absorbente.
- Preparación para Difracción de Rayos X:
 1. Para realizar la difracción de rayos X, fue necesario cortar una sección específica de cada muestra.
 2. Cada sección cortada tenía un tamaño de aproximadamente 10 mm por lado.
 3. Se obtuvieron cuatro trozos: dos de recubrimiento NiCr-CrC depositado por CS, uno de recubrimiento de Cr y uno de recubrimiento de WC-Co-Cr depositado por HVOF.
 4. Finalmente las muestras fueron limpiados con etanol con papel absorbente. Estos trozos se utilizaron directamente en el análisis de difracción de rayos X para estudiar la estructura de los recubrimientos.

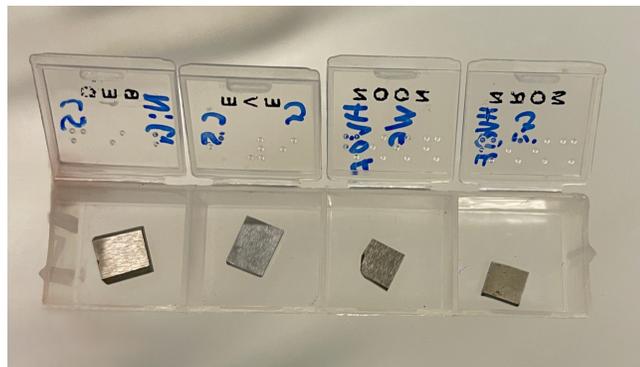


Figura 3.5: Muestras para XRD.

- Preparación para Microscopía Electrónica de Barrido:

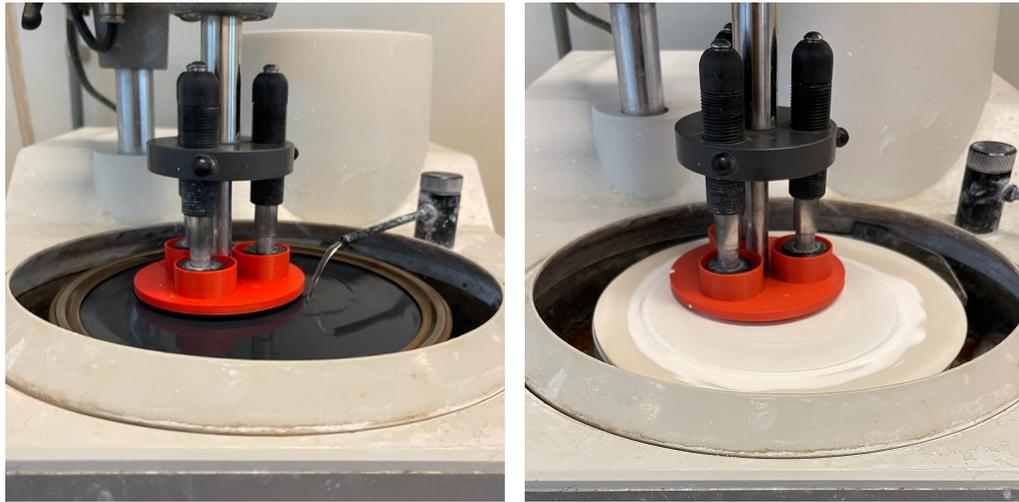
1. Utilizando una tronzadora equipada con un disco de corte abrasivo de la marca Presi, se procedió a cortar las barras en trozos de 10 mm de longitud.
2. Se obtuvieron seis muestras en total, tres correspondientes a la muestra 1 y tres a la muestra 2. Todos los trozos fueron meticulosamente limpiados con agua destilada y jabón.
3. Cada muestra fue posicionada dentro de un molde cilíndrico hueco junto a baquelita conductora, dejando la zona de interfaz entre el acero AISI 4340 y los dos recubrimientos hacia afuera.
4. Se empleó una abrazadera de calor que cubría el molde por fuera para fundir la baquelita.
5. El molde se colocó en una prensa hidráulica y se aplicó un prensado constante hasta obtener una compactación completa.
6. Una vez enfriado el molde, se retiraron las muestras encapsuladas.



Figura 3.6: Muestras metalográficas encapsuladas.

7. Se inició el proceso de pulido utilizando una máquina pulidora de muestras metalográficas, donde una pieza impresa en 3D permitió realizar un pulido semi automático a tres muestras simultáneamente. Esta pieza se fijó en un eje que giró de manera constante, con velocidad fija e inmodificable.
8. Se colocó en el disco giratorio una lija de grano 280 y se fijó. Las tres muestras se ubicaron en la pieza impresa de modo que estuvieran sobre el disco.
9. Se abrió el paso de agua como lubricante y se inició la máquina, fijando una velocidad de giro del disco a 150 rpm por 2 minutos y luego a 300 rpm por 8 minutos, completando el ciclo de 10 minutos de pulido.
10. El proceso se repitió cambiando la lija por otras de grano 360, 500, 1000, y 2500, cada una durante 10 minutos en total.
11. Se retiró el disco para lijas y se fijó un paño de pulido de 8" marca LECO.
12. Se inició la máquina posicionando las tres muestras sobre el paño con una velocidad de 100 rpm.

13. Se aplicó solución de alúmina de 1 micrón de modo que cada muestra estuviera en contacto con la solución, dejándolo por 10 minutos, completando el ciclo de pulido.
14. Se repite el proceso para alúmina de 0,3 y 0,04 micrones.



(a) Pulido lija de grano 1000

(b) Pulido solución de alúmina 1 micrón

Figura 3.7: Proceso de pulido semiautomático.

15. Una vez finalizado el tiempo, se retiraron las muestras y se lavaron con agua destilada. El resultado es una superficie pulida a espejo, plana y lisa que revela la zona de interfaz de los recubrimientos y el acero AISI 4340.



Figura 3.8: Muestra encapsulada pulido espejo.

3.2.2. Caracterización del recubrimiento

3.2.2.1. XRD

Las muestras cuatro muestras preparadas se envían al Laboratorio de Cristalografía y Difracción de Rayos-X , donde son procesadas para obtener patrones de difracción específicos para cada una en un Difractómetro Bruker D8 Advance.

Una vez obtenidos los patrones de difracción en formato de archivo .raw, estos son introducidos en el programa DIFFRAC.EVA que permite la identificación precisa de los picos en el

patrón de difracción, indicando las fases de los componentes presentes en cada recubrimiento. El análisis de los picos se realiza considerando factores como la posición angular de los picos y su intensidad. Esta información resulta crucial para determinar la composición cristalina y la estructura de los materiales estudiados, proporcionando datos valiosos sobre la calidad y características de los recubrimientos analizados.

3.2.2.2. Dureza

Los tres recubrimientos; Cr por galvanoplastia, NiCr-CrC depositado por CS, y WC-Co-Cr depositado por HVOF, son sometidas a ensayos de microdureza Vickers en el Laboratorio de Caracterización de Materiales.

El ensayo requiere una superficie plana de parte de las muestras, en este caso las muestras fueron rectificadas por lo que cumplen con el requisito. Para dar inicio al ensayo, se selecciona una carga específica, expresada en kilogramos-fuerza [kgf], que se aplica sobre la muestra mediante un indentador Vickers con forma de pirámide cuadrangular y un ángulo de 136 grados entre caras opuestas. En este caso, se emplea una fuerza de 0,5 [kgf] durante 10 segundos. Posteriormente, se mide la longitud de las dos diagonales de la huella dejada por el indentador, utilizando un sistema de medición incorporado en el equipo. La microdureza Vickers es calculada a partir de estas medidas y la carga aplicada.

Este procedimiento se repite cinco veces para cada tipo de recubrimiento en cada muestra, asegurando resultados representativos y estadísticamente significativos.

3.2.2.3. SEM

Las seis muestras encapsuladas, correspondientes a tres de la muestra 1 y tres 2, son analizadas en el Laboratorio de Microscopía Electrónica y Microanálisis, utilizando el equipo SEM FEI Quanta 250. El enfoque de esta caracterización es la zona de interfaz entre el sustrato y los recubrimientos depositados.

Para garantizar resultados representativos, se realizan múltiples análisis SEM en cada tipo de recubrimiento. Durante este proceso, se capturan imágenes de alta resolución de cada recubrimiento para observar la cohesión entre partículas y el estado de la superficie, identificando posibles porosidades.

En el proceso de captura de imágenes en un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM), se sigue un procedimiento meticuloso para obtener información visual de alta resolución sobre la muestra. Primero, a la muestra preparada con pulido espejo, se le debe aplicar un adhesivo de carbono en el lado opuesto a la cara de la muestra para facilitar la conducción en las muestras durante el análisis SEM. Posteriormente, se debe cargar las muestras en la cámara de vacío del SEM y definir parámetros, como la distancia de trabajo y la magnificación.

Tras realizar un enfoque fino y una alineación precisa del haz de electrones, se procede a la captura de imágenes usando electrones secundarios (SE) o retrodispersión de electrones (BSE), proporcionando información sobre la topografía y composición. Durante todo este proceso, se registran los datos resultantes.



Figura 3.9: Muestra encapsulada ingresando a cámara de vacío.

3.2.3. Pruebas tribológicas

Los ensayos tribológicos se llevan a cabo para cada variedad de recubrimiento; NiCr-CrC depositado por CS, Cr por galvanoplastia y WC-Co-Cr por HVOF. Para la realización de estos experimentos, se utiliza el modelo MFT-5000 de la marca Rtec, el cual fue proporcionado por la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Este dispositivo posee la capacidad de aplicar cargas de hasta 5 [N] y ejecutar movimientos lineales cíclicos, lo que resulta en la creación de pistas de desgaste sobre el sustrato.

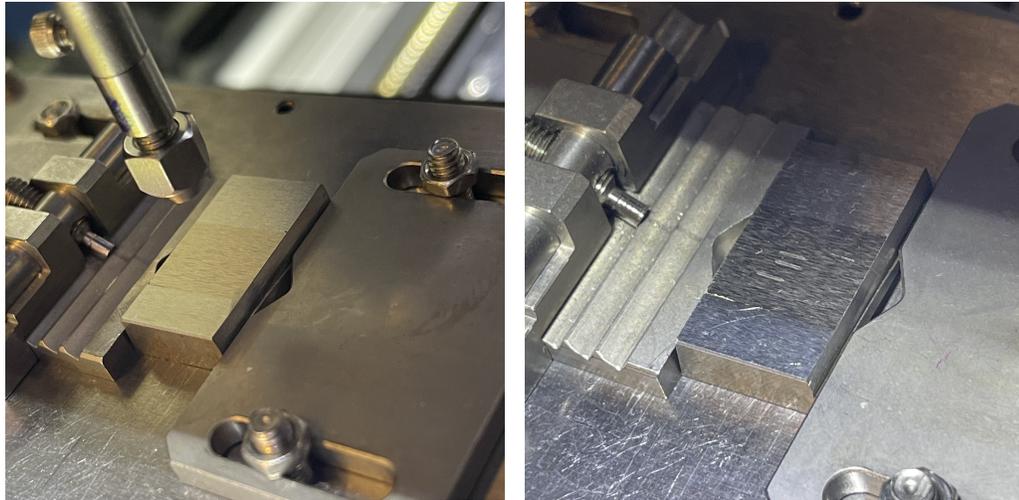
Con el propósito de obtener resultados significativos y fiables, cada variante de recubrimiento se somete a tres ensayos utilizando un contracuerpo específico. En este estudio, se utilizan dos tipos de bolas: una de acero E52100, que es una aleación de alta resistencia que contiene cromo y carbono, y otra de alúmina (Al_2O_3).

El procedimiento comienza encendiendo el tribómetro y la computadora que lo controla. Se inicia el software MFT 18 R4C, seleccionando la configuración para estudiantes y se ingresan los datos pertinentes, como la fuerza de contacto, la fuerza normal a aplicar y el tiempo de ensayo. La muestra se asegura en el porta muestra, y la bola de 4 [mm], que ha sido previamente limpiada con etanol en una máquina de limpieza ultrasónica durante 2 minutos, se coloca en el porta bola.

Con el sistema preparado, se acerca la bola a la muestra hasta dejar aproximadamente 5 [mm] de espacio entre ellas. Se inicia la prueba desde el software, asegurándose de que se cumplan las condiciones ingresadas previamente y se deja actuar, generando una pista de desgaste como se observa en la Figura 3.10.

Al concluir el proceso, se procede a recopilar datos proporcionados por el tribómetro. Dentro de los cuales se destaca, el coeficiente de roce ya que permite comprender el compor-

tamiento del desgaste generado en el recubrimiento.



(a) Muestra antes de prueba tribológica (b) Muestras luego de pruebas tribológicas.

Figura 3.10: Proceso de pruebas tribológicas.

Los parámetros tribológicos seleccionados luego de realizar ensayos para un ajuste óptimo son:

Bola	F_c [N]	F_n [N]	R [mm]	V [$\frac{mm}{s}$]	T_e [min]
Alúmina 4mm	0,2	1	2,5	2,5	60
Acero E52100 4mm	0,2	1	2,5	2,5	60

Tabla 3.1: Parámetros tribológicos.

- F_c : Fuerza de contacto impuesta por 5 segundos
- F_n : Fuerza normal
- R: Recorrido de la bola
- V: Velocidad de recorrido
- T_e : Tiempo de ensayo

3.2.4. Caracterización de la pista de desgaste

3.2.4.1. WLI

Para obtener imágenes detalladas de las pistas de desgaste, permitiendo un posterior procesamiento con el software de análisis de pistas de desgaste (Mountains Lab), es esencial contar con archivos en formato .bcrf generados a través del interferómetro incorporado en el tribómetro.

El proceso se inicia colocando la muestra en el porta muestras del interferómetro. A continuación, se gira una rueda que alberga una serie de objetivos hasta seleccionar la magnificación deseada para la observación, en este caso, 20X. Simultáneamente, desde el software de control MFT 18 R4C, se elige “WLI”.

Luego, se acerca el objetivo a la muestra hasta que esta se encuentre perfectamente enfocada. Con la imagen nítida, se selecciona la zona específica de interés que se capturará. Se corrige cualquier desenfoco, se ajusta el contraste, se fija la profundidad del escaneo en el rango de -50 a 50 [μm] y se aseguran los datos del enfoque en el sistema.

Para áreas de muestreo extensas, se puede optar por la opción “multi-scan”, que permite tomar múltiples capturas de una pista seleccionando los puntos de inicio y final, enfocando cada una de estas zonas. Este proceso asegura la adquisición de una visión completa y detallada de la topografía superficial de la muestra.

Una vez que se han capturado las imágenes necesarias, se puede obtener una caracterización preliminar de la pista de desgaste, donde con la imagen generada por WLI y se crea un gráfico que denota la disminución de material en la zona desgastada. Sin embargo, para obtener una evaluación precisa de las características tribológicas y el comportamiento de los recubrimientos, estas pistas deben ser procesadas y analizadas con el software de análisis de desgaste Mountains Lab.

3.2.4.2. SEM/EDS

Las pistas de desgaste obtenidas en las muestras, correspondientes a tres ensayos por recubrimiento para cada contracuerpo (bola de Alúmina y bola de Acero E52100), se someten al análisis en el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) para determinar la presencia de partículas externas indicativas de abrasión por tercer cuerpo.

El proceso sigue la misma metodología utilizada en la caracterización inicial de los recubrimientos. Sin embargo, en este caso, las muestras no se encuentran encapsuladas. Además, se enfoca en analizar la superficie del recubrimiento en lugar del área transversal de la interfaz.

Se capturan imágenes de una pista representativa por recubrimiento para cada contracuerpo. Utilizando el software, se seleccionan áreas clave de acumulación de material para la búsqueda de partículas desprendidas, las cuales pueden pertenecer al recubrimiento o a la bola de ensayo. Este análisis se realiza con EDS y contribuye a identificar y caracterizar cualquier desgaste o abrasión en la superficie de los recubrimientos bajo diferentes condiciones de ensayo.

3.3. Análisis de resultados

3.3.1. Mountains Lab

Para cumplir con los objetivos, es necesaria la obtención del volumen de desgaste correspondiente a cada pista presente en los distintos recubrimientos. Esto se realiza con el fin de obtener un indicador de las tasas de desgaste y a través del uso del software Mountains Lab.

El proceso inicia el importando los archivos .bcrf que se han generado previamente a través del instrumento WLI. En total, se consideran 18 pistas de desgaste, divididas en 9 que emplean bolas de Acero E52100 como contracuerpo y 9 adicionales con bolas de Alúmina. Cada tipo de bola ha generado tres pistas de desgaste en cada uno de los recubrimientos estudiados.

A continuación, se procede a abrir el software Mountains Lab y se elige la opción “topografía 3D” y “topografía superficial básica”. Posteriormente, se carga el archivo en el software. En una primera etapa del análisis, se aplica la función de “remove forma” y “nivelación”, con el propósito de uniformar la imagen y eliminar las variaciones de color presentes en los alrededores de la pista de desgaste, garantizando así la representación de una superficie plana, como se observa en la Figura 3.11.

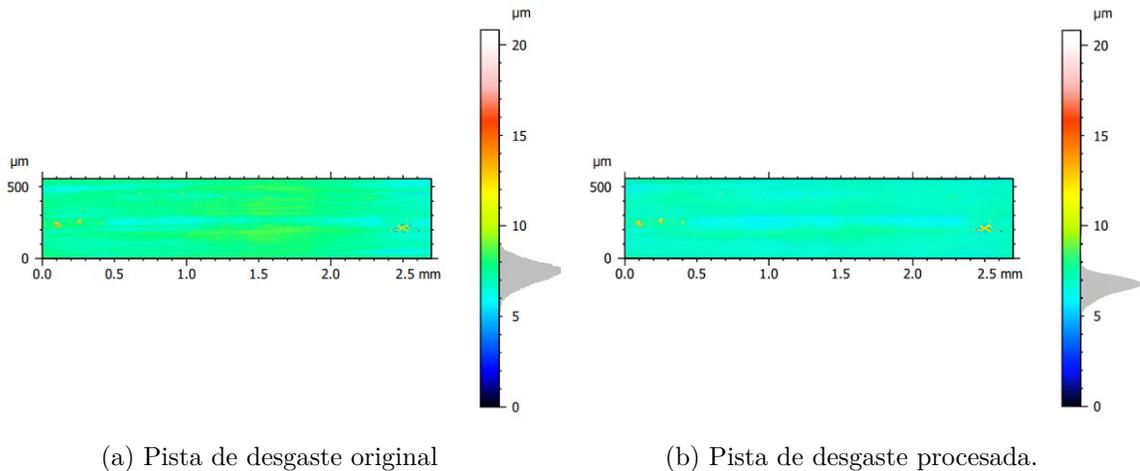


Figura 3.11: Cambio de superficie tras nivelar.

Luego, se reduce la escala de color entre -5 y 5 [μm] y se centra (Figura 3.12).

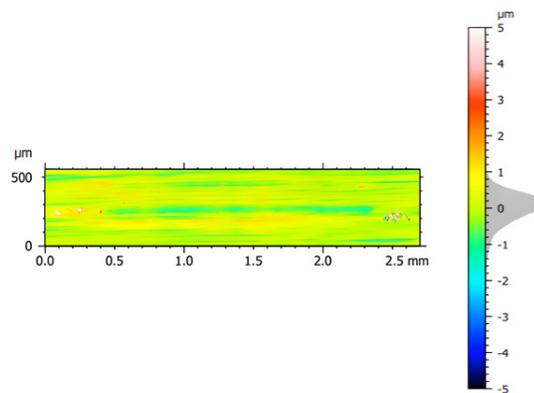


Figura 3.12: Pista de desgaste escalada.

El paso subsiguiente implica el uso de la función de “Volumen de hueco o pico” donde es necesario delimitar la pista de desgaste. En esta etapa, se realiza una comparación con las imágenes SEM obtenidas de cada pista, lo cual mejora la exactitud en la selección, ya que este proceso es de naturaleza manual. Esta etapa proporciona una cuantificación precisa del volumen desgastado durante las pruebas tribológicas.

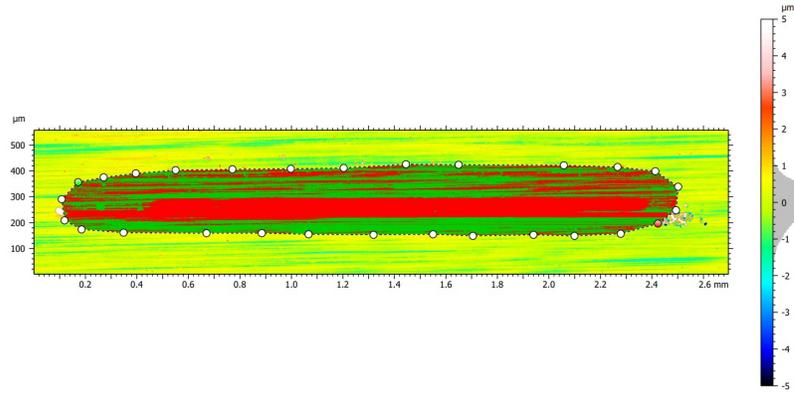


Figura 3.13: Pista de desgaste seleccionada.

Finalmente, se genera un perfil de desgaste de las pistas que han sido procesadas. A continuación, se procede a la selección de la “Superficie de un hueco o un pico”, donde se elige una línea transversal que abarca la totalidad de la imagen. Cabe destacar que al usar los mismos parámetros de profundidad de escaneo en WLI, la longitud de la línea transversal es la misma para cada captura de las pistas de desgaste. Como se observa en la Figura 3.14, la zona de estudio que se observa con color está limitada de acuerdo al ancho de la pista de desgaste, el restante corresponde a los alrededores de la muestra que no sufrieron desgaste. Este proceso proporciona resultados cuantitativos sobre la profundidad del hueco desgastada durante las pruebas.

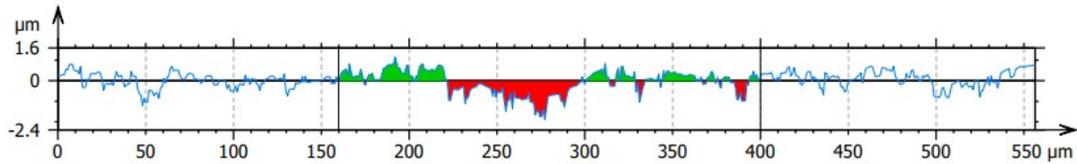


Figura 3.14: Perfil de desgaste y área desgastada.

Capítulo 4

Resultados y Discusiones

4.1. Caracterización del recubrimiento

Antes de llevar a cabo los ensayos tribológicos necesarios para cumplir los objetivos, es esencial que se conozca el estado inicial de los recubrimientos depositados.

4.1.1. SEM

En primer lugar, se empleó un microscopio electrónico de barrido (SEM) para examinar el corte transversal de las muestras 1 y 2. Este proceso permite la observación de los distintos recubrimientos, la interfaz entre ellos y el sustrato, proporcionando información sobre la adhesión y la presencia de porosidad en las partículas.

4.1.1.1. Muestra 1

En la Figura 4.1.a se aprecia el recubrimiento de NiCr-CrC de aproximadamente 80 [μm] de espesor depositado por CS y en la zona inferior el sustrato de acero AISI 4340. En esta imagen, se logran identificar los componentes del recubrimiento, donde las partículas de color gris oscuro corresponden a la fase cerámica compuesta por Carburo de Cromo, mientras que la zona gris claro se relaciona con la fase metálica compuesta por Níquel con Cromo en solución. Es importante destacar que este recubrimiento específico se compone en un 60% de NiCr y en un 40% de CrC.

Además, se pueden observar pequeñas áreas oscuras indican espacios vacíos entre las partículas o porosidades [12]. Estos vacíos denotan una falta de cohesión entre las partículas, lo cual es especialmente evidente en la Figura 4.1.b, donde un acercamiento más detallado permite observar con claridad las porosidades. Al cuantificar dichas porosidades a través de procesamiento de imagen, se tiene al rededor de un 1,7% de porosidad en el recubrimiento en promedio. Se ha observado que este comportamiento en recubrimientos NiCr-CrC se da por falta de plasticidad o deformación de las partículas tras el impacto, ya que al utilizar partículas en estado sólido y mantener temperaturas bajas, se deben considerar adecuadamente las velocidades y temperaturas en las cuales trabajar, tal que se supere la velocidad crítica y exista deformación plástica [12]. Esta condición puede convertirse en un problema al someter la muestra a pruebas de resistencia a la abrasión, ya que el desprendimiento de partículas podría facilitar el desgaste tanto por contacto entre dos cuerpos o por tercer cuerpo.

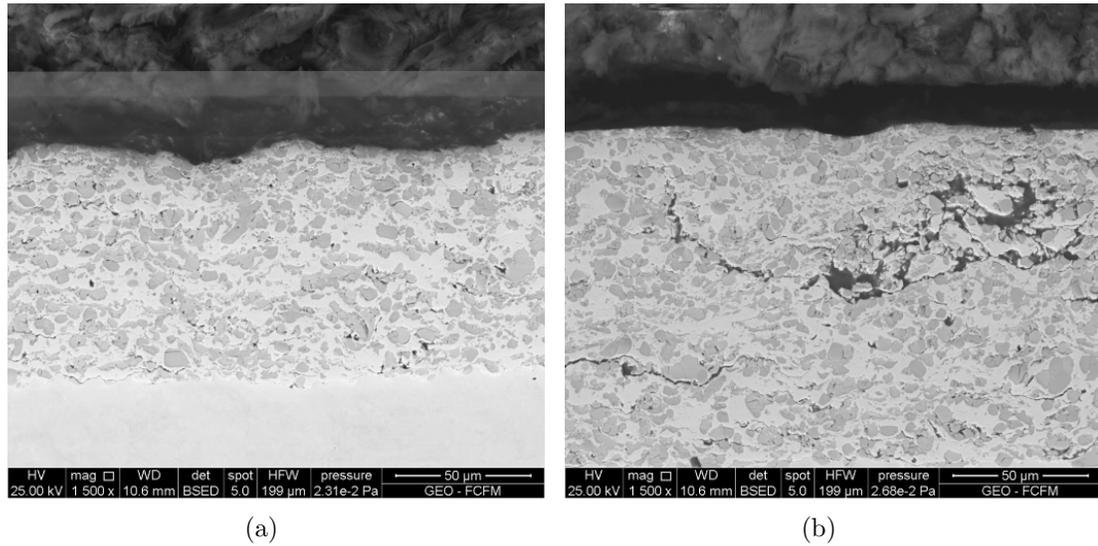


Figura 4.1: Recubrimiento NiCr-CrC por CS

En relación al recubrimiento de Cr, aplicado a través de galvanoplastia y representado en la Figura 4.2, se distingue una capa de aproximadamente $55 \mu\text{m}$ de espesor en contacto con el sustrato. Se observan unos cuantos espacios vacíos en la interfaz con el sustrato, lo cual podría contribuir al desprendimiento de la capa en situaciones de desgaste profundo. Además, se observan microfisuras distribuidas en la superficie transversal, las cuales son una característica inherente del cromado y corresponden al 1,2% del recubrimiento. Al momento de realizar la deposición por galvanoplastia, se producen tensiones internas residuales, las cuales son de tracción y se generan por la descomposición de hidruros. De esta manera, las tensiones aumentan a medida que aumenta el espesor del recubrimiento y se ven aliviadas por las microfisuras observadas, donde al rededor del 95% de ellas tienen una dirección entre 60° y 90° , es decir, presentan una direccionalidad cercana a lo vertical. Estas grietas suelen ser beneficiosas, ya que pueden facilitar la lubricación [19].

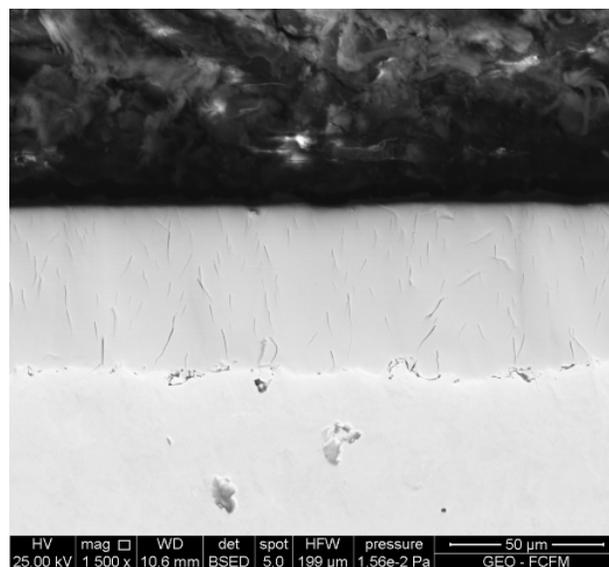


Figura 4.2: Recubrimiento de Cr por Galvanoplastia.

La Figura 4.3.a corresponde a una imagen de la muestra 1, compuesta por los dos recubrimientos antes observados. De este modo, en la parte izquierda se puede apreciar un recubrimiento de Cr depositado mediante galvanoplastia y en la parte derecha un recubrimiento de NiCr-CrC depositado por CS. En la parte inferior de la imagen, se visualiza el sustrato de acero AISI 4340.

Al analizar de cerca la interfaz entre los recubrimientos, es posible conocer el comportamiento al emplear el recubrimiento de NiCr-CrC como una capa de reparación en caso de que el recubrimiento de Cr sufra daños. En la Figura 4.3.b, se aprecia una sólida adhesión entre ambas capas, atribuible a las fuerzas de compresión ejercidas por los recubrimientos depositados por CS. Este fenómeno se debe a las altas velocidades de deposición, donde se produce una deformación plástica en la zona superficial del sustrato al impactar partículas sólidas a baja temperatura, con lo que se evitan fuerzas residuales de tracción [20, 21].

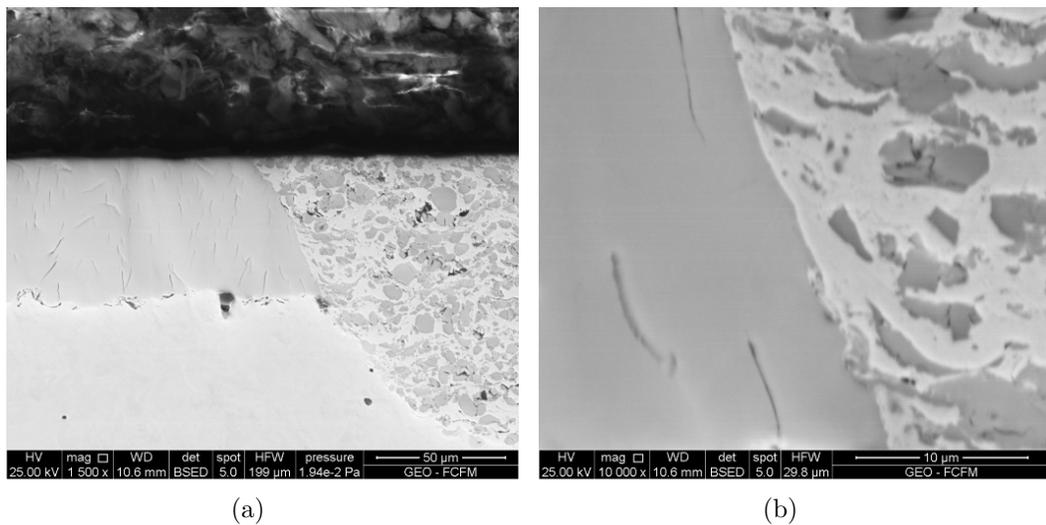


Figura 4.3: Zona de interfaz sustrato (Acero AISI 4340) - recubrimiento, Cr y NiCr-CrC.

4.1.1.2. Muestra 2

Al examinar el recubrimiento de WC-Co-Cr en la Figura 4.4.a, se aprecia una capa de aproximadamente 100 $[\mu\text{m}]$ sobre el sustrato de Acero AISI 4340. También, se observan zonas oscuras en la interfaz entre estos componentes. Este comportamiento puede atribuirse a las fuerzas de tracción generadas por un recubrimiento depositado mediante el proceso de HVOF. Es importante destacar que las partículas depositadas a través de este método de aspersión térmica se encuentran en estado fundido o semifundido, lo que implica un aumento en su temperatura. Cuando estas partículas entran en contacto con un sustrato más frío, el recubrimiento experimenta un proceso de enfriamiento en el cual se contrae y, como resultado, se generan estos espacios vacíos entre ambas capas [22]. Sin embargo, dada la envergadura de las zonas oscuras observados en la interfaz, se presume que estas corresponden a partículas de arena encapsuladas tras el proceso de arenado. Este proceso, que se realiza con el fin de eliminar impurezas o mejorar rugosidad, puede producir este tipo de problemas al ser muy agresivo o al no contar con una correcta limpieza posterior, dificultando la adherencia del recubrimiento.

La Figura 4.4.b se observa una cohesión entre partículas bastante uniforme a lo largo del recubrimiento, ya que la mayor temperatura de las partículas permiten una fusión entre partículas, aumentando el área de contacto entre ellas y asegurando una mejor adherencia, disminuyendo la porosidad [23], formando parte de sólo el 0,1 % del recubrimiento. No obstante, se tiene que en cuanto a la superficie del recubrimiento las partículas se disponen de manera irregular haciendo referencia a una deposición incorrecta o problemas al momento de rectificar la muestra.

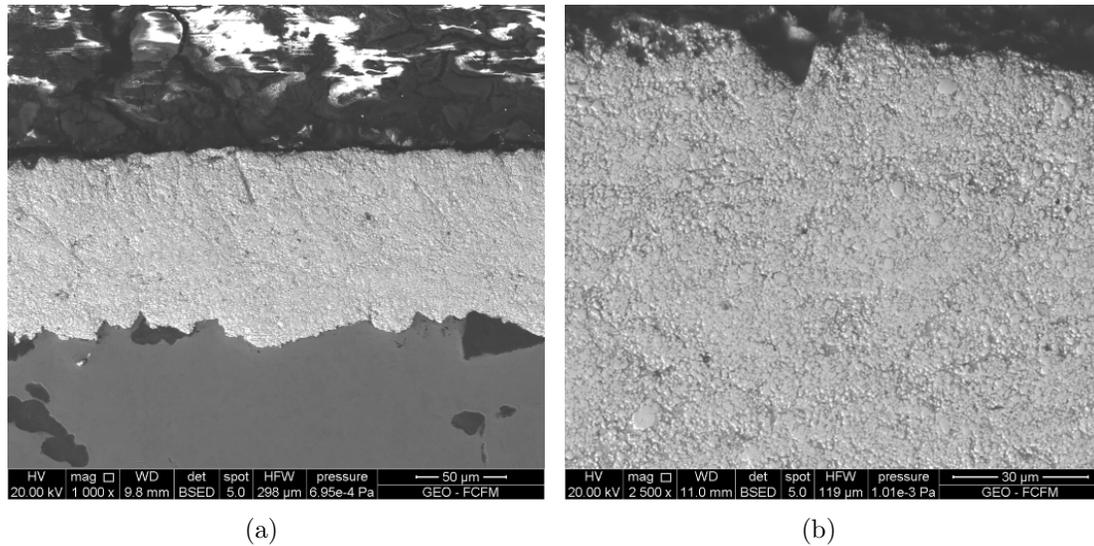


Figura 4.4: Recubrimiento WC-Co-Cr por HVOF

Como se observa en la Figure 4.5, el recubrimiento de la izquierda, correspondiente a NiCr-CrC depositado por CS, muestra una buena adhesión en la interfaz tanto con el sustrato como con el recubrimiento de WC-Co-Cr depositado por HVOF, por lo que se presenta como una buena alternativa para reparador desgastes del recubrimiento de HVOF, presentando una ventaja al ser proyectado a baja temperatura y evitar fuerzas residuales de tensión [20].

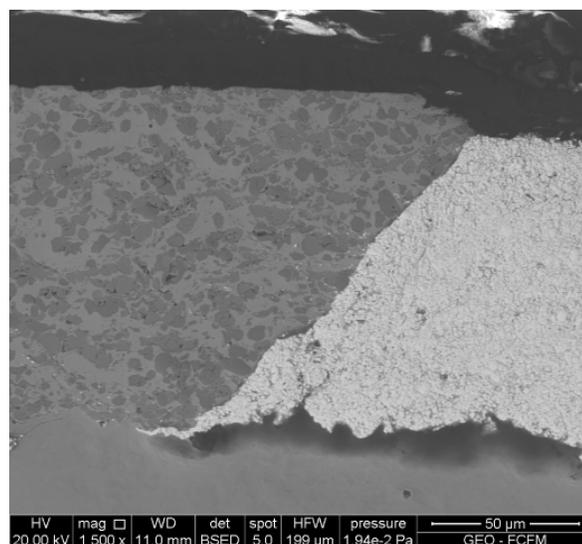


Figura 4.5: Zona de interfaz sustrato (Acero 4340) - recubrimiento, Cr y WC-Co-Cr.

4.1.2. XRD

En segundo lugar, los cuatro recubrimientos, dos correspondientes a cada muestra, fueron analizados por Difracción de rayos X con el fin de conocer la composición de los mismos. De este modo, identificar la presencia de impurezas, óxidos o componentes externos a través del software DIFFRAC.EVA.

4.1.2.1. Muestra 1

A continuación, se observa el patrón de difracción para los recubrimientos de NiCr-CrC depositado por CS y Cr por galvanoplastia, pertenecientes a la muestra 1. En ellos se identifican, gracias al uso de software, los peaks que dan cuenta de los materiales presentes en la muestra.

En la Figura 4.6, correspondiente al recubrimiento de NiCr-CrC, se observa la presencia de fases de Níquel metálico, Carburo de Cromo y Cromo metálico, ya que el NiCr se encuentra en solución sólida.

En cuanto a la Figura 4.7, correspondiente al recubrimiento de Cr, se aprecia sólo la presencia de fases de Cromo metálico.

De este modo, en ambos recubrimientos perteneciente a la muestra 1 se encuentran los componentes correspondientes a los recubrimientos, sin la presencia de ninguna fase de elementos externos.

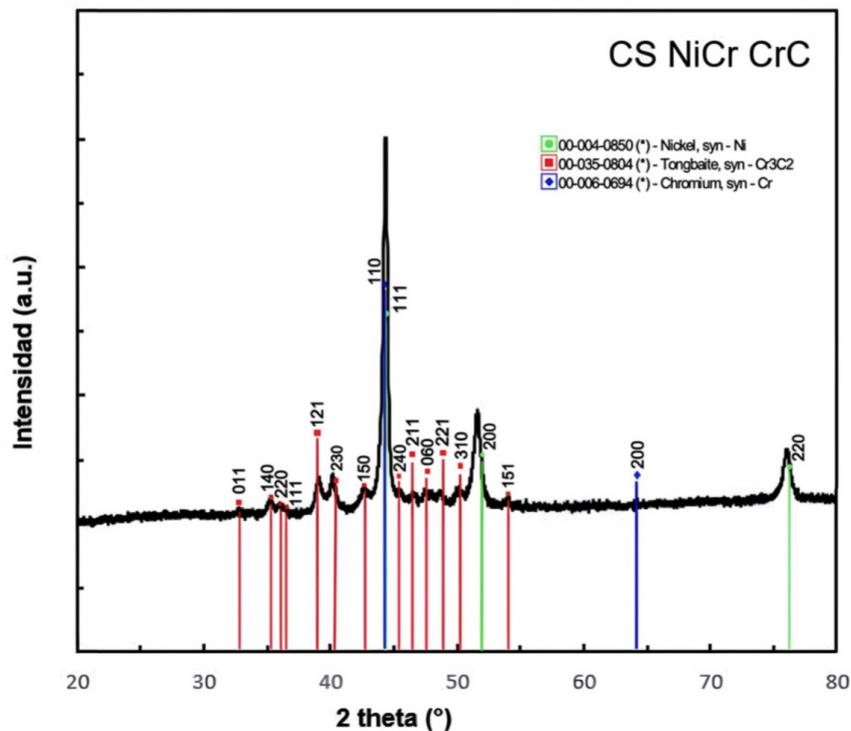


Figura 4.6: Patrón de difracción recubrimiento NiCr-CrC por CS (muestra 1).

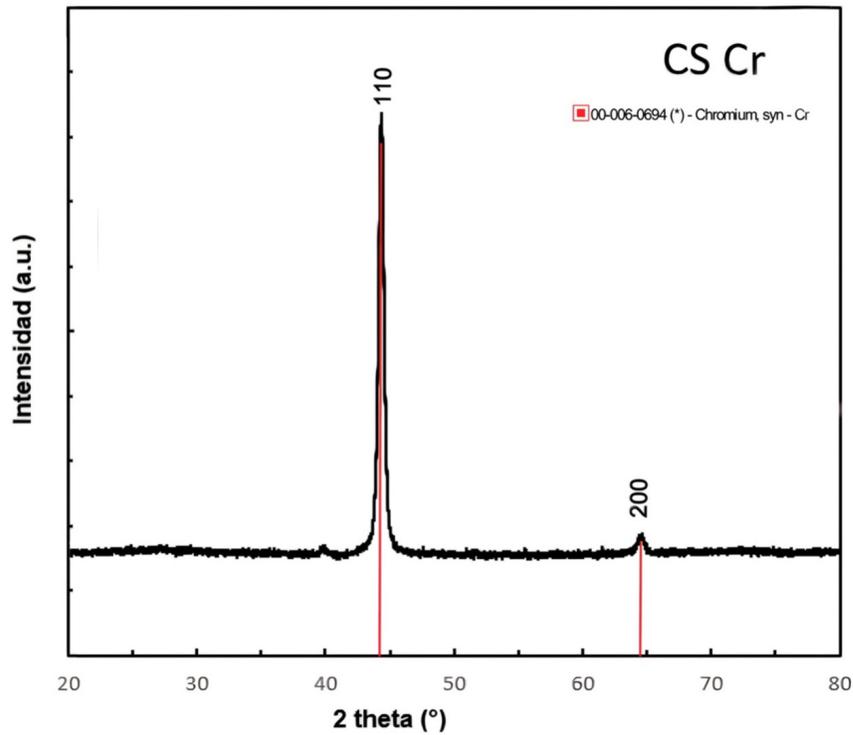


Figura 4.7: Patrón de difracción recubrimiento Cr por galvanoplastia.

4.1.2.2. Muestra 2

En la Figura 4.8, se puede notar que el patrón de difracción del recubrimiento de NiCr-CrC. El recubrimiento aplicado es el mismo que el presente en la muestra 1 (Figura 4.6). En él, no hay presencia fases de ningún elemento externo a los componentes depositados en el recubrimiento, es decir, sólo se hallan fases correspondientes a Níquel metálico, Carburo de Cromo y Cromo metálico.

En el caso de la Figura 4.9, correspondiente al recubrimiento de WC-Co-Cr depositado por HVOF, se observan los elementos que componen el recubrimiento, es decir, Carburo de Tungsteno, Cobalto metálico y Cromo metálico.

Por lo tanto, ambos recubrimientos perteneciente a la muestra 2 presentan los componentes correspondientes a los recubrimientos, sin la presencia de ninguna fase de elementos externos.

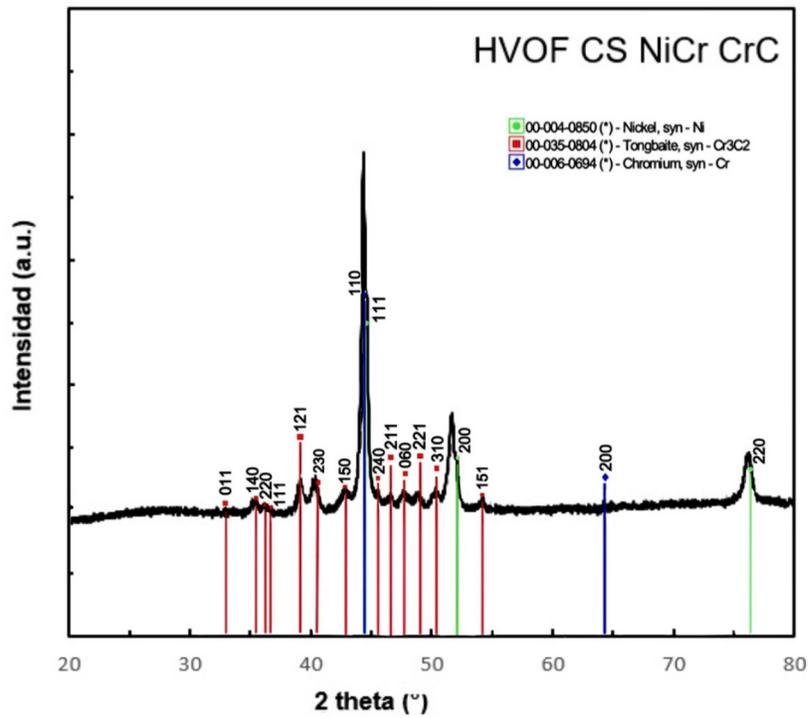


Figura 4.8: Patrón de difracción recubrimiento NiCr-CrC por CS (muestra 2).

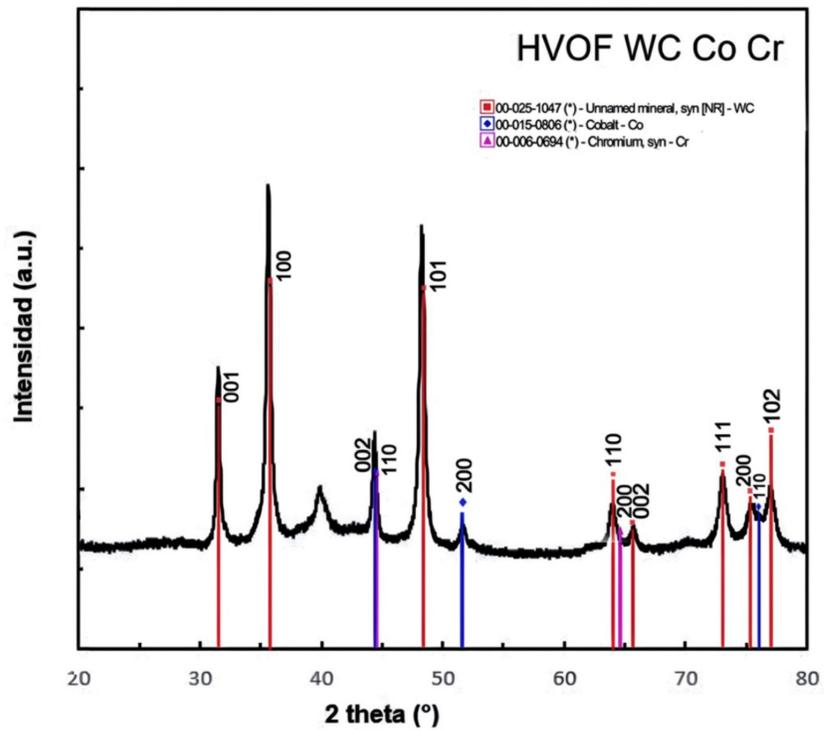


Figura 4.9: Patrón de difracción recubrimiento WC-Co-Cr por HVOF.

4.1.3. Dureza

Finalmente, se comparó la microdureza Vickers entre los diferentes recubrimientos. Al analizar los resultados de las Tablas 4.1, 4.2 y 4.3, se destaca que el recubrimiento de WC-Co-Cr, obtenido mediante el proceso HVOF, exhibe una microdureza promedio de 1857 [HV], considerablemente superior en comparación con los otros dos recubrimientos. El recubrimiento de Cr presenta una microdureza de 927 [HV], mientras que el recubrimiento de NiCr-CrC muestra una microdureza de 676 [HV]. También se observa que los tres recubrimientos muestran una desviación estándar menor, con resultados bastante homogéneos, por lo que se consideran aplicaciones uniformes.

L1 [μm]	L2 [μm]	Microdureza [HV]
36,77	37,45	673
35,72	36,92	703
36,34	37,54	679
37,35	38,31	648
36,81	37,19	677
Prom		676
Desv. est		19,6

Tabla 4.1: Microdureza Vickers recubrimiento NiCr-CrC por CS.

L1 [μm]	L2 [μm]	Microdureza [HV]
31,65	31,19	939
31,52	32,03	917
30,78	31,31	962
31,22	32,55	912
31,72	32,30	905
Prom		927
Desv. est		23,3

Tabla 4.2: Microdureza Vickers recubrimiento Cr por Galvanoplastia.

L1 [μm]	L2 [μm]	Microdureza [HV]
22,14	22,54	1856
22,17	23,24	1798
22,49	23,44	1759
21,32	22,15	1962
20,65	23,42	1908
Prom		1857
Desv. est		81,7

Tabla 4.3: Microdureza Vickers recubrimiento WC-Co-Cr por HVOF.

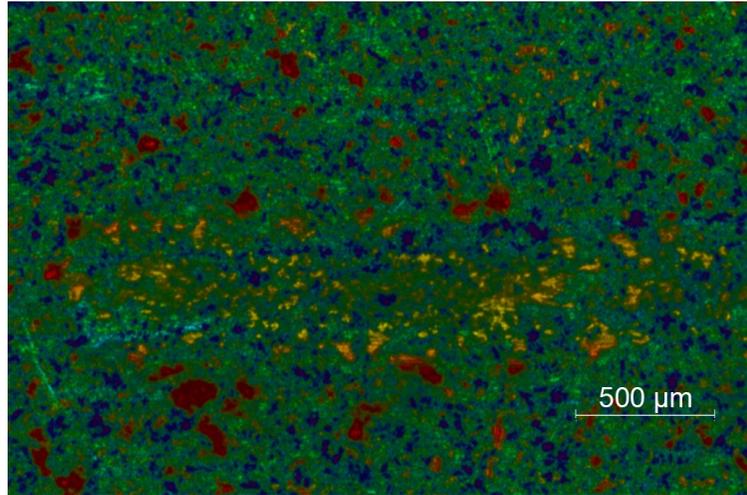
La dureza del recubrimiento de NiCr-CrC lo posiciona como una buena alternativa de reparación o reemplazo del acero cromado, que posee una dureza similar. En el caso del WC-Co-Cr se presenta una dureza excepcional que se aleja del acero cromado referencial. Esto se atribuye al uso Cermet en su composición, combina las propiedades sobresalientes de ambas fases. La fase cerámica aporta dureza, mientras que la fase metálica cumple la función de aglutinante, evitando la fractura al distribuir las cargas, lo que incrementa la resistencia y tenacidad del recubrimiento [22].

4.2. Ensayos tribológicos

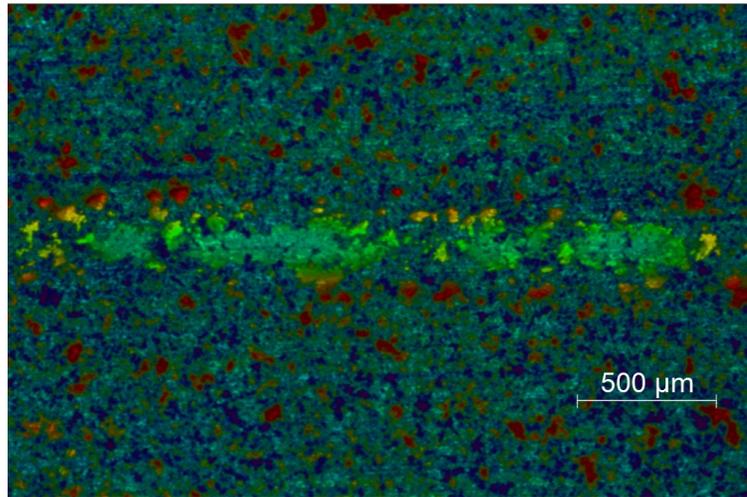
4.2.1. Parámetros experimentales

Para comenzar con las pruebas tribológicas, es esencial definir los parámetros experimentales. Siguiendo los estándares del laboratorio, se inician con valores bajos para el tiempo y la fuerza normal, aumentando gradualmente hasta que se detecte la presencia de una pista de desgaste adecuada. Para que esta pueda ser analizada debe ser visible en el WLI.

La selección del material del contracuerpo es un elemento crucial en los resultados obtenidos. Inicialmente, se empleó una fuerza de 0.2 [N] durante 15 [min] con un recorrido de 2.5 [mm] a 2.5 [$\frac{mm}{s}$], utilizando una bola de Acero E52100 como contracuerpo. Sin embargo, los resultados iniciales no mostraron pistas visibles. Siguiendo el procedimiento, se aumentó la fuerza normal, en intervalos de 0.2 [N], hasta llegar a 0.8 [N] y el tiempo del ensayo se extendió a 30 [min]. Al no observar mejoras significativas, se optó por cambiar a una bola de Alúmina, un material más duro. La Figura 4.10 ilustra claramente que este cambio en el contracuerpo mejoró sustancialmente la visibilidad de las pistas de desgaste. Para asegurar resultados confiables, se incrementó la fuerza a 1 [N] y se extendió el tiempo de ensayo a 60 [min], manteniendo el mismo paso. Con estas modificaciones, se lograron pistas de desgaste adecuadas para el análisis.



(a) Pista no observable, bola Acero E52100



(b) Pista observable, bola Alúmina

Figura 4.10: Pista de desgaste recubrimiento WC-Co-Cr, 0.8 [N], 30 [min].

Tras establecer los parámetros experimentales para el uso de la bola de Alúmina como contracuerpo, se decidió llevar a cabo pruebas adicionales utilizando una bola de Acero E52100 bajo los mismos parámetros. Estos resultados pueden servir como punto de comparación en el análisis. Es esencial considerar que los recubrimientos estudiados pueden entrar en contacto con diferentes materiales en sus aplicaciones prácticas.

Como resultado, se realizaron un total de 18 ensayos, con tres pruebas realizadas para cada recubrimiento, tanto con la bola de Alúmina como con la de Acero E52100.

4.2.2. Contracuerpo Acero E52100

A continuación, se presentan los resultados del coeficiente de fricción (COF) utilizando una bola de acero E52100 de 4 [mm] como contracuerpo. En la Figura 4.11, se representan tres curvas que corresponden al COF promedio obtenido a partir de tres ensayos realizados para cada tipo de recubrimiento.

Inicialmente, se observa un aumento en el COF que eventualmente alcanza un estado de estabilidad, aunque este tiempo varía entre los distintos recubrimiento. En particular, el recubrimiento de NiCr-CrC es el primero en alcanzar la estabilidad a los $t = 100$ [s], seguido por el recubrimiento de Cr a los $t = 300$ [s], y finalmente, el recubrimiento de WC-Co-Cr se estabiliza a los $t = 800$ [s]. Durante este período de estabilización, conocido como “running-in”, la bola está en contacto con las partículas en las capas superiores, pero con el tiempo, estas partículas comienzan a desgastarse hasta que se dan las condiciones superficiales óptimas para que se genere un COF estable [24]. El comportamiento de las tres curvas es igual y suele ser característico de un par metálico seco y no lubricado, con presencia de algunas impurezas menores o contaminantes que son desgastadas rápidamente provocando un aumento de la fricción [25].

En este caso, se considera el recubrimiento de WC-Co-Cr es el que más demora en conseguir una estabilidad, así mismo es aquel que presenta la superficie más irregular según lo visto en SEM. De este modo, el área de contacto entre la bola y la superficie va a variar a medida que se tenga contacto con las partículas superficiales durante el movimiento. Es importante considerar que el área de contacto entre los cuerpos aumenta tanto al desgastar las partículas superficiales como al desgasta la bola que actúa como contracuerpo.

El COF alcanzado por los recubrimientos de Cr y WC-Co-Cr son bastante similares una vez estabilizados. Sin embargo el recubrimiento de NiCr-CrC es algo mayor. Esto indica que la fricción entre los dos cuerpos es más intensa, lo que puede significar un mayor desgaste para la muestra.

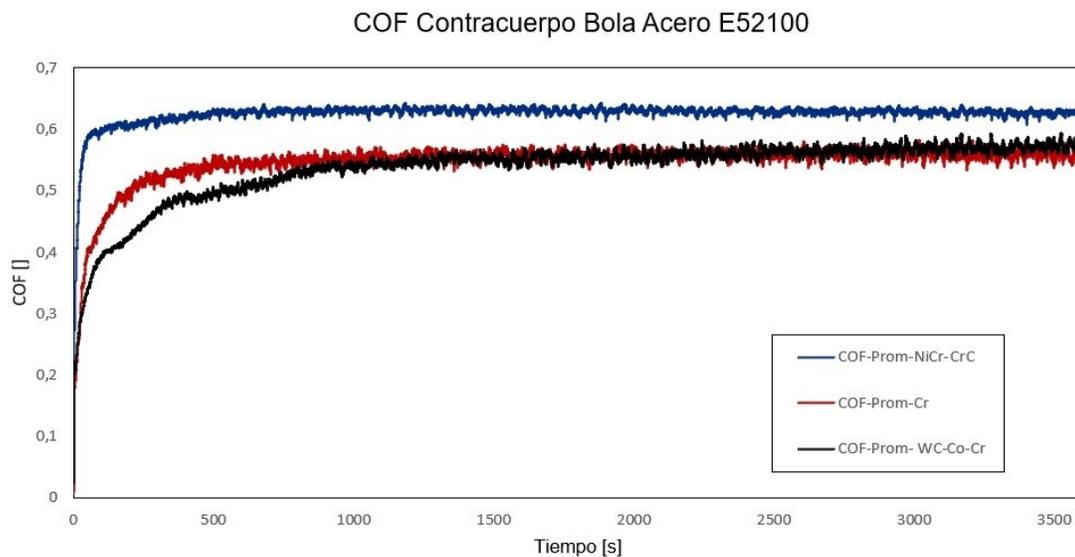


Figura 4.11: COF de los distintos recubrimientos con Bola de Acero E52100.

4.2.3. Contracuerpo de Alúmina

En la Figura 4.12, se presentan tres curvas correspondientes al COF de los recubrimientos cuando se emplea una bola de Alúmina como contracuerpo. Indicando que con 1 [hr] de

ensayo, los COF obtenidos en los tres recubrimientos se encuentran entre 0,4 y 0,5.

Al observar el comportamiento del recubrimiento de WC-Co-Cr, se observa un incremento mantenido del COF durante el ensayo. Este comportamiento puede ser un indicador de abrasión por tercer cuerpo, ya que la liberación de partículas duras del recubrimiento contribuye a una fricción más intensa entre la bola y el recubrimiento. [24]

En la curva correspondiente al recubrimiento de NiCr-CrC, se aprecia una disminución en el COF, lo cual podría indicar un menor desgaste a medida que avanza el ensayo. Un COF decreciente suele estar asociado con un desgaste menos agresivo, lo que sugiere una mayor resistencia a la abrasión del recubrimiento de NiCr-CrC. El COF es alto hasta que las asperezas más agudas desaparecen y la superficie se vuelve más suave. La posterior caída del COF, se puede relacionar con el alisamiento de la superficie, la texturización de la misma por cizallamiento o por el desarrollo de una película de transferencia por cizallamiento, que permita un mejor deslizamiento. Esta consiste en una capa fina transferida desde uno de los cuerpos al otro, disminuyendo la fricción entre ambos. [25–27].

En cuanto al comportamiento de la curva roja, correspondiente al Cr depositado por galvanoplastia, difiere de los otros recubrimientos. Sin embargo, este es un patrón usual de COF cuando no se aplica ningún tipo de lubricación sobre el recubrimiento de Cr [28]. Esta curva muestra un pico inicial atribuido al desgaste de las partículas superficiales. Como se dijo anteriormente, la superficie de este recubrimiento es irregular y es desgastada durante el contacto con la bola de Alúmina en la fase de “running-in”. Pero al contrario de estabilizarse, el COF disminuye rápidamente, esta baja se puede atribuir a las mismas razones que la disminución de COF en el recubrimiento de NiCr-CrC. Posteriormente, se produce un aumento en el COF y una estabilización, esto se relaciona con un la generación de una capa de partículas desprendidas (“escombros”) o con una transferencia excesiva de material [26].

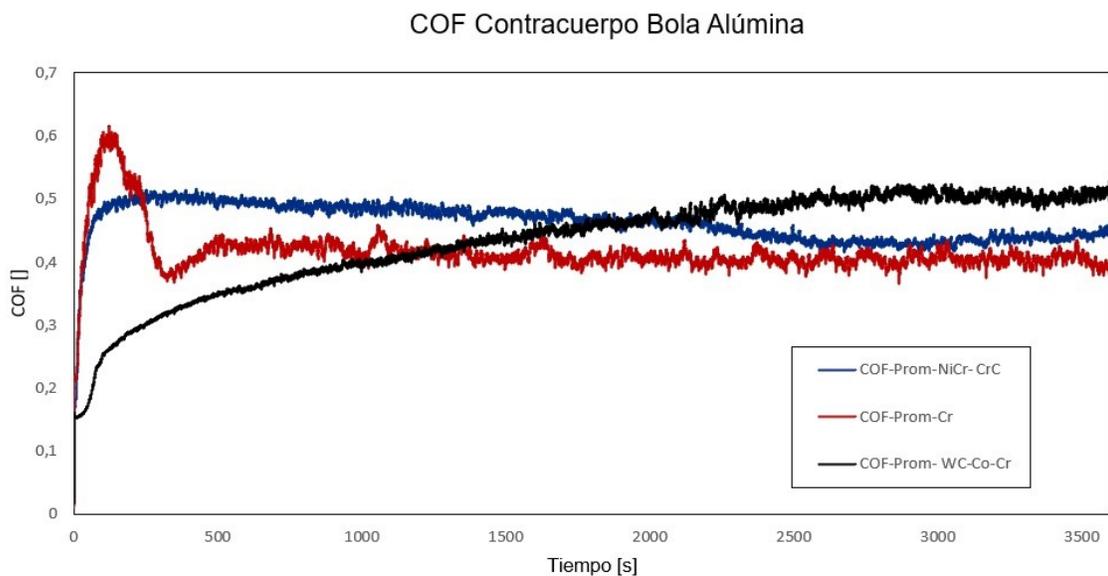


Figura 4.12: COF de los distintos recubrimientos con Bola de Alúmina.

4.3. Análisis de Desgaste y Características Tribológicas

4.3.1. SEM

Se escogió una pista de desgaste representativa para cada recubrimiento con una bola específica y fueron caracterizadas por SEM. Al usar distintos contracuerpos se puede observar que las pistas presentes en las Figuras 4.13, 4.14 y 4.15 son diferentes, denotando distinta cantidad de material al rededor de la pista de desgaste y distinto desgaste en el centro del recorrido del contracuerpo.

Al examinar las superficies sometidas a desgaste, se aprecia en las Figuras 4.13 y 4.14 que los recubrimientos de NiCr-CrC y Cr muestran superficies similares, siendo el depósito de CS ligeramente más rugoso. Es importante destacar que estas muestras han sido rectificadas, lo que implica un proceso de desgaste superficial para nivelarlas, revelando así las porosidades existentes. Esto concuerda con las observaciones iniciales de la caracterización de los recubrimientos, donde se evidenció una menor cohesión entre partículas en el depósito por CS.

En cuanto a la superficie del recubrimiento de WC-Co-Cr, presentada en la Figura 4.15, se nota una deposición más rugosa, como se había observado previamente en las muestras encapsuladas. Sin embargo, la baja porosidad observada en el área transversal indica una buena cohesión entre partículas.

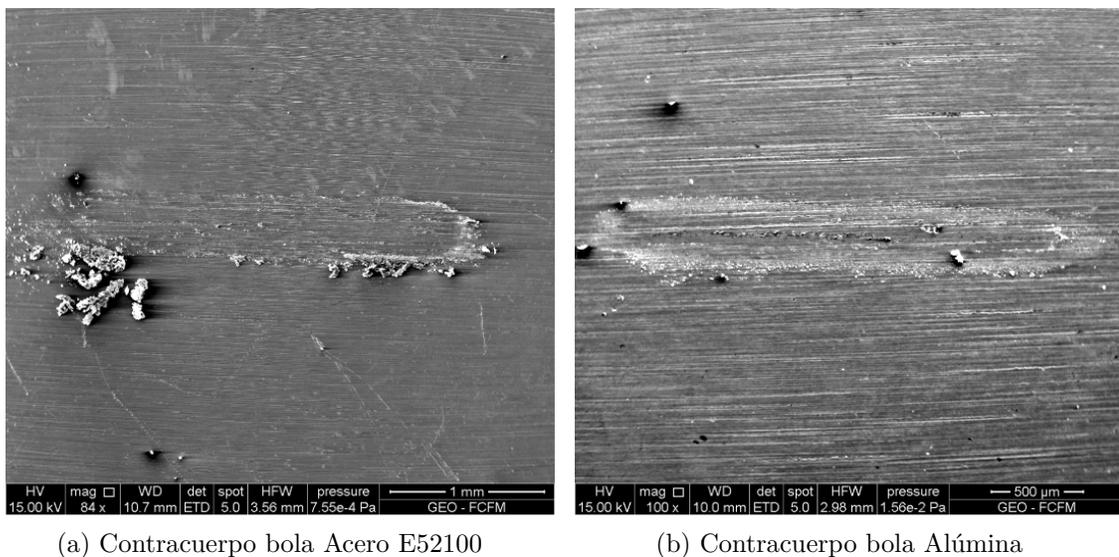
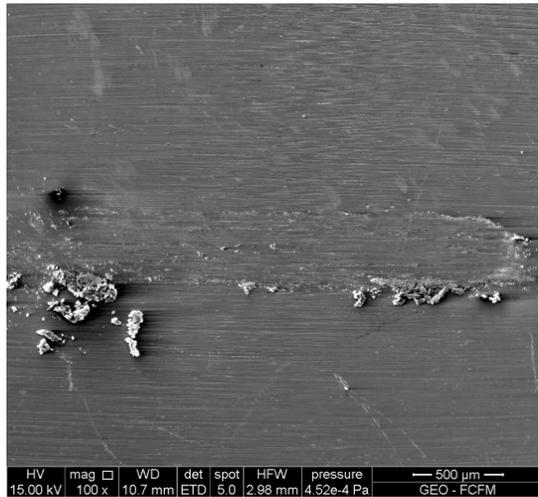
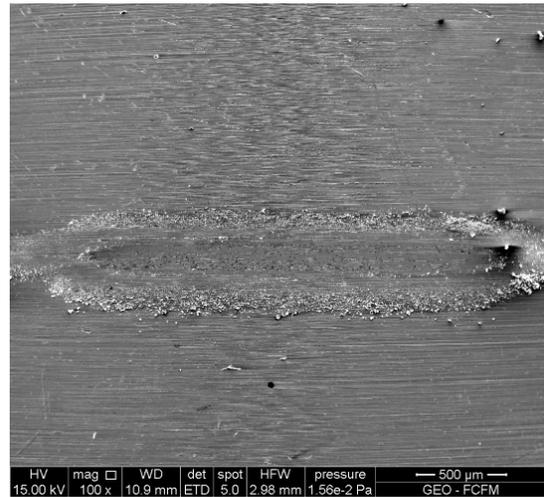


Figura 4.13: Pista en recubrimiento de NiCr-CrC por CS

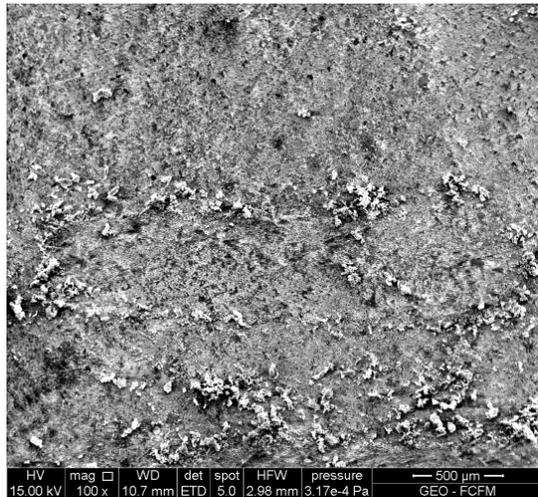


(a) Contracuerpo bola Acero E52100

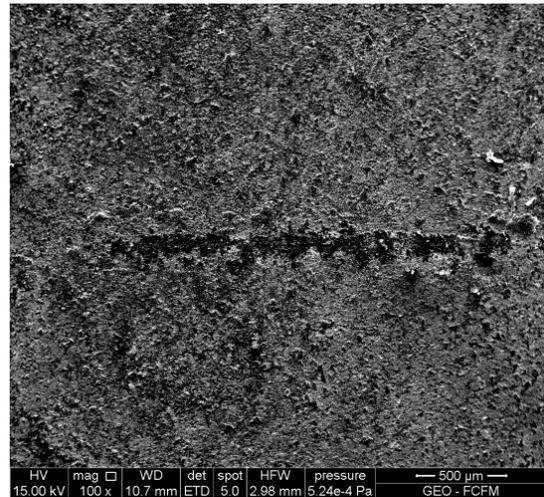


(b) Contracuerpo bola Alúmina

Figura 4.14: Pista en recubrimiento de Cr por Galvanoplastia



(a) Contracuerpo bola Acero E52100



(b) Contracuerpo bola Alúmina

Figura 4.15: Pista en recubrimiento de WC-Co-Cr por HVOF

4.3.2. EDS

El equipo SEM cuenta con la implementación del método de caracterización mediante espectroscopia de rayos X (EDS), que permite determinar la composición de la muestra en un punto específico. En esta instancia, se utiliza para identificar el material de las partículas desprendidas que se visualizan en las diferentes pistas. Esto permite determinar si se ha producido abrasión por tercer cuerpo o desgaste en el contracuerpo.

En la Figura 4.16 se observa la acumulación de material en un costado de la pista de desgaste. Al analizar este punto, se observa que la composición de las partículas presentes, como se detalla en la Tabla 4.4, corresponde en gran medida al material desprendido de la bola de Acero E52100 y no al recubrimiento. Específicamente, más del 80 % corresponde a Oxígeno y Hierro, lo que sugiere la formación de óxidos durante la prueba. Por lo tanto, se

presume que prácticamente todo el desgaste que pueda ocurrir se debe al desgaste de la bola al tener contacto con el recubrimiento, con poco indicio de desgaste en el recubrimiento y una participación mínima de la abrasión por tercer cuerpo, siendo el porcentaje en masa de Carbono y Cromo inferior al 20%. En este caso, al desgastarse la bola de Acero, aumenta la superficie de contacto entre ambos cuerpos, lo cual concuerda con el aumento inicial de la curva COF presentada anteriormente.

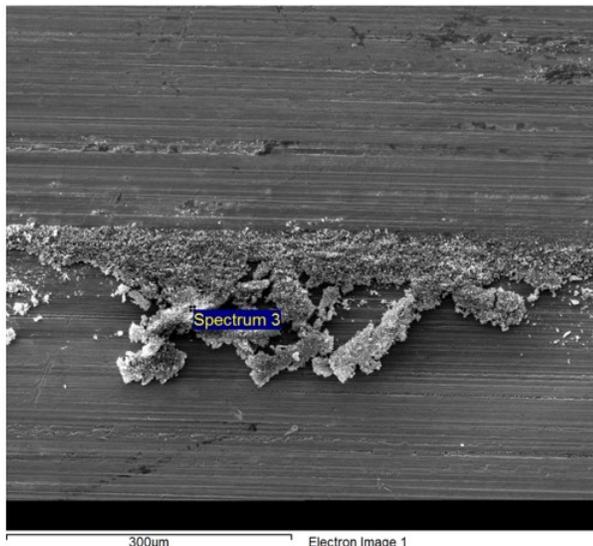


Figura 4.16: Punto de medición para EDS pista recubrimiento NiCr-CrC, bola E52100.

Elemento	Masa [%]
O	46.61
Fe	35.62
C	12.8
Cr	4.96
Total	100

Tabla 4.4: Componentes en partículas, recubrimiento NiCr-CrC, bola Acero E52100.

En el caso de utilizar una Bola de Alúmina, también se observa el desprendimiento de material al final de la pista de desgaste, como se puede notar en la Figura 4.17. Los elementos presentes en esta acumulación corresponden a la composición del recubrimiento (Tabla 4.5), por lo que no hay desgaste en la Bola de Alúmina. La presencia de Oxígeno y Cromo expresa la formación de Óxido de Cromo, y en conjunto con la presencia de Níquel y Carbono se evidencia el desgaste del recubrimiento. También, se debe considerar que las porosidades observadas anteriormente en la caracterización inicial del recubrimiento NiCr-CrC contribuyen al desprendimiento de partículas. De este modo, se considera posible que en este ensayo haya ocurrido abrasión por tercer cuerpo, dado que la presencia de partículas duras de cromo podrían desgastar la fase de NiCr del recubrimiento.

De igual manera, como se mencionó anteriormente, la disminución del COF obtenido durante el ensayo indica que, luego de la remoción de la capa irregular superior del recubrimiento, hubo un cambio en las propiedades del recubrimiento. Con el comportamiento del COF, se infiere que en caso de existir abrasión por tercer cuerpo esta sería de carácter menor ya que con el tiempo el desgaste fue menos agresivo.

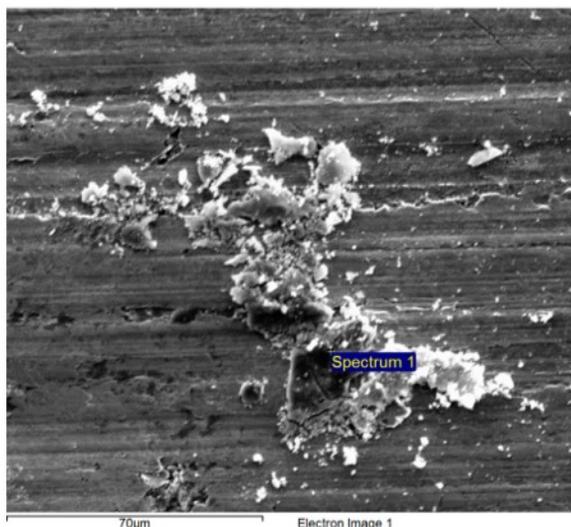


Figura 4.17: Punto de medición para EDS pista recubrimiento NiCr-CrC, bola Alúmina.

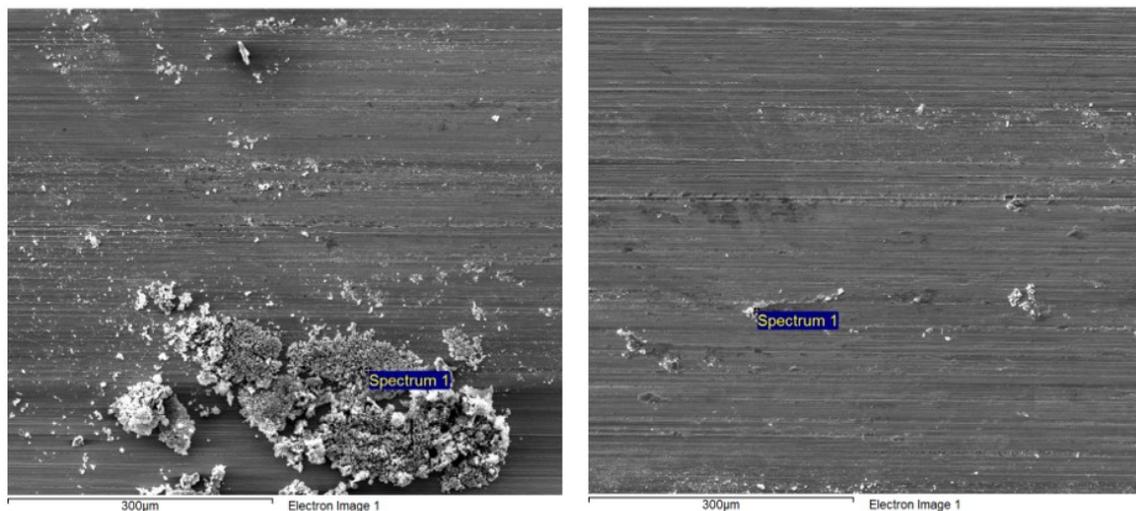
Elemento	Masa [%]
O	42.83
Cr	25.16
Ni	22.61
C	9.40
Total	100

Tabla 4.5: Componentes en partículas, recubrimiento NiCr-CrC, bola Alúmina

Continuando con el análisis del recubrimiento de Cr por galvanoplastia, se llevó a cabo el ensayo utilizando una bola de Acero E52100. En este caso, se observa una acumulación de partículas tanto en los laterales como en el centro de la pista, por lo que se seleccionaron dos puntos de medición para el análisis mediante EDS, como se aprecia en las Figuras 4.18.a y 4.18.b.

La Tabla 4.6 revela que las partículas en los laterales están mayormente compuestas por Óxido de Cromo, con un porcentaje en masa de Cromo y Oxígeno que supera el 95%. Además, se indica que las partículas engarzadas en el centro de la pista están compuestas en su mayoría por Óxido de Hierro, indicando que las partículas desprendidas de la bola se alojaron en la pista durante el movimiento cíclico de la bola sobre el recubrimiento.

Por lo tanto, se evidencia desgaste tanto en el recubrimiento como en la bola de Acero. Considerando los resultados obtenidos en el centro de la pista, se considera poco probable la participación de la abrasión por tercer cuerpo, lo cual concuerda con los resultados del COF, ya que se alcanza y mantiene una estabilidad a lo largo del ensayo.



(a) Partículas acumuladas al lateral de la pista.

(b) Partículas al centro de la pista

Figura 4.18: Puntos de medición para EDS pista recubrimiento Cr, bola Acero E52100

Elemento	(a) Masa [%]	(b) Masa [%]
Cr	64.00	6.57
O	32.56	39.56
Fe	2.58	45.00
C	0.86	8.87
Total	100	100

Tabla 4.6: Componentes en partículas, recubrimiento Cr, bola Acero E52100

El ensayo realizado con bola de Alúmina para el recubrimiento de Cr por galvanoplastia, mostró acumulación de partículas a los laterales de la pista, por lo que se consideró como punto de medición para EDS. Del mismo modo, se consideró un segundo punto de medición en el centro de la pista en búsqueda de partículas engarzadas. En este caso, como indica la Tabla 4.7 la composición es prácticamente la misma, mostrando la presencia de Cromo, Carbono y, en menor medida, Oxígeno. No se considera la formación de Óxidos durante este ensayo ni partículas engarzadas a lo largo de la pista. Además, no hubo desgaste de parte de la bola de Alúmina.

Es importante destacar que el Carbono presente en este análisis se encuentra sobredimensionado, dada la dificultad del equipo para capturar los cambios de energía de este material. De este modo, lo que se encuentra realmente en esta muestra es Cromo.

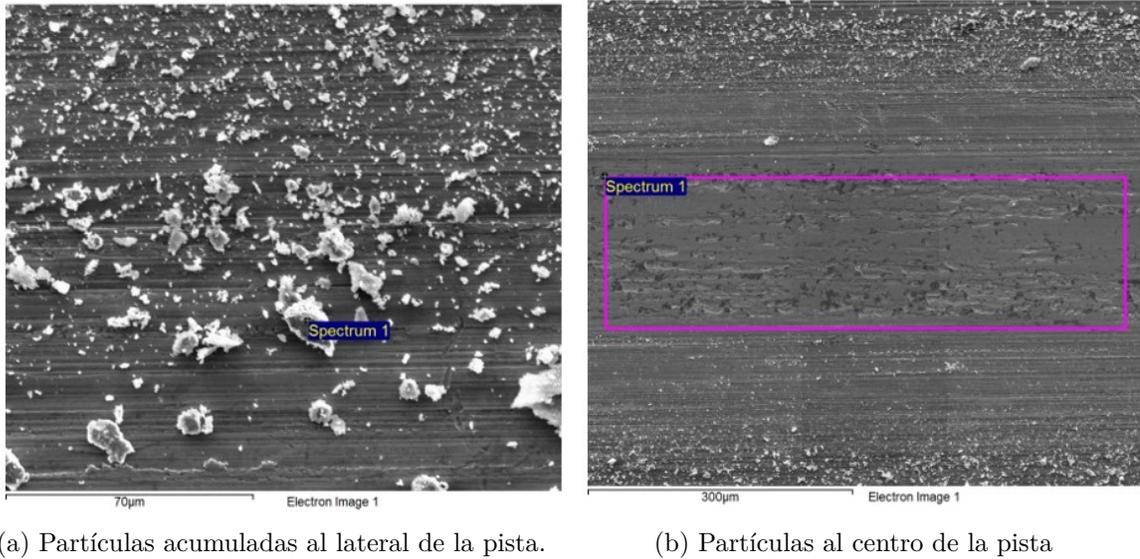


Figura 4.19: Puntos de medición para EDS pista recubrimiento Cr, bola Alúmina

Elemento	(a) Masa[%]	(b) Masa[%]
Cr	64.46	64.50
C	33.96	33.93
O	1.58	1.56
Total	100	100

Tabla 4.7: Componentes en partículas, recubrimiento Cr, bola Alúmina

El ensayo del recubrimiento de WC-Co-Cr con una bola de Acero E52100 revela una notoria acumulación de partículas alrededor de la pista de desgaste y sobre la superficie rugosa del material, como se muestra en la Figura 4.20. Al analizar la composición de estas partículas, se observa que más del 90 % de ellas corresponde a Hierro y Oxígeno, indicando la formación de Óxido de Hierro, proveniente del material de la bola utilizada. Esto sugiere desgaste de la bola, resultando en un aumento en la superficie de contacto entre los dos materiales durante el ensayo, coincidiendo con el COF presentado previamente para este recubrimiento.

Además, como se puede apreciar en la Tabla 4.8, se detecta en menor proporción la presencia de Carbono. El cual, como se mencionó anteriormente, en algunos casos se sobredimensiona por configuración del equipo. En cuanto a la presencia de Níquel, se considera que el uso de la misma bola durante los ensayos pudo causar la presencia de material correspondiente a otro recubrimiento. Dadas las bajas concentraciones de porcentaje en masa, es poco probable que contribuyan de manera significativa al desgaste superficial. Con ello se deduce que la abrasión por tercer cuerpo no se presenta durante el ensayo, lo cual explica la estabilidad del COF.

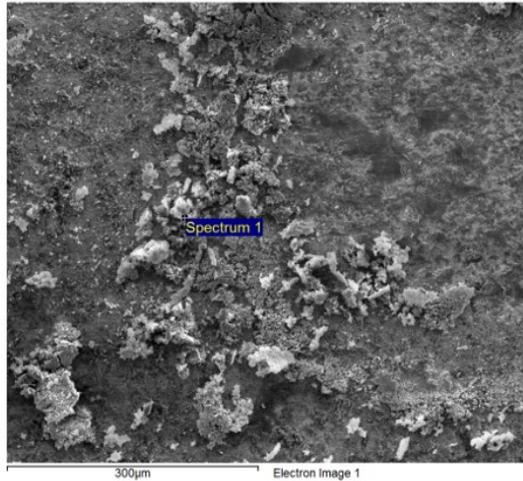


Figura 4.20: Punto de medición para EDS pista recubrimiento WC-Co-Cr, bola Acero E52100.

Elemento	Masa [%]
Fe	60.1
O	30.32
C	4.16
Cr	2.89
Ni	2.53
Total	100

Tabla 4.8: Componentes en partículas, recubrimiento WC-Co-Cr, bola Acero E52100.

Finalmente, el ensayo en el recubrimiento de WC-Co-Cr por HVOF con contracuerpo bola de Alúmina, presenta una menor cantidad de material acumulado en los extremos de la pista de desgaste. Como se ilustra en la Figura 4.21, la rugosidad de la superficie hace difícil notar las partículas desprendidas. Sin embargo, se consideró un punto de medición para EDS en las partículas desprendidas en el extremo de la pista de desgaste.

En la Tabla 4.9 se muestra un porcentaje en masa de Oxígeno y Cromo superior al 75 % lo que indica la formación de Óxido de Cromo. También, se tiene en menor medida Carbono, Tungsteno, Hierro y, por primera vez, Aluminio. De este modo, se tiene desgaste del recubrimiento y, en mucha menor medida, de la bola. Considerando los resultados de COF obtenidos para este recubrimiento, se considera la abrasión por tercer cuerpo muy posible ya que cada vez había un desgaste mas agresivo, sin llegar a estabilizarse.

En cuanto a la presencia de Hierro, se considera posible transferencia de material durante la manipulación de la muestra o el desarrollo del ensayo. Igualmente, se debe destacar que el desgaste de la bola de Alúmina es prácticamente despreciable. Sin embargo, al existir en esta ocasión se demuestra la dureza del material, anteriormente comprobada en el ensayo de microdureza Vickers.

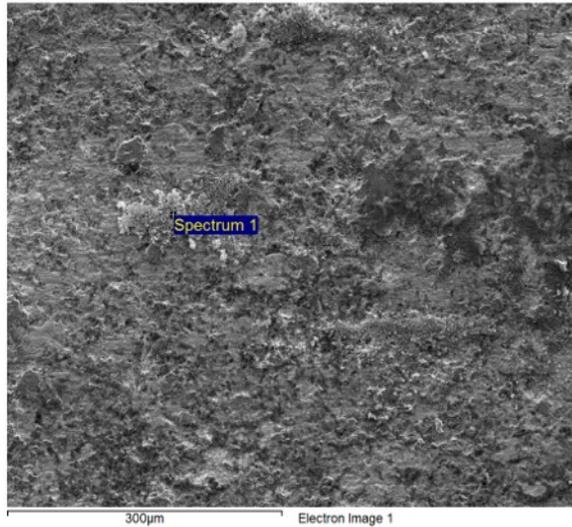


Figura 4.21: Punto de medición para EDS pista recubrimiento WC-Co-Cr, bola Alúmina.

Elemento	Masa [%]
O	45.40
Cr	31.07
C	10.15
W	8.57
Fe	4.14
Al	0.68
Total	100

Tabla 4.9: Componentes en partículas, recubrimiento WC-Co-Cr, bola Alúmina

4.3.3. Profundidades máximas de desgaste

Para analizar el material removido durante los ensayos se utilizó el software Mountains Lab donde se obtuvieron valores cuantitativos de profundidad de hueco y volumen desgastado en la pista.

Como se aprecia en la Figura 4.22, la profundidad máxima alcanzada fue menor al utilizar la bola de Acero E52100, teniendo en cuenta el desgaste de la bola en todos los ensayos. A pesar de ello, se produjo desgaste en las muestras, siendo el recubrimiento de NiCr-CrC depositado por CS el que presentó la mayor profundidad máxima promedio de hueco, alcanzando 1,5 [μm]. Seguido por el recubrimiento de Cr por galvanoplastia que exhibió una profundidad de alrededor de 1,3 [μm], y el de WC-Co-Cr por HVOF que mostró una profundidad de 1,2 [μm].

Al analizar estos resultados junto con los obtenidos en pruebas anteriores, se observa que

el recubrimiento de NiCr-CrC tenía una mayor porosidad, lo que hacía más probable el desprendimiento de partículas y por lo tanto, la presencia de huecos en la superficie. Además, la caracterización por EDS reveló la presencia de cromo y carbono, lo que sugiere que la acción cíclica de la bola de Acero causó algo de desgaste. En cuanto a los recubrimientos de Cr y WC-Co-Cr, se notó una profundidad similar debido a su baja porosidad.

Es importante destacar que la rugosidad superficial del recubrimiento depositado por HVOF y el desgaste de la bola de Acero E52100 obligaron a repetir el análisis mediante el software en varias ocasiones. La profundidad máxima de hueco está sujeta a un punto referencial en el plano detectado por el software. Sin embargo, la irregularidad superficial generó variaciones a lo largo del recubrimiento, mostrando profundidades y volúmenes poco representativos. Este problema pudo mejorarse utilizando herramientas de nivelación con las que se fijó un plano referencial correcto.

En relación al ensayo con bola de Alúmina, se destaca que el recubrimiento de WC-Co-Cr registró la mayor profundidad. La caracterización por EDS y el COF obtenido sugieren la presencia de abrasión por tercer cuerpo. Dado que este recubrimiento es el más duro, las partículas desprendidas generaron una profundidad significativa de 2,6 μm . A pesar de la baja porosidad en el área transversal, la superficie irregular facilita que las partículas continúen desgastando la superficie.

Por otro lado, el recubrimiento NiCr-CrC, con una porosidad más elevada, exhibió una menor profundidad que el recubrimiento de WC-Co-Cr, alcanzando una profundidad máxima promedio de 2,4 μm . Esto se puede atribuir a un cambio en el tribosistema, ya sea por alisamiento de la superficie o por formación de capas de transferencia entre los cuerpos, como se observó en la caracterización por EDS y en el análisis del COF. Respecto al recubrimiento de Cr, su profundidad fue de 2,0 μm , resultado de una buena cohesión entre partículas y la excesiva transferencia o desprendimiento de material, que contribuyen a un menor desgaste [26, 27].

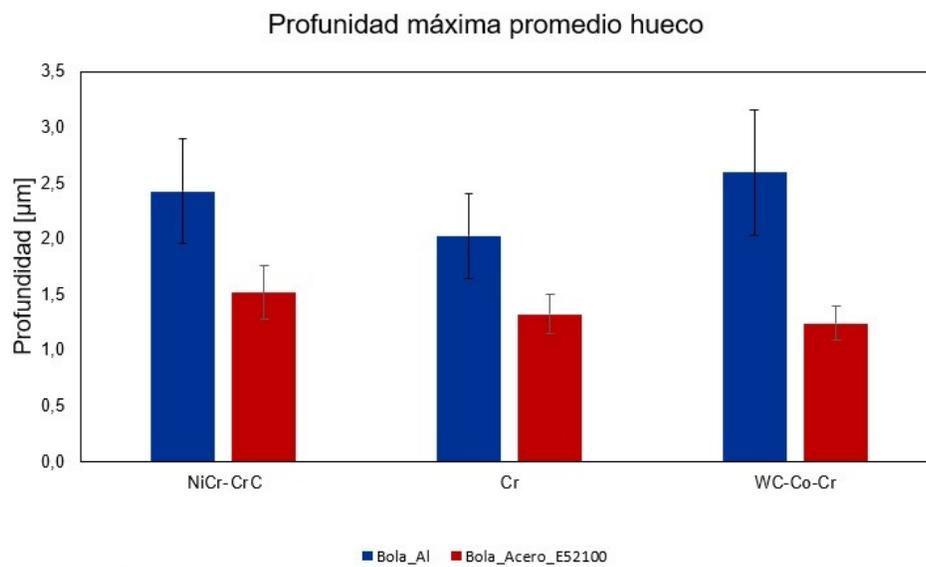


Figura 4.22: Profundidad máxima de hueco promedio.

En cuanto a los errores relativos a la profundidad máxima promedio, se observan variaciones similares cuando se emplea la bola de Acero E52100. Dado que este material fue el principal componente desgastado durante los ensayos, se considera que la variación es de carácter menor. En los casos en que se utilizó la bola de Alúmina, se nota un mayor error en el recubrimiento de WC-Co-Cr, lo cual concuerda con la presencia de una superficie irregular. En los recubrimientos de NiCr-CrC y Cr, donde el COF se logró estabilizar, la variación depende de la cantidad de material desprendido. En este contexto, tiene sentido que el recubrimiento de NiCr-CrC presente un mayor error, ya que los posibles problemas de cohesión entre sus partículas pueden afectar la cantidad de partículas desprendidas y, por ende, las profundidades observadas.

4.3.4. Volúmenes de desgaste

A lo largo del desarrollo de los ensayos tribológicos se utilizaron los mismos parámetros para todos los recubrimientos, tal que las tasas de desgaste son proporcionales a los volúmenes desgastados que serán analizados.

El volumen promedio desgastado de los diferentes recubrimientos, presente en la Figura 4.23, exhibe una distribución distinta a las profundidades máximas observadas. Tanto en los ensayos con la bola de Acero E52100 como con la de Alúmina, el recubrimiento de WC-Co-Cr presenta el mayor volumen desgastado, seguido por Cr y, finalmente, NiCr-CrC.

Como se dijo anteriormente, la bola de Acero fue desgastada por cada uno de los recubrimientos y de esta forma la superficie de contacto aumentó. Como el recubrimiento de WC-Co-Cr presenta una mayor dureza y una menor profundidad hueco, es posible notar que el mayor del volumen de desgaste esta relacionado con el aumento del ancho de la pista dado el desgaste de la bola, considerando la excepcional dureza del recubrimiento.

El ensayo con bola de Acero en el recubrimiento de Cr, indica un volumen desgastado menor al del recubrimiento de WC-Co-Cr. Según el análisis EDS, se observó que hubo desgaste del recubrimiento y no sólo de la bola, como en los otros casos. Por lo tanto, se considera que el volumen promedio desgastado esta dado tanto por el aumento de la zona de contacto por el desgaste de la bola, como por el desgaste en el recubrimiento dada la profundidad antes vista.

Por otro lado, el recubrimiento de NiCr-CrC, que exhibió la mayor profundidad de hueco al utilizar la bola de Acero como contracuerpo, se observa el menor volumen desgastado. Esto indica que el desgaste, correspondiente a la profundidad antes vista, no fue uniforme en toda la pista, sino que se produjo en puntos específicos donde las partículas se desprendieron en las zonas de porosidad. Además, se descarta la posibilidad de que estas partículas causaran un desgaste significativo, ya que al examinar el COF no se observan indicios notables de abrasión por tercer cuerpo.

Los errores para la bola de Acero son bajos en el caso de NiCr-CrC y Cr, pero para WC-Co-Cr son mayores dado que el ancho de la pista de desgaste depende de cuan desgastada fue la bola y esto, a su vez, depende del contacto con la superficie la cual es rugosa y varía en cada ensayo.

Al utiliza la bola de Alúmina, la cual prácticamente no fue desgastada, se tienen resulta-

dos fiables en los que el único factor que afecta el volumen representado es el desgaste del recubrimiento.

En primer lugar, se evidencia un mayor volumen desgastado en el recubrimiento de WC-Co-Cr. Como se señaló previamente, este recubrimiento también exhibe la mayor profundidad máxima de hueco, atribuible a la abrasión por tercer cuerpo. Este fenómeno provoca un desgaste amplificado, ya que las partículas duras desprendidas o los óxidos generados se alojan entre los dos cuerpos en movimiento relativo [13].

Siguiendo con el recubrimiento de Cr, se observa un volumen de desgaste menor en comparación con el anterior y la menor profundidad de hueco. Según lo visto en el comportamiento relativamente estable del coeficiente de fricción (COF), se genera un desgaste menor en términos de profundidad, ya que las partículas se incrustan o compactan en la pista y genera una fricción menos agresiva.

Finalmente, en el recubrimiento de NiCr-CrC, que presenta una profundidad de hueco casi tan alta como el recubrimiento de WC-Co-Cr, se observa el menor volumen desgastado. El desgaste provocado por la bola en las zonas de porosidad fue localizado, y la intensidad de la fricción fue menor en las zonas correctamente depositadas.

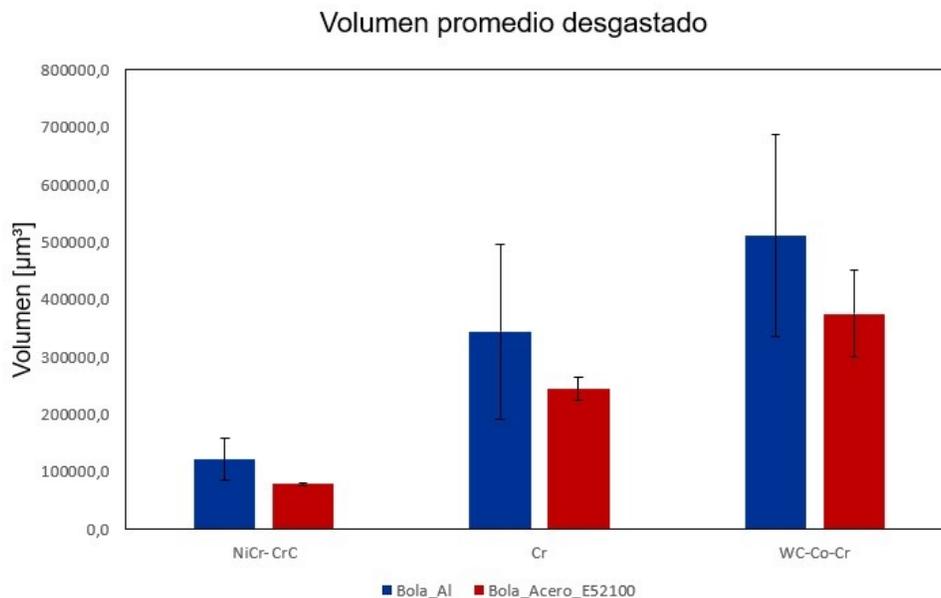


Figura 4.23: Volumen promedio de hueco.

Los errores mayores observados para WC-Co-Cr están relacionado a la variación de partículas desprendidas y el desgaste generado por tercer cuerpo o a la bola. En el caso de Cr depende de las partículas que son desprendidas por la naturaleza frágil del recubrimiento. Es menor el error en el caso de NiCr-CrC ya solo hay desprendimiento localizado y no se genera abrasión por tercer cuerpo permanente.

Capítulo 5

Conclusiones

A lo largo de este trabajo de título, se lograron cumplir satisfactoriamente los objetivos planteados. Siguiendo la metodología establecida, se procedió a la caracterización de las microestructuras de los recubrimientos de NiCr-CrC depositados por Cold Spray (CS), Cr por galvanoplastia y WC-Co-Cr por Proyección Térmica de Alta Velocidad (HVOF).

Los resultados indicaron que el CS se destaca como la opción más efectiva para la restauración de recubrimientos de Cr, gracias a sus esfuerzos residuales de compresión, asegurando una mejor adherencia a los recubrimientos previamente presentes en el sustrato. También, se notó la presencia de porosidades al utilizar CS y la proyección de partículas en estado sólido en lugar de partículas fundidas, como en el HVOF. Por ello, este último demostró tener una menor porosidad y mayor densidad en el recubrimiento, a pesar de exhibir una superficie irregular.

En el ensayo de microdureza Vickers, se determinó que el recubrimiento más duro es el de HVOF, seguido por Cr y, finalmente, el de CS, con estos dos últimos mostrando semejanza en esta propiedad.

Durante las pruebas tribológicas, se establecieron parámetros aplicables a ensayos con dos tipos de bolas distintas. El coeficiente de fricción (COF) obtenido luego del ensayo en el tribómetro con la bola de Acero E52100, indicó un proceso de estabilización o “running-in” más prolongado para el recubrimiento de WC-Co-Cr, debido al aumento del contacto con las asperezas de la capa superior. En los ensayos con la bola de Alúmina, se identificaron indicios de abrasión por tercer cuerpo en el recubrimiento de WC-Co-Cr y el cambio del tribosistema en el recubrimientos de NiCr-CrC y Cr, evidenciada por la disminución del COF.

Al estudiar SEM/EDS de las pistas de desgaste, se encontró una mayor acumulación de material en los ensayos con la bola de Acero E52100, perteneciendo este material a la bola usada como contracuerpo. La mayoría del desgaste en estas pruebas fue atribuible al Acero E52100, a excepción del recubrimiento de Cr, que también sufrió desgaste por el contacto con la bola durante el ensayo. En cambio, al usar la bola de Alúmina, se observó la producción de óxidos y desprendimiento de partículas superficiales, evidenciando la abrasión por tercer cuerpo antes inferida en el recubrimiento de WC-Co-Cr.

En el análisis de la profundidad y volumen de desgaste para evaluar la resistencia a la

abrasión de los recubrimientos, se concluyó que el recubrimiento de WC-Co-Cr tiene el mayor volumen de desgaste en ambos ensayos, seguido por Cr y finalmente el recubrimiento de NiCr-CrC. Esta diferencia se atribuye principalmente a la abrasión por tercer cuerpo, generando mayores profundidades en el caso del depósito por HVOF. El recubrimiento de Cr, considerado frágil, permite el desprendimiento de partículas que genera un desgaste constante. En el recubrimiento de NiCr-CrC, se concluye que no hay un gran volumen de desgaste, ya que se descartó la acción de partículas externas que generaran abrasión por tercer cuerpo y poca profundidad de desgaste en las zonas correctamente depositadas.

Cabe destacar que el análisis de desgaste en las pruebas con la bola de Acero E52100 presentaron resultados comparativos poco representativos, debido al desgaste variable de la bola en cada ensayo. Por otro lado, la bola de Alúmina, al no desgastarse, permitió un análisis más preciso del desgaste de las pistas. Además, se sugiere considerar que la acumulación excesiva de material puede afectar el análisis superficial de las pistas, dificultando la definición de un plano referencial.

Para obtener resultados más confiables, se recomienda prestar atención a la contaminación de las muestras al utilizar la misma bola en distintos recubrimientos, asegurando un análisis de composición por EDS más preciso. Además, mejorar la calidad de la deposición del recubrimiento en las muestras o llevar a cabo un mayor número de ensayos puede contribuir de manera significativa a elevar la calidad de los resultados obtenidos. Se sugiere también investigar a mayor profundidad los cambios en el tribosistema que se producen durante los ensayos tribológicos, lo cual permitirá un mejor entendimiento de sus comportamientos ante el desgaste y su interacción con otros materiales.

Finalmente, tras realizar la evaluación tribológica y comparación del desgaste por abrasión de los tres recubrimientos, se considera que el recubrimiento de NiCr-CrC depositado por CS es el más adecuado tanto para restaurar recubrimientos como para reemplazar el acero cromado. Con semejantes durezas y un mejor rendimiento en cuanto a la resistencia a la abrasión al ser un recubrimiento de cermet, se posiciona como la mejor opción.

Es relevante tener en cuenta que las técnicas de aspersión térmica, aunque más precisas, son más costosas, y su implementación a gran escala puede no ser inmediata. No obstante, es vital reconocer y, en la medida de lo posible, reemplazar los procedimientos que representan riesgos para la salud. Con este propósito en mente, se espera que futuras investigaciones continúen explorando el uso de materiales cermets en aplicaciones que demanden excelentes propiedades mecánicas y se avance a un futuro industrial más compatible con la conservación del buen estado de salud.

Bibliografía

- [1] Poyner, J. (1987). *Electroplating. Special Interest Model Books*.
- [2] Liang, A., Ni, L., Liu, Q. & Zhang, J. (2013). *Structure characterization and tribological properties of thick chromium coating electrodeposited from a Cr(III) electrolyte. Surface and Coatings Technology*, 218, 23-29. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.12.021>
- [3] REACH, Regulation (EC) No 1907/2006 - REACH - Safety and Health at Work - EU-OSHA (2006)
- [4] Yin, S., Cavaliere, P., Aldwell, B., Jenkins, R., Liao, H., Li, W. & Lupoi, R. (2018). *Cold spray additive manufacturing and repair: Fundamentals and applications. Additive Manufacturing*, 21, 628-650. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.017>
- [5] Bergmann, C. P. & Vicenzi, J. (2011). *Protection against Erosive Wear Using Thermal Sprayed Cermet: A Review. Protection against Erosive Wear Using Thermal Sprayed Cermet*, 1-77. https://doi.org/10.1007/978-3-642-21987-0_1
- [6] *Electroquímica. (s/f). Margaritalezama. https://margaritalezama.wixsite.com/margaritalezama/copia-de-polimeros*
- [7] Dennis, J. K., & E, T. (2013). *Nickel and Chromium Plating. Woodhead Publishing*.
- [8] Zou, Y. (2021). *Cold Spray Additive Manufacturing: Microstructure Evolution and Bonding Features. Accounts of Materials Research*, 2(11), 1071-1081. <https://doi.org/10.1021/accountsmr.1c00138>
- [9] Bedoya, J., Cinca, N. & Guilemany, J. M. (2013). *Recubrimientos micro/nanoestructurados de aleaciones ligeras mediante proyección fría para la protección y reparación de componentes de elevado valor añadido: Estado del arte. Revista de Metalurgia*, 49(3), 223-236. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.1237>
- [10] Singh, H., Sidhu, T. & Kalsi, S. (2012). *Cold spray technology: future of coating deposition processes. Frattura ed Integrità Strutturale*, 6(22), 69-84. <https://doi.org/10.3221/igf-esis.22.08>
- [11] Zahiri, S. H., Fraser, D., Gulizia, S. & Jahedi, M. (2006). *Effect of Processing Conditions on Porosity Formation in Cold Gas Dynamic Spraying of Copper. Journal of Thermal Spray Technology*, 15(3), 422-430. <https://doi.org/10.1361/105996306x124437>
- [12] Fernandez, R. & Jodoin, B. (2017). *Effect of Particle Morphology on Cold Spray Deposition of Chromium Carbide-Nickel Chromium Cermet Powders. Journal of Thermal Spray Technology*, 26(6), 1356-1380. <https://doi.org/10.1007/s11666-017-0580-3>
- [13] Gómez, M. A. (2005). *Caracterización de las Propiedades Tribológicas de los Recubrimientos Duros [Memoria de Doctorado]. Universidad de Barcelona*.

- [14] Tribometer. (2020, mayo 13). Rtec Instruments; Rtec Instruments, INC. https://rtec-instruments.com/tribometer/universal-tribometer/?gclid=Cj0KCQjwtJKqBhCaARIsAN_yS_kGBhyO1irvQ7T9VXdSg_68zCrMEP_pEAuagoUA_exOncppt68GmNMMAjapEALw_wcB
- [15] Schmit, J., Creath, K., & Wyant, J. C. (2007). Surface profilers, multiple wavelength, and white light interferometry. En *Optical Shop Testing* (pp. 667–755). John Wiley Sons, Inc.
- [16] Nan, Y., & Zhong-Lin, W. (Eds.). (2006). *Handbook of microscopy for nanotechnology (2005a ed.)*. Springer.
- [17] Faraldos, M., & Goberna, C. (2011). *Técnicas de análisis y caracterización de materiales*. CSIC Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- [18] Salman Ali, A. (2020). Application of nanomaterials in environmental improvement. En *Nanotechnology and the Environment*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.91438>
- [19] Nascimento, M. P., Souza, R. C., Miguel, I. M., Pigatin, W. L., & Voorwald, H. J. C. (2001). Effects of tungsten carbide thermal spray coating by HP/HVOF and hard chromium electroplating on AISI 4340 high strength steel. *Surface Coatings Technology*, 138(2–3), 113–124. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)01148-8](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)01148-8)
- [20] Luzin, V., Spencer, K., & Zhang, M.-X. (2011). Residual stress and thermo-mechanical properties of cold spray metal coatings. *Acta Materialia*, 59(3), 1259–1270. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.10.058>
- [21] Ghelichi, R., Bagherifard, S., MacDonald, D., Fernandez-Pariente, I., Jodoin, B., & Guagliano, M. (2014). Experimental and numerical study of residual stress evolution in cold spray coating. *Applied Surface Science*, 288, 26–33. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.09.074>
- [22] Bergmann, C. P., & Vicenzi, J. (2014). Protection against erosive wear using thermal sprayed cermet: A review (2011a ed.). Springer.
- [23] Ji, G.-C., Li, C.-J., Wang, Y.-Y., Li, W.-Y. (2006). Microstructural characterization and abrasive wear performance of HVOF sprayed Cr₃C₂-NiCr coating. *Surface Coatings Technology*, 200(24), 6749–6757. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.10.005>
- [24] Wang, Q. J., & Chung, Y.-W. (Eds.). (2013b). *Encyclopedia of tribology / encyclopedia of tribology (2013a ed.)*. Springer.
- [25] Blau, P. J. (2005). On the nature of running-in. *Tribology International*, 38(11–12), 1007–1012. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.07.020>
- [26] Blau, P. J. (2019). *Friction science and technology: From concepts to applications, second edition (2a ed.)*. CRC Press.
- [27] Ma, C., Wang, S. C., Wang, L. P., Walsh, F. C., & Wood, R. J. K. (2013). The role of a tribofilm and wear debris in the tribological behaviour of nanocrystalline Ni-Co electrodeposits. *Wear: An International Journal on the Science and Technology of Friction Lubrication and Wear*, 306(1–2), 296–303. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.121>

- [28] Wu, H., Jia, F., Zhao, J., Huang, S., Wang, L., Jiao, S., Huang, H., & Jiang, Z. (2019). Effect of water-based nanolubricant containing nano-TiO₂ on friction and wear behaviour of chrome steel at ambient and elevated temperatures. *Wear: An International Journal on the Science and Technology of Friction Lubrication and Wear*, 426–427, 792–804. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.11.023>
- [29] Gupta, S., Filimonov, D., Zaitsev, V., Palanisamy, T., & Barsoum, M. W. (2008). Ambient and 550° C tribological behavior of select MAX phases against Ni-based superalloys. *Wear: An International Journal on the Science and Technology of Friction Lubrication and Wear*, 264(3–4), 270–278. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.03.011>

Anexo A

Detalle COF Pruebas Tribológicas

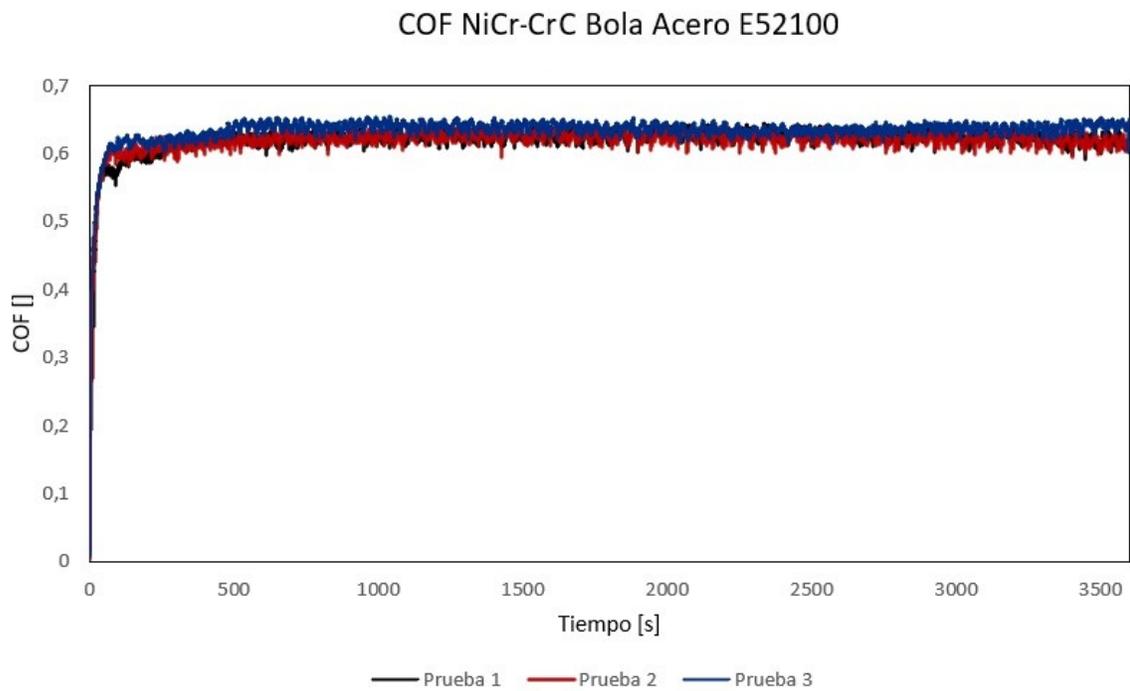


Figura A.1: COF recubrimiento NiCr-CrC, bola Acero E52100.

COF Cr Bola Acero E52100

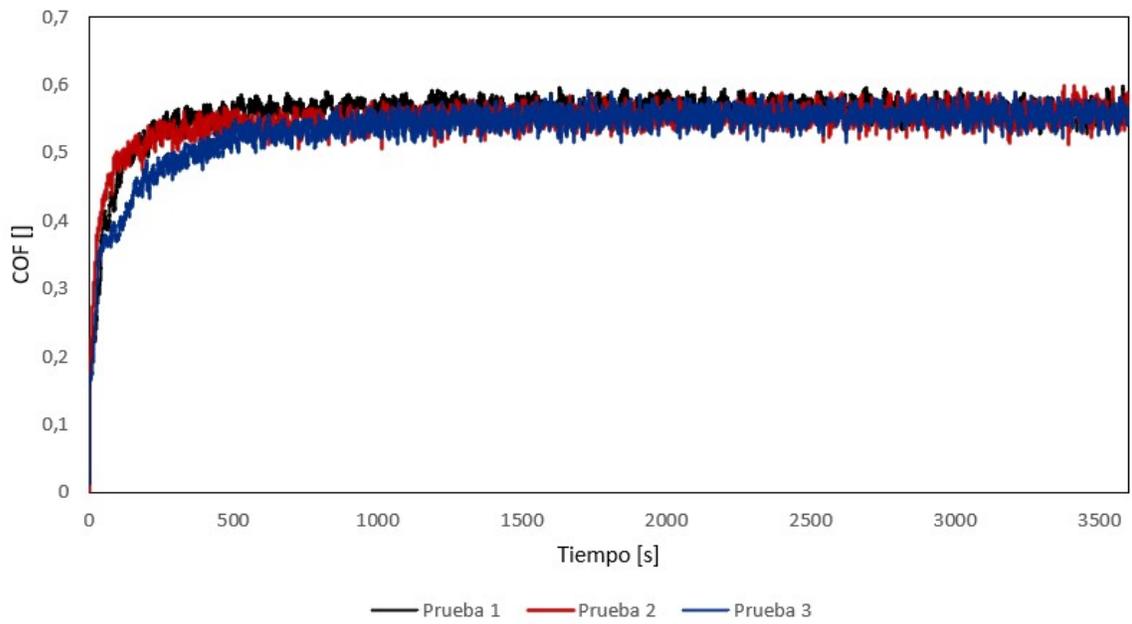


Figura A.2: COF recubrimiento Cr, bola Acero E52100.

COF WC-Co-Cr Bola Acero E52100

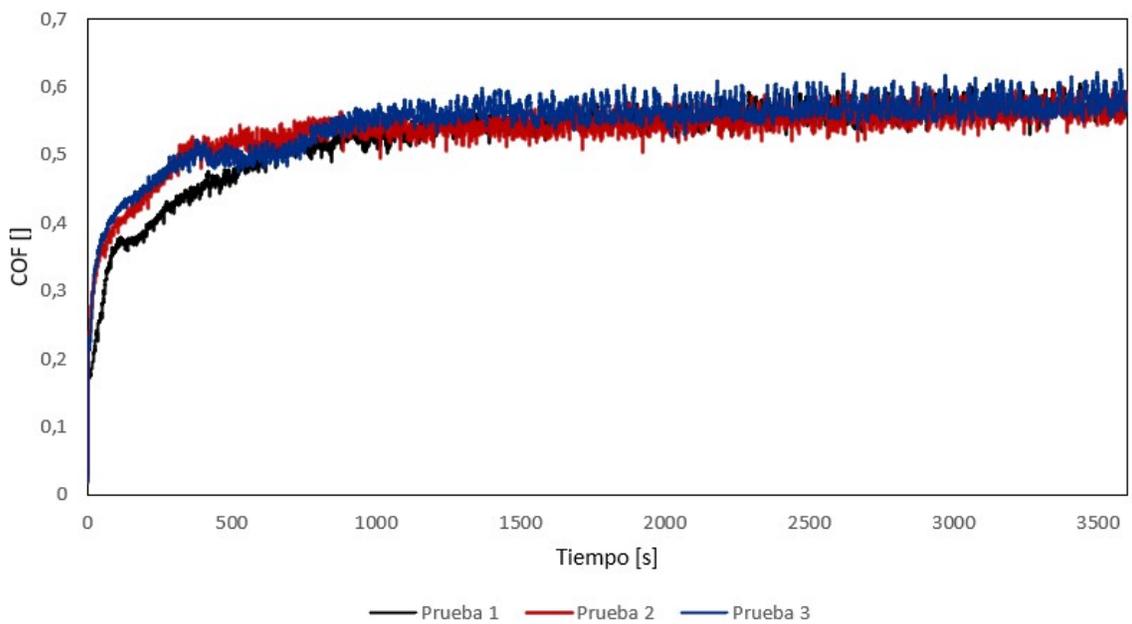


Figura A.3: COF recubrimiento WC-Co-Cr, bola Acero E52100.

COF NiCr-CrC Bola Alúmina

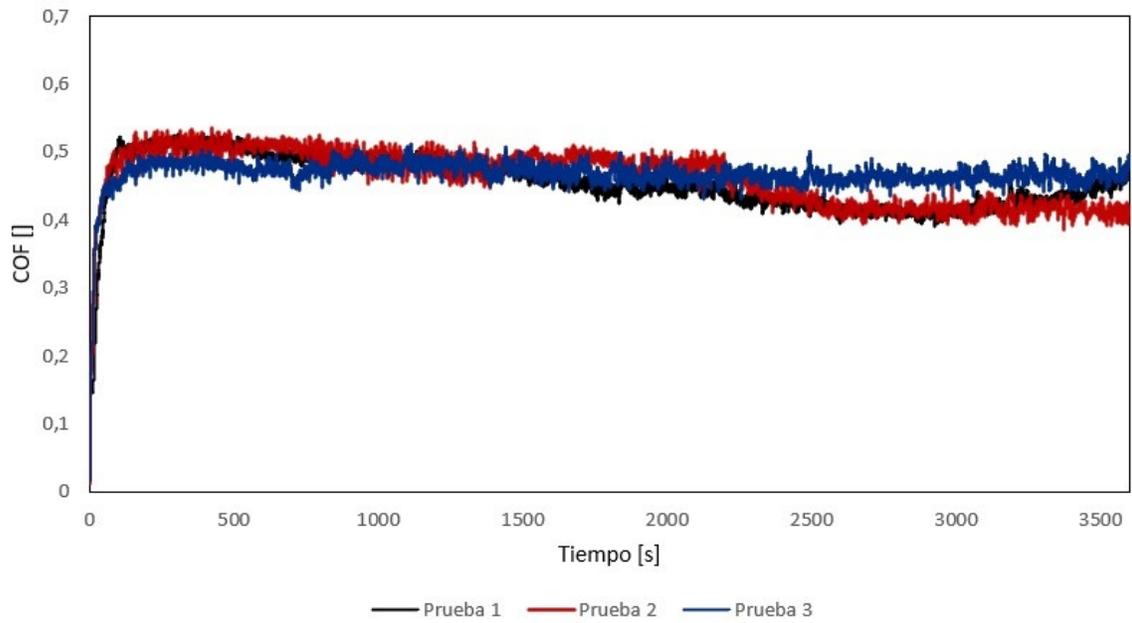


Figura A.4: COF recubrimiento NiCr-CrC, bola Alúmina.

COF Cr Bola Alúmina

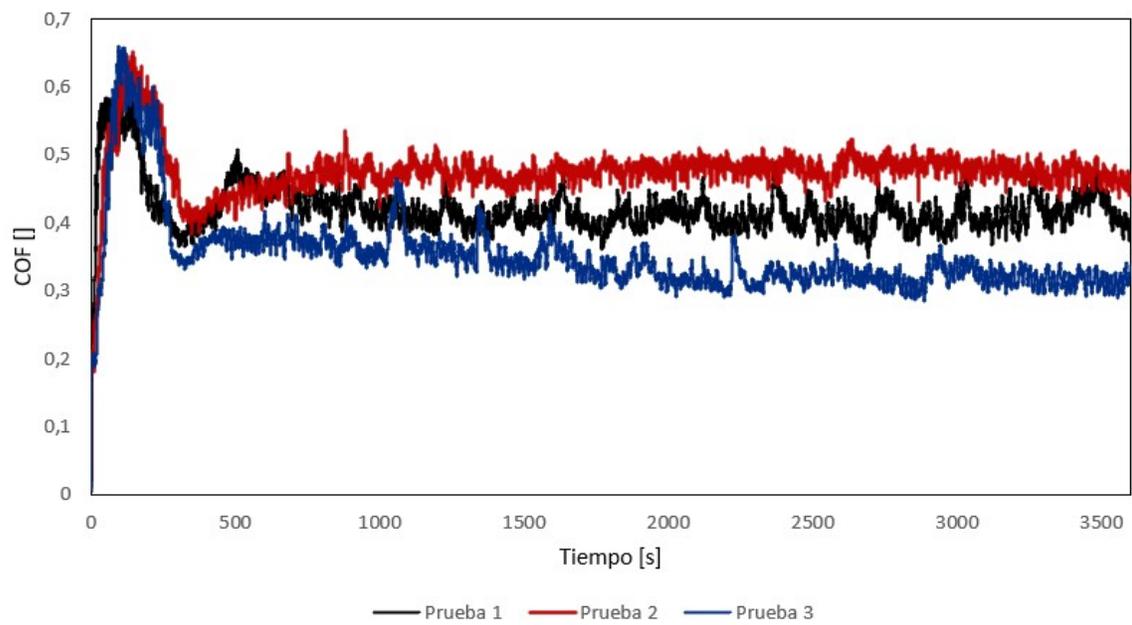


Figura A.5: COF recubrimiento Cr, bola Alúmina.

COF WC-Co-Cr Bola Alúmina

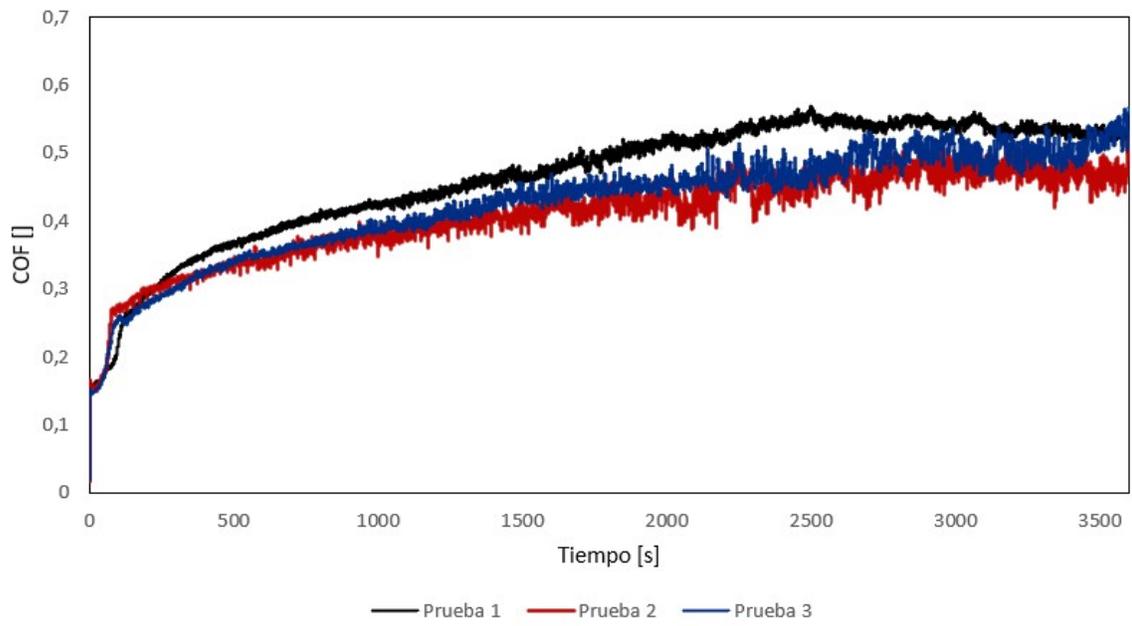


Figura A.6: COF recubrimiento WC-Co-Cr, bola Alúmina.

Anexo B

Detalle Espectros EDS

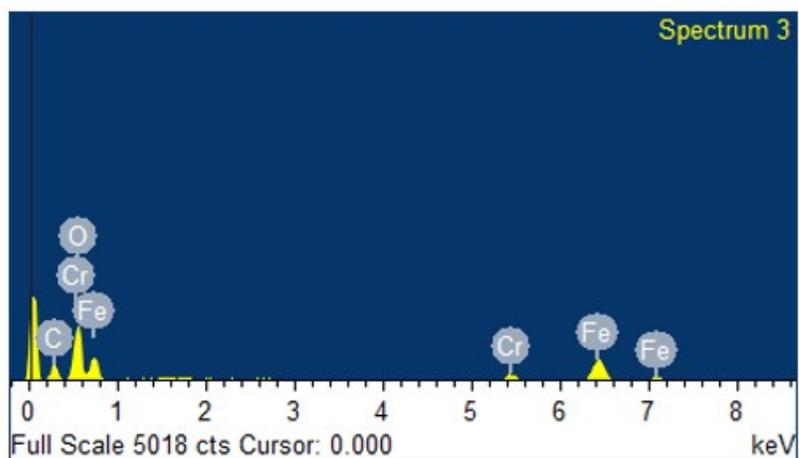


Figura B.1: Espectro pista recubrimiento NiCr-CrC, bola E52100

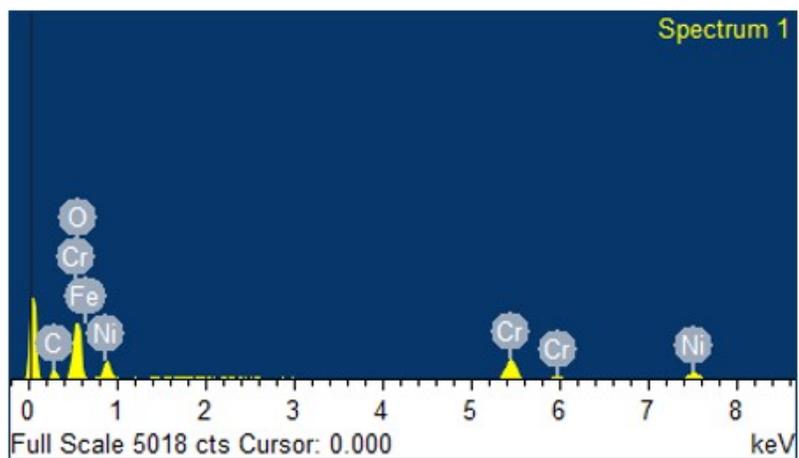
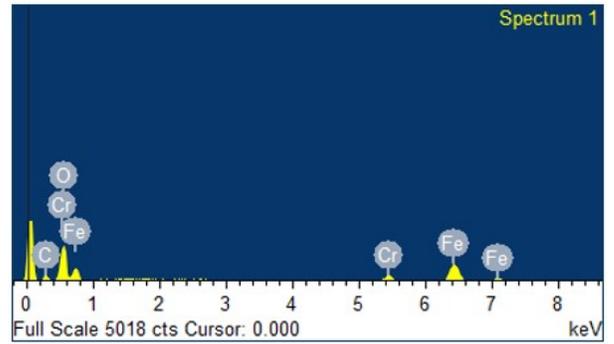
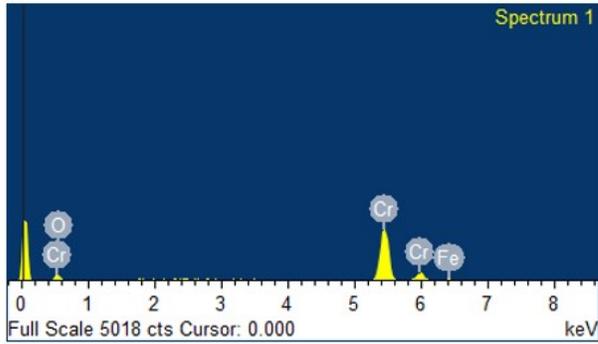


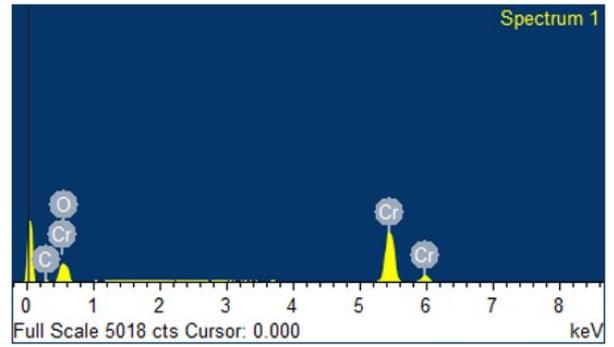
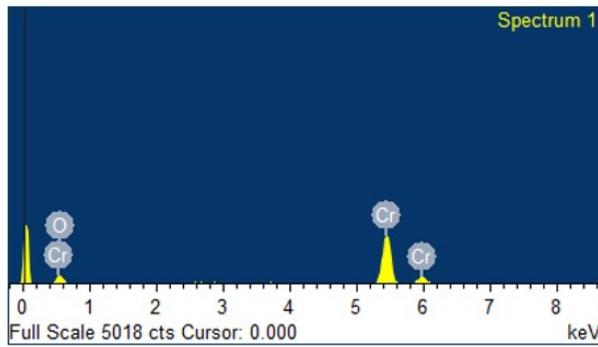
Figura B.2: Espectro pista recubrimiento NiCr-CrC, bola Alúmina.



(a)

(b)

Figura B.3: Espectros pista recubrimiento Cr, bola Acero E52100



(a)

(b)

Figura B.4: Espectros pista recubrimiento Cr, bola Alúmina

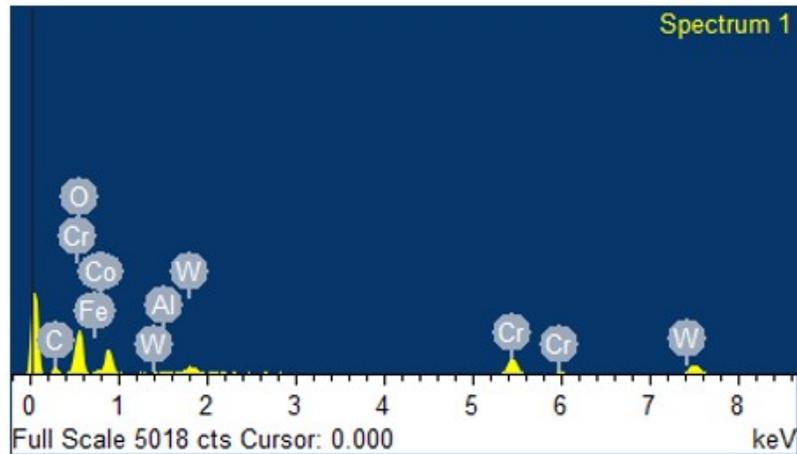


Figura B.5: Espectro pista recubrimiento WC-Co-Cr, bola Acero E52100

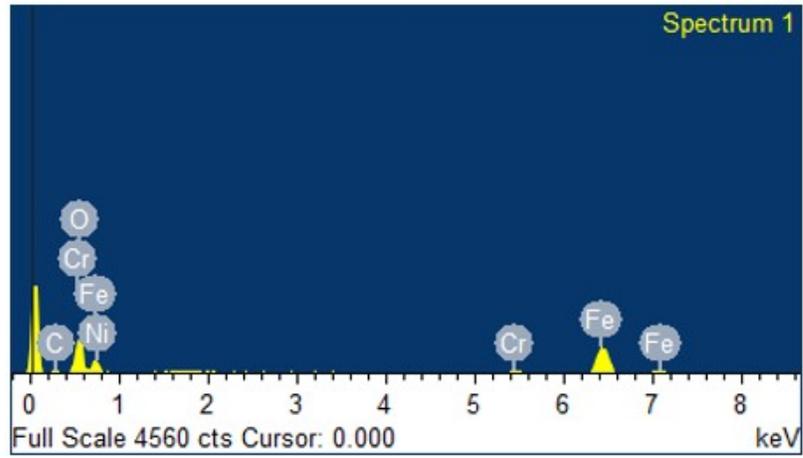


Figura B.6: Espectro pista recubrimiento WC-Co-Cr, bola Alúmina.

Anexo C

Detalle Profundidad Máxima y Volumen desgastado

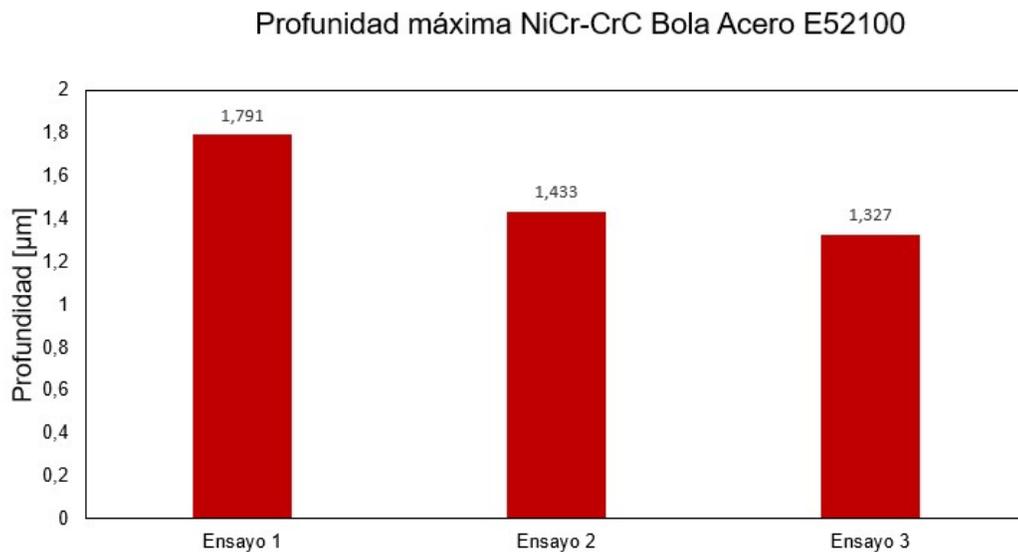


Figura C.1: Profundidades máximas ensayos NiCr-CrC, bola Acero E52100

Profundidad máxima NiCr-CrC Bola Alúmina

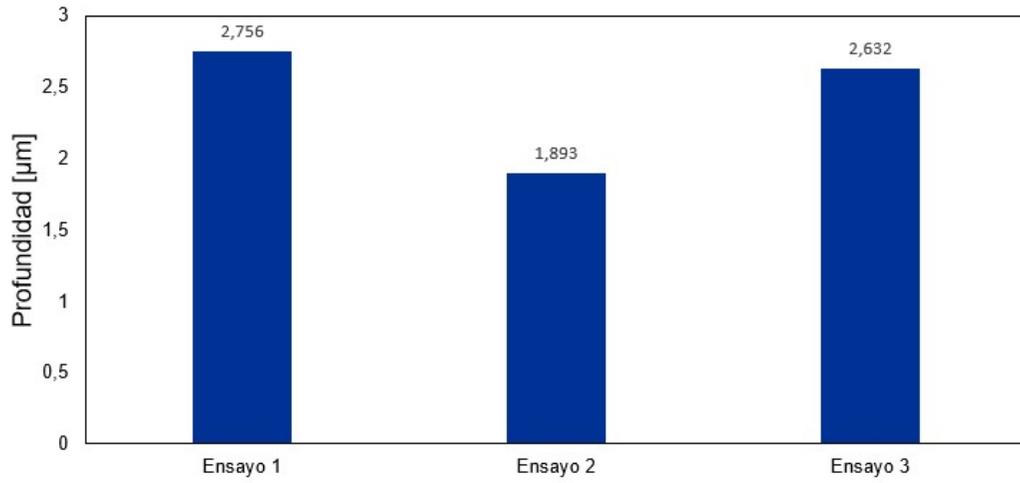


Figura C.2: Profundidades máximas ensayos NiCr-CrC, bola Alúmina.

Profundidad máxima Cr Bola Acero E52100

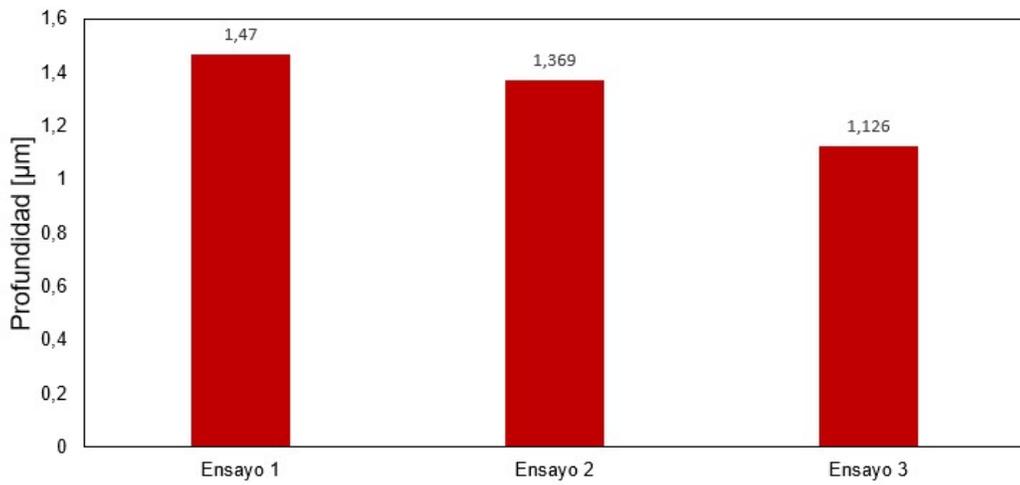


Figura C.3: Profundidades máximas ensayos Cr, bola Acero E52100

Profundidad máxima Cr Bola Alúmina

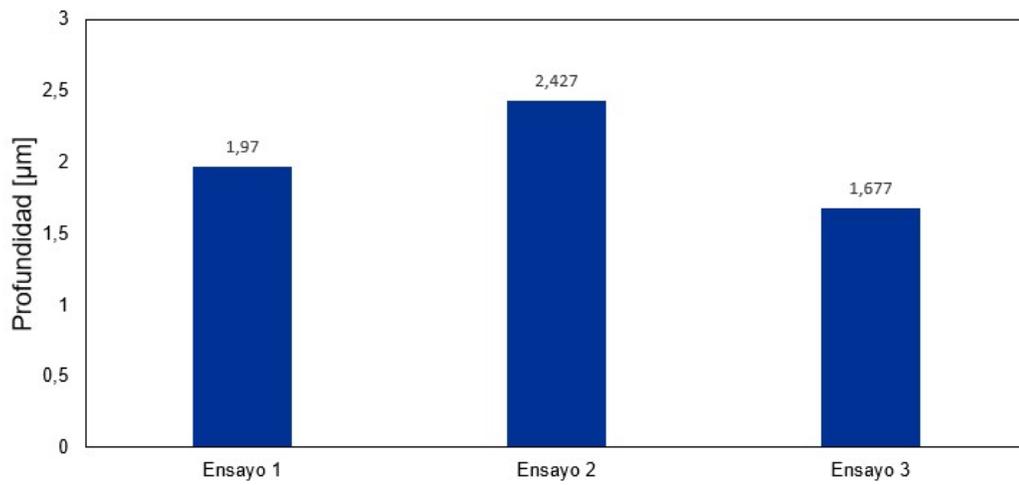


Figura C.4: Profundidades máximas ensayos Cr, bola Alúmina.

Profundidad máxima WC-Co-Cr Bola Acero E52100

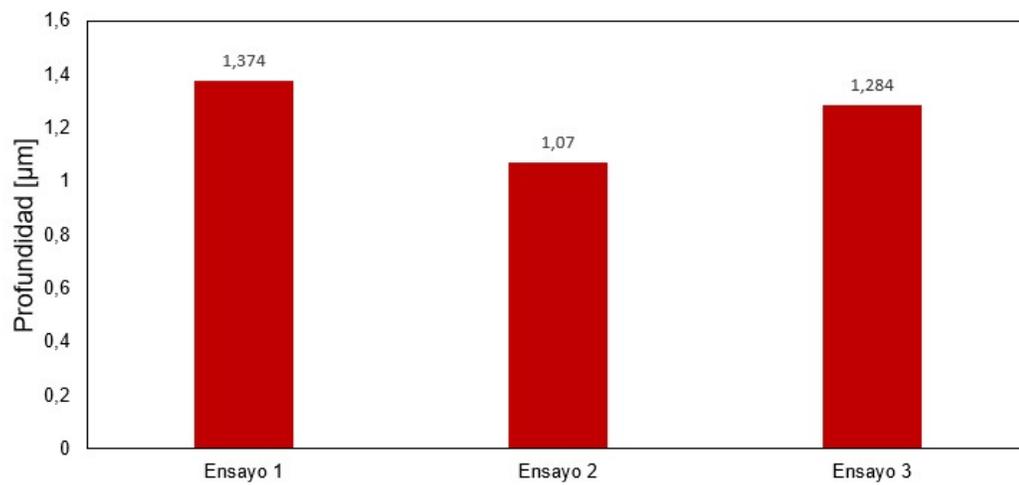


Figura C.5: Profundidades máximas ensayos WC-Co-Cr, bola Acero E52100

Profundidad máxima WC-Co-Cr Bola Alúmina

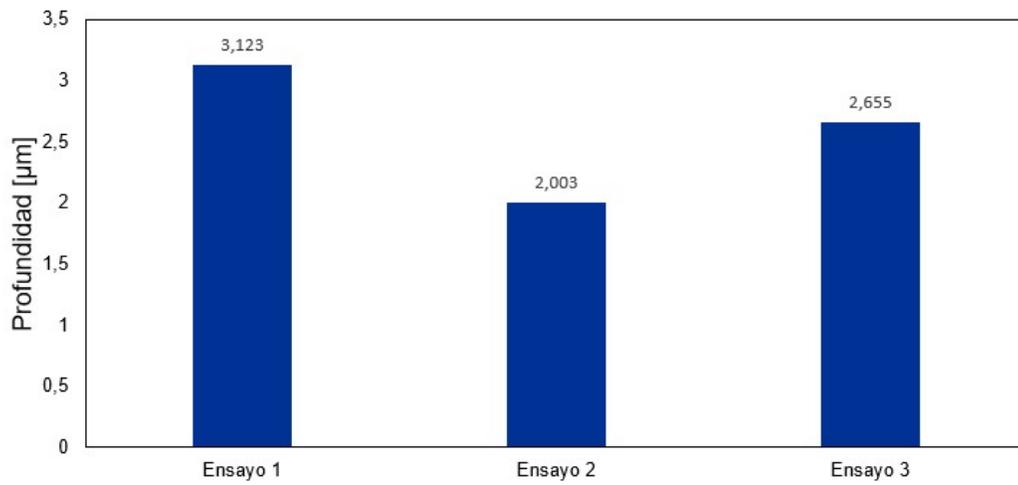


Figura C.6: Profundidades máximas ensayos WC-Co-Cr, bola Alúmina.

Volumen desgastado NiCr-CrC

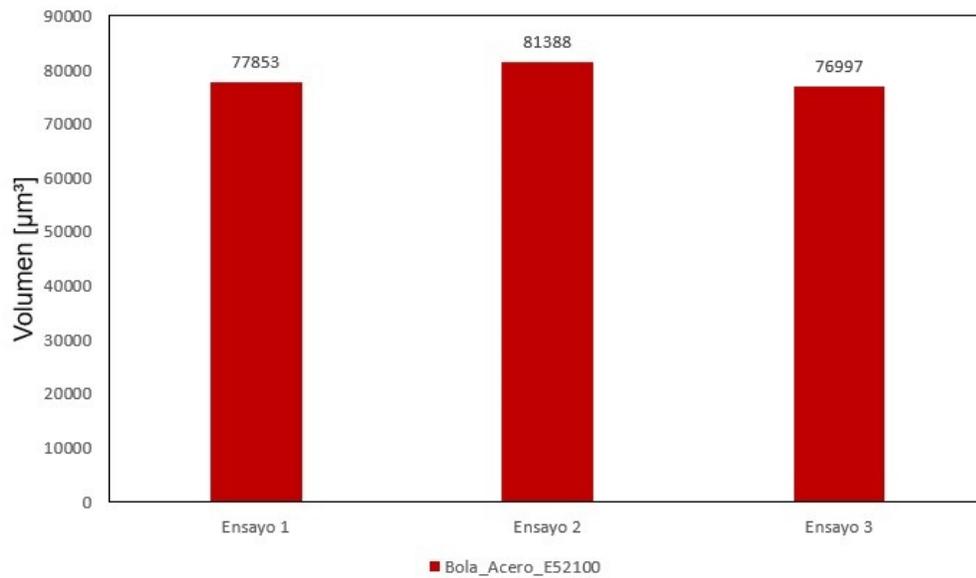


Figura C.7: Volumen desgastado ensayos NiCr-CrC, bola Acero E52100

Volumen desgastado NiCr-CrC

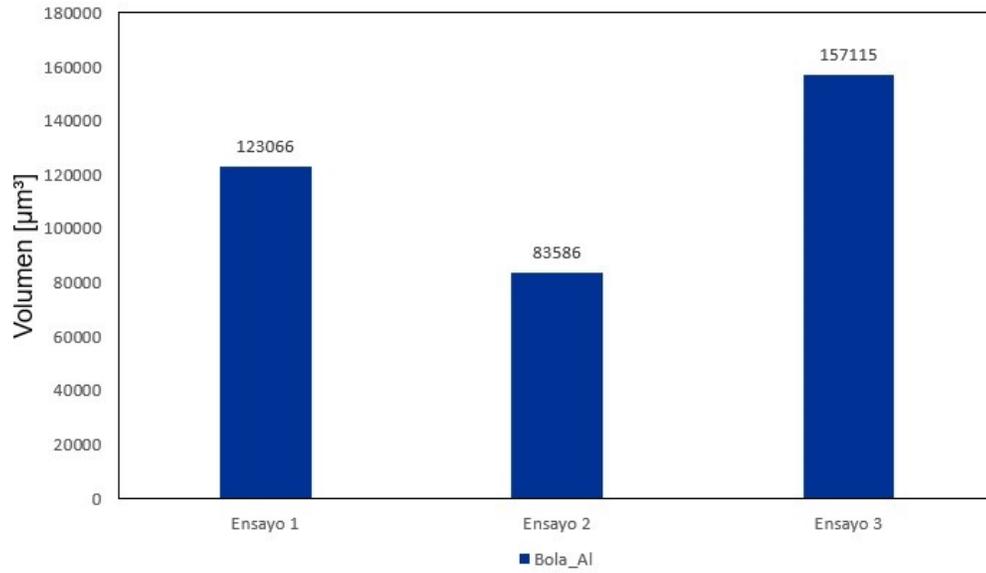


Figura C.8: Volumen desgastado ensayos NiCr-CrC, bola Alúmina.

Volumen desgastado Cr

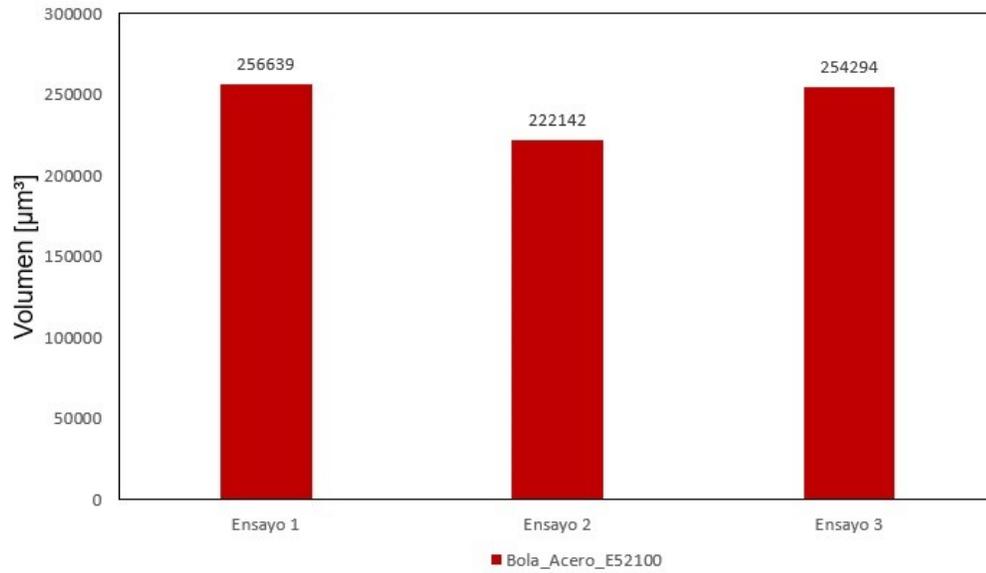


Figura C.9: Volumen desgastado ensayos Cr, bola Acero E52100

Volumen desgastado Cr

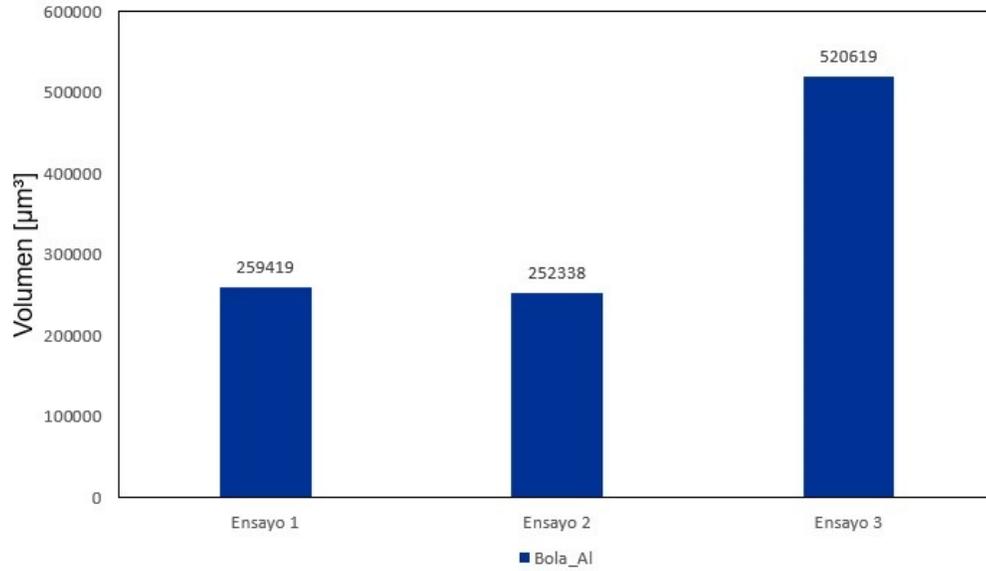


Figura C.10: Volumen desgastado ensayos Cr, bola Alúmina.

Volumen desgastado WC-Co-Cr

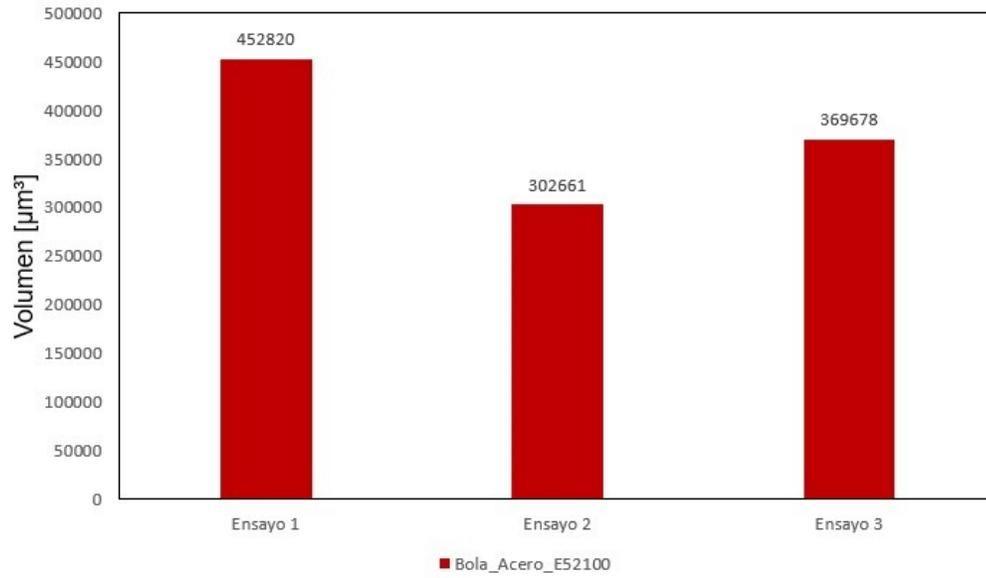


Figura C.11: Volumen desgastado ensayos WC-Co-Cr, bola Acero E52100

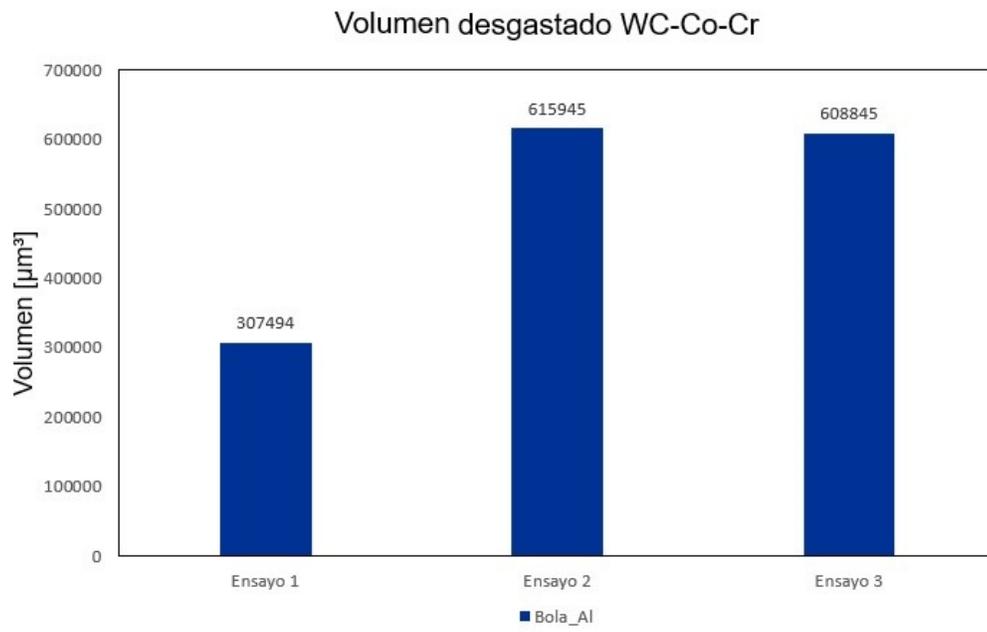


Figura C.12: Volumen desgastado ensayos WC-Co-Cr, bola Alúmina.