



Universidad Autónoma de Zacatecas
“Francisco García Salinas”



Unidad Académica de Ingeniería I

MAESTRÍA EN CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES

TÍTULO

***Influencia de los parámetros de
procesamiento sobre las propiedades de
recubrimientos de WC-Co-Cr depositados
por rociado térmico por flama***

Tesis que presenta

Ing. Karla Ofelia Méndez Medrano

para obtener el título de

Maestra en Ciencia e Ingeniería de los Materiales

ASESORA

Dra. Haideé Ruiz Luna

COASESORES

Dr. Víctor Hugo Baltazar Hernández

Dr. Miguel Montoya Dávila

08 de Septiembre de 2017

RESUMEN

La influencia de los parámetros de depósito de recubrimientos de WC-Co-Cr rociados por flama fue evaluada a través de la microestructura, estructura cristalina, dureza y resistencia al desgaste por deslizamiento de los recubrimientos. Se consideraron tres parámetros de rociado: distancia, tipo de flama (oxidante, neutra y carburante o reductora) y geometría de la boquilla. Los resultados indican que las partículas de WC sufren un grado de decarburización y disolución considerable durante el proceso de rociado mostrando la presencia de fases adicionales al WC tales como: W_2C , W y $\eta-Co_3W_3C$ para todas las condiciones depositadas. Sin embargo, esta transformación de fases depende de la química de la flama y por lo tanto, del estado en vuelo de las partículas antes de impactar contra el sustrato mientras que la microestructura de los recubrimientos es principalmente afectada por el tipo de boquilla utilizada. Respecto al comportamiento al desgaste por deslizamiento, los recubrimientos que poseen una distribución uniforme de partículas duras en su microestructura son los que muestran mejor desempeño. La descomposición de la fase WC en la fase W_2C parece no tener un efecto significativo en la pérdida de masa, sin embargo, la transformación de la fase WC en tungsteno metálico y en la fase $\eta-Co_3W_3C$ produce tasas de desgaste más altas debido a la deficiencia de las partículas de carburo y la fragilización de la fase aglutinante la cual induce el agrietamiento y delaminación de las laminillas.

ABSTRACT

The influence of deposition parameters on the microstructure, crystal structure, sliding wear resistance, and hardness of WC-Co-Cr flame spray coatings was examined. Three parameters were considered: spraying distance, type of flame (oxidizing, neutral, or reducing), and the spray torch nozzle. Results indicated that WC particles undergo considerable degree of decarburization and dissolution during spraying, showing substantial amounts of W_2C , W and Co_3W_3C , for all the considered conditions. However, the extent of phase transformation depended largely on the flame chemistry and therefore, on the in-flight particle state before impact the substrate. The microstructure of the coatings was mainly affected by the spray nozzle employed. Regarding the sliding wear behavior, the coatings with uniform distribution of hard particles provided the best wear resistance. The decomposition of WC into W_2C phase seems to have meaningless significance in the mass loss, nevertheless, the WC phase transformation to metallic tungsten and h-phase (Co_3W_3C) produce higher wear rates due to deficiency of carbide particles and embrittlement of the binder phase which induces cracking and delamination of the splats.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme culminar el gran reto que ha representado para mí la maestría, por darme fuerza y sabiduría para llevarla a cabo y poner gente en mi camino que me ayudó con ello.

A mi familia por confiar en mí y brindarme todo su apoyo, especialmente a mi esposo Arturo e hijos Diego y Carlos, por comprender que estuviera ausente tantas veces y en tantos momentos y estar incondicionalmente apoyándome.

A mis compañeros y amigos de maestría por estar ahí cuando los necesité, tanto profesional como personalmente, compartiendo buenos y no tan buenos momentos, pero sobretodo en todas y cada una de las aventuras que nos puso en frente la maestría.

A mi asesora, la Dra. Haideé Ruiz Luna y coasesores, el Dr. Víctor Hugo Baltazar Hernández y el Dr. Miguel Montoya Dávila por trabajar a mi lado, mostrando gran interés y disponibilidad en este proyecto.

Al personal docente, de oficina y técnicos del programa de Maestría en Ciencia e Ingeniería de los Materiales que me ayudaron en todos y cada uno de los problemas que se me presentaron y a sacar adelante el trabajo con su guía, sus enseñanzas y consejos.

A CONACYT por otorgarme la beca que me sirvió de estímulo para esforzarme aún más para obtener un trabajo de calidad y económicamente apoyó actividades propias de la maestría.

Al Dr. Omar Jiménez de la Universidad de Guadalajara por su apoyo en la toma de algunas de las imágenes de SEM que se muestran en la presente tesis.

Al equipo del CAMJ de la Universidad de Waterloo en Canadá por permitirme la realización de la estancia de investigación donde pude obtener el complemento de los resultados de esta investigación.

A todas aquellas personas que de alguna manera me brindaron su apoyo y ayuda en algún momento de la maestría.

CONTENIDO

CONTENIDO	4
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS	7
1 INTRODUCCIÓN	8
1.1 OBJETIVOS	9
1.1.1 GENERAL	9
1.1.2 OBJETIVOS PARTICULARES	9
1.2 IMPACTO DEL PROYECTO	10
1.3 JUSTIFICACIÓN	10
1.4 HIPÓTESIS	11
2 MARCO TEÓRICO.....	12
2.1 ROCIADO TÉRMICO	12
2.1.1 ROCIADO TÉRMICO POR FLAMA	13
2.1.2 PARÁMETROS DE DEPÓSITO Y FORMACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS	15
2.2 GENERALIDADES DE LA ALEACIÓN WC-Co-Cr	17
2.3 DESGASTE	21
2.3.1 TIPOS DE DESGASTE	22
2.3.1.1 MECANISMOS DE DESGASTE	23
3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	25
3.1 PISTOLA DE ROCIADO TÉRMICO POR FLAMA	25
3.2 MATERIA PRIMA PARA EL DEPÓSITO DE RECUBRIMIENTOS.....	27
3.3 DEPÓSITO DE RECUBRIMIENTOS	29
3.3.1 PARÁMETROS DE DEPÓSITO DE LA ALEACIÓN DE WC-Co-Cr.....	29

3.4	CARACTERIZACIÓN DE RECUBRIMIENTOS	32
3.4.1	DIFRACCIÓN DE RAYOS X	32
3.4.2	MICROSCOPIA ÓPTICA Y ELECTRÓNICA DE BARRIDO	32
3.4.3	DUREZA VICKERS	32
3.4.4	ENSAYOS DE DESGATE POR DESLIZAMIENTO	33
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
4.1	ETAPA 1. EFECTO DE LA DISTANCIA DE ROCIADO Y TIPO DE FLAMA	35
4.1.1	CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL	36
4.1.2	CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL	38
4.2	ETAPA 2. EFECTO DE LA GEOMETRÍA DE LA BOQUILLA Y TIPO DE FLAMA	40
4.2.1	CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL	40
4.2.2	CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL	42
4.2.3	CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS (DUREZA)	49
4.2.4	COMPORTAMIENTO AL DESGASTE POR DESLIZAMIENTO	50
5	CONCLUSIONES	55
6	TRABAJOS FUTUROS.....	57
7	REFERENCIAS.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2-1. Esquema del proceso de rociado térmico.</i>	14
<i>Figura 2-2. Dureza a temperatura ambiente de los carburos en función del tamaño de grano y contenido de Co [37].</i>	18
<i>Figura 2-3. Diagrama de fases del sistema W-C [21].</i>	20
<i>Figura 2-4. Efecto del ángulo de impacto en el desgaste erosivo [22].</i>	23
<i>Figura 2-5. Esquema de los 4 tipos básicos de falla en el material para desgaste abrasivo.</i>	24
<i>Figura 3-1. Componentes principales de la pistola de rociado térmico CastoDyn DS-8000.</i>	25
<i>Figura 3-2. Boquillas de rociado térmico diseñadas para la pistola CastoDyn DS-8000.</i>	27
<i>Figura 3-3. Morfología del polvo de WC-Co-Cr en a) y b) vista superficial y; c) y d) sección transversal a distintos aumentos.</i>	28
<i>Figura 4-1. Patrones de difracción de rayos X para recubrimientos WC-Co-Cr depositados por rociado térmico a 100 y 200 mm de distancia con flama a) carburante, b) neutra y c) oxidante.</i>	37
<i>Figura 4-2. Sección transversal de recubrimientos WC-Co-Cr depositados por flama: a) y d) carburante; b) y e) neutra; c) y f) oxidante, a 100 y 200 mm, respectivamente.</i>	39
<i>Figura 4-3. Patrones de difracción de rayos X de recubrimientos WC-Co-Cr depositados con boquillas: a) B10, b) B20 y c) B30; d) Vista a detalle de la ampliación de picos en el patrón de difracción para las condiciones B30 en el rango 37 a 45° de 2θ.</i>	41
<i>Figura 4-4. Sección transversal de los recubrimientos WC-Co-Cr rociados por flama por combustión depositados con boquilla: B10 (a-c), B20 (d-f) y B30 (g-i) y tipo de flama: carburante (a, d, g), neutra (b, e, h) y oxidante (c, f, i). Una vista detallada de la microestructura correspondiente ha sido incluida en la inserción.</i>	44
<i>Figura 4-5. Microestructura a detalle de recubrimientos WC-Co-Cr depositados con: a) B10, b) B20 y c) B30.</i>	46
<i>Figura 4-6. Sección transversal y vista isométrica de las boquillas: a) y d) B10; b) y e) B20; y c) y f) B30, respectivamente.</i>	47
<i>Figura 4-7. Perfil de dureza de los recubrimientos WC-Co-Cr a largo y ancho del espesor, rociados con boquilla: a) B10, b) B20 y c) B30; d) Huella de la indentación sobre el recubrimiento de la condición O10.</i>	50
<i>Figura 4-8. Desgaste por deslizamiento de los recubrimientos WC-Co-Cr en función de la carga aplicada para las boquillas: a) B10, b) B20 y c) B30; d) Desgaste por deslizamiento en función de la variación en tiempo para la condición N20.</i>	51
<i>Figura 4-9. Morfología de los polvos-residuo correspondientes a las condiciones: a) B10 y B20, b) B30 y el mapeo correspondiente de EDS. Espectro representativo del análisis EDS para: c) rico en Fe y d) rico en W tomado de las partículas indicadas de a) y b).</i>	52
<i>Figura 4-10. Mecanismo de desgaste para los recubrimientos WC-Co-Cr en función de la boquilla utilizada, a) B10 y B20, b) B30.</i>	53
<i>Figura 6-1. Variación en el espesor en función de la dispersión de las partículas a través del cono producido durante el proceso de rociado térmico.</i>	57

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2-1. Recubrimientos por rociado térmico utilizados en diversos sectores industriales [22].</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 2-2. Parámetros de rociado térmico [18].</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 2-3. Propiedades de los carburos de tungsteno con Co más representativos [22].</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 3-1. Datos generales del polvo de WC-Co-Cr utilizado para el depósito de los recubrimientos.</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 3-2. Parámetros de rociado de la Etapa 1 para el depósito de la aleación cermet WC-Co-Cr.</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 3-3. Parámetros de rociado de la Etapa 2 para el depósito de la aleación cermet WC-Co-Cr.</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 3-4. Parámetros utilizados para las pruebas de Microdureza Vickers.</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 3-5. Parámetros utilizados para las pruebas de desgaste por deslizamiento para los recubrimientos WC-Co-Cr rociados por flama por combustión.</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 3-6. Condiciones de prueba para desgaste por deslizamiento para la condición óptima N20 del polvo WC-Co-Cr.</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 4-1. Nomenclatura de los recubrimientos de acuerdo con las condiciones de rociado.</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 4-2. Porcentaje de porosidad y espesor de los recubrimientos WC-Co-Cr.</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 4-3. Nomenclatura de los recubrimientos de acuerdo con las condiciones de rociado.</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 4-4. Porcentaje de porosidad de recubrimientos WC-Co-Cr para todas las condiciones obtenidas.</i>	<i>45</i>

1 INTRODUCCIÓN

El desgaste de componentes, piezas y/o maquinaria es uno de los fenómenos más recurrentes y con mayores pérdidas económicas que afecta a varios sectores industriales incluyendo el automotriz, minero y aeronáutico. El nivel de desgaste que sufren estos componentes depende del giro de la industria, entorno ambiental y de la función que ese componente desempeñe. En general, el desgaste disminuye el tiempo de vida medio de los componentes llevándolos a la falla haciendo imprescindible el reemplazo total de la pieza a tiempos muy cortos de operación.

Una alternativa de prevenir o corregir el daño sufrido en dichos componentes es la aplicación de recubrimientos que protejan al sustrato base del desgaste, alargando al mismo tiempo la vida útil de esos componentes sin necesidad de un mantenimiento tan continuo o el reemplazo total de ellos. Actualmente existe una gran variedad de materiales apropiados para ser depositados como recubrimientos que protejan contra diversos tipos de daño. Las aleaciones de carburo de tungsteno con cobalto y adiciones de cromo (WC-Co-Cr) son materiales ampliamente utilizados para aplicaciones que requieren resistencia al desgaste y a la corrosión en distintos sectores industriales incluyendo: aeronáutica, minería y automotriz. Por ejemplo, estos materiales han sido propuestos para reemplazar al cromo duro electrolítico comúnmente empleado en los trenes de aterrizaje de los aviones debido a su alta dureza y resistencia superior a la fricción y abrasión [1] [2] [3].

Diferentes procesos de rociado térmico, tales como el de alta velocidad por combustión de oxígeno (HVOF) [1] [4] [5] [6], rociado por plasma atmosférico (APS) [7] [8] [9] y pistola de detonación (DG) [2] [10] [11] han sido principalmente utilizados para depositar recubrimientos de carburo de tungsteno. Estas técnicas se han investigado con respecto a la caracterización estructural y microestructural, propiedades mecánicas y resistencia al desgaste de polvos y recubrimientos de WC [5] [6] [9] [12] [13] [14]. Una alternativa a estas técnicas de rociado, las cuales requieren de una gran inversión financiera inicial y materiales costosos, es el proceso de rociado de combustión por flama. Esta técnica ha sido empleada para depositar una amplia gama de materiales incluyendo recubrimientos resistentes al desgaste [15] [16] [17]. A pesar de que esta técnica produce temperaturas y velocidades de flama bajas y recubrimientos con alto contenido de porosidad (hasta 20%) [18], el proceso de rociado por flama es comúnmente utilizado debido a su bajo costo, empatía con el medio ambiente, aspectos prácticos y de adaptación, además de que, ofrece opciones económicas para aplicaciones comerciales [16] [17] [19].

El utilizar una aleación que ofrece alta resistencia al desgaste y depositarla por medio de la técnica de rociado térmico por flama no garantiza obtener recubrimientos con buenas propiedades y características finales, para ello es indispensable una correcta selección de los parámetros de procesamiento por medio del estudio del efecto de esos parámetros sobre las propiedades y características de los recubrimientos resultantes, además de que cada equipo en particular requiere de una selección específica, debido a que las características propias de cada equipo influyen de distinta manera en el recubrimiento final.

Por lo anterior y con base en que no se tiene antecedente de estudios similares con el equipo de rociado empleado en esta investigación se pretende estudiar el efecto de los parámetros de rociado sobre la estructura, microestructura, dureza y resistencia al desgaste de recubrimientos de WC-Co-Cr depositados por rociado térmico por flama por combustión.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 GENERAL

Estudiar la influencia de los parámetros de depósito de recubrimientos de WC-Co-Cr empleando la técnica de rociado térmico por combustión por flama sobre sus propiedades estructurales, microestructurales, mecánicas y tribológicas.

1.1.2 OBJETIVOS PARTICULARES

1. Determinar el efecto de la variación de los parámetros de rociado, sobre las características de recubrimientos de WC-Co-Cr depositados por rociado por flama.
2. Estudiar las propiedades estructurales, microestructurales y mecánicas de los recubrimientos obtenidos en función de la distancia de rociado, la geometría de la boquilla y química de la flama.
3. Evaluar la resistencia al desgaste por deslizamiento de los recubrimientos obtenidos en función de los parámetros de rociado.

1.2 IMPACTO DEL PROYECTO

Debido a que el rociado térmico por flama es una técnica para depósito de recubrimientos de bajo costo y amigable con el ambiente y que por medio de ella puedan obtenerse recubrimientos que brinden propiedades de alta resistencia al desgaste, impacta en lo económico y en lo social. Además se genera una importante aportación de conocimiento en un área específica del rociado térmico por flama donde no hay antecedentes de investigación estudiando el efecto de los parámetros de depósito sobre las características resultantes de los recubrimientos por la particularidad del tipo de equipo que se está empleando y las diferentes variaciones que éste puede ofrecer por sus características propias.

1.3 JUSTIFICACIÓN

La necesidad de combatir el desgaste en diversos sectores industriales sin invertir grandes capitales genera la búsqueda de soluciones que brinden respuesta a ello. La aplicación de recubrimientos de materiales resistentes al desgaste es una opción viable, de ahí que se desee investigar la manera de obtenerlos de forma económica y a su vez con las mejores propiedades mecánicas posibles, por ello la aplicación de los recubrimientos por la técnica de rociado por flama por combustión y la intención de variar los distintos parámetros de rociado que interfieren en el proceso para obtener una optimización de ellos para el material con el que se está trabajando.

Con base en lo anterior y considerando que el proceso de rociado por flama produce baja velocidad de partícula, y las características de composición y microestructurales de los recubrimientos rociados térmicamente dependen de la historia de las partículas en vuelo durante el rociado [4] [6] [8] [12] [20] [21], es esencial investigar el efecto de los parámetros de rociado por flama sobre las propiedades y características de los recubrimientos de WC. Por consiguiente, la apropiada selección y control de los parámetros de rociado puede reducir los defectos microestructurales y de composición de los recubrimientos resultantes. Cabe resaltar que al presente no se tiene antecedente de estudios similares en los que se determine y compare la estructura, microestructura, dureza y el comportamiento al desgaste en función de los parámetros de rociado por flama en recubrimientos WC-Co-Cr.

1.4 HIPÓTESIS

A través de la variación y combinación idónea de los parámetros de depósito que más afectan un proceso de rociado térmico de combustión por flama, es decir, distancia de rociado, química de la flama y geometría de la boquilla de salida se obtienen recubrimientos de buena calidad en términos de bajos porcentajes de porosidad, partículas sin fundir, óxidos, con buenas propiedades mecánicas y resistentes al desgaste.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 ROCIADO TÉRMICO

El proceso de rociado térmico es uno de los procesos más ampliamente empleados para la fabricación de recubrimientos [22] [23]. Esta técnica se basa en el impacto consecutivo de un material, en forma de polvo, alambre o barra, el cual es arrastrado por un gas e impactado sobre una superficie. Esta tecnología ha avanzado considerablemente los últimos 10 años como resultado de que es posible depositar todo tipo de materiales (metales, cerámicos, polímeros, metal-cerámico, entre otros) en varios sectores industriales incluyendo la aeroespacial, automotriz, minera, del papel, y biomédica [24] (ver **Tabla 2-1**). Actualmente esta técnica es considerada una de las mejores opciones para contrarrestar daños sufridos de distinta índole, como desgaste, oxidación y/o corrosión, en componentes de maquinaria o diversas áreas de trabajo, así como por ofrecer resistencia térmica (recubrimientos de barrera térmica), limpieza y control dimensional, propiedades eléctricas (resistencia y conductividad), entre otros. Estos procesos tienen la ventaja de que el recubrimiento puede ser depositado en cualquier geometría y área y sus costos dependen fuertemente de los materiales usados para recubrir y del tipo de técnica que se utilice [25].

El rociado térmico puede clasificarse a grandes rasgos en dos grupos principales de acuerdo al tipo de energía que utilizan para el depósito de los recubrimientos: aquellos que utilizan energía eléctrica (plasma) y aquellos que utilizan energía química (reacción de combustión) [18] [22]. En particular, los procesos de rociado térmico por combustión utilizan una mezcla de oxígeno con combustible (propano, propileno, acetileno, keroseno, entre otros) para generar una reacción continua de combustión la cual se encargará de proporcionar la energía cinética y térmica suficiente para acarrear las partículas e impactarlas en la superficie a recubrir. Estos procesos se caracterizan por tener altas velocidades y menores temperaturas de partículas en vuelo por lo cual son ampliamente utilizados para depositar recubrimientos con buena adherencia, poca porosidad y bajo contenido de óxidos [18] [22] [26] [27].

Tabla 2-1. Recubrimientos por rociado térmico utilizados en diversos sectores industriales [22].

Sector de la industria	Carburos	Auto-fundente	Fe y acero	Aleaciones Ni	Súper aleaciones	MCrAlY	Aleaciones Co	No ferrosas
Aeroturbinas de gas	X		X	X	X	X	X	X
Agricultura		X	X	X				X
Arquitectura	X							X
Motores automotrices	X			X	X	X	X	
Equipo de negocios								X
Cementos y estructuras de arcilla		X	X					X
Procesamiento químico			X	X	X		X	
Molinos de Cobre y Latón							X	
Aeroespacial y de defensa	X	X	X	X	X	X	X	X
Motores diésel	X		X	X	X	X	X	
Eléctrica y electrónica								X
Utensilios eléctricos		X	X	X			X	X
Procesamiento de comida		X	X					
Forjado		X	X	X	X		X	
Manufactura de vidrio	X	X	X					
Turbinas de vapor	X	X	X	X	X		X	X
Fundiciones de Fe y acero		X	X					X
Manufactura de Fe y acero		X	X	X	X		X	X
Medica								X
Minería y construcción		X	X					X
Nuclear								
Exploración de gas y petróleo		X	X	X			X	X
Equipo de impresión								X
Pulpa y papel		X	X	X				X
Ferrocarril		X	X	X				X
Productos de roca		X						X
Manufactura de plástico y caucho		X	X	X			X	
Cribado			X					
Manufactura/repación de barcos y botes			X	X				X
Turbinas de gas terrestres	X		X	X	X	X	X	X
Laminado de acero		X	X	X	X		X	X
Textil			X					
Transporte			X	X				X

2.1.1 ROCIADO TÉRMICO POR FLAMA

El rociado por combustión por flama fue desarrollado alrededor de 1917 y es considerada la primera técnica de rociado térmico para el depósito de materiales con bajo punto de fusión y en los últimos años ha retomado fuerza debido a su facilidad de manejo, es

amigable con el ambiente y es relativamente más económica en comparación con otras técnicas de combustión como el de alta velocidad. Es una opción muy atractiva para cualquier industria puesto que puede dar solución a problemas de desgaste y corrosión además de que disminuye la inversión inicial para su empleo [15] [16] [17].

El principio de funcionamiento del rociado por flama consiste en que el material a depositar (en forma de polvo) cae por gravedad y es alimentado axialmente en la boquilla de salida en donde es acarreado por el flujo del gas de combustión. Durante la trayectoria de vuelo, las partículas de polvo se funden completa o parcialmente por efecto de la energía térmica de la flama y son aceleradas por la energía cinética del gas hasta impactarlas en una superficie. Al momento del impacto la energía de las partículas se transforma en deformación plástica en donde van apilándose subsecuentemente en forma de laminillas hasta formar el recubrimiento. Dependiendo del estado en vuelo de las partículas es el grado de deformación y aplanamiento al impacto [18] [22] [28]. Dicho proceso se encuentra esquematizado en la **Figura 2-1**.

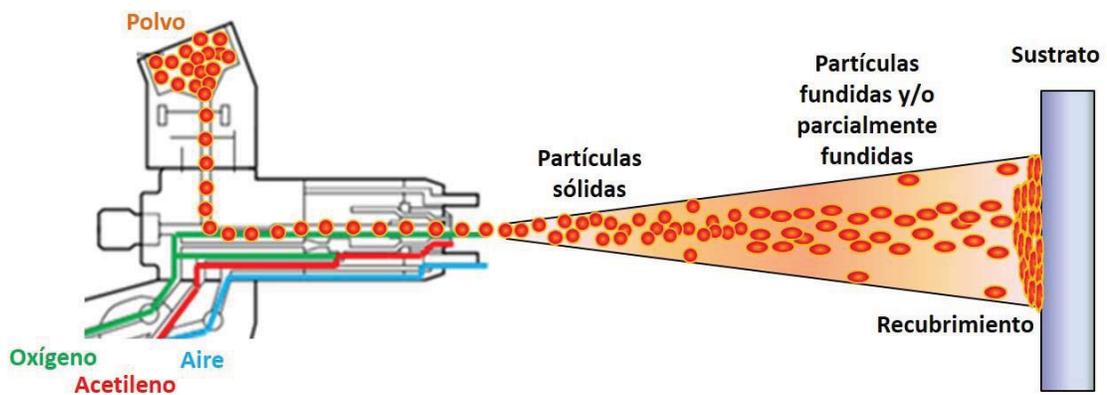


Figura 2-1. Esquema del proceso de rociado térmico.

Entre las principales características del rociado térmico por flama podemos mencionar [18] [28]:

- La tasa depósito o razón de alimentación del material varía entre 15 y 500 g/min.
- El espesor de los recubrimientos está en el rango de 50 a 1000 μm .
- La temperatura de la flama está entre los 3000 y 3300°C.

- La velocidad de las partículas de 80-100 m/s.
- El tamaño de las partículas ronda entre 5-100 μm .

2.1.2 PARÁMETROS DE DEPÓSITO Y FORMACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS

Durante el proceso de formación del recubrimiento, hay factores, denominados parámetros de rociado, que afectan las propiedades y características del recubrimiento resultante [18]. La variación en los parámetros de rociado trae como consecuencia cambios en la estructura (transformación de fases), microestructura (porcentaje de porosidad o formación de óxidos, partículas sin fundir, cohesión, entre otros), propiedades mecánicas (dureza, módulo de elasticidad, etc.) y desempeño. La cantidad de parámetros que pueden variarse en un proceso de rociado térmico es bastante amplia considerando, además, las características de la materia prima a emplear (ver **Tabla 2-2**). En general, la selección de los parámetros de procesamiento depende de la aplicación final del recubrimiento.

Tabla 2-2. Parámetros de rociado térmico [18].

Propiedades químicas del polvo
Propiedades físicas del polvo
Química de la flama
Boquilla de salida
Distancia de rociado
Flujo de los gases
Presión de los gases
Número de pasadas
Temperatura del sustrato
Velocidad transversal de la pistola
Razón de alimentación

Para un proceso de combustión la química de la flama y la geometría de boquilla son parámetros determinantes para las propiedades del recubrimiento final. Por una parte, la variación de flujo de los gases en la razón combustible/oxígeno altera la química de la flama,

lo que genera variaciones en los productos de la reacción. Por ejemplo, la reacción de combustión ideal del acetileno con el oxígeno es:



Cuando se mezclan en proporciones estequiométricas, es decir, todo el combustible reacciona con todo el oxígeno el tipo de flama se denomina neutra. En los casos donde se tiene un exceso de combustible la flama se denomina carburante o reductora y en el caso contrario, oxígeno en exceso, entonces la flama es oxidante. Cada una de estas condiciones promueve diferencias en cuanto a las características en vuelo de las partículas, lo cual afecta la estructura y microestructura de los recubrimientos. Además, dependiendo de las características de la materia prima hay flamas que son más propensas a producir transformaciones de fase (descomponer la(s) fase(s) original(es) del polvo) como consecuencia de la exposición de ésta al calor de la flama y al oxígeno presente en el aire. Lo ideal en un proceso de rociado térmico es que se conserve la estructura cristalina original de las aleaciones en el recubrimiento, ya que, si ésta cambia, también cambian sus propiedades pudiendo resultar en la presencia de fases indeseables en el recubrimiento o en la disolución de los elementos [29]. Por ejemplo, Kumari y colaboradores; Verdon y colaboradores y; Stewart y colaboradores han mostrado que cuanto mayor es la temperatura de depósito de aleaciones duras base carburo de tungsteno mayor es el grado de decarburización y disolución del carburo de tungsteno en el aglutinante [5] [29] [30].

De manera similar, la boquilla de salida de los gases y partículas de polvo está relacionada con la energía que es transmitida de los gases hacia las partículas, esto a su vez, influye en la microestructura de los recubrimientos en términos del grado de deformación plástica, porcentaje de porosidad, óxidos y adherencia, por mencionar algunos. Existen diversos tipos de boquillas, convergentes-divergentes, rectas, de Laval, entre otras, cuya diferencia en su geometría afecta directamente en el número de Mach. En el caso del rociado térmico por combustión por flama las partículas pueden alcanzar velocidades entre 50 a 100 m/s dependiendo de la geometría de salida de la boquilla empleada. Estos valores influyen sobre la adherencia del recubrimiento al metal base en conjunto con rugosidad superficial de la superficie a rociar. Se espera que aquellas condiciones de depósito que impacten a las partículas de polvo con mayor velocidad tendrán un mejor anclaje con el sustrato además de que la cohesión entre partículas también se verá favorecida [29].

En general, las distintas variables de depósito juegan un papel muy importante en las propiedades finales de los recubrimientos y en su desempeño. Por mencionar algunos: el

tipo de combustible que se utiliza, ya que de éste depende la temperatura de la flama que se presenta durante el rociado y la energía térmica que se les transmite a las partículas durante el vuelo hacia el sustrato; el grado de alimentación de polvo durante el rociado, a mayor cantidad de tasa de alimentación mayor cantidad de calor necesario para fundirlas; la geometría de boquilla de salida del equipo influye grandemente en la energía cinética que llevan las partículas y en cómo éstas impactan contra el sustrato [6]. Por lo tanto, es indispensable determinar la influencia de la mayoría de los parámetros de procesamiento en un sistema de rociado térmico.

Como ya se mencionó, el rociado térmico por flama recientemente se ha utilizado para depositar varios tipos de materiales sobre diversos sustratos obteniéndose buenos resultados. Sin embargo, no hay un estudio que muestre cómo influyen los parámetros de depósito sobre las propiedades de los recubrimientos. Por este motivo, en la presente investigación se utilizó un material ampliamente usado en la industria [31] [13], una aleación metal-cerámica, un carburo de tungsteno cuyas propiedades y características se describen en los temas subsecuentes.

2.2 GENERALIDADES DE LA ALEACIÓN WC-Co-Cr

El desarrollo de los materiales metal-cerámico está relacionado con el nombre de Karl Schroeter [32]. El primer carburo desarrollado por Schroeter fue un polvo de monocarburo de tungsteno mezclado con hierro, níquel o cobalto, respectivamente, como aglutinante. Sus resultados mostraron que el carburo de tungsteno (WC) que contenía Co como fase aglutinante presentaba propiedades superiores respecto a todos los carburos conocidos previamente, posiblemente a la mayor afinidad que existe entre el Co y el WC a altas temperaturas y por la tenacidad que éste le confería al compuesto, creándolo denso [33] [34]. En general, los carburos son materiales que consisten en partículas duras de carburos tales como WC, TiC o TaC unidos a través de un aglutinante metálico, por lo general Co (por sus propiedades de adhesión y mojabilidad con los carburos [21]), el cual previene la propagación de grietas entre las partículas y mejora la tenacidad del material. De forma particular la aleación WC-Co son materiales conocidos por su alta dureza, tenacidad, esfuerzo a la cedencia, alto módulo de elasticidad, alta conductividad térmica, baja dilatación térmica, resistencia al desgaste y a la abrasión, entre otros (ver **Tabla 2-3**), lo que los hace materiales muy versátiles para distintas aplicaciones industriales [35] [36].

En cuanto a la dureza de las aleaciones WC-Co, esta depende en gran manera del tamaño promedio de grano y del contenido de Co, y puede variar ligeramente por el tipo de proceso de manufactura por el que son procesados (**Figura 2-2**).

Tabla 2-3. Propiedades de los carburos de tungsteno con Co más representativos [22].

Composición nominal	Tamaño de grano	Dureza (HRA)	Densidad g/cm ³	Resistencia transversal MPa	Resistencia a compresión MPa	Módulo de elasticidad GPa	Resistencia relativa a la abrasión (a)	Coeficiente de expansión térmico μm/mK		Conductividad térmica W/mK
								a 200°C	a 1000°C	
97WC3Co	Medio	92.5-93.2	15.3	1590	5860	641	100	4.0	...	121
94WC6Co	Fino	92.5-93.1	15.0	1790	5930	614	100	4.3	5.9	...
	Medio	91.7-92.2	15.0	2000	5450	648	58	4.3	5.4	100
	Grueso	90.5-91.5	15.0	2210	5170	641	25	4.3	5.6	121
90WC10Co	Fino	90.7-91.3	14.6	3100	5170	620	22
	Grueso	87.4-88.2	14.5	2760	4000	552	7	5.2	...	112
84WC16Co	Fino	89	13.9	3380	4070	524	5
	Grueso	86.0-87.5	13.9	2900	3860	524	5	5.8	7.0	88
75WC25Co	Medio	83-85	13.0	2550	3100	483	3	6.3	...	71
71WC12.5TiC12TaC4.5Co	Medio	92.1-92.8	12.0	1380	5790	565	11	5.2	6.5	35
72WC8TiC11.5TaC8.5Co	Medio	90.7-91.5	12.6	1720	5170	558	13	5.8	6.8	50

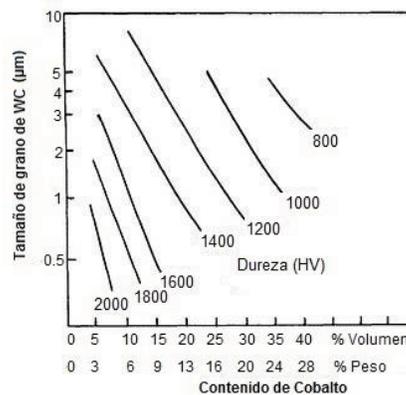


Figura 2-2. Dureza a temperatura ambiente de los carburos en función del tamaño de grano y contenido de Co [37].

Derivado de sus propiedades las aleaciones de WC-Co son comúnmente aplicadas para proteger superficies contra el desgaste. Sin embargo, las propiedades del aglutinante metálico deben ser consideradas bajo ambientes erosivos y corrosivos. El aglutinante de Co puro sufre corrosión cuando es expuesto a ambientes corrosivos tales como condiciones de agua de mar, en las que se observan efectos de gran sinergia entre la corrosión y la erosión. La corrosión y, por lo tanto, las propiedades de corrosión por erosión pueden mejorarse con la adición de cromo al aglutinante metálico [38]. De esta manera la aleación WC-Co-Cr es uno de los materiales más reconocidos y ampliamente usados como recubrimientos, ya que la adición de Cr mejora su resistencia a la corrosión y a la oxidación en ambientes secos y húmedos [39].

Diversos procesos de rociado térmico, tales como el de alta velocidad por combustión de oxígeno (HVOF, por sus siglas en inglés) [11] [14] [15] [16], rociado por plasma atmosférico (APS, por sus siglas en inglés) [17] [18] [19] y el rociado térmico por detonación (DG, por sus siglas en inglés) [12] [20] [21] principalmente, han sido empleados para el depósito de recubrimientos de carburo de tungsteno. Estas técnicas se han investigado con respecto a la caracterización estructural y microestructural, propiedades mecánicas y resistencia al desgaste de polvos y recubrimientos de varios materiales base WC [15] [16] [19] [22] [23] [24]. Alternativamente a estas técnicas de rociado, las cuales requieren una inversión inicial considerable, se encuentra el proceso de rociado por combustión por flama que ha sido utilizado para depositar un amplio rango de materiales incluyendo recubrimientos resistentes al desgaste [5] [25] [26] debido a su bajo costo, empatía con el ambiente, aspectos prácticos y de adaptación [25] [26] [27].

Sin embargo, durante el rociado térmico de estas aleaciones ocurre un fenómeno de descomposición o decarburización de las partículas de WC. En general, temperaturas excesivamente altas de las partículas de polvo durante su vuelo pueden causar una decarburización de las partículas dando lugar a la formación de otras fases (**Figura 2-3**), tales como: W_2C , $\eta-Co_xW_yC_z$ (Co_6W_6C y Co_3W_3C), disolución del tungsteno metálico y carbón en la fase aglutinante, así como la formación de una fase amorfa de Co debido a la rápida solidificación durante el impacto [5] [13] [20] [21] [40]. Esta descomposición incrementa la fragilidad y disminuye la fracción volumétrica de partículas duras disminuyendo la resistencia al desgaste de los recubrimientos [41] [3] [4] [13]. No obstante, la decarburización y el comportamiento al desgaste de los recubrimientos de WC-Co-Cr no depende sólo del sistema de rociado térmico [4] [6] [13] [42], sino que también depende y de manera significativa de los parámetros de rociado, de las características de las partículas

del polvo de la aleación (tipo, morfología, composición) y del tipo de combustible utilizado [14] [20]. Además, los recubrimientos de carburo de tungsteno presentan alto desempeño al desgaste, dureza y aspectos microestructurales en función del contenido de fases, tamaño y distribución del grano de carburo [6] [12] [13] [43], contenido de porosidad [5] [9] [44] y la cohesión de las partículas de WC con la fase aglutinante de Co [4] [11] [13].

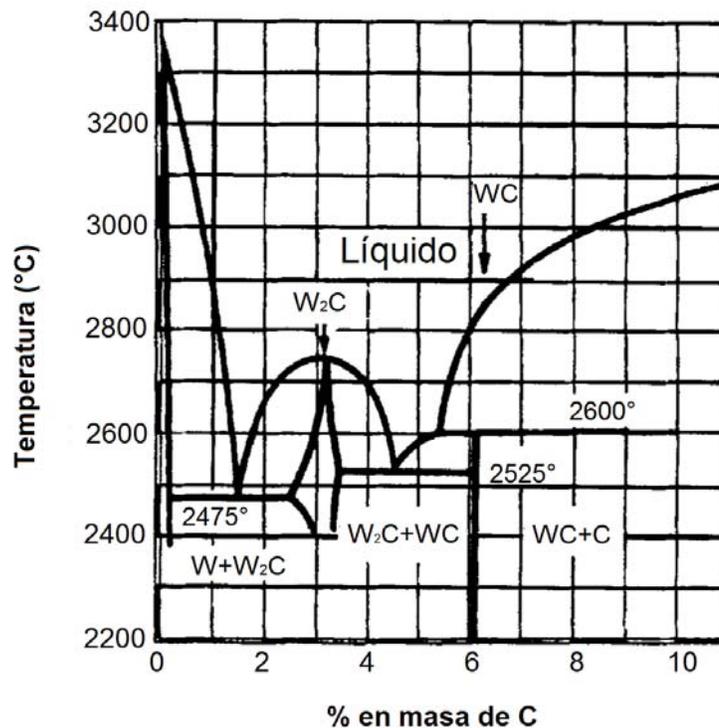


Figura 2-3. Diagrama de fases del sistema W-C [21].

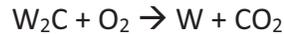
De acuerdo con Orton la descomposición del WC a W₂C se lleva a cabo a 2030 K, mientras que, de acuerdo con el diagrama de fase de Sara, establecido experimentalmente, la descomposición se lleva a cabo a una temperatura de 3000 K, pero sin indicios de que exista una transformación subsecuente [20].

De acuerdo con Li y colaboradores, el fenómeno de decarburización se presenta en 2 etapas [20]:

1. Primero, el WC se transforma en W₂C:



2. Después el W_2C se transforma en W (debido a su oxidación):



El fenómeno de decarburización entonces se ve influido por factores como: el tipo de combustible utilizado, por ejemplo, el acetileno usado como gas combustible en el proceso de rociado por flama promueve la descomposición del WC , debido a que produce flamas con mayor temperatura; química de la flama: condiciones ricas en combustible generan por lo general bajas temperaturas y altas velocidades de partículas mientras que condiciones ricas en oxígeno o neutras, producen altas temperaturas y bajas velocidades de partículas; atmósfera de rociado: el oxígeno promueve la descomposición y oxidación del W_2C en W ; composición de la aleación inicial debido a que la presencia de fases adicionales al WC tal como la fase $\eta-Co_3W_3C$ puede acelerar la descomposición del WC [4] [5] [20] [21] [38] [45].

Los recubrimientos metálicos duros son usados en distintas aplicaciones industriales para protección al desgaste bajo diferentes condiciones de servicio, incluyendo altas temperaturas y medios agresivos [39], también son utilizados en la industria de electrónicos, aplicable sobre tecnología de turbinas de gas [25] y han sido ampliamente usados para numerosas aplicaciones como aeronaves, aceite y gas, minería, etc. [5] en la solución de severos problemas de abrasión y erosión. Además, son usados en su forma sinterizada para aplicaciones estructurales, para maquinado de componentes como herramientas de corte, dados, émbolos, engranajes, rodamientos, entre otros [5] [33] [46].

2.3 DESGASTE

El desgaste tiene gran importancia tecnológica y económica, ya que causa la pérdida parcial o total y altera la forma de las piezas o herramientas empleadas cotidianamente. El desgaste es definido como la remoción de material de la superficie de un sólido al estar en contacto con otro material, y su causa principal es porque existen microasperezas en esa superficie, además de esa rugosidad superficial, para que se produzca un desgaste, debe haber interacción con otro objeto o material bajo una carga en relativo movimiento, aunque no es necesario que este movimiento sea continuo o plano a la superficie [22] [36] [47].

2.3.1 TIPOS DE DESGASTE

De acuerdo con la manera en la que las superficies sufren la remoción de material es la forma en la que se distinguen los diferentes tipos de desgaste, con base en esto se tiene que el desgaste puede ser:

- *Por deslizamiento o por fricción:* Se produce cuando 2 cuerpos en contacto superficial y bajo fuerzas normales, se deslizan entre sí. Por lo general este tipo de deslizamiento estará presente en conjunto con cualquier otro tipo de desgaste [48] [49].
- *Abrasivo:* es cuando una superficie dura y áspera o una que tenga partículas duras y salientes está en contacto o se desliza sobre otra. Durante este tipo de desgaste se desprenden partículas, que interactúan entre las superficies, produciendo ranuras o rayaduras en la superficie de contacto más suave. La resistencia a este tipo de desgaste en metales puros y cerámicos es directamente proporcional a la dureza que poseen [36].
- *Por fatiga:* también llamado por *fractura superficial*, se produce cuando la superficie de un material es sometida a cargas cíclicas o ciclos térmicos. Las partículas de desgaste suelen formarse por descascaramiento o picadura (causado por cargas de deslizamiento o rodadura) debido a que se producen grietas de fatiga. Cuando la carga de contacto está en deslizamiento, las grietas inician en la superficie y propagan hacia el núcleo, al unirse causan picadura. Por el contrario, si la carga de contacto es por rodadura, las grietas inician debajo de la superficie, por lo general en la interfase duro-blando, así que las grietas crecen hacia la superficie causando el desprendimiento del material [36] [50].
- *Erosivo:* es un proceso de eliminación de material a causa de la incidencia de partículas sólidas sobre una superficie. El grado de desgaste depende del ángulo de incidencia de la partícula respecto de la superficie, es decir, si se trata de un material dúctil, las partículas a un ángulo de 90° (perpendicular a la superficie) posiblemente sólo lo deformen incluso endurezca, pero a un ángulo de 20°, el material será eliminado por una acción de corte (ver **Figura 2-4**) [48].

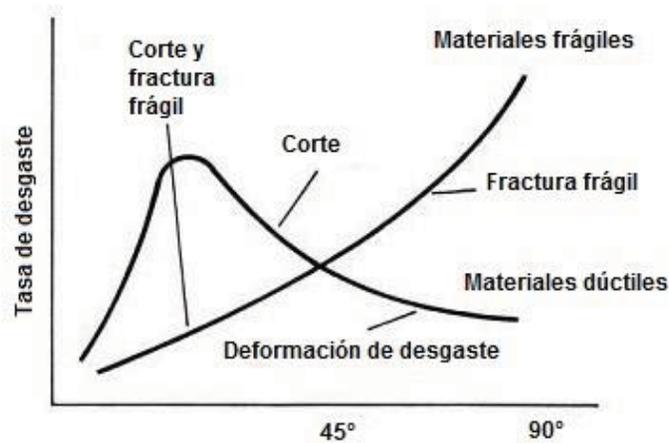


Figura 2-4. Efecto del ángulo de impacto en el desgaste erosivo [22].

En cada método particular, las variables de prueba tienen diversos y significativos efectos sobre la evaluación del desempeño al desgaste y esto está asociado a los mecanismos de desgaste [51].

En la presente investigación el motivo de estudio del comportamiento al desgaste por deslizamiento es debido a que este tipo de desgaste se presenta casi siempre en combinación con algún otro tipo de desgaste, es decir, por lo general está presente, por lo que lo hace un tipo de desgaste muy estudiado [39] [52] [53] [54].

2.3.1.1 MECANISMOS DE DESGASTE

Además de la rugosidad superficial de los materiales y la interacción entre ellos bajo una carga en relativo movimiento, existen otros factores que permiten determinar los mecanismos de desgaste: material de las superficies, el grado de interacción de los materiales, la carga sobre la superficie y la naturaleza y velocidad del relativo movimiento. De acuerdo con esto los mecanismos de desgaste se dividen en [22]:

- *Adhesivo*: se presenta cuando los puntos de contacto de 2 superficies en interacción y relativo movimiento se deforman y pueden llegar a soldarse juntas debido a

fuerzas interatómicas. Si la unión es más fuerte que la del propio material, entonces el material unido se corta o deforma plásticamente, y ocurre el endurecimiento.

- *Abrasivo*: se presenta por el impacto de un material más duro sobre una superficie (granallado) o en movimiento a lo largo de una superficie bajo carga (desbaste). La interacción de las superficies resulta en indentación superficial y puede removerse material por: corte, arado, astillado o fractura por fatiga (**Figura 2-5**).
- *Fatiga*: cuando una superficie está sujeta a cargas repetitivas puede producirse fractura o fragmentación.

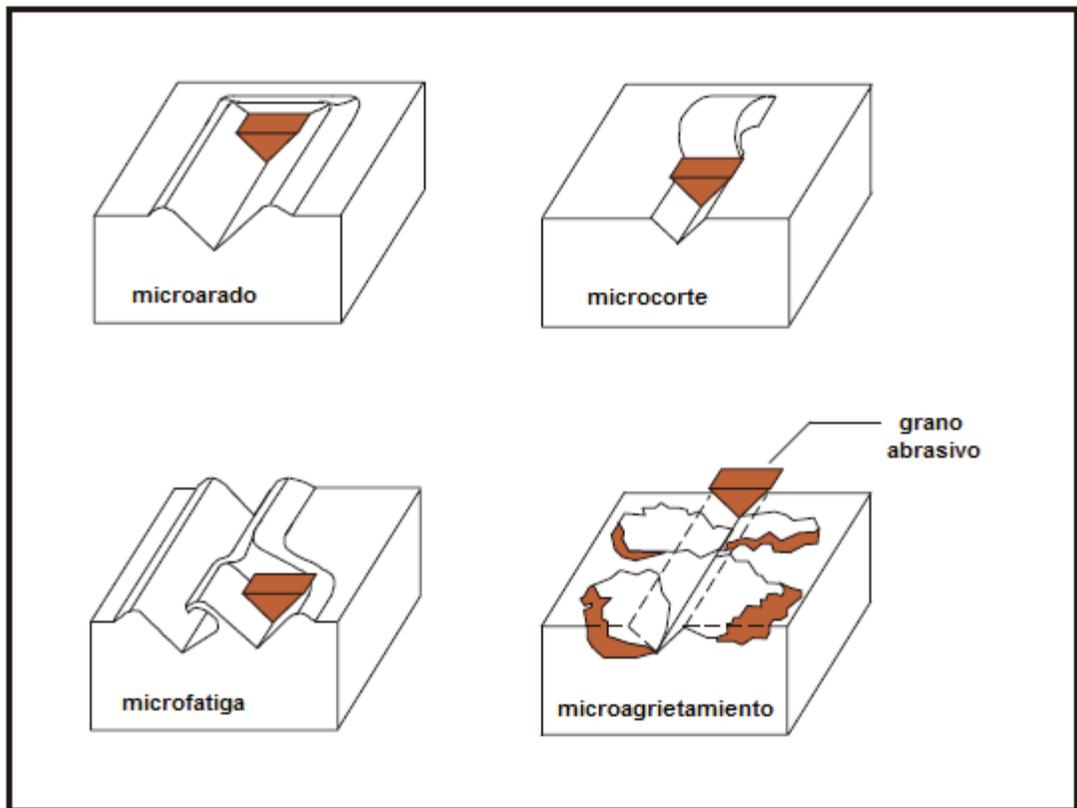


Figura 2-5. Esquema de los 4 tipos básicos de falla en el material para desgaste abrasivo.

3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este capítulo se presenta el desarrollo experimental de la fabricación y caracterización de la materia prima y de los recubrimientos depositados usando una pistola de combustión por flama.

3.1 PISTOLA DE ROCIADO TÉRMICO POR FLAMA

Los recubrimientos desarrollados en la presente tesis se realizaron empleando una pistola de rociado térmico por flama modelo CastoDyn DS-8000 (Castolin Eutectic). La **Figura 3-1** muestra el sistema de rociado térmico por combustión oxiacetilénica y sus componentes principales.

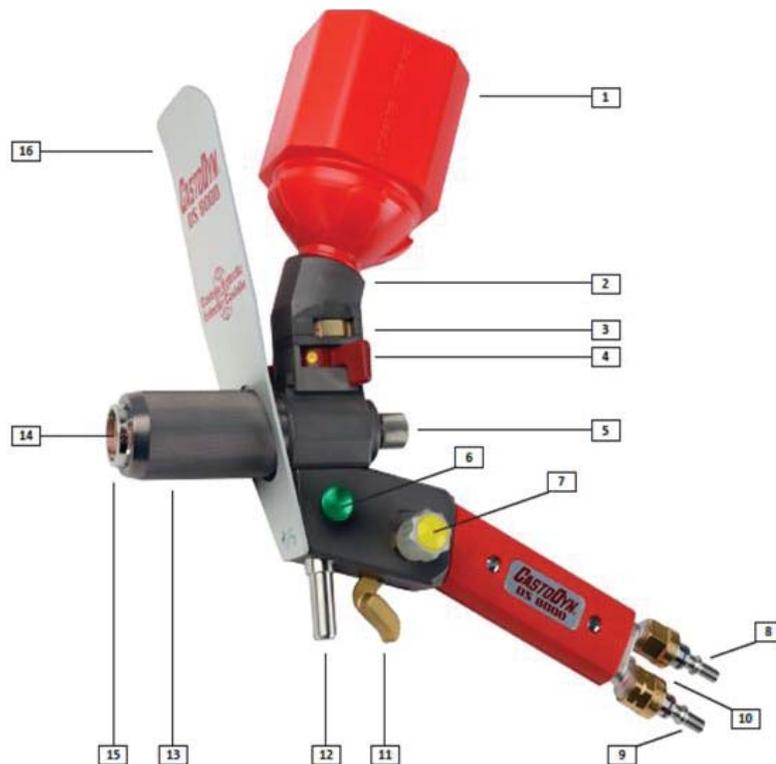


Figura 3-1. Componentes principales de la pistola de rociado térmico CastoDyn DS-8000.

1. Contenedor de polvo.
2. Montaje del contenedor de polvo.
3. Control del diafragma para la alimentación del polvo (6 aperturas).
4. Interruptor de bloqueo. En amarillo, permite colocar o quitar el contenedor de polvo, en verde, permite el flujo del polvo hacia la pistola.
5. Inyector de polvo. Es parte complementaria de la boquilla o módulo de rociado. Determina la tasa de flujo del polvo que es acarreado por el gas.
6. Válvula de aire comprimido. Botón rojo oprimido, sin salida de aire, botón verde oprimido, aire fluyendo.
7. Válvula de acetileno. La perilla permite variar el flujo del acetileno.
8. Entrada del Oxígeno.
9. Entrada del gas combustible (acetileno).
10. Entrada del Aire comprimido.
11. Dispositivo que controla la entrada del oxígeno y el acetileno a la pistola. Posición vertical: abierto. Posición horizontal y hacia atrás: cerrado.
12. Tornillo para montaje.
13. Cubierta de la boquilla o módulo de rociado. Asegura que la boquilla se ajuste al cuerpo de la pistola y evita fugas.
14. Boquilla o módulo de rociado para la flama (4 distintas configuraciones). A través de ella fluye la mezcla de gases y el polvo es impulsado hacia la flama.
15. Salida de gases en expansión y polvo. Punto de ignición de los gases.
16. Escudo térmico.

Entre las características más importantes de este tipo de pistolas se pueden mencionar [18] [55]:

- Temperatura de la flama: 2800 - 3100°C
- Velocidad de la partícula: 50 - 100 m/s
- Tasa de depósito: 1 – 6 Kg/h
- Material para recubrimiento: aleaciones y cerámicos en forma de polvo
- Densidad del recubrimiento: 85 – 95 %
- Nivel de ruido: 70 – 80 dB

Como se mencionó anteriormente, este equipo tiene la versatilidad de contar con 4 diferentes boquillas o módulos de rociado (ver **Figura 3-2**), y de acuerdo con el fabricante cada una de ellas tiene una distinta aplicación en cuanto al tipo de aleación a depositar.



Figura 3-2. Boquillas de rociado térmico diseñadas para la pistola CastoDyn DS-8000.

3.2 MATERIA PRIMA PARA EL DEPÓSITO DE RECUBRIMIENTOS

Se empleó una aleación comercial (WC-Co-Cr) en forma de polvo con características y propiedades específicas. La composición química, tamaño y proveedor de la materia prima se presenta en la **Tabla 3-1**.

Tabla 3-1. Datos generales del polvo de WC-Co-Cr utilizado para el depósito de los recubrimientos.

Polvo	Composición (% peso)	Tamaño (μm)	Proveedor
WC-Co-Cr	WC-10Co-4Cr	-45 +11	Oerlikon Metco

La morfología del polvo se muestra en la **Figura 3-3**, tanto la vista superficial como la sección transversal.

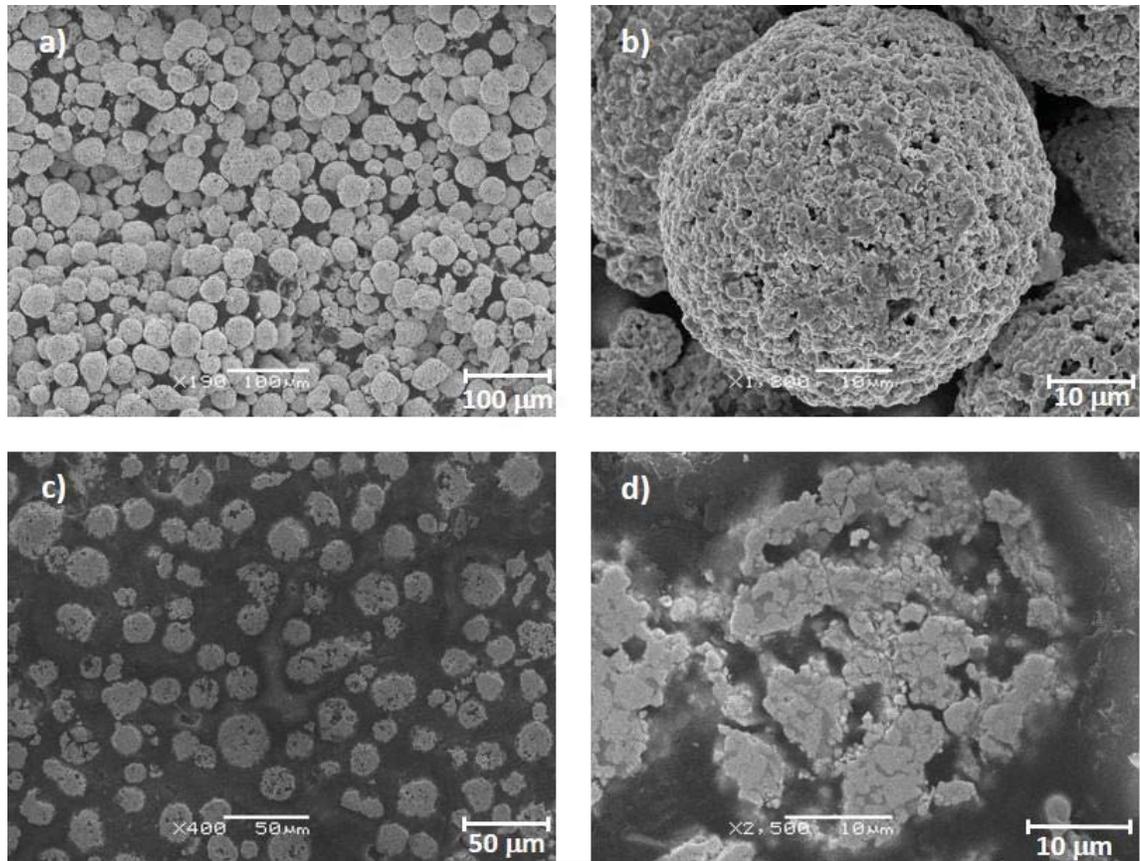


Figura 3-3. Morfología del polvo de WC-Co-Cr en a) y b) vista superficial y; c) y d) sección transversal a distintos aumentos

Las imágenes muestran que el polvo posee una morfología en su mayoría esférica, además de eso, las partículas se caracterizan por ser porosas, esta porosidad se atribuye al proceso de manufactura, aglomerado y sinterizado, que de acuerdo con L. Pawlowsky producen partículas porosas [18].

En la presente investigación los recubrimientos se depositaron sobre 2 tipos de sustratos de acero al bajo carbono AISI/SAE 1018, (0.18% de C) con geometría distinta, dependiendo del tipo de análisis o prueba que se realizó durante la parte experimental:

- ✚ Solera rectangular delgada
- ✚ Barra cilíndrica rolada en frío

Se empleó solera rectangular delgada de acero al bajo carbono (AISI-SAE 1018) de dimensiones: 5.08 x 2.54 x 0.3175 cm, para los análisis de difracción de rayos X, microscopía y microdureza.

Se empleó una varilla de acero al bajo carbono (AISI-SAE 1018) en pines de 2.54 cm de largo aproximadamente, con una punta redondeada con un diámetro de 10 mm. Estos pines son utilizados para realizar pruebas de desgaste por deslizamiento o fricción con base en la norma ASTM G-99 [56].

Todos los materiales usados como sustratos para el depósito de las aleaciones fueron sometidos a un proceso de sand-blast con partículas de Al_2O_3 reforzada para eliminar la contaminación superficial y dejar una rugosidad superficial Ra aproximada de 5 μm con el objetivo de incrementar el anclaje del recubrimiento con el sustrato.

3.3 DEPÓSITO DE RECUBRIMIENTOS

Cuando una técnica de procesamiento involucra una gran cantidad de parámetros, lo primero a considerar es el efecto que éstos pueden causar sobre las propiedades y características finales del material en estudio. Con base en esto, como primer paso se estudian todas aquellas variables que aparentemente tienen un efecto significativo en los resultados y se dejan fijos aquellos parámetros que no representan cambios significativos. Una vez teniendo esta relación, se recurre a realizar la experimentación por etapas priorizando los parámetros más significativos. Una correcta optimización de parámetros garantizará la obtención de un material de calidad, en función de lo que se desea obtener.

3.3.1 PARÁMETROS DE DEPÓSITO DE LA ALEACIÓN DE WC-Co-Cr

La metodología experimental para la caracterización de la pistola y obtención de recubrimientos fue dividida en 2 etapas:

1. Efecto de la distancia de rociado y tipo de flama.
2. Efecto de la geometría de la boquilla y tipo de flama.

Etapa 1

El objetivo en esta etapa es estudiar el efecto de la distancia sobre el recubrimiento para posteriormente trabajar con un solo valor y simplificar el diseño de la Etapa 2, además de estudiar el efecto de la química de la flama sobre la estructura del recubrimiento por la posible transformación de fases y sobre la microestructura del mismo.

Las condiciones para el primer depósito de recubrimientos por flama se muestran en la **Tabla 3-2**. Cabe mencionar que los valores de las presiones de todos los gases, la velocidad de avance, la apertura y el número de pasadas se mantuvieron constantes en las dos etapas de depósito.

Tabla 3-2. *Parámetros de rociado de la Etapa 1 para el depósito de la aleación cermet WC-Co-Cr.*

Parámetro	Valor
Tipo de flama	Oxidante (O), Neutra (N) y Carburante (C)
Distancia de rociado	100 y 200 mm
Boquilla	20
Apertura	4
Presión de oxígeno	4 bar
Presión de acetileno	0.7 bar
Presión de aire	6 bar
Velocidad de avance	14.7 m/min
Número de pasadas	1

Con este primer diseño se pretende obtener una primera aproximación del efecto de la distancia de rociado y del tipo de flama sobre las características de los recubrimientos.

Etapa 2

Como se describió en la sección anterior, la pistola puede operar con 4 distintas boquillas (ver **Figura 3-2**) clasificadas como sigue:

SSM-10: Familias de aleaciones base Ni y Fe

SSM-20: Familias de aleaciones auto-fundentes base Ni.

SSM-30: Materiales cerámicos.

SSM-40: Materiales con bajo punto de fusión y polímeros.

Debido a que la aleación utilizada en el presente proyecto no tiene bajo punto de fusión, la boquilla SSM-40 no fue considerada en el análisis.

Los parámetros de depósito para la segunda etapa se muestran en la **Tabla 3-3**:

Tabla 3-3. *Parámetros de rociado de la Etapa 2 para el depósito de la aleación cermet WC-Co-Cr.*

Parámetro	Valor
Tipo de flama	Oxidante (O), Neutra (N) y Carburante (C)
Boquilla	10, 20 y 30
Distancia de rociado	200 mm
Apertura	4
Presión de oxígeno	4 bar
Presión de acetileno	0.7 bar
Presión de aire	6 bar
Velocidad de rociado	14.7 m/min
Número de pasadas	1

Con este segundo diseño se pretende obtener la boquilla óptima para el depósito de este tipo de materiales.

3.4 CARACTERIZACIÓN DE RECUBRIMIENTOS

3.4.1 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Los recubrimientos fueron evaluados por Difracción de Rayos X (XRD por sus siglas en inglés) usando una radiación Cu-K α en un difractómetro D8Advance Bruker.

3.4.2 MICROSCOPIA ÓPTICA Y ELECTRÓNICA DE BARRIDO

Se caracterizó la sección transversal de los recubrimientos rociados por flama usando un microscopio óptico y un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM, Scanning Electronic Microscope, Tescan Mira3) equipado con un espectrómetro de Rayos X de energía dispersiva (EDX, energy-dispersive X-ray spectrometer) para cuantificar la composición química.

El porcentaje de porosidad de los recubrimientos rociados por flama fue determinado por análisis de imagen (software ImageJ) de la sección transversal, tomando 8 imágenes en promedio de la parte central de los recubrimientos.

3.4.3 DUREZA VICKERS

Las mediciones de microdureza Vickers fueron llevadas a cabo a lo largo y ancho del espesor de los recubrimientos usando un durómetro Shimadzu. Los parámetros usados para las pruebas de dureza se muestran en la **Tabla 3-4**.

Tabla 3-4. *Parámetros utilizados para las pruebas de Microdureza Vickers.*

ANÁLISIS DE MICRODUREZA	
Carga	1 N
Tiempo	15 s
Número de indentaciones	10

3.4.4 ENSAYOS DE DESGATE POR DESLIZAMIENTO

Los ensayos de desgaste fueron realizados usando un equipo de “pin-on-disc” fabricado bajo la norma ASTM G-99. Para la prueba se utilizaron 6 pines en promedio.

Un acero para herramientas AISI/SAE-D2 en forma de disco de 100 mm de diámetro y 10 mm de espesor fue empleado como contracara. El disco de acero fue tratado térmicamente y templado para alcanzar una dureza de 62-64 HRC, además, los discos fueron rectificadas en la superficie con el propósito de lograr una rugosidad superficial $R_a < 0.8 \mu\text{m}$ de acuerdo con la norma ASTM G-99. La **Tabla 3-5** muestra las condiciones experimentales bajo las cuales se llevaron a cabo las pruebas de desgaste por deslizamiento.

Tabla 3-5. *Parámetros utilizados para las pruebas de desgaste por deslizamiento para los recubrimientos WC-Co-Cr rociados por flama por combustión.*

PRUEBAS DE PIN SOBRE DISCO (G-99)	
Carga	15, 30, 50 N
Tiempo	15 min
Velocidad	400 rpm
Número de pines	6

Cabe mencionar que una vez obtenida la condición óptima para el polvo de WC-Co-Cr se realizaron pruebas de desgaste variando el tiempo. Las condiciones experimentales para la condición óptima son mostradas en la **Tabla 3-6**.

Tabla 3-6. *Condiciones de prueba para desgaste por deslizamiento para la condición óptima N20 del polvo WC-Co-Cr.*

PRUEBAS DE PIN SOBRE DISCO (G-99) (Condición Óptima)	
Carga	30 N
Tiempo	5, 10, 15, 30, 45, 60 min
Velocidad	400 rpm
Número de pines	6

Para calcular la pérdida de masa, los pines fueron pesados y limpiados con acetona antes y después de la prueba, usando una balanza electrónica con un grado de exactitud de $\pm 10^{-3}$ mg. La morfología y composición química del polvo-residuo del desgaste fue analizado por SEM.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se describió en secciones anteriores, las propiedades y características de los recubrimientos por rociado térmico son afectados por parámetros tales como: distancia de rociado y velocidad de avance; distribución del tamaño, tamaño y morfología de las partículas; química, velocidad y temperatura de la flama; propiedades químicas y físicas del polvo; entre otros. Algunos de ellos tienen mayor efecto sobre el recubrimiento final y el resultado deseado dependerá de la aplicación para la que se busque sea utilizado.

4.1 ETAPA 1. EFECTO DE LA DISTANCIA DE ROCIADO Y TIPO DE FLAMA

Como se describió en la sección experimental, el efecto de los parámetros de depósito está dividido en dos etapas. En la primera etapa se analiza la influencia de la distancia de rociado y la química de la flama sobre los cambios en la estructura cristalina de los recubrimientos y sobre su microestructura en función de la presencia de partículas sin fundir, cohesión interlaminar, oxidación, porcentaje de porosidad, entre otros. La designación para cada condición de rociado de esta etapa se muestra en la **Tabla 4-1**. Actualmente no se tiene reporte del efecto de los parámetros de rociado utilizando un proceso de combustión por flama sobre recubrimientos de WC-Co-Cr, razón por la cual se realiza el presente análisis.

Tabla 4-1. *Nomenclatura de los recubrimientos de acuerdo con las condiciones de rociado.*

Designación del recubrimiento	Tipo de flama	Distancia (mm)
C100	Carburante	100
N100	Neutral	100
O100	Oxidante	100
C200	Carburante	200
N200	Neutral	200
O200	Oxidante	200

4.1.1 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL

En la **Figura 4-1** se muestran los patrones de difracción de rayos X de la materia prima y de los recubrimientos rociados a una distancia de 100 y 200 mm, respectivamente. En el patrón de difracción de la aleación de WC-Co-Cr, se identificó la fase WC como la fase con mayor presencia y pequeñas proporciones de la fase Co y la fase η -Co₃W₃C. Se ha reportado que la presencia de la fase η -Co₃W₃C proviene del proceso de manufacturación [21] [30]. Por otra parte, el análisis de los patrones de difracción de los recubrimientos muestra los picos correspondientes a las fases W₂C, W y η -Co₃W₃C. La presencia de estas fases demuestra que durante de rociado térmico de las partículas de WC-Co-Cr ocurrió un proceso de decarburización y disolución de la fase de WC [21] [52] [5] [20] [6] [30]. En cuanto a la fase Co ésta desaparece para dar lugar a un ensanchamiento de picos en el rango 2 θ de 37 a 47° y de 68 a 78° en todos los recubrimientos, aunque es más notorio en los recubrimientos depositados a una distancia de 100 mm y en la condición rica en oxígeno depositada a 200 mm (**Figura 4-1c**). Este ensanchamiento de los picos pertenecientes a la fase η -Co₃W₃C, sugiere la amorfización y/o nanocrystalización del Co debido a las altas tasas de enfriamiento de las partículas durante su solidificación al momento del impacto [12] [21] [20] [30]. De acuerdo con el análisis semicuantitativo, los recubrimientos depositados a 100 mm con una flama rica en combustible y una neutra presentan mayor retención de la fase principal WC, 35.2% y 27.2% respectivamente, que los depositados con estas flamas a una distancia de 200 mm (16.4% y 18.4%, respectivamente). Este comportamiento se atribuye a que a menores distancias de rociado menor es el tiempo de permanencia de las partículas en la flama durante el proceso de rociado lo cual disminuye su calentamiento y oxidación y por lo tanto los fenómenos de decarburización y disolución. Por otra parte, los recubrimientos depositados a 200 mm además de presentar mayor decarburización de la fase WC en W₂C, también presentan mayor disolución del W₂C en W, como consecuencia del mayor tiempo de permanencia de las partículas en la flama debido a la mayor distancia que recorren.

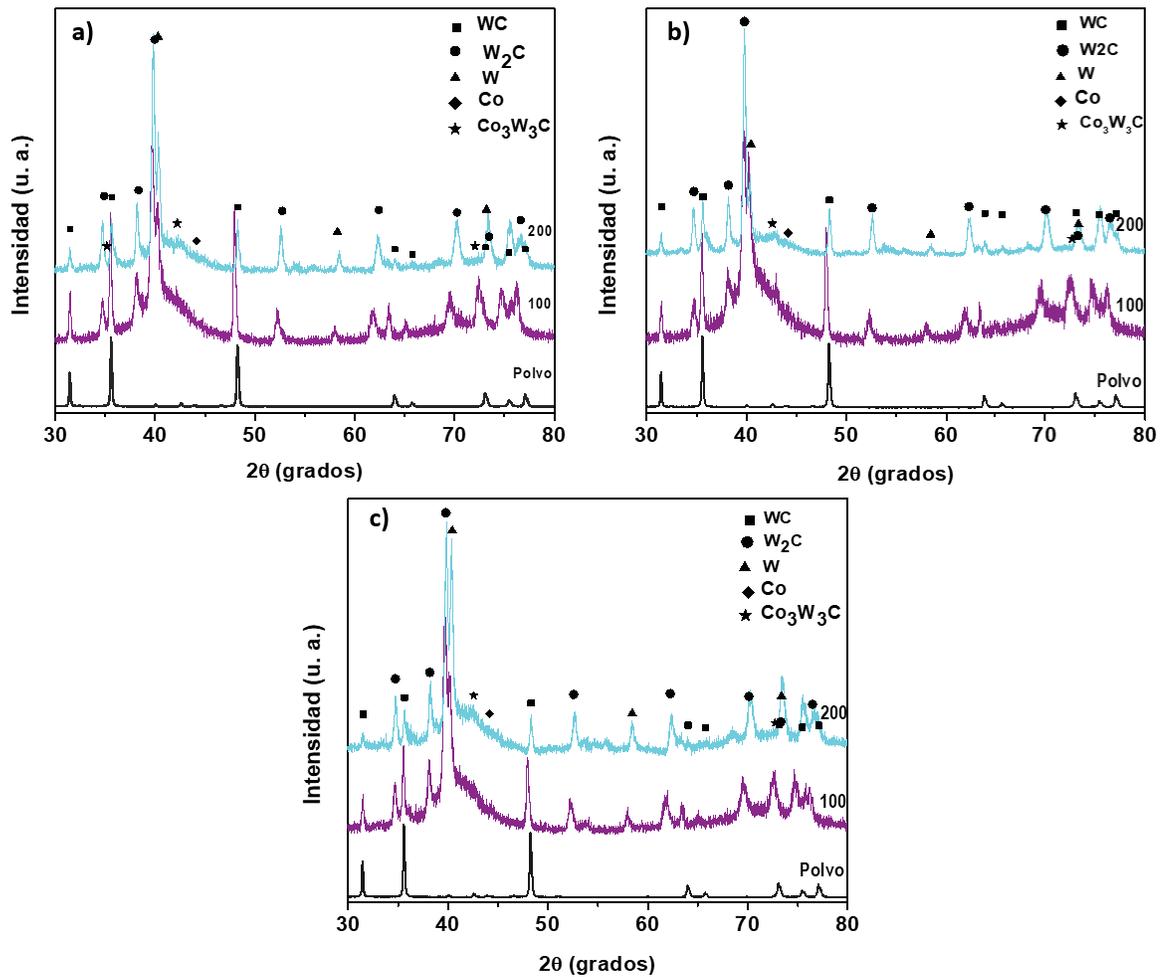


Figura 4-1. Patrones de difracción de rayos X para recubrimientos WC-Co-Cr depositados por rociado térmico a 100 y 200 mm de distancia con flama a) carburante, b) neutra y c) oxidante.

Es importante mencionar que a pesar de que el proceso de descomposición del WC está presente en todos los recubrimientos éstos presentan algunas diferencias respecto al tipo de flama empleada durante el depósito. Se observa que las condiciones depositadas a 100 mm son muy semejantes, sin embargo, la intensidad relativa de los picos de WC para la condición O100 (**Figura 4-1c**) es ligeramente menor que aquellos depositados con una flama rica en combustible y neutra. Con base en el análisis de rayos X, la flama oxidante es la que presenta una menor cantidad de WC (23.7%) y mayor porcentaje de W_2C (44.3%). De acuerdo con lo reportado por Berget y colaboradores [38], de Villiers Lovelock [21], Jacobs y

colaboradores [52], Wang y colaboradores [45] y Kumari y colaboradores [5], flamas ricas en el gas oxidante generan mayores temperaturas de partículas lo que incrementa la decarburización, disolución e incluso oxidación de la mismas reflejándose en una mayor pérdida de la fase de carburo de tungsteno.

Por otra parte, se observa que los recubrimientos rociados a una distancia de 200 mm presentan mayores diferencias dependiendo de la flama utilizada. Por ejemplo, la condición O200 (**Figura 4-1c**) muestra una intensidad de picos de la fase de W mucho mayor que las condiciones C200 y N200, esto debido a la mayor presencia de oxígeno en el rociado por la condición de la misma flama, lo que provoca mayor descomposición del WC en W_2C y a su vez en W y Co_3W_3C , de acuerdo con lo descrito por Li y colaboradores [20].

4.1.2 CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL

La sección transversal de los recubrimientos de WC-Co-Cr depositados a diferentes distancias y tipos de flama se observan en la **Figura 4-2**. En general, todos los recubrimientos presentan una microestructura heterogénea con presencia de partículas sin fundir, parcialmente fundidas, oxidación interna y alto porcentaje de porosidad (ver **Tabla 4-2**). De acuerdo con estos resultados, la distancia de rociado tiene un efecto sobre el porcentaje de porosidad y el espesor de los recubrimientos. Los recubrimientos depositados a una distancia de 200 mm presentan de manera general menor porosidad, contenido de partículas sin fundir y espesor a excepción del depositado con flama oxidante, **Tabla 4-2**. Lo anterior se atribuye a que a distancias cortas el tiempo de permanencia de las partículas en la flama disminuye lo que implica que las partículas no alcancen un estado ideal en vuelo que permita se deformen plásticamente al momento del impacto contra el sustrato. Esta falta de deformación incrementa la porosidad, el contenido de partículas sin fundir y el espesor de los recubrimientos. Por el contrario, a mayor distancia de rociado el tiempo de permanencia de las partículas en la flama aumenta generando que las partículas incrementen su viscosidad y velocidad y por lo tanto su deformación plástica al impacto, lo que disminuye el contenido de porosidad, partículas sin fundir y espesor.

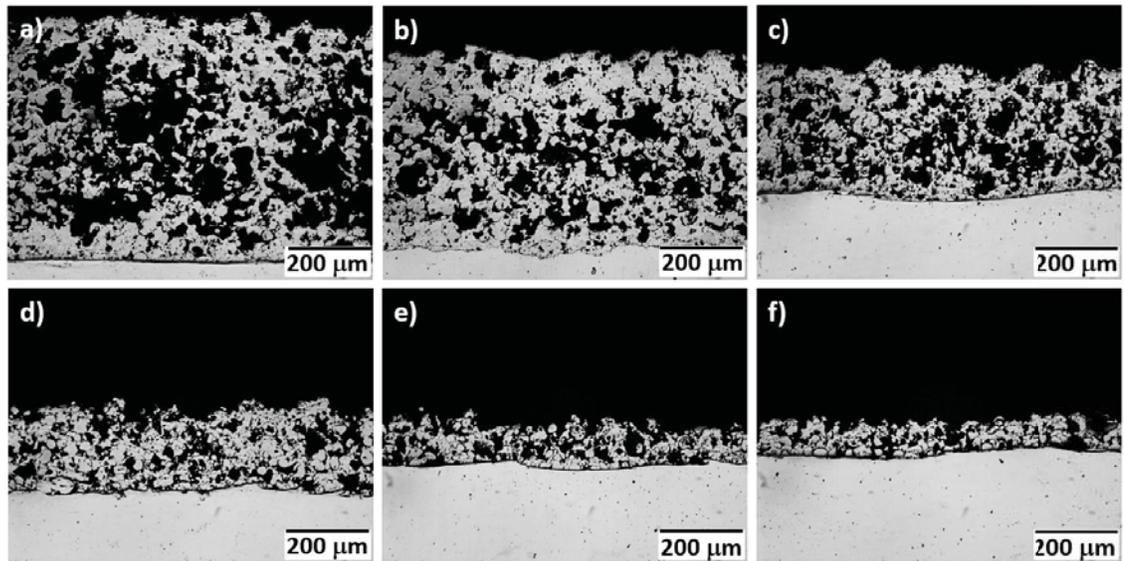


Figura 4-2. Sección transversal de recubrimientos WC-Co-Cr depositados por flama: a) y d) carburante; b) y e) neutra; c) y f) oxidante, a 100 y 200 mm, respectivamente.

De acuerdo con los resultados, se observa que independientemente de la química de la flama empleada los recubrimientos presentan aproximadamente el mismo porcentaje de porosidad para las dos distancias estudiadas.

Tabla 4-2. Porcentaje de porosidad y espesor de los recubrimientos WC-Co-Cr.

Condición	Porosidad (%)		Espesor (μm)	
	100 mm	200 mm	100 mm	200mm
C20	35.4 ± 3.7	30.8 ± 1.7	898.2 ± 52.0	338.5 ± 17.1
N20	33.0 ± 2.9	36.7 ± 2.2	738.6 ± 43.6	195.2 ± 15.4
O20	33.1 ± 3.7	29.9 ± 4.6	485.4 ± 49.0	168.8 ± 24.9

4.2 ETAPA 2. EFECTO DE LA GEOMETRÍA DE LA BOQUILLA Y TIPO DE FLAMA

En esta etapa se analiza el efecto combinado de la geometría de la boquilla y el tipo de flama sobre las características estructurales, microestructurales, químicas, mecánicas y de desgaste por deslizamiento de los recubrimientos. La denominación para cada condición de rociado de esta etapa se muestra en la **Tabla 4-3**.

Tabla 4-3. Nomenclatura de los recubrimientos de acuerdo con las condiciones de rociado.

Designación del recubrimiento	Tipo de flama	Boquilla
C10	Carburante	B10
N10	Neutra	B10
O10	Oxidante	B10
C20	Carburante	B20
N20	Neutra	B20
O20	Oxidante	B20
C30	Carburante	B30
N30	Neutra	B30
O30	Oxidante	B30

4.2.1 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL

La **Figura 4-3** muestra los patrones de difracción de la aleación de WC-Co-Cr y de los recubrimientos obtenidos en todas las condiciones descritas en la **Tabla 4-3**. El patrón de difracción de la materia prima muestra al WC como la fase con mayor presencia, así como algunos rastros de la fase Co y la fase η -Co₃W₃C. Por el contrario, picos correspondientes a las fases de WC, W₂C, W y Co₃W₃C, se observan en los patrones de todos los recubrimientos evidenciando que procesos de decarburización y disolución del WC ocurrieron durante el proceso de rociado térmico de las partículas de polvo [21] [52] [5] [20] [6] [30]. La fase de Co, originalmente presente en la aleación, no se observa y a su vez se distingue el ensanchamiento de dos picos para todos los recubrimientos, el primero en el rango de 37

a 45° y el segundo entre 68 a 80° en 2θ . Este ensanchamiento en los picos, identificada como la fase η , corresponde a la matriz aglutinante y con frecuencia se encuentra en tamaño nano-cristalino o como fase amorfa debido a las altas tasas de enfriamiento que experimentan las partículas rociadas durante la solidificación como ha sido reportado previamente por de Villiers Lovelock [21], Li y colaboradores [57], Nerz y colaboradores [12] y Verdon y colaboradores [30]. Cabe mencionar que estos picos son más visibles para los recubrimientos rociados con la boquilla 30 (**Figura 4-3d**) que para los que fueron rociados con las boquillas 20 y 10.

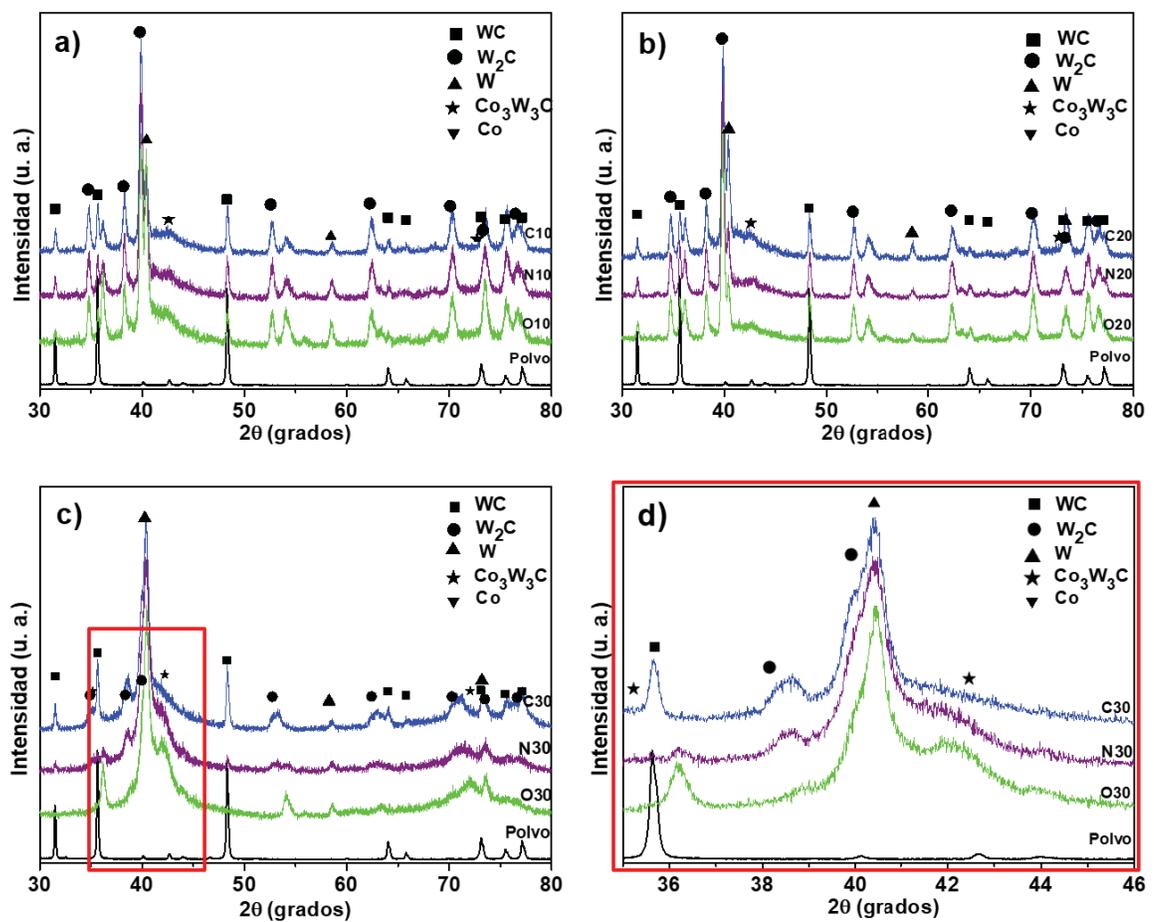


Figura 4-3. Patrones de difracción de rayos X de recubrimientos WC-Co-Cr depositados con boquillas: a) B10, b) B20 y c) B30; d) vista a detalle de la ampliación de picos en el patrón de difracción para las condiciones B30 en el rango 37 a 45° de 2θ .

A pesar de que los patrones de difracción son bastante similares para todos los recubrimientos, se observa un efecto interesante en términos del tipo de flama para las muestras depositadas con la B30. Claramente se observa en la **Figura 4-3c** que los picos de WC son más intensos para el recubrimiento rociado con una flama rica en combustible (C30), mientras que la intensidad relativa de esta fase disminuye o casi desaparece para las muestras depositadas con una flama neutra y/u oxidante (N30 y O30). Como resultado de esto, se realizó una semi-cuantificación del contenido de cada fase detectada en los patrones de difracción de rayos X por medio del software DiffracEVA. El análisis indicó que la muestra C30 depositada con una flama rica en combustible, retuvo el contenido más alto de la fase WC (aproximadamente 24%) comparado con los recubrimientos rociados usando una flama neutra (N30) y una flama rica en oxígeno (O30), los cuales muestran un grado más alto de decarburización con presencia significativa de las fases W y η -Co₃W₃C y la correspondiente a la fase WC se redujo al mínimo (5 y 2 %, respectivamente). Este comportamiento está relacionado a las condiciones de la química de la flama; flamas ricas en combustible causan bajas temperaturas y altas velocidades de partícula resultando en un menor grado de decarburización o descomposición de las partículas de WC. Además, el tiempo de permanencia de las partículas de polvo en contacto con la flama es más corto, como resultado de la alta velocidad, y por consiguiente alcanzan temperaturas más bajas. Por el contrario, altas temperaturas y largos tiempos de permanencia de las partículas son obtenidos al usar flamas neutras y oxidantes ocasionando un mayor grado de disolución y decarburización de las partículas de WC. Resultados similares han sido reportados por Berget y colaboradores [38]; de Villiers Lovelock [21]; Jacobs y colaboradores [4]; Kumari y colaboradores [5]; Li y colaboradores [20]; y Wang y colaboradores [45] durante el depósito de aleaciones de WC por otras técnicas de rociado térmico (rociado de alta velocidad por combustión de oxígeno, plasma atmosférico y detonación) donde encontraron que la decarburización de los recubrimientos de carburo de tungsteno se reduce cuando se emplean flamas de baja temperatura.

4.2.2 CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL

La sección transversal de los recubrimientos depositados a diferentes boquillas y tipos de flama se muestra en la **Figura 4-4**. Como se observa en las micrografías, la microestructura de los recubrimientos WC-Co-Cr es bastante similar para los recubrimientos depositados con las boquillas B10 y B20 (**Figura 4-4a-f**). Para estas condiciones no se aprecia una

microestructura laminar, y a su vez, se aprecia una microestructura no uniforme, con grandes cantidades de partículas sin fundir y parcialmente fundidas, además de algunas regiones altamente porosas. El limitado aplanamiento de las partículas de polvo se atribuye a la baja velocidad lo cual causa menor grado de deformación plástica de las partículas al momento del impacto [4] [5] [2], mientras que el contenido de porosidad (**Tabla 4-4**) es consecuencia de esta falta de aplanamiento y de una fundición heterogénea de las partículas durante el rociado [58] [59]. Sin embargo, es importante señalar que estos recubrimientos muestran la presencia de partículas carburo con forma redondeada y con diferente tamaño de grano uniformemente distribuidos a lo largo de su microestructura. Por el contrario, la microestructura típica de recubrimientos depositados por rociado térmico se distingue para las muestras depositados con la boquilla B30 **Figura 4-4 (g-i)**. Dichos recubrimientos muestran una estructura de laminillas paralelas a la superficie del sustrato, baja porosidad (**Tabla 4-4**), pocas partículas sin fundir y óxidos de forma alargada. De manera particular, la morfología de estos recubrimientos presenta diferencias significativas en función del tipo de flama utilizada. Se observa, que las partículas de carburo de tungsteno están distribuidas en la mayoría de las laminillas de la muestra depositada con flama carburante (C30, **Figura 4-4g**), mientras que para las muestras N30 y O30 (**Figura 4-4h y Figura 4-4i**, respectivamente), los granos de WC desaparecieron casi por completo dejando una matriz de Co con W y subcarburos. La ausencia de partículas de carburos para estos recubrimientos reafirma que una disolución de las partículas de WC dentro de la matriz Co ocurrió durante el depósito, causando que el volumen de la fase aglutinante aumentara, **Figura 4-4 (h-i)**. Este resultado es consistente con el análisis de difracción de rayos X, donde se obtuvieron altas concentraciones de W (aproximadamente 36%) y fase η -Co₃W₃C (incrementando del 9 al 36% aproximadamente). El alto grado de decarburización de los recubrimientos para las condiciones N30 y O30 se atribuye a la alta temperatura y condiciones de oxidación de la flama.

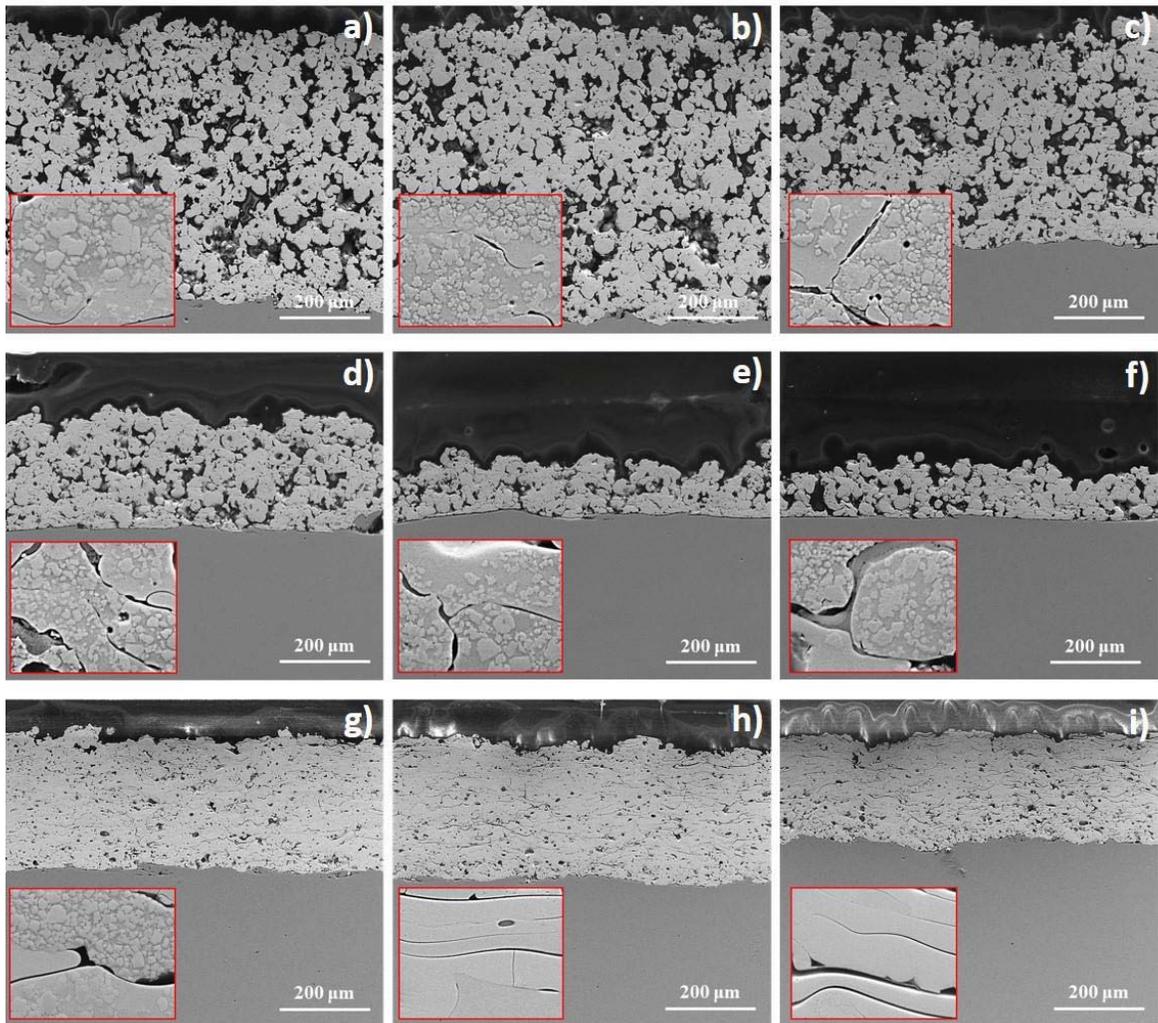


Figura 4-4. Sección transversal de los recubrimientos WC-Co-Cr rociados por flama por combustión depositados con boquilla: B10 (a-c), B20 (d-f) y B30 (g-i) y tipo de flama: carburante (a, d, g), neutra (b, e, h) y oxidante (c, f, i). Una vista detallada de la microestructura correspondiente ha sido incluida en la inserción.

Tabla 4-4. Porcentaje de porosidad de recubrimientos WC-Co-Cr para todas las condiciones obtenidas.

Condición	Porosidad (%)
C10	16.7 ± 1.6
N10	14.7 ± 1.7
O10	15.9 ± 1.9
C20	17.1 ± 1.4
N20	14.9 ± 2.6
O20	18.9 ± 1.9
C30	6.6 ± 1.2
N30	6.4 ± 0.7
O30	8.0 ± 1.0

Es importante mencionar que independientemente de la boquilla y química de la flama empleada, los granos de carburo de tungsteno presentes en los recubrimientos exhiben una morfología redondeada. En la **Figura 4-5** se muestra a gran detalle la microestructura de los recubrimientos depositados por las distintas boquillas, en todas las condiciones mostradas se aprecia que la morfología de los granos de WC cambió de angular a redondeada. Se observan también partículas presumiblemente de WC en un tono gris oscuro, las cuales están rodeadas de la fase W_2C (gris claro). Este comportamiento es un indicativo de la disolución del WC durante el rociado, y ha sido reportado previamente por Jacobs y colaboradores [52], Stewart y colaboradores [29] y Verdon y colaboradores [30], en donde estudios de microscopía electrónica de transmisión y difracción de electrones han mostrado que el W_2C tiene una estructura de borde de núcleo y rodea a las partículas de WC. En dichas investigaciones también se ha demostrado que el Co puede aparecer como dendritas alrededor de los granos de carburo.

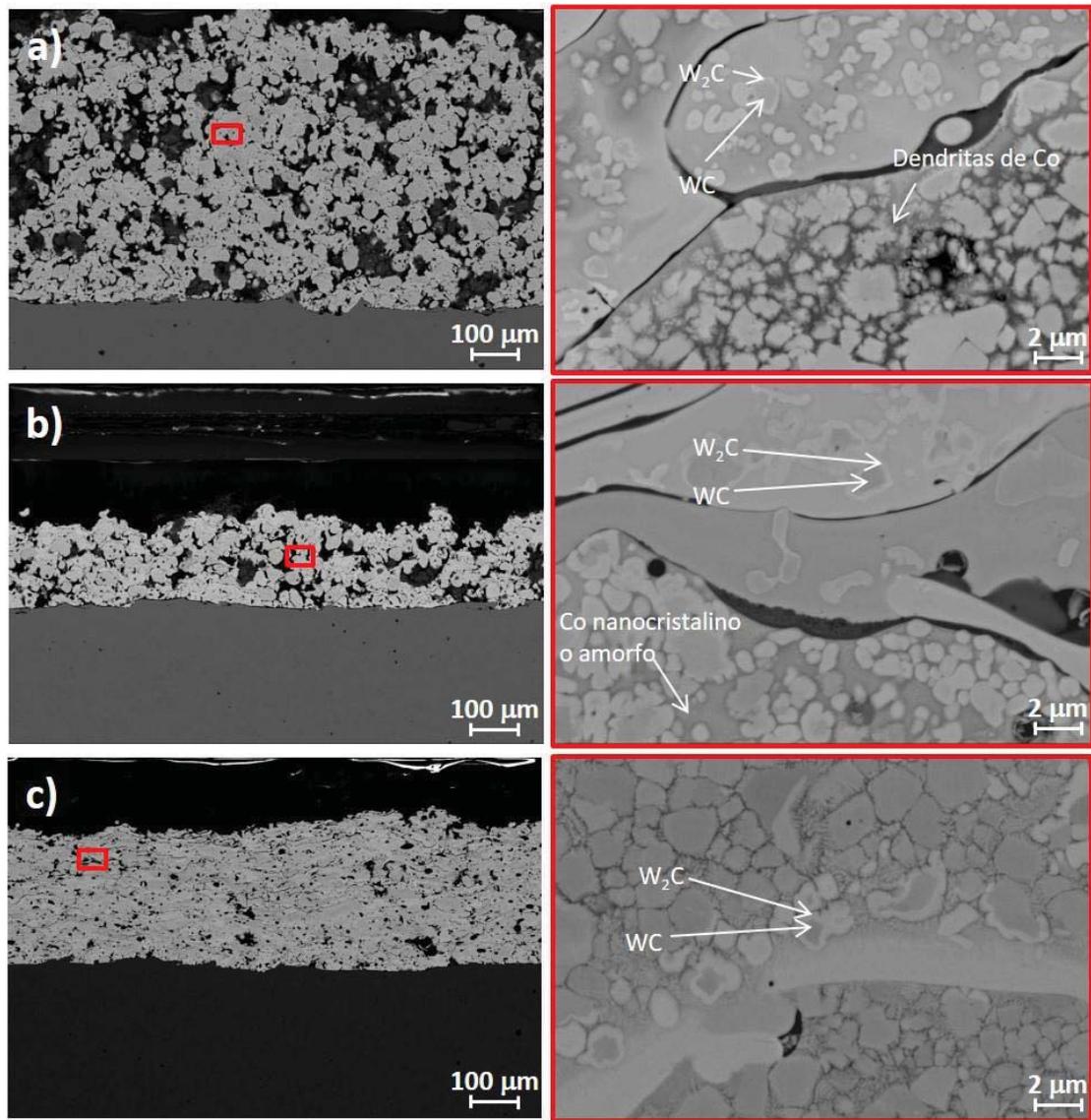


Figura 4-5. Microestructura a detalle de recubrimientos WC-Co-Cr depositados con: a) B10, b) B20 y c) B30.

Con base en los análisis microestructurales, la geometría de la boquilla tiene una influencia significativa sobre las características de las partículas en vuelo (velocidad y temperatura), es decir, sobre la energía que es transmitida del gas a las partículas de polvo. Analizando las secciones transversales de las boquillas se observa que la geometría interna es casi idéntica

para las boquillas 10 y 20 y la que corresponde a la boquilla 30 es completamente diferente (**Figura 4-6**).

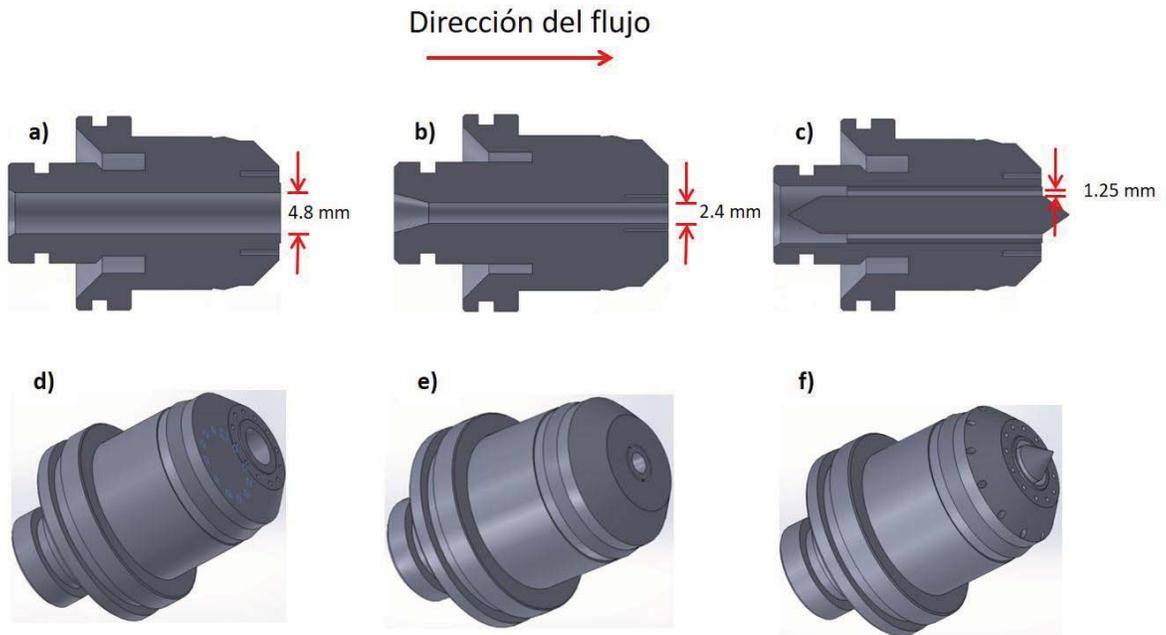


Figura 4-6. Sección transversal y vista isométrica de las boquillas: a) y d) B10; b) y e) B20; y c) y f) B30, respectivamente.

De acuerdo a las mediciones de la sección transversal, se encuentra que la boquilla 30 tiene un área de salida más pequeña (ancho del anillo: 1.25 mm, **Figura 4-6c**), seguida por las boquillas 20 y 10 (diámetros: 2.4 mm, **Figura 4-6b**; y 4.8 mm, **Figura 4-6a**; respectivamente). Puesto que las 3 boquillas tienen un ducto recto hacia la salida de los gases, entonces éstas tienen una velocidad máxima de Match 1 [60], y debido a que la velocidad de la flama (80-100 m/s [18]) en un proceso de rociado por combustión por flama es mucho más baja que la velocidad del sonido, entonces puede asumirse que el flujo de gas se comporta de manera incompresible. De acuerdo con los principios de la dinámica de fluidos, los ductos con un área de salida más pequeña incrementan la velocidad del flujo y viceversa [61]. Por lo tanto, se espera que la boquilla 30 produzca una velocidad de partícula más alta, seguida por la boquilla 20 y finalmente por la boquilla 10. De acuerdo con lo anterior, las diferencias en la

microestructura de los recubrimientos de WC-Co-Cr están principalmente asociadas con la variación del estado de la partícula una vez que impacta contra el sustrato. Las características de las partículas en vuelo dependen de las diferencias en las áreas de salida de las boquillas, afectando directamente la energía térmica y cinética y por lo tanto el estado de deformación plástica al momento del impacto con el sustrato resultando en distintas morfologías de las laminillas. Los recubrimientos rociados con boquillas de área de salida más pequeña, y por lo tanto a mayor velocidad (B30), presentan una estructura laminar con pocas partículas sin fundir y parcialmente fundidas. A estas condiciones, parece que las partículas alcanzan la velocidad y la temperatura ideal asegurando un balance entre aplanamiento y solidificación al impacto contra el sustrato (**Figura 4-4g-i**). Por el contrario, boquillas con áreas de salida más grande (B10 y B20) están asociadas con velocidades bajas y por lo tanto menor energía cinética que se transforma en energía de deformación. La microestructura de los recubrimientos para estos casos está formada de una gran cantidad de partículas no fundidas y parcialmente fundidas, poros y óxidos (**Figura 4-4a-f**). Estas características se atribuyen tanto a la resolidificación o enfriamiento de las partículas, a la interacción con el aire del ambiente, al calor que proviene de la flama y a la baja velocidad de las partículas, la cual es incapaz de esparcir y deformar plásticamente las partículas de polvo [21] [20].

Considerando la influencia de la energía térmica de la flama sobre las características de los recubrimientos, varios estudios han demostrado que, durante el rociado térmico de los materiales con carburo de tungsteno, entre mayor es la transferencia de calor de la flama a las partículas de WC-Co-Cr, mayor es la reacción de descomposición de la fase de WC. Por lo tanto, disminuyendo la habilidad de calentamiento de la flama (temperatura) y/o incrementando su velocidad, lo cual reduce el tiempo de residencia de las partículas en la flama, se reducen los niveles de decarburización y/o disolución de las partículas de WC con la fase aglutinante [52] [20] [12] [6] [29].

En términos generales, la temperatura de la flama de los sistemas de rociado por combustión es fuertemente influenciada por la química o estequiometría de la flama [18]. De manera particular, condiciones reductoras o ricas en combustible generan altas velocidades de partículas y bajas energías térmicas de la flama, lo cual reduce la temperatura de las partículas y su nivel de oxidación. Por otra parte, condiciones neutras y oxidantes producen altas temperaturas y bajas velocidades de partículas, permitiendo un alto grado de oxidación de las partículas como consecuencia de mayores tiempos de residencia en la flama. Estos resultados son consistentes con el análisis de difracción de

rayos X, los cuales muestran que cuando se cambia de una flama rica en combustible a una rica en oxígeno, menos partículas de WC son retenidas y mayor decarburización y reacción con la fase aglutinante es detectada en los recubrimientos.

Es importante mencionar que todas las condiciones obtenidas muestran tener un alto nivel de porosidad, siendo los recubrimientos depositados por B10 y B20 los que presentan mayor porcentaje de porosidad en comparación a los recubrimientos depositados por la boquilla B30 (**Tabla 4-4**). Los recubrimientos depositados con B30 producen menor nivel de porosidad debido a que la combinación de energías cinética-térmica de las partículas permite que, al momento del impacto, la mayoría de las partículas tengan una morfología aplanada evitando la formación de porosidades. Por otro lado, el uso de las boquillas B10 y B20 que proporcionan menor velocidad de partícula, es decir, mayores tiempos de permanencia en la flama, la energía térmica suministrada a las partículas no es suficiente para que éstas alcancen un grado de viscosidad o fusión, por lo que, al momento del impacto contra el sustrato, las partículas sólo son adheridas o sólo son ligeramente deformadas en el impacto generando porosidades entre ellas.

4.2.3 CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS (DUREZA)

La **Figura 4-7** muestra el perfil de indentación a lo largo de los recubrimientos WC-Co-Cr para todas las condiciones examinadas. Como se observa, la dureza es bastante consistente a través del espesor del recubrimiento en todas las condiciones probadas; sin embargo, se aprecia que los recubrimientos depositados con B10 y B20 son más duros que los recubrimientos rociados con B30. Los valores más bajos de dureza obtenidos para las condiciones B30 con flamas neutras y oxidantes pueden atribuirse de manera clara al bajo contenido de fases duras, es decir WC y W_2C , lo cual concuerda con los resultados de difracción de rayos X y el análisis de la microestructura (**Figura 4-3** y **Figura 4-4**, respectivamente). Cabe mencionar que la dispersión de los resultados de dureza se ve altamente afectada por las inherentes características microestructurales de los recubrimientos tales como: tamaño y distribución de carburos, fracción de fases duras, contenido de porosidad y nivel de cohesión con la fase aglutinante [41] [13] [52] [62] [63].

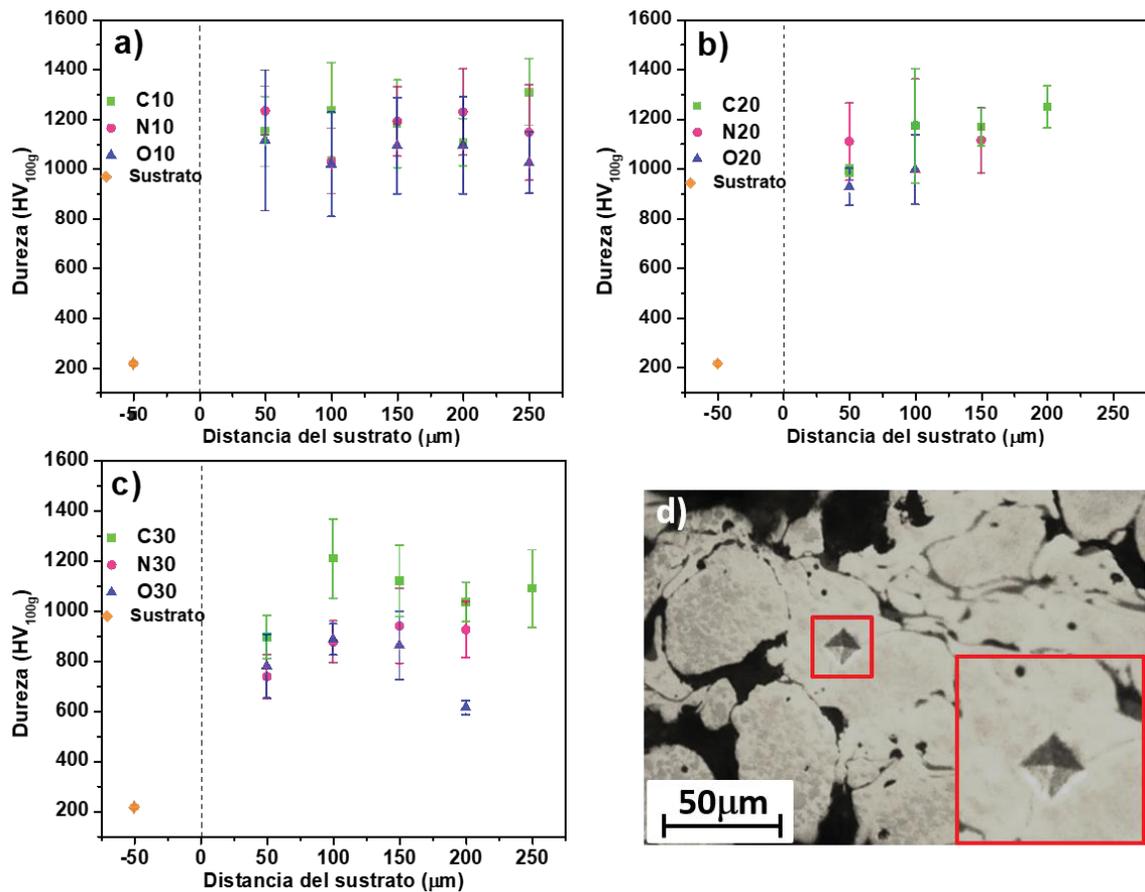


Figura 4-7. Perfil de dureza de los recubrimientos WC-Co-Cr a largo y ancho del espesor, rociados con boquilla: a) B10, b) B20 y c) B30; d) Huella de la indentación sobre el recubrimiento de la condición O10.

4.2.4 COMPORTAMIENTO AL DESGASTE POR DESLIZAMIENTO

El comportamiento al desgaste por deslizamiento en función de la carga normal aplicada a los recubrimientos WC-Co-Cr para todas las condiciones probadas se observa en la **Figura 4-8**. Como se aprecia, la pérdida de masa de los recubrimientos incrementa conforme también se incrementa la carga normal. Las muestras depositadas con las boquillas 10 y 20 muestran la menor pérdida de masa y por el contrario la mayor pérdida de masa se observa para los recubrimientos depositados con la boquilla 30. Entre todas las condiciones probadas, se observa que el mejor desempeño al desgaste lo presentan los recubrimientos depositados con la boquilla 20.

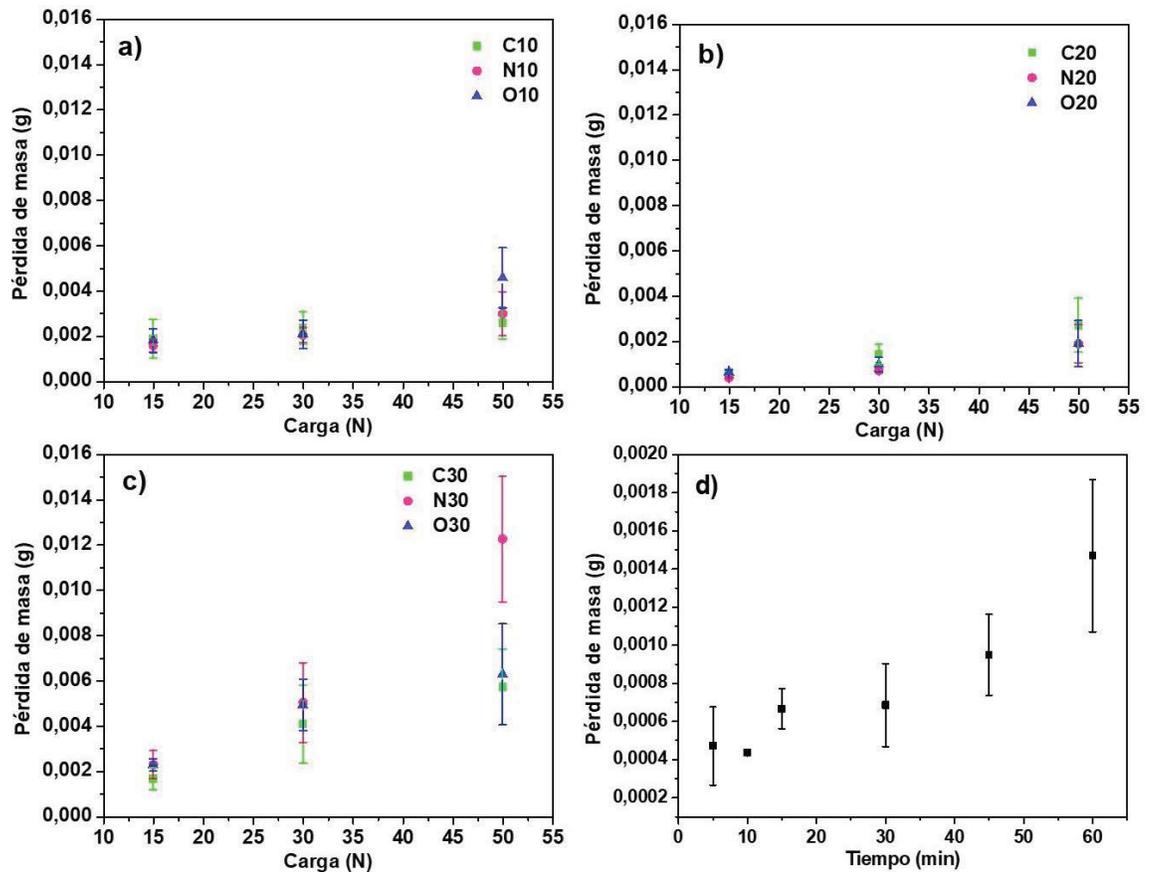


Figura 4-8. Desgaste por deslizamiento de los recubrimientos WC-Co-Cr en función de la carga aplicada para las boquillas: a) B10, b) B20 y c) B30; d) desgaste por deslizamiento en función de la variación en tiempo para la condición N20.

La **Figura 4-9** muestra los polvos-residuo provenientes de la prueba de desgaste por deslizamiento para las condiciones depositadas por las 3 boquillas. Los polvos-residuo obtenidos de las condiciones B10 y B20 (**Figura 4-9a**), presentan distintas morfologías incluyendo partículas gruesas aplanadas y semi-aplanadas ricas en hierro correspondientes a la contraparte de acero (disco), junto con residuos de forma más redondeada ricos en tungsteno y que pertenecen a los recubrimientos WC-Co-Cr, de acuerdo con los análisis químicos. Por el contrario, partículas fracturadas ricas en tungsteno y residuos altamente deformados con morfología de hojuela ricos en hierro (**Figura 4-9b**) se observan para las muestras rociadas con la boquilla B30. Es importante resaltar que la forma de las partículas

de los residuos de la prueba de desgaste está propiamente relacionada con la microestructura de los recubrimientos, **Figura 4-4**. El mapeo de composición química muestra que el W está presente principalmente en los residuos redondeados y fragmentados y el residuo más grueso está compuesto de Fe proveniente del acero (**Figura 4-9c-d**).

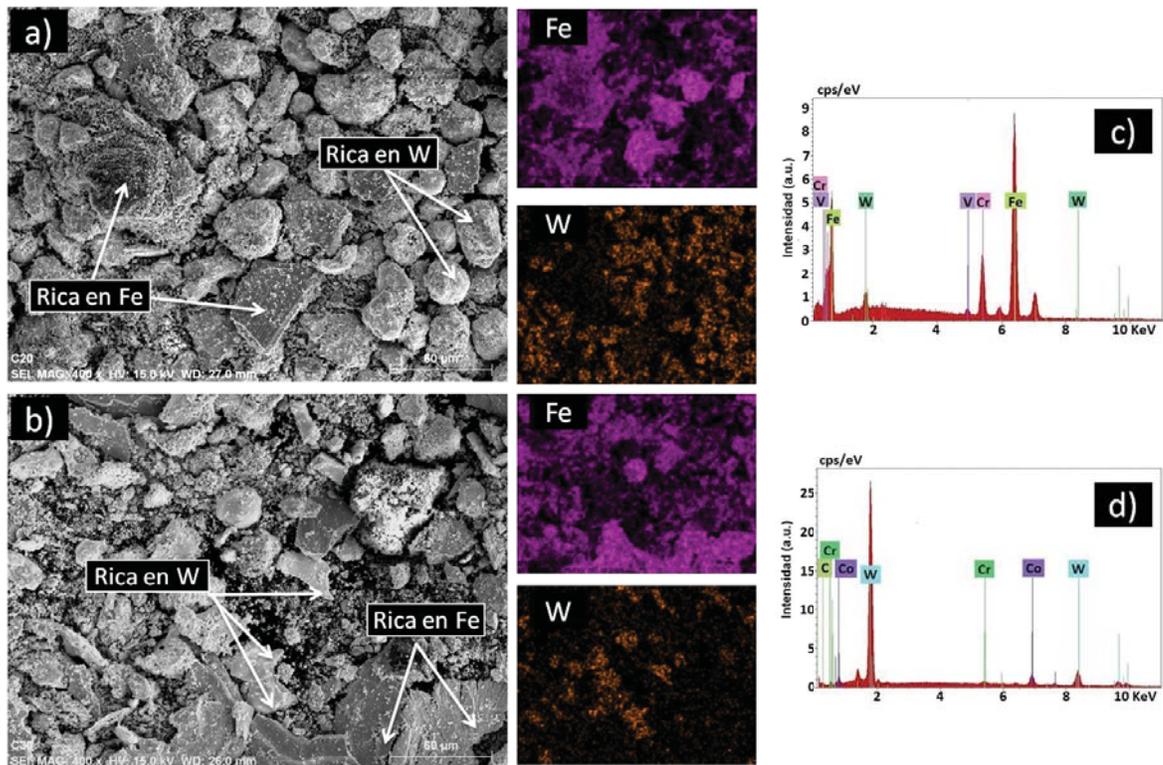


Figura 4-9. Morfología de los polvos-residuo correspondientes a las condiciones: a) B10 y B20, b) B30 y el mapeo correspondiente de EDS. Espectro representativo del análisis EDS para: c) rico en Fe y d) rico en W tomado de las partículas indicadas de a) y b).

Al comienzo de las pruebas de desgaste por deslizamiento, el área de contacto inicial entre la superficie del recubrimiento y la contraparte de acero se desarrolla a través de la microestructura del recubrimiento. Durante el movimiento de deslizamiento puntos locales de contacto van incrementándose, particularmente entre los granos duros (WC rodeados de W_2C) y la contraparte de acero (ver **Figura 4-10**). Los puntos de contacto son consecuencia de la severa deformación del aglutinante provocando que cada vez más

partículas duras sean expuestas en la superficie. Por lo tanto, la presencia de partículas duras contra la contraparte de acero produce predominantemente un mecanismo de desgaste por abrasión y probablemente tribo-oxidación, lo cual se confirmó posteriormente en la superficie de la contraparte de acero. Las partículas duras se comportan como puntos de apoyo [64] actuando contra la contraparte de acero resultando en la formación de grandes surcos, además de la remoción de partículas ricas en Fe con morfología de hojuelas gruesas como se muestra en la **Figura 4-9a**. De forma subsecuente, se produce la remoción de partículas de carburo conforme la fase aglutinante se desgasta. Particularmente, las partículas esféricas no fundidas fueron removidas de la superficie del recubrimiento, las cuales actúan como partículas abrasivas libres entre las superficies de contacto, residuos de tales partículas liberadas fueron encontradas entre los polvos-residuo como se muestra en la **Figura 4-9a**. Cuando se trata de este mecanismo, el desgaste ocurre por la remoción de la fase aglutinante seguido por el arranque de las partículas de carburo. Este mecanismo de desgaste es observado para los recubrimientos depositados con las boquillas B10 y B20, **Figura 4-10a**, los cuales contienen una gran cantidad de partículas de carburo distribuidas a lo largo de la fase aglutinante, **Figura 4-4a-f**.

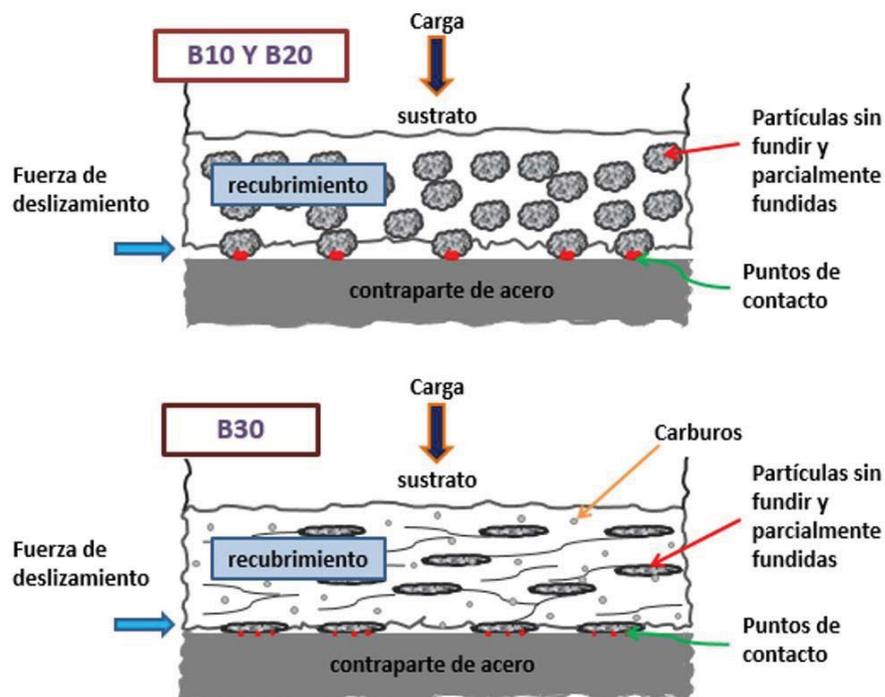


Figura 4-10. Mecanismo de desgaste para los recubrimientos WC-Co-Cr en función de la boquilla utilizada, a) B10 y B20, b) B30.

Por el contrario, el desgaste de los recubrimientos depositados con la B30 surge a través de la delaminación de partículas. De acuerdo al análisis de difracción de rayos X y las imágenes de microscopia, estos recubrimientos contienen baja concentración de fases de WC y W_2C , las cuales proporcionan resistencia al desgaste, y altos contenidos de las fases W y Co_3W_3C , que se han reportado que fragilizan la fase aglutinante [6] [29] [45]. Durante el desgaste, las laminillas del recubrimiento se fracturan o fatigan fácilmente y son arrancados del recubrimiento. Resultados similares de ambos mecanismos de desgaste han sido reportados anteriormente para recubrimientos de WC depositados por diferentes técnicas de rociado térmico [4] [62] [63] [13] [43] [45].

De acuerdo con la semicuantificación de fases del análisis de difracción de rayos X (**Figura 4-3**), concentraciones altas de la fase de WC con W_2C (aprox. 70%) y bajos contenidos de W y Co_3W_3C (debajo de aproximadamente 21 y 10%, respectivamente) resultan en menores pérdidas de masa para las condiciones B10 y B20. Particularmente, el contenido de fases duras (WC junto con el W_2C) para las muestras con menor pérdida de masa, B20, representan alrededor del 82% mientras que para N30 el contenido de fases duras es aproximadamente el 35%. Entre todas las condiciones probadas, las muestras B30 mostraron el contenido más bajo de WC y W_2C y el más alto de las fases de W y Co_3W_3C . Por lo tanto, proporciones relativamente bajas de WC con W_2C en las partículas influyen en el comportamiento al desgaste por deslizamiento. Los presentes resultados muestran que la presencia de la fase W_2C en los recubrimientos, parece ser benéfica para conferir mayor resistencia al desgaste por deslizamiento en seco de los recubrimientos WC-Co-Cr rociados por flama. Resultados similares han sido reportados por Schwetzke y Kreye [6] quienes encontraron que el porcentaje de decarburización de hasta un 60% no influye en la resistencia al desgaste de los recubrimientos WC depositados por HVOF.

En general, el comportamiento al desgaste por deslizamiento parece estar controlado tanto por la distribución homogénea de partículas duras en la microestructura, así como por la presencia de las fases duras WC y W_2C . Las condiciones B10 y B20 se distinguen por tener estas características, mientras que las muestras B30 se caracterizan por tener una morfología pobre en WC y W_2C y una fase aglutinante frágil con altas concentraciones de W y subcarburos de Co los cuales contribuyen a que los recubrimientos presenten menor resistencia al desgaste y mayor arranque de partículas.

5 CONCLUSIONES

1. La distancia de rociado tiene influencia sobre la estructura de los recubrimientos depositados, debido a que, a mayor tiempo de permanencia en la flama de las partículas, mayor es el grado de decarburización y disolución del WC, por efecto de la energía que se transmite a las partículas, permitiendo un mayor estado de calentamiento y por lo tanto un mayor grado de descomposición.
2. A distancias cortas de rociado (100mm) los recubrimientos presentan mayor porosidad y espesor, debido al menor tiempo de permanencia en la flama de las partículas lo que limita su estado de calentamiento, provocando que impacten al sustrato aún sin fundir o parcialmente fundidas, generando porosidad entre ellas y un menor grado de aplanamiento. Distancias largas de depósito (200mm) permiten mayores tiempos de permanencia en la flama lo que aumenta su estado de calentamiento y velocidad generando un mejor aplanamiento de las partículas al impacto con el sustrato, disminuyendo el porcentaje de porosidad y por lo tanto el espesor del recubrimiento.
3. Las partículas de WC sufren altos niveles de decarburización y disolución durante el rociado para todas las condiciones consideradas. Sin embargo, el cambiar la química de la flama de rica en combustible a rica en oxígeno se generan temperaturas de partícula más altas permitiendo un mayor grado de descomposición del WC como se detectó mediante los análisis de difracción de rayos X. Una reducción en la entrada de calor durante el rociado disminuye el grado de descomposición del WC en W_2C , W y Co_3W_3C .
4. La geometría de la boquilla utilizada durante el depósito de los recubrimientos influye significativamente en la microestructura de los recubrimientos. Boquillas con un área de salida menor producen velocidades de partícula más altas y por lo tanto menores tiempos de residencia en la flama y temperaturas de partícula asegurando un balance entre el aplanamiento y expansión de la partícula al momento del impacto. Por otra parte, boquillas con área de salida más grande, limitan la deformación de las partículas, es decir, promueven la presencia de grandes cantidades de partículas sin fundir y parcialmente fundidas como resultado de su baja velocidad.

5. El comportamiento al desgaste por deslizamiento está fuertemente ligado a la microestructura del recubrimiento y al contenido de fases duras (WC y W_2C). La presencia de fases duras distribuidas en la microestructura es un factor clave para conferir superior resistencia al desgaste independiente del porcentaje de porosidad.
6. La transformación de fase del WC al W_2C parece no disminuir las propiedades del desgaste por deslizamiento. Sin embargo, una disminución considerable de granos de WC junto con una alta concentración de W y fase $\eta-Co_3W_3C$ en la matriz deterioran la resistencia al desgaste.
7. El mecanismo de desgaste que predomina entre las superficies de contacto para los recubrimientos depositados con las boquillas B10 y B20 se debe inicialmente al desgaste abrasivo de la matriz seguido por el arranque de las partículas duras. Por el contrario, el mecanismo de desgaste de las condiciones B30 es debido a la delaminación como resultado de la fractura y fatiga de las laminillas.

6 TRABAJOS FUTUROS

- Control del espesor durante el proceso de rociado (ver **Figura 6-1**) mediante un sistema automatizado (variación del número de pasadas y apertura) para obtener un recubrimiento más uniforme y medir con mayor precisión su comportamiento al desgaste.

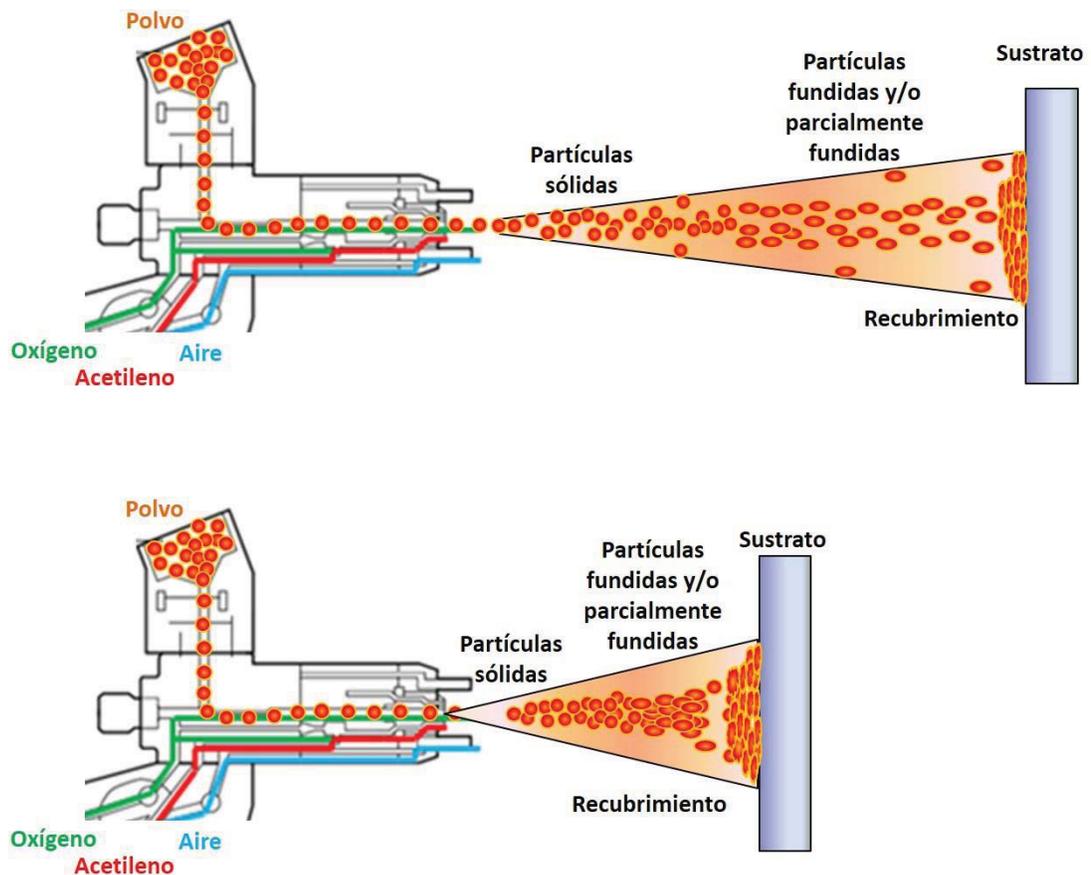


Figura 6-1. Variación en el espesor en función de la distancia durante el proceso de rociado térmico.

- Mediciones de la velocidad y temperatura de las partículas (estado de la “partícula en vuelo”), antes del impacto contra el sustrato, en función de las diferentes condiciones de prueba del presente estudio, con el fin de analizar a detalle su efecto

sobre el nivel de decarburización y/o disolución de las partículas WC-Co-Cr durante el proceso de rociado térmico.

- Análisis detallado a manera de clarificar la correspondencia actual entre la dureza y el comportamiento al desgaste por deslizamiento.

7 REFERENCIAS

- [1] G. Bolelli, V. Cannillo, L. Lusvarghi y T. Manfredini, «Wear behaviour of thermally sprayed ceramic oxide coatings,» *Wear*, vol. 261, p. 1298–1315, 2006.
- [2] J. K. N. Murthy y B. Venkataraman, «Abrasive wear behaviour of WC–CoCr and Cr₃C₂–20(NiCr) deposited by HVOF and detonation spray processes,» *Surface & Coatings Technology*, vol. 200, pp. 2642-2652, 2006.
- [3] T. Sahraoui, N. Fenineche, G. Montavon y C. Coddet, «Alternative to chromium: Characteristics and wear behavior of HVOF coatings for gas turbine shafts repair (heavy- duty),» *Journal Materials Processing Technology*, vol. 152, p. 43–55, 2004.
- [4] L. Jacobs, M. M. Hyland y M. de Bonte, «Study of the influence of microstructural properties on the sliding-wear behavior of HVOF and HVOF sprayed WC-cermet coatings,» *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 8, nº 1, pp. 125-132, 1999.
- [5] K. Kumari, K. Anand, M. Bellacci y M. Giannozzi, «Effect of microstructure on abrasive wear behavior of thermally sprayed WC–10Co–4Cr coatings,» *Wear*, vol. 268, p. 1309–1319, 2010.
- [6] R. Schwetzke y H. Kreye, «Microstructure and properties of tungsten carbide coatings sprayed with various high velocity oxygen fuel spray systems,» *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 8, nº 3, pp. 433-439, 1999.
- [7] H. Chen y I. Hutchings, «Abrasive wear resistance of plasma-sprayed tungsten carbide-cobalt coatings,» *Surface and Coatings Technology*, vol. 107, pp. 106-114, 1998.
- [8] H. Kim, Y. Kweon y R. Chang, «Wear and erosion behavior of plasma-sprayed WC-Co coatings,» *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 3, nº 2, pp. 169-178, 1994.
- [9] S. Wayne y S. Sampath, «Structure/property relationships in sintered and thermally sprayed WC-Co,» *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 1, nº 4, pp. 307-315, 1992.
- [10] E. C. López y B. Mellor, «Fracture toughness and crack morphologies in eroded WC–Co–Cr thermally sprayed coatings,» *Materials Letters*, vol. 37, pp. 201-210, 1998.

- [11] P. B. Suresh, B. Basu y G. Sundararajan, «Abrasive wear behavior of detonation sprayed WC–12Co coatings: Influence of decarburization and abrasive characteristics,» *Wear*, vol. 268, p. 1387–1399, 2010.
- [12] J. Nerz, B. Kushner y A. Rotolico, «Microstructural evaluation of tungsten carbide-cobalt coatings,» *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 1, nº 2, pp. 147-152, 1992.
- [13] J. A. Picas, Y. Xiong, M. Punset, L. Ajdelsztajn, A. Forn y J. M. Schoenung, «Microstructure and wear resistance of WC–Co by three consolidation processing techniques,» *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, vol. 27, pp. 344-349, 2009.
- [14] D. Stewart, P. Shipway y D. McCartney, «Abrasive wear behaviour of conventional and nanocomposite HVOF-sprayed WC–Co coatings,» *Wear*, vol. 225–229, p. 789–798, 1999.
- [15] D. Culliton, A. Betts, S. Carvalho y D. Kennedy, «Improving tribological properties of cast Al-Si alloys through application of wear-resistant thermal spray coatings,» *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 22, nº 4, pp. 491-501, 2013.
- [16] J. Rodríguez, A. Martín, R. Fernández y J. Fernández, «An experimental study of the wear performance of NiCrBSi thermal spray coatings,» *Wear*, vol. 255, p. 950–955, 2003.
- [17] J. Miranda y A. Ramalho, «Abrasion resistance of thermal sprayed composite coatings with a nickel alloy matrix and a WC hard phase. Effect of deposition technique and re-melting,» *Tribology Letters*, vol. 11, nº 1, pp. 37-48, 2001.
- [18] L. Pawlowsky, *The science and engineering of thermal spray coating*, West Sussex: Jonh Wiley and sons Ltd., 2008.
- [19] M. A. Bradai, A. Sadeddine, A. Y. Mou, A. Benabbas y A. Mammeri, «Microstructural and mechanical properties of Ni-base thermal spray coatings deposited by flame spraying,» *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 42B, pp. 932-938, 2011.

- [20] C.-J. Li, A. Ohmori y Y. Harada, «Effect of powder structure on the structure of thermally sprayed WC-Co coatings,» *Journal of Materials Science*, vol. 31, pp. 785-794, 1996.
- [21] H. L. de Villiers Lovelock, «Powder/processing/structure relationships in WC-Co thermal spray coatings: a review of the published literature,» *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 7, nº 3, pp. 357-373, 1998.
- [22] J. R. Davis, *Handbook of Thermal Spray Technology*, USA: ASM International, 2004.
- [23] J. Yoganandh, S. Natarajan y S. Kumaresh Babu, «Erosion behaviour of NiCrBSi coating under mining conditions,» *Surface Engineering*, vol. 30, nº 1, pp. 71-77, 2014.
- [24] V. Souza y A. Neville, «Aspects of microstructure on the synergy and overall material loss of thermal spray coatings in erosion–corrosion environments,» *Wear*, vol. 263, pp. 339-346, 2007.
- [25] S. Houdková, F. Zahálka y M. Kasparová, «Comparative study of thermally sprayed coatings under different types of wear conditions for hard chromium replacement,» *Tribological Letters*, vol. 43, p. 139–154, 2011.
- [26] P. L. Fauchais, J. V. Heberlein y M. Boulos, *Thermal Spray Fundamentals: From Powder to Part*, New York: Springer, 2014.
- [27] N. Espallargas, *Future Development of Thermal Spray Coatings: Types, Designs, Manufacture and applications*, Cambridge: Woodhead Publishing, 2015.
- [28] S. Bose, *High temperature coatings*, Burlington: Elsevier Science & Technology Books, 2007.
- [29] D. Stewart, P. Shipway y D. McCartney, «Microstructural evolution in thermally sprayed WC-Co coatings: comparison between nanocomposite and conventional starting powders,» *Acta Materialia*, vol. 48, pp. 1593-1604, 2000.
- [30] C. Verdon, A. Karimi y J.-L. Martin, «A study of high velocity oxy-fuel thermally sprayed tungsten carbide based coatings. Part 1: Microstructures,» *Materials Science and Engineering*, vol. A246, p. 11–24, 1998.

- [31] M. Xie, S. Zhang y M. Li, «Comparative investigation on HVOF sprayed carbide-based coatings,» *Applied Surface Science*, vol. 273, pp. 799-805, 2013.
- [32] A. Ginjaume y F. Torre, Ejecución de procesos de mecanizado, conformado y montaje, Madrid: Ediciones Paraninfo, S.A., 2005.
- [33] E. Isakov, Cutting data for turning of steel, Nueva York: Industrial Press Inc., 2009.
- [34] J. R. Davis, ASM Specialty Handbook: Tool Materials, Michigan: ASM International the materials information society, 1995.
- [35] M. N. Salán Ballesteros, Tecnología de proceso y transformación de materiales, Catalunya: Edicions UPC, 2005.
- [36] S. Kalpakjian y S. R. Schmid, Manufactura, ingeniería y tecnología, Edo. de México: Prentice-Hall, 2002.
- [37] G. S. Upadhyaya, Cemented tungsten carbides production, properties, and testing, New Jersey: Noyes Publications, 1998.
- [38] J. Berget, T. Rogne y E. Bardal, «Erosion–corrosion properties of different WC–Co–Cr coatings deposited by the HVOF process—influence of metallic matrix composition and spray powder size distribution,» *Surface & Coatings Technology*, vol. 201, pp. 7619-7625, 2007.
- [39] G. Bolelli, L.-M. Berger, M. Bonetti y L. Lusvarghi, «Comparative study of the dry sliding wear behaviour of HVOF-sprayed WC–(W,Cr)2C–Ni and WC–CoCr hardmetal coatings,» *Wear*, vol. 309, p. 96–111, 2014.
- [40] C. Verdon, A. Karimi y J.-L. Martin, «Microstructural and analytical study of thermally sprayed WC-Co coatings in connection with their wear resistance,» *Materials Science & Engineering A*, vol. 234–236, p. 731–734, 1997.
- [41] G. Bolelli, V. Cannillo, L. Lusvarghi y S. Riccò, «Mechanical and tribological properties of electrolytic hard chrome and HVOF-sprayed coatings,» *Surface & Coatings Technology*, vol. 200, p. 2995 – 3009, 2006.

- [42] T. Sudaprasert, P. Shipway y D. McCartney, «Sliding wear behaviour of HVOF sprayed WC-Co coatings deposited with both gas-fuelled and liquid-fuelled systems,» *Wear*, vol. 255, p. 943–949, 2003.
- [43] L. Thakur y N. Arora, «Sliding and Abrasive Wear Behavior of WC-CoCr Coatings with Different Carbide Sizes,» *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 22, nº 2, pp. 574-583, 2013.
- [44] J. Voyer y B. R. Marple, «Sliding wear behavior of high velocity oxy-fuel and high power plasma spray-processed tungsten carbide-based cermet coatings,» *Wear*, Vols. %1 de %2225-229, pp. 135-145, 1999.
- [45] Q. Wang, S. Zhang, Y. Cheng, J. Xiang, X. Zhao y G. Yang, «Wear and corrosion performance of WC-10Co4Cr coatings deposited by different HVOF and HVOF spraying processes,» *Surface & Coatings Technology*, vol. 218, pp. 127-136, 2013.
- [46] W. D. J. Callister, *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*, Barcelona: Reverté, S.A., 2002.
- [47] F. Martínez Pérez, *Tribología, ciencia y técnica para el mantenimiento*, Ciudad de México: Limusa-Noriega Editores, 2002.
- [48] L. M. Vélez Moreno, *Materiales industriales, teoría y aplicaciones*, Medellín: Instituto Tecnológico Metropolitano ascrito en Medellín, 2008.
- [49] C. Riba Romeva, *Selección de materiales en el diseño de máquinas*, Barcelona: Edicions UPC, 2008.
- [50] H. Hernández Albañil y É. Espejo Mora, *Mecánica de fractura y análisis de falla*, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2002.
- [51] A. Ghabchi, T. Varis, E. Turunen, T. Suhonen, X. Liu y S.-P. Hannula, «Behavior of HVOF WC-10Co4Cr coatings with different carbide size in fine and coarse particle abrasion,» *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 19, nº 1-2, pp. 368-377, 2010.

- [52] L. Jacobs, M. M. Hyland y M. De Bonte, «Comparative study of WC-Cermet coatings sprayed via the HVOF and the HVAF process,» *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 7, nº 2, pp. 213-218, 1998.
- [53] J. Guilemany, J. Miguel, S. Vizcaino y F. Climent, «Role of three-body abrasion wear in the sliding wear behaviour of WC-Co coatings obtained by thermal spraying,» *Surface & Coatings Technology*, vol. 140, pp. 141-146, 2001.
- [54] P. Shipway, D. McCartney y T. Sudaprasert, «Sliding wear behaviour of conventional and nanostructured HVOF sprayed WC-Co coatings,» *Wear*, vol. 259, pp. 820-827, 2005.
- [55] C. Eutectic, *Global Coating Technology*.
- [56] A. S. f. T. a. M. International, *Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus*, West Conshohocken: ASTM International, 2017.
- [57] C.-J. Li y Y.-Y. Wang, «Effect of particle state on the adhesive strength of HVOF sprayed metallic coating,» *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 11, nº 4, pp. 523-529, 2002.
- [58] B. H. Kear, G. Skandan y R. K. Sadangi, «Factors controlling decarburization in HVOF sprayed nano-WC-Co hardcoatings,» *Scripta Materialia*, vol. 44, pp. 1703-1707, 2001.
- [59] M. Sainz, M. Osendi y P. Miranzo, «Protective Si–Al–O–Y glass coatings on stainless steel in situ prepared by combustion flame spraying,» *Surface & Coatings Technology*, vol. 202, pp. 1712-1717, 2008.
- [60] W. Rusch, «Comparison of operating characteristics for gas and liquid fuel HVOF torches,» *Thermal Spray 2007: Global Coating Solutions (ASM International)*, vol. 5, pp. 572-576, 2007.
- [61] R. Mott, *Applied Fluid Mechanics*, Prentice Hall, 1996.
- [62] C. W. Lee, J. H. Han, J. Yoon, M. C. Shin y S. I. Kwun, «A study on powder mixing for high fracture toughness and wear resistance of WC–Co–Cr coatings sprayed by HVOF,» *Surface & Coatings Technology*, vol. 204, pp. 2223-2229, 2010.

- [63] S. L. Liu, X. P. Zheng y G. Q. Geng, «Influence of nano-WC–12Co powder addition in WC–10Co–4Cr AC-HVAF sprayed coatings on wear and erosion behaviour,» *Wear*, vol. 269, pp. 362-367, 2010.
- [64] A. D. Sarkar, *Friction and Wear*, London: Academic Press, Inc., 1980.
- [65] Q. Wang, S. Zhang, Y. Cheng, J. Xiang, X. Zhao y G. Yang, «Wear and corrosion performance of WC-10Co4Cr coatings deposited by different HVOF and HVAF spraying processes,» *Surface & Coatings Technology*, vol. 218, pp. 127-136, 2013.