

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTUDIO DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE
RECUBRIMIENTOS DEPOSITADOS POR ROCIADO TÉRMICO DE
ALTA VELOCIDAD Y POR ELECTRODEPOSICIÓN**

PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE
UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
POR LOS BACHILLERES:

ESTÉVEZ B., DANIEL A.
GONZÁLEZ M., LEONARDO.

PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

CARACAS, 2003

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE RECUBRIMIENTOS DEPOSITADOS POR ROCIADO TÉRMICO DE ALTA VELOCIDAD Y POR ELECTRODEPOSICIÓN

TUTOR ACADÉMICO:

Prof. MARÍA RODRÍGUEZ DE PRATO

PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE
UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
POR LOS BACHILLERES:

**ESTÉVEZ B., DANIEL A.
GONZÁLEZ M., LEONARDO.**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

CARACAS, 2003

DEDICATORIA

**A nuestros padres, a Dios y a todos nuestros amigos por apoyarnos siempre.
Gracias Totales...**

AGRADECIMIENTOS

A nuestra tutora Maria de los Ángeles Rodríguez de Prato por su apoyo y dedicación.

Al Prof. Ing Andrea Scagni por su colaboración.

Al Prof. Ing. Crisanto Villalobos por su importante ayuda profesional.

Al Prof. Ing Juan Carlos Mestre.

A todo el personal de Plasmatec Ingenieros por su colaboración en la realización de los recubrimientos.

A la empresa Durocrom de Venezuela C.A., por su colaboración en la realización de los recubrimientos.

Al Departamento de Microscopia Electrónica del I.U.T por su colaboración en los ensayos de Microscopia Electrónica de Barrido (MEB).

A la escuela de Metalúrgica por su colaboración en el uso de los laboratorios.

Al personal que labora en la escuela.

Al Ing. Jorge Shell por facilitarnos el disco de goma usado para realizar los ensayos de abrasión.

A la empresa Rias C.A., por facilitarnos la arena de cuarzo requerida para los ensayos.

A la compañía (Bauxilum) por donarnos el material erodante (Alúmina) utilizado en el ensayo de erosión.

A nuestras familias por su gran apoyo durante la realización de este trabajo de grado.

Caracas, 13 de noviembre de 2003

ACTA

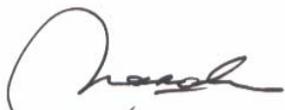
Los abajo firmantes, miembros del jurado examinador del Trabajo Especial de Grado de los Brs. LEONARDO GONZÁLEZ MÚJICA y DANIEL ALEXANDER ESTEVEZ BACIGALUPI, designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la universidad central de Venezuela, titulado:

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE RECUBRIMIENTOS DEPOSITADOS POR ROCIADO TERMICO DE ALTA VELOCIDAD Y POR ELECTRODEPOSICION”

Dejan constancia, por medio de la presente acta, que consideran que el referido trabajo ha cumplido con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico, sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expresadas por los autores.


Prof. Alfonso Quiroga


Prof. Andrea Scagni


Profa. Maria A. Rodríguez de Prato
Coordinador



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA DE PRODUCCION



Los suscritos, Miembros del Jurado Examinador designado por el Concejo de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los bachilleres **LEONARDO GONZALEZ**, Cedula de identidad V.-13.583.685 y **DANIEL ESTEVEZ**, Cedula de identidad V.-13.114.797, el cual lleva por título

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE RECUBRIMIENTOS DEPOSITADOS POR ROCIADO TERMICO DE ALTA VELOCIDAD Y POR ELECTRODEPOSICION”

Decidimos conferirle

MENCION HONORIFICA

En reconocimiento al esfuerzo realizado como estímulo a la actividad creativa demostrada en el transcurso de la elaboración de este Trabajo Especial de Grado, el cual constituye un aporte importante e inédito al estudio en el área de Recubrimientos Resistentes al Desgaste.

En fe de lo anteriormente expuesto se levanta la presente Acta en la ciudad de Caracas, a los trece días del mes de noviembre del año dos mil tres, dejándose constancia que, de acuerdo a la normativa vigente, actuó como Coordinador del Jurado Examinador la Profa. María de los A. Rodríguez de Prato.


Prof. Alfonso Quiroga


Prof. Andrea Scagni


Profa. Maria A. Rodríguez de Prato
Coordinador

RESUMEN

Estévez B., Daniel A. y González M., Leonardo

***ESTUDIO DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE
RECUBRIMIENTOS DEPOSITADOS POR ROCIADO TÉRMICO
DE ALTA VELOCIDAD Y POR ELECTRODEPOSICIÓN***

**TUTOR ACADÉMICO: PROF. ING. MARÍA RODRÍGUEZ DE PRATO.
TESIS. U.C.V. FACULTAD DE INGENIERÍA. ESCUELA DE INGENIERÍA
MECÁNICA, CARACAS, 2003. 89 PÁGINAS**

Palabras claves: Rociado Térmico, HVOF, Cromoduro, Desgaste, abrasión, erosión, Pin on Disk.

El objetivo fundamental de este trabajo fue realizar un estudio comparativo de la resistencia al desgaste abrasivo, por deslizamiento y erosivo de recubrimientos depositados por la técnica de Rociado Térmico de alta Velocidad Oxígeno Combustible (HVOF), y por la técnica de electrodeposición (Cromoduro).

Un Acero AISI 1020 fue utilizado como sustrato, para la deposición de ambos recubrimientos.

El material seleccionado en este estudio fue una aleación de WC-10%Co+4%Cr.

A fin de determinar la resistencia al desgaste de ambos recubrimientos se realizaron ensayos de abrasión erosión y desgaste por deslizamiento según las normas ASTM G65-C, ASTM G76-95 y ASTM G99-95^a respectivamente. Posteriormente se efectuó la Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y análisis químico de los componentes mediante el método de Espectroscopia por Dispersión de Energía de Rayos X (EDS). Se pudo determinar a través de nuestro estudio que el recubrimiento de Cromoduro presentó una resistencia al desgaste abrasivo 4.9 veces menor comparado con el recubrimiento de WC-10%Co+4%Cr depositado por HVOF.

En cuanto al desgaste erosivo se pudo determinar que el Cromoduro es el más resistente a la erosión para todos los ángulos en estudio, presentando 25% mayor resistencia en comparación con el recubrimiento de WC-10%Co+4%Cr y un 12 % en comparación al acero.

Las huellas de desgaste producidas por la bola (pin) en la superficie del disco, se caracterizaron mediante perfilometría óptica y microscopía electrónica de barrido (MEB). Las observaciones se dirigieron a la evaluación de los mecanismos de desgaste presentes, los cuales resultaron de tipo adhesivo y abrasivo preferiblemente. El desgaste de las muestras recubiertas con WC-10%Co+4%Cr fue leve y con poco volumen desgastado, arrojando un coeficiente de fricción promedio de $\mu=0.51$. También se logró determinar a través de nuestro estudio que el coeficiente de desgaste de los pines resultó ser 2.67 veces mayor para las muestras con el recubrimiento de WC-10%Co+4%Cr en comparación con las muestras recubiertas con Cromoduro.

INDICE GENERAL	Pág.
DEDICATORIA	III
AGRADECIMENTOS	IV
RESUMEN	V
INTRODUCCIÓN	1
Motivación	1
Planteamiento del Problema	1
Objetivo General	3
Objetivos Específicos	3
CAPITULO I	
I. MARCO TEÓRICO	5
1.1. - Recubrimientos Electrolíticos.	5
1.1.1. - Electrodeposición con Cromo.	6
1.1.2. - Soluciones utilizadas para realizar el recubrimiento de Cromoduro.	7
1.1.3. - Soluciones de sulfato convencional.	8
1.1.4. - Equipo utilizado para recubrir con Cromoduro utilizando una solución convencional.	8
1.1.5. - Principales parámetros del proceso de electrodeposición del cromo.	9
1.1.6. - Aplicaciones del Cromoduro.	10
1.2. - Rociado Térmico.	11
1.2.1. - Tipos de procesos de Rociado Térmico.	12
1.2.2. - Rociado Térmico por HVOF (High Velocity Oxygen Fuel).	13
1.3. - Teoría de Desgaste.	16
1.3.1. - Desgaste sobre recubrimientos realizados por HVOF y por electrodeposición.	17
1.3.2. - Desgaste Abrasivo.	19
1.3.3. - Desgaste Adhesivo.	23
1.3.4. - Desgaste Erosivo.	24

1.3.5. - Desgaste Corrosivo.	28
1.3.6. - Desgaste por Fatiga.	28
CAPITULO II	
II. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	30
2.1. - Material de las probetas.	30
2.2. - Preparación de probetas previa a ser rociadas térmicamente.	31
2.3. - Proceso de Rociado Térmico.	32
2.4. - Preparación de probetas para aplicar el recubrimiento por electrodeposición (Cromo-duro).	33
2.5. - Aplicación de recubrimiento por electrodeposición (Cromoduro).	34
2.6. - Cálculo de la densidad.	35
2.7. - Ensayo de Abrasión.	36
2.8. - Ensayo de Erosión.	38
2.9. - Ensayo de Desgaste por Deslizamiento (Pin on Disk).	39
2.10. - Ensayo de la Microdureza.	41
2.11. - Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).	42
CAPITULO III	
III. ANÁLISIS DE RESULTADOS	45
3.1. - Análisis de la Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).	45
3.2. - Análisis de la Microdureza.	48
3.3. - Análisis de la Rugosidad Superficial.	50
3.4. - Análisis de la Densidad.	50
3.5. - Análisis del Ensayo de Erosión.	51
3.6. - Análisis del Ensayo de Abrasión.	57
3.7. - Análisis del Desgaste por Deslizamiento.	63
CAPITULO IV	
IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	74
4.1. – Conclusiones.	74
4.2. – Recomendaciones.	76
4.3.- Referencias Bibliográficas.	77

CAPITULO V

V. ANEXOS	82
5.1. - Anexo 1. Procedimiento de los ensayos de abrasión y erosión.	82
5.2. - Anexo 2. Durezas de las muestras.	85
5.3. - Anexo 3. Valores de pérdida de peso en gramos para los ensayos de erosión y abrasión.	87

INDICE DE FIGURAS	Pág.
Figura 1.1.- Principio de la deposición electrolítica.	5
Figura 1.2.- Tanque utilizado para el recubrimiento de Cromoduro. [1]	9
Figura 1.3.- Esquema de un sistema de Rociado Térmico por HVOF.	14
Figura 1.4.- Pistola HVOV (alimentación en forma de polvo).	14
Figura 1.5.- Influencia de la dureza en la resistencia a la abrasión.	20
Figura 1.6.- Influencia del contenido de carbono en la resistencia a la abrasión.	21
Figura 1.7.- Tipos de cortes producidos por el impacto de las partículas. [16]	28
Figura 2.1.- Colocación de las probetas previo al rociado térmico.	28
Figura 2.2.- a) Pistola JP-5000, b) Sistema de alimentación de polvos.	32
Figura 2.3.- Aplicación del Rociado Térmico.	32
Figura 2.4.- a) Decapado de las probetas previo a la realización del recubrimiento de Cromo-duro, b) Recipiente para decapado.	34
Figura 2.5.- a) Tina electrolítica que contiene las soluciones de cromo que se depositan sobre el substrato, b) Unidad de regulación de la corriente aplicada en el proceso.	34
Figura 2.6.- a) Máquina de abrasión, b) Detalle interior de la máquina de abrasión.	36
Figura 2.7.- a) Banco de Ensayo de Erosión, b) Detalle interior de la máquina de erosión.	38
Figura 2.8.- Tribómetro.	40
Figura 2.9.- Microdurómetro.	41
Figura 2.10.- a) Cortadora de precisión, b) Detalle interior de la cortadora de precisión.	42
Figura 2.11.- Muestras embutidas.	42
Figura 2.12.- Pulidora de plato giratorio.	43
Figura 2.13.- Microscopio Electrónico de Barrido.	43

Figura 3.1.- Micrografía en modo de electrones primarios (BSE) de la sección transversal del recubrimiento WC-10%Co+4%Cr. a) 300X, b) 1000X, c) 3500X , d) Análisis químico general (EDS).	45
Figura 3.2.- Análisis químico puntual (EDS) de las tres fases observadas. a) Fase blanca, b) Fase gris clara, c) Fase oscura.	46
Figura 3.3.- Sección transversal del recubrimiento de Cromoduro. a) 3500X, b) 5000X, c) Análisis químico general (EDS).	48
Figura 3.4.- Microdureza en Vickers de los materiales estudiados.	49
Figura 3.5.- Pérdida de masa en gramos de los diferentes materiales.	52
Figura 3.6.- Tasa de erosión para los distintos materiales.	54
Figura 3.7.- Factor de Erosión Normalizado (FEN).	54
Figura 3.8.- Muestras recubiertas con WC-10%Co+4%Cr erosionadas a 90°, a)1000x, b)3500x	55
Figura 3.9.- Muestras recubiertas con WC-10%Co+4%Cr erosionadas a 30°, a)1000x, b)3500x.	56
Figura 3.10.- Muestras recubiertas con Cromoduro erosionadas a 90°	56
Figura 3.11.- Muestras recubiertas con Cromoduro erosionadas a 45°	57
Figura 3.12.- Pérdida de masa en abrasión para los materiales en estudio.	58
Figura 3.13.- Pérdida de volumen en abrasión para los distintos tiempos de ensayos.	59
Figura 3.14.- Pérdida Volumétrica Corregida.	60
Figura 3.15.- Muestras recubiertas con WC-10%Co+4%Cr luego del ensayo de abrasión, a)1000x, b)2000x.	61
Figura 3.16.- Figura 3.16. Muestras recubiertas con Cromoduro a)500x (BSE) antes de ensayar, b) 50x (SE) luego del ensayo de abrasión, c) 50x (SE) luego del ensayo de abrasión, d)300x (SE) luego del ensayo de abrasión.	62
Figura 3.17.- Análisis químico puntual (EDS) de la Fase oscura.	63

Figura 3.18.- Ensayo de Pin on Disk.	64
Figura 3.19.- Volumen desgastado del Pin.	65
Figura 3.20.- Micrografía del pin utilizado sobre la muestra de Cromoduro a) 100X (SE), b) Análisis químico puntual EDS del pin zona clara, c) 100X(BSE).	66
Figura 3.21.- Micrografía del pin utilizado sobre la muestra de WC-10%Co+4%Cr. a) 100X (SE), b) Análisis químico puntual EDS del pin zona clara, c) . 100X(BSE).	66
Figura 3.22.- Huella de desgaste de la muestra de Cromoduro. a) topografía de la huella de pin on disk, b) superficie de la huella, c) fotografía de la huella de pin on disk, d) perfil de la sección transversal de la huella de pin on disk.	68
Figura 3.23.- Huella de desgaste de la muestra de Cromoduro. a) topografía de la huella de pin on disk, b) superficie de la huella, c) fotografía de la huella de pin on disk, d) perfil de la sección transversal de la huella de pin on disk.	69
Figura 3.24.- Huella producida por el pin sobre el recubrimiento de Cromoduro. a) 100X (SE), b)100X (BSE), c) 500X (BSE), d) análisis químico puntual (EDS).	71
Figura 3.25.- Huella producida por el pin sobre el recubrimiento de WC-10%Co+4%Cr e. a) 100X (SE), b)500X (SE), c) 500X (BSE), d) análisis químico puntual (EDS).	72
Figura 5.1.- Balanza Analítica.	83

INDICE DE TABLAS	Pág.
Tabla 1.1.- Variación del número de Best con el tipo de daño.	26
Tabla 2.1.- Medidas de las probetas según las normas ASTM.	30
Tabla 2.2.- Número de probetas y de ensayos requeridos para la investigación.	31
Tabla 2.3.- Parámetros para la realización del recubrimiento WC-10%Co+4%Cr por HVOF..	33
Tabla 2.4.- Parámetros para realizar el recubrimiento de Cromo-Duro.	35
Tabla 2.5.- Parámetros del ensayo de abrasión.	37
Tabla 3.1.- Valores de dureza para los materiales estudiados.	48
Tabla 3.2.- Rugosidad superficial en μm de los materiales estudiados.	50
Tabla 3.3.- Densidad en gr/mm^3 de los recubrimientos utilizados.	51
Tabla 3.4.- Pérdida de masa en gramos de los diferentes materiales.	51
Tabla 3.5.- Tasa de erosión RE (mm^3/gr).	53
Tabla 3.6.- Pérdida de Masa por Abrasión.	58
Tabla 3.7.- Pérdida de volumen corregida.	59
Tabla 3.8.- Coeficientes de desgaste de los pines.	67
Tabla 3.9.- Volumen desgastado del disco.	67
Tabla 5.1.- Resultado de microdureza para el Cromoduro a una carga de 300gf.	86
Tabla 5.2.- Resultado de Microdureza para el WC-10%Co+4%Cr a una carga de 300gf.	86
Tabla 5.3.- Pérdida de peso (gr) en erosión del WC-10%Co+4%Cr.	88
Tabla 5.4.- Pérdida de peso (gr) en erosión del Cromoduro.	88
Tabla 5.5.- Factor de Erosión Normalizado (FEN) de los recubrimientos.	88
Tabla 5.6.- Pérdida de peso (gr) en abrasión del WC-10%Co+4%Cr.	89
Tabla 5.7.- Pérdida de peso (gr) en abrasión del Cromoduro.	89

INTRODUCCIÓN

Motivación

El desarrollo de diferentes procesos en el campo de la ingeniería referidos al recubrimiento de superficies ha generado una gran variedad de técnicas destinadas a mejorar las propiedades superficiales de los materiales, como dureza, resistencia al desgaste, la corrosión y estabilidad química entre otras.

Muchas industrias utilizan los recubrimientos para prolongar la vida de sus productos y así aumentar su eficiencia y reducir costos de producción y mantenimiento. Los recubrimientos pueden ser el medio más rentable para proteger la superficie del sustrato contra el desgaste y la corrosión.

La existencia de fenómenos como la corrosión y desgaste de piezas que pierden material en zonas sometidas a movimientos y cargas permite el estudio de recubrimientos que minimicen este tipo de problemas.

Con el desarrollo de este trabajo especial de grado se pretende hacer una comparación entre dos diferentes recubrimientos, un recubrimiento rociado térmicamente con una aleación tipo cermet (cerámico-metal), y otro recubrimiento realizado por un proceso de electrodeposición. Mediante el estudio del comportamiento frente al desgaste abrasivo, por deslizamiento y erosivo.

Planteamiento del Problema

El desgaste y deterioro de piezas ha sido un problema presente en todo proceso industrial lo cual ocasiona una gran pérdida de dinero por concepto de mantenimiento y operación, lo cual puede ocasionar interrupciones parciales o totales. Es por ello que se buscan nuevas técnicas que prolonguen la vida útil de las piezas que intervienen en un proceso mecánico.

Tradicionalmente los recubrimientos depositados con cromo denominados Cromoduro han tenido un uso extenso en muchas de las grandes empresas incluyendo las empresas automotoras, aeroespaciales, mineras, agrícolas y petroquímicas. El Cromoduro es el más usado de los recubrimientos por electrodeposición por su resistencia al desgaste.

Las aplicaciones para el Cromoduro incluyen componentes internos de motores de combustión, cilindros hidráulicos, trenes de aterrizaje, rodillos, bombas, anillos de pistones y herramientas de máquinas.

En años recientes el ímpetu por encontrar alternativas para el Cromoduro se ha acelerado drásticamente debido principalmente a un asunto que entrelaza la toxicidad y las consecuencias ambientales.

El proceso de Cromoduro genera graves daños al medio ambiente por sus desechos tóxicos (Cromo Hexavalente) eso contribuye a la contaminación por desechos del aire y el agua. El cromo hexavalente es uno de los agentes causantes del cáncer, por consiguiente las industrias se han visto obligadas a ver de cerca su aplicación y considerar alternativas para los recubrimientos depositados con cromo. Una de las más viables alternativas es el Rociado Térmico por HVOF (High velocity oxygen fuel) complementado con una prudente selección del material.

En esta investigación se pretende determinar la resistencia al desgaste abrasivo, por deslizamiento y erosivo de los recubrimientos antes mencionados, con la finalidad de proporcionar un esquema de resultados que permitan identificar el recubrimiento de mejor desempeño.

Objetivo General

Realizar un estudio comparativo de la resistencia al desgaste de recubrimientos tipo cermet (cerámico-metal) depositados por rociado térmico de alta de velocidad y recubrimientos depositados por electrodeposición del cromo.

Objetivos Específicos

- Determinar la influencia del tiempo de desgaste abrasivo para los recubrimientos en estado de termorociado y por electrodeposición del cromo.
- Relacionar la microestructura con los resultados obtenidos en el ensayo de abrasión.
- Determinar el mecanismo de desgaste para los recubrimientos en estudio.
- Determinar la influencia del desgaste erosivo sobre superficies rociadas térmicamente (WC-10%Co+4%Cr) y electrodepositadas con cromo.
- Estudiar el comportamiento frente al desgaste de cada recubrimiento y realizar un análisis comparativo.

CAPITULO I

1. Marco Teórico

1.1 Recubrimientos electrolíticos

El principio básico de los procesos de recubrimientos electrolíticos consiste en la conversión del metal del ánodo en iones metálicos que se distribuyen en la solución. Estos iones se depositan en el cátodo (pieza que será recubierta) formando una capa metálica en su superficie.

El recubrimiento electrolítico de las piezas se produce por inmersión en un baño como se observa en la Figura 1.1. Para ello se introducen las piezas en tanques donde se encuentra el electrolito el cual se disuelve del ánodo y se deposita sobre la pieza (Cátodo) con ayuda de una corriente eléctrica. Al extraer las piezas del baño se acumula una cantidad del electrolito sobre la superficie de las piezas, esa película se elimina en un proceso de lavado posterior [1].

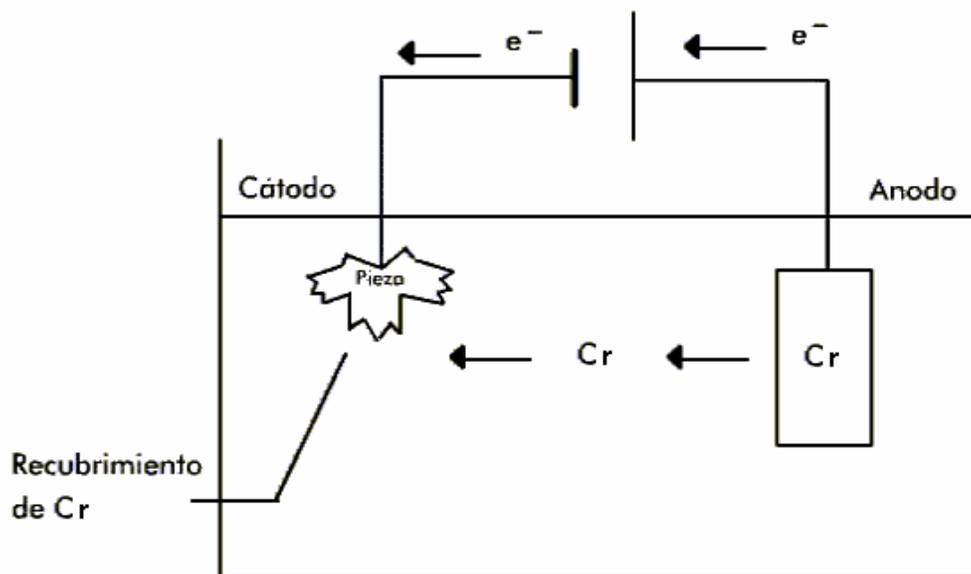


Figura 1.1. Principio de la deposición electrolítica. (Ihobe,1995)

Generalmente los procesos de deposición electrolítica como la mayoría de los procesos de deposición requieren que la superficie a recubrir esté completamente limpia, por lo tanto las piezas deben ser sometidas a procesos de limpieza como el cepillado, desengrase, pulido, entre otros, que permita eliminar grasas, óxidos, y otras impurezas que impidan una buena adhesión substrato-recubrimiento. En algunos casos se requiere de una limpieza más profunda como lo es el decapado químico con lo cual se eliminan capas de óxido.

1.1.1 Electrodeposición con Cromo

El recubrimiento de Cromoduro es producido por electrodeposición a partir de una solución que contiene ácido crómico (CrO_3) y un anión catalítico en proporciones adecuadas. El proceso es utilizado en aplicaciones donde se requiere una excelente resistencia al desgaste, tales como rodillos hidráulicos, engranajes, moldes para fundición, cilindros, pistones y válvulas de motores de combustión. También la reconstrucción de piezas mal maquinadas o desgastadas representan un gran campo de aplicación para el Cromoduro [1].

El recubrimiento de Cromoduro también se le conoce como un recubrimiento de cromo industrial o ingenieril y es destinado a incrementar la vida de servicio de una parte funcional, al proveer una superficie con bajo coeficiente de fricción que resiste la abrasión, el desgaste y la corrosión. El cromo decorativo, por otra parte sólo tiene aplicación estética en partes exteriores o visibles. Otro de los propósitos de los recubrimientos de Cromoduro es restaurar las dimensiones de piezas desgastadas o con dimensiones no adecuadas [2].

El Cromoduro es normalmente depositado a espesores en el orden de 1,2 y 500 μm y para ciertas aplicaciones hasta espesores considerablemente mayores. El cromo decorativo pocas veces excede 1,3 μm de espesor. Con ciertas excepciones, el Cromoduro es depositado directamente sobre el metal base, mientras que el cromo decorativo es aplicado sobre una capa de níquel o de cobre-níquel [1].

La mayoría de los depósitos de Cromoduro son aplicados sobre metales y aleaciones ferrosas, sin embargo, numerosas aplicaciones aeroespaciales requieren los depósitos sobre aleaciones de níquel y de aluminio.

Desde el punto de vista del proceso el recubrimiento de Cromoduro puede ser aplicado a los aceros independientemente de su dureza y su composición química siempre que el metal base sea suficientemente fuerte para soportar la capa de cromo en servicio [2].

La dureza del cromo electrodepositado es una función de la composición química utilizada en la solución de recubrimiento, y de las condiciones de deposición. En general el recubrimiento de cromo brillante es que presenta mayor dureza; estos depósitos a partir de soluciones convencionales tienen valores de dureza de 850 a 950 HV, aquellos obtenidos a través de soluciones de mezclas catalíticas tienen valores de dureza entre 900 y 1000 HV y aquellos obtenidos de soluciones libres de fluoruro tienen valores de dureza entre 950 y 1110 HV o más [2].

1.1.2 Soluciones utilizadas para realizar el recubrimiento de Cromoduro

El ácido crómico es la fuente utilizada en las soluciones para hacer estos recubrimientos sin embargo, el ácido crómico no deposita el cromo si no está presente una cantidad determinada de catalizador.

El catalizador que se ha probado exitosamente ha sido una solución compuesta por aniones ácidos los cuales provienen de un sulfato. Una sustitución de los iones de fluoruro por una porción de sulfato mejora la operación de deposición del cromo [1].

De acuerdo al tipo de catalizador, las principales clases de soluciones son designadas como: sulfato convencional, catalizadores mezclados (una mezcla química entre sulfato y fluoruro) y catalizadores libres de fluoruro.

1.1.3 Soluciones de sulfato convencional

La composición de las soluciones de ácido crómico convencional catalizadas por un sulfato puede variar ampliamente, manteniendo la relación de peso de ácido crómico a sulfato, dentro de un intervalo entre 75 y 120 a 1. Operando con mayor corriente, se puede utilizar una relación entre 90 y 110 a 1. Sin embargo en un margen entre 75 y 90 a 1 se obtienen depósitos brillantes y se puede utilizar una alta densidad de corriente.

Las soluciones que contienen alrededor de 50 gr/lit no representan una producción práctica ya que el ámbito de deposición es muy limitado, existe una mayor tendencia a la contaminación, hay mayor resistencia eléctrica y se requiere mayores voltajes para la operación.

Las soluciones con baja concentración (250 gr/lit de CrO_3) son bastante utilizadas porque minimizan las pérdidas y los problemas ambientales relacionados con la deposición. Las soluciones de alta concentración (400 gr/lit de CrO_3) tienen la ventaja de ser menos sensibles a los cambios de concentración y son más fáciles de controlar, son más conductivas y pueden ser operadas a menores voltajes por lo que desprenden menos calor [3-5].

1.1.4 Equipo utilizado para recubrir con Cromoduro utilizando una solución convencional

En la Figura 1.2 se observa un equipo que consta principalmente de un tanque, generalmente fabricado de acero de bajo carbono, revestido con un material resistente a la corrosión de ácido crómico. El material de revestimiento suele ser de una aleación de plomo que contiene antimonio, ya que este es efectivo contra la corrosión. También se usan unos ladrillos resistentes al ácido en combinación con el revestimiento, para evitar las pérdidas de corriente. El tanque debe estar situado por lo menos a 100 mm del suelo, colocado sobre unas vigas. Para aislar el tanque del

suelo se coloca una fibra de vidrio entre el suelo y la viga. Para aislar los electrodos del tanque se utilizan ladrillos de vidrio. Las dimensiones del tanque obedecen a especificaciones relacionadas de manera adecuada, de acuerdo al largo, profundidad, espesor de la pared y ancho requerido. De igual manera, el revestimiento también se encuentra sometido a este tipo de especificaciones.

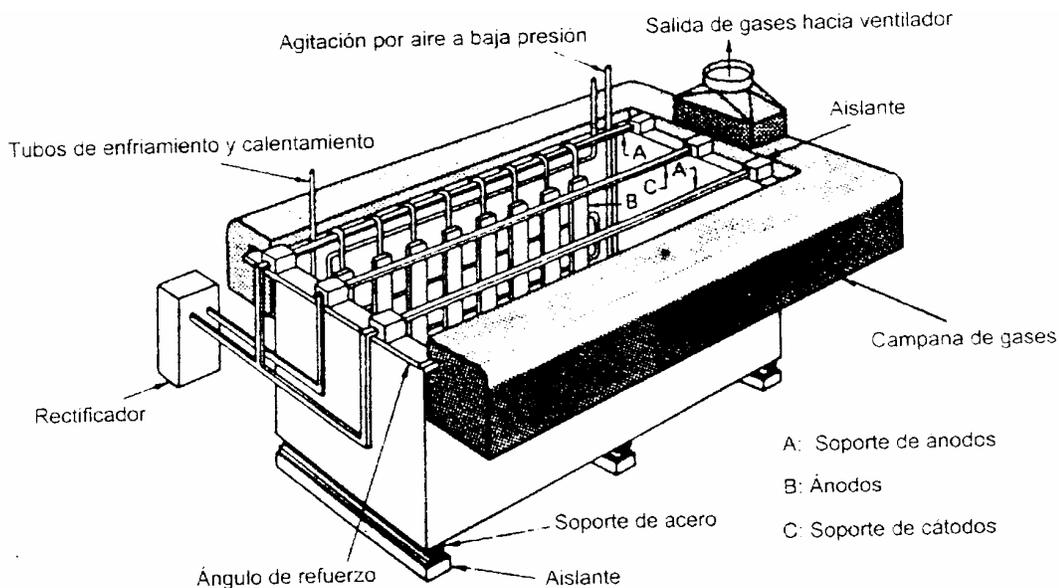


Figura 1.2. Tanque utilizado para el recubrimiento de Cromoduro [1]

1.1.5 Principales parámetros del proceso de electrodeposición del cromo

La eficiencia de la corriente catódica varía con la densidad de corriente y temperatura de la solución. La eficiencia se incrementa significativamente con el incremento de la densidad de corriente y decrece ligeramente con el aumento de la temperatura. Estas dos variables tienen un efecto definitivo en la dureza y apariencia del recubrimiento.

El tiempo de deposición disminuye a medida en que aumenta la eficiencia de corriente, de esta manera, la velocidad de deposición aumenta de manera significativa si se aumenta la densidad de corriente. Debido a que el tiempo en el tanque es un factor económico importante, velocidades de deposición elevadas producidas por la alta disponibilidad de corriente, pueden determinar también, la temperatura del recubrimiento más adecuada [1].

1.1.6 Aplicaciones del Cromoduro

Se aplica el Cromoduro tanto a piezas de nueva fabricación como a piezas desgastadas, que son perfectamente recuperadas y aun mejoradas en algunas propiedades [4].

Las piezas recubiertas con Cromoduro se utilizan en la fabricación de motores de explosión, para el cromado de cilindros, camisas, segmentos, ejes de levas, entre otros. Se emplea también en la fabricación y recuperación de cilindros: para laminación de metales, para máquinas de fabricar papel, para teñido y estampado de telas, etc. El Cromoduro da excelentes resultados y prolonga la vida de los ejes y pistones de bombas hidráulicas, pistones de prensas, de martillos de forja, de máquinas neumáticas, entre otros [4].

Los plásticos, pastas alimenticias, entre otros, no se adhieren al Cromoduro, por ello se usa para cromar los moldes utilizados para la fabricación de estos productos. Otra aplicación muy interesante es el cromado de matrices, troqueles, machos, tanto para metales como para plástico.

Las herramientas cromadas como brocas, escariadores, entre otros, mejoran no sólo en su vida útil, sino en velocidad de trabajo, que puede elevarse por la mayor facilidad para el desprendimiento de la viruta, cuando las superficies están cromadas. También los instrumentos de medida, sobre todo los calibres, se croman, lo que, además de proteger la superficie contra la corrosión, mantiene sus medidas exactas mucho más tiempo por la resistencia al desgaste del Cromoduro. Se utiliza también para el cromado del interior de los cañones de las ametralladoras, piezas de artillería, entre otros [4].

Los recubrimientos de cromo son muy utilizados para la reconstrucción de piezas mal maquinadas o desgastadas. Un ejemplo de ello es la restauración de cigüeñales de motores de combustión. En esta aplicación, los espesores varían entre 125 y 1250 μm ,

otorgando excelente resistencia al desgaste debido a su bajo coeficiente de fricción. Sin embargo, desde 1970, este proceso de reconstrucción utilizando Cromoduro ha sido sustituido por el proceso de Rociado Térmico el cual es de aplicación más fácil y rápida.

1.2 Rociado Térmico

El proceso de Rociado Térmico surge inicialmente como una importante herramienta en lo que a protección de superficies se refiere. No obstante, el rociado térmico no es una tecnología nueva ya que este proceso comienza luego de la introducción de dos procesos: El primero de ellos era la llama oxiacetilénica la cual fue introducida entre los años 1890 y 1910, el segundo proceso se debe gracias a Schoop y sus colaboradores, quienes inventan el llamado Arco Eléctrico alrededor del año 1910 con la finalidad de fundir, atomizar y aplicar metales conductores en forma de alambres sobre un material base. A partir de allí surge el rociado térmico como el producto de la unión de estos dos procesos. Sus principales aplicaciones se encontraban en las plantas químicas, estructuras marinas y puentes, posteriormente al transcurrir el tiempo se fueron adicionando nuevos procesos como el rociado por plasma. Este último fue introducido por Reinecke en el año 1930 en el cual se podía confinar en un arco, altas temperaturas y así poder fundir o semifundir materiales con altos puntos de fusión como los cerámicos [5].

El rociado térmico es un término genérico usado para definir un grupo de procesos en el cual metales, cerámicos, carburos y algunos polímeros son calentados hasta ser fundidos dentro de un rango plástico debido a la energía térmica suministrada por un proceso de combustión o por la resultante de un arco eléctrico. Las partículas semifundidas son aceleradas con la ayuda de gas comprimido y posteriormente rociadas y proyectadas como especie de gotas semifundidas, sobre una superficie previamente preparada en la cual estas partículas golpean en cada pasada aplastándose para de esta manera construir el recubrimiento.

Los recubrimientos depositados por proyección térmica con metales, carburos, cerámicos o plásticos son ampliamente utilizados en distintas aplicaciones industriales, en las áreas de mantenimiento y producción, sin embargo también son utilizados en implantes óseos o dentales. Estos pueden ser tan blandos como el Babbit (aleación estaño-cobre) o tan duros como el Carburo de Tungsteno, siendo el primero utilizado exitosamente en superficies anti-fricción (cojinetes de cigüeñales), y el segundo en superficies antidesgaste.

Existen factores que caracterizan al proceso de rociado térmico como forma de aplicar recubrimientos, como la baja temperatura a la que esta expuesta el substrato, alrededor de unos 200 °C, eliminando de esta manera cambios metalúrgicos y las posibles distorsiones del material base [6].

A continuación presentamos algunas características de los recubrimientos térmicos rociados.

- Resistencia al desgaste abrasivo, erosión y adhesión
- Resistencia a la corrosión atmosférica y soluciones químicas
- Resistencia a las altas temperaturas
- Resistencia a los metales fundidos
- Barreras térmicas
- Dieléctricos
- Conductividad eléctrica
- Recubrimientos biomédicos

1.2.1 Tipos de procesos de Rociado Térmico

Los proceso de Rociado Térmico pueden ser de dos tipos, que a su vez poseen otras subdivisiones:

A.) Procesos de Combustión

- Rociado por Llama
- Rociado por HVOF
- Rociado por Detonación.

B.) Procesos Eléctricos

- Proyección por Arco Eléctrico
- Proyección de Plasma

Existen numerosas tesis donde se puede encontrar la descripción de cada uno de estos procesos de Rociado Térmico [5,6,7,8], en este caso sólo se va a hacer referencia brevemente del Rociado Térmico por HVOF que es el proceso utilizado en este trabajo de grado.

1.2.2 Rociado Térmico por HVOF (High Velocity Oxygen Fuel)

Es uno de los métodos más nuevos de Rociado térmico, utiliza oxígeno y un gas como combustible a altas presiones. Algunos gases combustible típicos son propano, propileno e hidrógeno. La mezcla de gases es acelerada a velocidades supersónicas y el material de alimentación en forma de polvo es inyectado dentro de la llama. El proceso minimiza la entrada térmica y maximiza la energía cinética para producir recubrimientos que son realmente densos, con baja porosidad y alta fuerza de enlace.

Este proceso esta íntimamente relacionado al Rociado por Llama. Pero una diferencia esencial entre ellos es que en el Rociado por Llama los procesos de combustión se realiza en el aire (ambiente), mientras que en el HVOF la combustión se realiza en una pequeña cámara. Debido a las altas presiones creadas en la cámara de combustión, los gases salen a velocidades supersónicas, y aceleran las partículas fundidas. Estas, aunque no alcanzan las velocidades de los gases, alcanzan altas velocidades con las que chocan en la superficie obteniendo un recubrimiento de alta calidad. En la Figura 1.3 se observa un esquemáticamente la unión del combustible con el aire comprimido en un equipo de control para crear la combustión que genera

los gases a alta velocidad que funden el polvo de recubrimiento en una pistola de HVOF, la cual es refrigerada con agua [7].

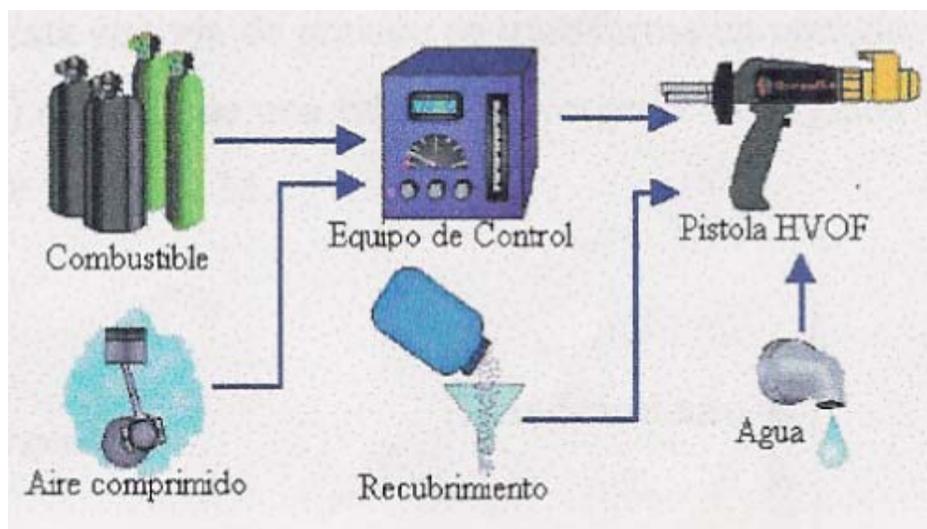


Figura 1.3. Esquema de un sistema de Rociado Térmico por HVOF.

En la Figura 1.4 se pueden ver en detalle una pistola de HVOF con alimentación en forma de polvo. Las aplicaciones de HVOF se enfocan en la industria aeroespacial, árboles o rodets de bombas o compresores, válvulas, rollos de impresión en la industria de impresión de papel, molinos para la preparación de la pulpa y principalmente para disminuir el desgaste corrosivo en la industria química. En la mayoría de los casos, los recubrimientos realizados por HVOF ofrecen mejoras en la calidad por encima de las ofrecidas por el Rociado por Plasma o Llama [5].

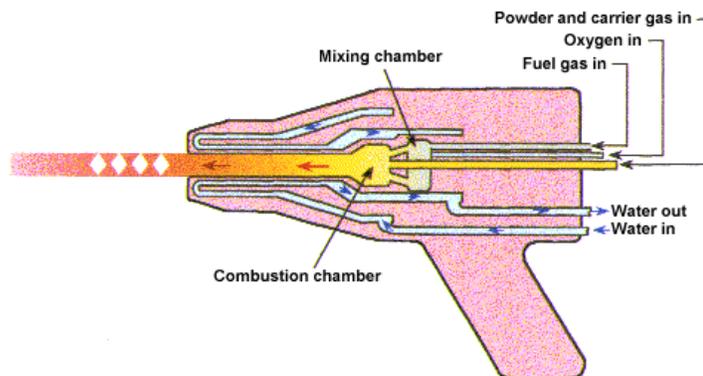


Figura 1.4. Pistola HVOF (alimentación en forma de polvo)

El HVOF produce velocidades de partículas considerablemente más altas que los demás procesos de Rociado Térmico. Las velocidades de los gases oscilan entre los 1370 m/s y 1930 m/s, con velocidades de partícula de polvo correspondientes a 480 – 1020 m/s, Es de hacer notar que esta velocidad puede llegar a ser hasta tres veces superior a la velocidad del sonido (360 m/s). Las temperaturas del gas en la recámara de reacción del sistema HVOF están característicamente entre 1650 ° y 2760 °C, dependiendo del combustible usado y la reacción estequiométrica de la combustión. La longitud de la boquilla, sin embargo, debe ajustarse para cada material debido a las pérdidas de calor (producto del refrigerante el cual generalmente es agua) lo cual reduce su eficiencia calorífica. El calentamiento excesivo y/o fusión de la partícula dentro de la boquilla pueden llevar a la deposición indeseable en las paredes de la misma, este fenómeno se conoce como “plugging” el cual produce un funcionamiento inestable debido al flujo de gas restringido por estas deposiciones. Las velocidades de las partículas alcanzadas en el sistema de HVOF son la causa principal de los beneficios que este sistema trae consigo [7].

Dentro de los beneficios que este proceso ofrece se encuentran:

- Tiempo de la exposición más corto, debido a las altas velocidades de la partícula.
- Ambiente más favorable (atmósfera menos oxidante).
- Calentamiento de la partícula más uniforme y eficiente.
- Energía cinética más alta en los impactos.
- Densidad más alta (porosidad más baja) porque la energía de impacto es más alta debido a las velocidades alcanzadas por las partículas.
- Implanta una barrera anticorrosiva a través de la baja porosidad.
- Dureza más alta debido a una menor degradación y una mejor fuerza de adhesión.
- Mejor resistencia al desgaste debido a una mayor dureza en el revestimiento.
- Adherencia más alta y mayor fuerza cohesiva porque mejora la unión entre las partículas.

- Volumen del óxido más bajo por el menor tiempo de exposición con el aire.
- Mayor cantidad en el volumen de las partículas fundidas debido a un mejor calentamiento de éstas.
- Mayor retención de las propiedades químicas del polvo y sus fases debido al tiempo reducido de exposición a altas temperaturas.
- Capas más espesas (por paso y total) a través del mejoramiento en las tensiones residuales (disminución de éstas).
- Superficies más lisas debido a una energía de impacto más alta.

1.3 Teoría de Desgaste

Existe un término que se debe conocer antes de entrar en los tópicos del desgaste como tal, dicho término es la tribología. Etimológicamente esta palabra se halla compuesta por los vocablos griegos tribo que significa frotar o rozar y logia cuyo significado es ciencia. Entonces se puede definir a la tribología como la ciencia que estudia la totalidad de los fenómenos emergentes de superficies que interactúan con movimiento relativo entre sí, en presencia o ausencia de algún medio circundante. A ella se incorporan un gran número de tópicos como lubricación, fricción, desgaste y aspectos propios de los materiales [5].

El desgaste es el fenómeno que más afecta la productividad de las máquinas ya que obliga a su detención ya sea de manera programada ó intempestiva cuando alguno de sus componentes falla de manera catastrófica. En los componentes de las máquinas se presentan algunos tipos de desgaste como el erosivo y el abrasivo que de manera silenciosa van desgastando sus superficies de fricción sin que el usuario en la mayoría de los casos detecte a tiempo condiciones anormales en su funcionamiento, las cuales conllevan inexorablemente a su deterioro, pérdida de tolerancias, a un comportamiento errático y por consiguiente a su reemplazo [6].

Debido al elevado número de factores que intervienen en el proceso de Desgaste, se torna difícil de obtener, con un solo ensayo, el comportamiento que tendrá el material en servicio. Generalmente se analiza la influencia de las variables más significativas

del sistema, y se diseña en un laboratorio uno o varios tipos de ensayos que serán más representativos de cada caso en particular.

Los ensayos de laboratorio generalmente se utilizan para:

- 1.- Estudiar los mecanismos de Desgaste.
- 2.- Desarrollar mejoras en los materiales utilizados.
- 3.- Seleccionar materiales para determinar condiciones de servicio.

1.3.1 Desgaste sobre recubrimientos realizados por HVOF y por electrodeposición

A.R. Jones (1997) [2], determinó que los recubrimientos con Cromoduro libres de grietas no son tan duros como aquellos que presentan microgrietas. Debido a que se encontró que los depósitos de cromo libres de grietas presentan durezas entre 300 y 600 HK₁₀₀ mientras que los depósitos con microgrietas presentan durezas entre 850 y 1050 HK₁₀₀. Estos valores de dureza están relacionados en forma directamente proporcional con la resistencia al desgaste, en donde, los depósitos libres de grietas presentan una muy pobre resistencia al desgaste comparada con los depósitos de cromo con grietas.

Devorah C. Bolles (1995) [9], mediante estudios realizados observa una tendencia del recubrimiento de Cromoduro a desconcharse repentinamente durante el desgaste en aplicaciones donde la lubricación es escasa y en contacto de metal con metal por ello concluye que el Rociado Térmico ofrece una gran alternativa para el proceso de Cromoduro a través de la utilización de la tecnología de (HVOF) complementada con una prudente selección del material.

En 1995, Barbera y Malaver, [10] hicieron evaluaciones a recubrimientos de WC-16%Co, carburo de cromo y Níquel-Cromo-Boro-Silicio usados para recuperación de elementos de máquinas expuestos a desgaste erosivo y concluyeron que el carburo de

tungsteno, fue el material que presentó mayor resistencia al desgaste erosivo y el que presentó menor resistencia fue el Níquel-cromo-Boro-Silicio.

Marcelino P. Nacimiento y colaboradores (1999) [11], realizaron estudios de resistencia al desgaste, fatiga y abrasión con recubrimientos de carburo de tungsteno rociados térmicamente por HVOF y recubrimientos electrodepositados con cromo y concluyeron que los recubrimientos de rociado térmico por (HVOF) y el cromo duro son ineficientes cuando son sometidos a ensayos de fatiga, mientras que al ser evaluados al desgaste abrasivo el recubrimiento termo rociado indico mejores resultados.

P.L.Ko y M. F. Robertson (2001) [12], estudiaron las características del rociado térmico WC-10Co-4Cr y del cromo duro, al realizarles un ensayo de desgaste deslizante sobre Al-Ni-bronce en una cámara temporizada, observaron una ganancia de peso del pin utilizado sobre las muestras de cromo duro y una disminución de peso del pin utilizado en las muestras rociadas térmicamente.

J.K.N Murthy y colaboradores (2000) [13], realizaron estudios de erosión usando una pistola de aire con partículas erosionantes a 80 m/seg, sobre dos mezclas rociadas térmicamente, una de WC-Co y otra WC-Co-Cr siendo esta última la que aportó mejores características al desgaste erosivo.

Bruce D. Sartwell (2000) [14], realizó ensayos de corrosión de exposición atmosférica con rociado de sal durante 18 meses, y ensayos de desgaste de pistón oscilante sobre cojinetes a baja frecuencia para los recubrimientos de rociado térmico por (HVOF) WC-Co y Cromoduro, de un acero AISI 1045, de los cuales concluyó que los sustratos recubiertos por WC-Co (HVOF) demostraron un desempeño superior en todas las pruebas que los recubrimientos por Cromoduro.

Galárraga G., Michael X. y González F., Fernando.; (2002) [8]. Mediante estudios de desgaste erosivo y abrasivo concluyeron que el acero AISI 1020 presentó una mayor

resistencia a la erosión que los recubrimientos de WC-10%Co+4%Cr y WC-12%Co+80%Colmonoy88, también llegaron a la conclusión que el recubrimiento que presentó el mejor comportamiento al desgaste abrasivo y erosivo fue el WC-10%Co+4%Cr.

1.3.2 Desgaste Abrasivo

La abrasión es el desgaste producido por las partículas duras que penetran en una superficie, ocasionando deformación plástica y/o, desprendimiento de material.

El desgaste abrasivo se produce cuando partículas duras penetran una superficie y desplazan, o remueven material en forma de astillas alargadas o tiras. Debido a ello, una superficie lisa o pulida, se vuelve áspera, con marcas y ranuras bastantes regulares, pudiendo haber productos o restos metálicos desprendidos o adheridos. Cuando las partículas de abrasivo se ponen en contacto con el material, éste es removido por mecanismos que dependen de la naturaleza del sistema. El principal de ellos es, en este caso, el micro maquinado de la superficie, ocasionado por las partículas duras que se comportan como pequeñas herramientas de corte. Por otro lado, la deformación plástica localizada y el endurecimiento por trabajado traen como consecuencia efectos de fatiga [5].

Una de las formas de desgaste abrasivo más comunes es la abrasión a baja presión, donde el metal es desgastado gradualmente por la acción de las partículas abrasivas, produciendo en su superficie un rayado o pulido. Las partículas pueden ser, por ejemplo, de cemento, de arena, polvo y otros, que se desplazan a velocidad variable. La partícula abrasiva, baja presión, no es fracturada en este caso; este tipo de desgaste es también llamado “abrasión de dos elementos”.

En el caso de la abrasión a alta presión, el abrasivo es forzado a penetrar entre las dos superficies; por ser tres los elementos en contacto, por ejemplo, metal-abrasivo-metal, se llama también abrasión de tres elementos. Dadas las fuerzas de compresión aplicadas, en este caso las abrasivas se fracturan. Aún cuando la carga aplicada pueda

ser baja, el esfuerzo ejercido sobre el grano del abrasivo lo llevan hasta el punto de resistencia de rotura por compresión, causando deformación de los constituyentes dúctiles, agrietamiento en aquellos que son frágiles y producción de fragmentos afilados del abrasivo roto [7].

La situación denominada de dos cuerpos es frecuentemente encontrada en transporte de minerales desprendidos o sueltos, y la de tres cuerpos en tratamiento de minerales.

Las partículas abrasivas pueden ser inclusiones provenientes de una superficie o bien partículas sueltas. Este tipo de desgaste se presenta en equipos de perforación de suelos, trituradoras, molinos de bolas y en algunos casos en cuerpos en contacto deslizante, etc.

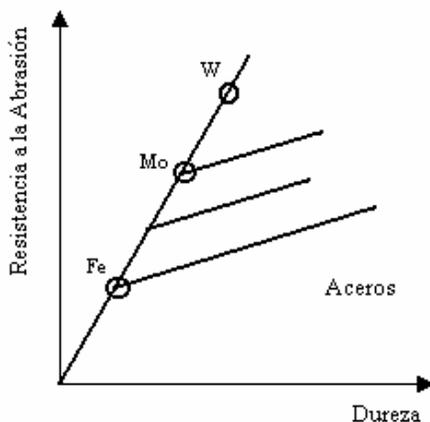


Figura 1.5. Influencia de la dureza en la resistencia a la abrasión.

Por otra parte, en la Figura 1.5 observamos como la dureza aumenta la resistencia a la abrasión y en la figura 1.6 que el contenido de carbono hace disminuir la abrasión en los aceros. De acuerdo al gráfico, se observa que la martensita presenta mejor resistencia a este fenómeno, entre las tres microestructuras que se comparan, pero también se han tenido buenos resultados con refinamientos de perlita y esto se atribuye a una tasa alta de endurecimiento por deformación.

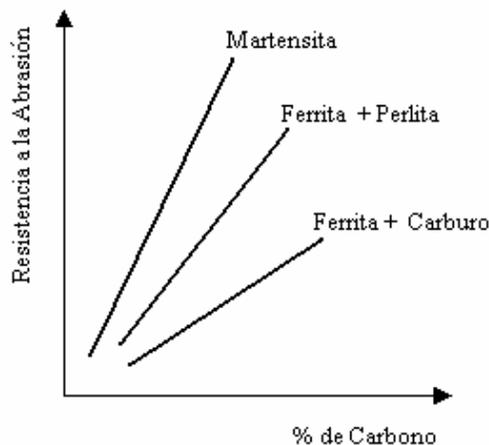


Figura 1.6. Influencia del contenido de carbono en la resistencia a la abrasión.

A fin de obtener un aumento apreciable en la resistencia de la abrasión la dureza superficial debe hacerse mayor que la mitad de la dureza Vickers del abrasivo. Por otra parte, no es recomendable, aumentar la dureza de la superficie por encima de 1,3 veces la dureza del abrasivo, ya que esto podría resultar contraproducente. En general, para metales ferrosos, las mejores resistencias al desgaste se obtienen en matrices martensíticas, con carburos secundarios uniformemente distribuidos. Cuando la dureza de los carburos es aumentada mediante una aleación, la resistencia al desgaste también aumenta, pero hay que tener en cuenta la dureza de las partículas abrasivas. Si se requiere una matriz más tenaz, para condiciones de impacto fuertes, es más recomendable una estructura austenítica inestable, la cual tiende a endurecerse por deformación o sufrir transformación de fase, o bien ser sometida a ambos procesos durante el trabajo de abrasión [7].

Con relación al material abrasivo: tamaños reducidos, formas redondeadas, disminución de las velocidades y de las cargas de impacto, son todos factores que hacen disminuir el fenómeno de la abrasión.

En general los factores más importantes que hacen disminuir la abrasión son los siguientes:

- Aumento de la dureza.
- Aumentos del contenido de carbono y carburos duros.
- Control de la relación entre la dureza superficial y del abrasivo.
- Disminución del tamaño de las partículas abrasivas.
- Partículas abrasivas con formas redondeadas.
- Disminución de velocidades.
- Disminución de cargas.

La mayoría de las teorías se basan en el concepto de que la abrasión es el proceso de rayado, además simplifican la punta del abrasivo como un cono anguloso. Por lo tanto, se concentran en explicar el efecto de dicho cono deslizándose a través de la superficie del material.

Debido a lo anteriormente expuesto, varias ecuaciones han sido derivadas para correlacionar el desgaste y las otras propiedades; la más conocida es la ecuación de Archard, si bien fue deducida para el desgaste adhesivo, ha resultado ser muy útil para el desgaste abrasivo. Cuando un grano de abrasivo efectúa la remoción de material de una superficie por corte, el máximo volumen de desgaste que puede obtenerse, está descrito por:

$$W = A \cdot d \quad (\text{Ec. 1.1})$$

Donde:

W = Volumen del material removido.

A = Sección transversal de la ranura.

d = Distancia de desplazamiento.

Al mismo tiempo, la sección transversal de la ranura, depende de la forma del grano abrasivo representado por el factor k_1 y de la profundidad de penetración p . A su vez la profundidad de penetración es función de la carga aplicada L , la dureza del material H , y nuevamente de la forma del grano de abrasivo, representado por k_2 .

Dando como resultado, luego de reducir los términos que la ecuación de Anchard (Ec.2), sea igual a:

$$W = \frac{K_3 \cdot L \cdot d}{H} \quad (\text{Ec.1.2})$$

Siendo K_3 una constante que engloba las otras dos.

Generalmente un material posee buena o mala resistencia al desgaste cuando éste se refiere al recíproco del volumen desgastado (Ec, 3), siendo así:

$$R = \frac{1}{W} \quad (\text{Ec. 1.3})$$

La ecuación de Anchard, con pequeñas modificaciones es ampliamente utilizada como punto de partida para el desarrollo de ecuaciones más complejas.

Los factores más importantes que afectan el desgaste abrasivo son el tiempo, carga, temperatura, materiales lubricantes, medio ambiente, vibración, desgaste, fricción, acabado superficial, geometría y velocidad.

El volumen desgastado aumenta con la distancia de deslizamiento. Si ocurren desviaciones, éstas se deben generalmente a una reducción del tamaño del abrasivo o a una obstrucción o destrucción de la superficie.

1.3.3 Desgaste Adhesivo

Es llamado también desgaste por fricción o deslizante. Consiste en una forma de deterioro que se presenta entre dos superficies en contacto deslizante y es generado por la adhesión entre las estructuras atómicas de los cuerpos en movimiento relativo. Las fuerzas de deslizamiento fracturan las uniones generando un intercambio de material entre ambas superficies, lo cual ocasiona nuevas cavidades en una de las

superficies y proyecciones en la otra. Se puede llegar a pensar entonces que si dos superficies poseen un excelente acabado superficial tendrán una mayor área de contacto y por lo tanto una fuerza de adhesión superior. Otro aspecto a considerar es el relativo al efecto de la temperatura, el desgaste aumenta a medida que ésta se incrementa debido al aumento de la ductilidad de las asperezas. Sin embargo, se han hallado temperaturas de transición, sobre las cuales las velocidades de desgaste disminuyen debido a la formación de óxidos con muy buenas propiedades lubricantes. Su presencia típica se refleja en las chumaceras, los motores de combustión interna, los cojinetes de deslizamiento, los tornillos de potencia, las bielas, los engranes, etc. El desgaste adhesivo es por lo general el primer mecanismo que actúa en los casos típicos de desgaste [15].

1.3.4 Desgaste Erosivo

Se puede decir que es un tipo de desgaste abrasivo el cual envuelve pérdida de material de una superficie en contacto con un fluido que contiene partículas. Para este proceso es indispensable el movimiento relativo entre la superficie y el fluido, en donde las fuerzas que causan el daño superficial son aplicadas por el fluido [8].

Es un desgaste abrasivo que envuelve pérdida de material de una superficie en contacto con un fluido que contiene partículas. El movimiento relativo entre la superficie y el fluido es esencial para este proceso, y las fuerzas de las partículas que causan el daño son aplicadas por el fluido.

La distinción más clara entre la erosión y la abrasión es que en la primera, la fuerza ejercida por las partículas erosivas en el material, es debida a su desaceleración, mientras que en la segunda, la fuerza se aplica externamente y aproximadamente constante.

La erosión en la cual el movimiento relativo es casi paralelo a la superficie erosionada es llamada erosión abrasiva, mientras que la erosión en la cual el

movimiento relativo es casi normal a la superficie erosionada es llamada erosión por choque.[7-8,15]

Existe una buena correlación entre la resistencia a la erosión y el módulo de resistencia del material.

$$R = \frac{S_y^2}{2 * E} \quad (\text{Ec. 1.4})$$

En donde:

- E : Módulo de elasticidad de Young
- S_y : Resistencia a la fluencia
- R : Módulo de resistencia

Este parámetro representa la cantidad de energía que puede ser absorbida por un cuerpo antes de que ocurra una deformación plástica o fractura por impacto.

Las partículas responsables del desgaste erosivo generalmente varían en tamaños desde 5 a 500 μm y las velocidades de impacto en un rango entre 5 y 500 m/s. A menudo las partículas erosivas varían en composición y son generalmente mas duras que la superficie a desgastar. El cuarzo, óxido de aluminio y el carburo de silicio tienen durezas de 1300, 1750, 2000 Kg/mm^2 respectivamente y son generalmente usados en pruebas de simulación de procesos de erosión.

También el impacto de una partícula con una superficie metálica puede provocar la deformación elástica o plástica; la deformación plástica ocurre cuando el valor del esfuerzo de fluencia del material es excedido durante el impacto.

El valor adimensional denominado número de Best representa la magnitud de daño de la superficie:

$$B = \frac{\rho * V^2}{Y} \quad (\text{Ec. 1.5})$$

En donde:

- B: Número de Best
 V: Velocidad de impacto
 Y: Esfuerzo de fluencia del material
 ρ : Densidad del material

Las deformaciones producidas por el impacto de las partículas erosionantes se pueden clasificar en función del Número de Best en 4 grupos, véase tabla 1.1.

Tabla 1.1. Variación del número de Best con el tipo de daño.

Número de Best	Tipo de daño
10^{-5}	Cuasi-estático
10^{-3}	Inicio de deformación plástica
10	Deformación plástica extensiva
10^3	Fenómeno de hiper velocidad

(Malaver, 1995) [10]

Las variables que afectan la erosión pueden ser ampliamente separadas en tres tipos, las referidas a las características del impacto del fluido, las de la partícula y las del material. Las variables básicas de impacto son: ángulo de incidencia (θ), velocidad de la partícula (V). El ángulo de incidencia está definido como el ángulo que forma la dirección del flujo de las partículas abrasivas y la superficie proyectada. Las variables referidas a las partículas pueden ser: la forma, el tamaño, disposición a la fractura y dureza [10].

En cuanto a las características del material, la tasa de erosión se ve afectada por el ángulo de impacto y la velocidad de la partícula erodante acorde con la relación de la forma:

$$E = K * V^n * f(\theta) \quad (\text{Ec. 1.6})$$

En donde:

- E : Factor de erosión
- V : Velocidad de la partícula
- K : Magnitud absoluta de la erosión
- $f(\theta)$: Función adimensional del ángulo de impacto, medido este con respecto al plano del objetivo
- n : Este valor se encuentra entre 2,3 y 2,5 para los metales

Estudios anteriores demostraron que otra posible causa de la variación de las partículas es que éstas alcanzan la velocidad del flujo del gas aproximadamente a 3 metros de proyección [10].

Best estudió y calculó de las trayectorias de las partículas de 5 μm en la proximidad de las probetas, y muestra que los ángulos de impacto pueden diferir significativamente de la orientación original; para un flujo de 100 m/s únicamente el 44% de las partículas proyectadas se espera que choquen con la superficie de la probeta a un ángulo de incidencia de 45° [7].

Estudios experimentales, hechos con partículas angulares simples, con ángulos de incidencia oblicuos, indica que, el comportamiento de las partículas puede ser clasificado en tres tipos (ver figura 1.10) como sigue a continuación:

- Arado o "Ploughing", tiene como característica que el material deformado es desplazado hacia el borde final del cráter de impacto.
- Corte I, presenta un corte en la superficie, levantando un gran fragmento de viruta al final del cráter, el cual es vulnerable a la remoción por el impacto de otra partícula.
- Corte II, la partícula rota en sentido contrario a la trayectoria del impacto, provocando una remoción de material bajo la acción de un maquinado. [16].

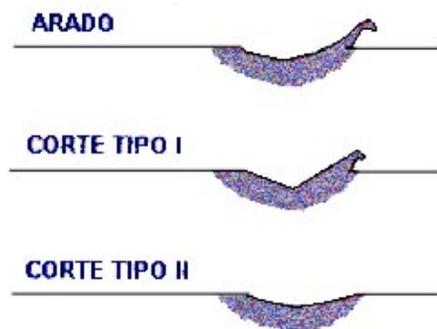


Figura 1.7.- Tipos de cortes producidos por el impacto de las partículas. (Hutchings, I. M, 1979). [16]

1.3.5 Desgaste Corrosivo

Es ocasionado por la reacción superficial de muchos metales con el medio que los rodea, conllevando a la formación de películas superficiales u óxidos. Por lo general, estas partículas son duras y crean una capa protectora sobre la superficie, que llegan a crecer a un punto que se vuelven frágiles y por ende es propensa a ser removida dejando al material expuesto nuevamente para que el ciclo se vuelva a repetir. Esto trae como consecuencia que las partículas removidas se comporten como un tercer cuerpo y conducir a la aparición del desgaste abrasivo [8].

Este desgaste se puede observar en los cascos de los barcos, carrocerías de autos, y en general en superficies expuestas al medio ambiente.

1.3.6 Desgaste por Fatiga

Este tipo de desgaste se produce por la aplicación continua de cargas que crean tensiones sobre las capas superficiales, creando fisuras sobre los mismos, y a medida que las fisuras crecen ocurre un repentino desprendimiento de material [15].

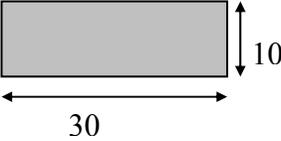
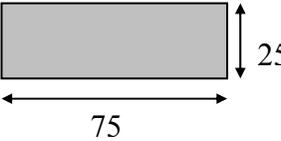
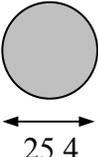
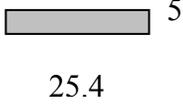
CAPITULO II

2. Procedimiento Experimental

2.1 Material de las probetas

El material empleado como sustrato fue una pletina de acero AISI 1020, la cual fue mecanizada para obtener las probetas con las dimensiones recomendadas por los ensayos a realizar en el presente trabajo como se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Medidas de las probetas según las normas ASTM.

Ensayos	Vista Superior	Vista Lateral
Erosión Norma ASTM G 76-95		
Abrasión Norma ASTM G 65-00		
Pin on disk Norma ASTM G99-95a		

El material utilizado para la realización de los recubrimientos termo-rociados fue WC-10%Co+4%Cr y para los recubrimientos por electrodeposición se utilizó una solución que contenía ácido crómico, ácido sulfúrico y agua. En total se realizaron 92 probetas. La Tabla 2.2. muestra el número de probetas requeridas en función de los ensayos a realizar.

Tabla 2.2 Número de probetas y de ensayos requeridos para la investigación.

	Desgaste abrasivo			Desgaste erosivo				Pin on disk	Metal. y micro dureza	Muestras por recubrimiento
	t1	t2	t3	α 1	α 2	α 3	α 4			
# de muestra para recubrimiento WC-10%Co+4%Cr	5	5	5	5	5	5	5	2	2	39
# de muestra para recubrimiento de Cromoduro	5	5	5	5	5	5	5	2	2	39
# de muestras de Acero AISI 1020	2	2	2	2	2	2	2	0	0	14
									TOTAL	92

2.2 Preparación de probetas previa a ser rociadas térmicamente

Para la aplicación del recubrimiento por HVOF se realizaron 3 procesos previos descritos a continuación:

- Las probetas se colocaron en una pletina mediante un proceso de soldadura para facilitar la aplicación del rociado térmico, (Figura 2.1.)
- Limpieza con Thinner para desengrasar las probetas y quitar impurezas.
- Precalentamiento mediante una llama oxiacetilénica para eliminar la humedad las probetas.
- Finalmente las probetas fueron sometidas a un proceso de granallado el cual consiste en la proyección de partículas de alúmina (Al_2O_3) sobre la superficie de las probetas. Este proceso se realizó a una presión de 0.41 MPa (60 psi) y con diámetro de partículas comprendido entre 1000 y 2000 μ m.

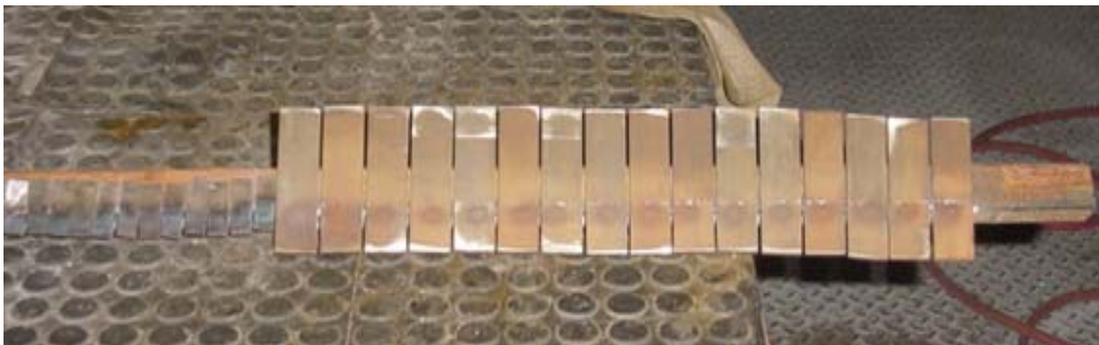


Figura 2.1 Colocación de las probetas previo al rociado térmico.

2.3 Proceso de Rociado Térmico

El recubrimiento de las probetas fue logrado mediante el proceso de HVOF (alta velocidad oxígeno combustible). El cual fue realizado en la compañía Plasmatec Ingenieros C.A. utilizando una pistola modelo JP-5000 la cual utiliza un sistema de alimentación de polvos HVOF como se muestra en la Figura 2.2.

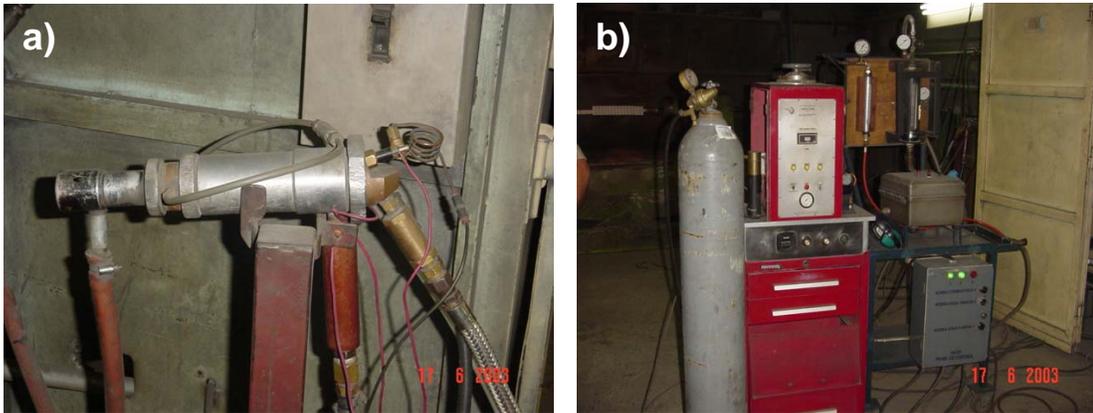


Figura 2.2 a) Pistola JP-5000, b) Sistema de alimentación de polvos.

En la Figura 2.3. muestra el equipo HVOF durante el proceso de deposición de las muestras.

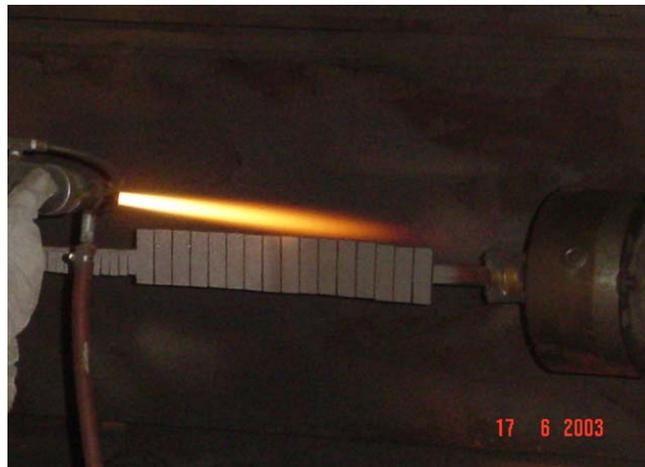


Figura 2.3 Aplicación del Rociado Térmico.

La Tabla 2.3. contiene los parámetros utilizados para la deposición del recubrimiento de (WC-10%Co)+4%Cr, los mismos fueron recomendados por el fabricante de los polvos.

Tabla 2.3 Parámetros para la realización del recubrimiento WC-10%Co+4%Cr por HVOF.

Temperatura de precalentamiento del sustrato	79°C
Distancia de rociado térmico	40.64 cm
Presión de oxígeno	1930.53 KPa
Flujo de oxígeno	350 Lt/min
Presión de Kerosén	861.61KPa
Flujo de Kerosén	0.21Lt/min
Presión de la cámara de combustión	827.37Kpa
Velocidad de alimentación de polvos	83.15 gr/min

2.4 Preparación de probetas para aplicar el recubrimiento por electrodeposición (Cromoduro)

- Las muestras fueron rectificadas con una piedra abrasiva de óxido de aluminio para garantizar una buena adherencia del cromo en la superficie; ya que el cromo en solución adopta exactamente la geometría y rugosidad del sustrato.
- Posteriormente fueron sometidas a un proceso de decapado con la finalidad de eliminar la formación de capas de óxido (véase Figura 2.4).
- Seguidamente se limpiaron con detergente para eliminar los residuos químicos y posibles impurezas.
- Finalmente se realizó una limpieza con thinner para eliminar la grasa presente sobre las probetas.

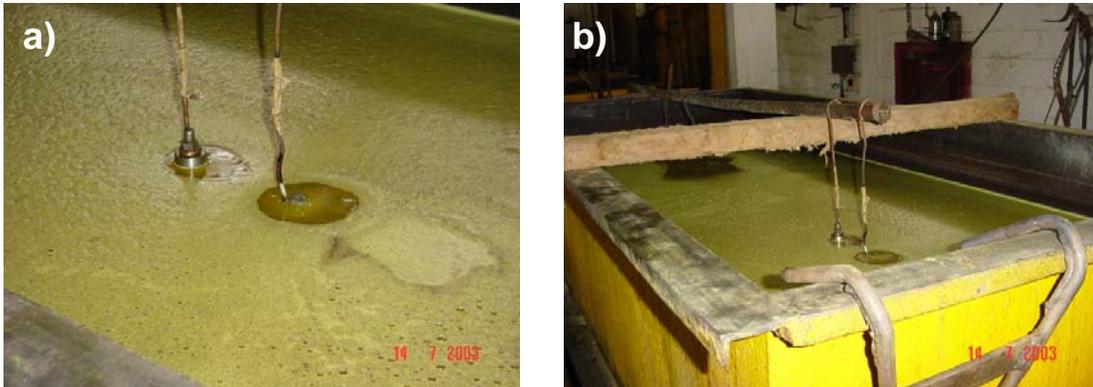


Figura 2.4 a) Decapado de las probetas previo a la realización del recubrimiento de Cromoduro, b) Recipiente para decapado.

2.5 Aplicación de recubrimiento por electrodeposición (Cromoduro)

Luego de realizarse la previa preparación de las muestras para la aplicación del recubrimiento de cromoduro, estas fueron colocadas en la tina electrolítica mostrada en la Figura 2.5a, luego de fijar los parámetros necesarios para la aplicación del Cromoduro.

Este recubrimiento se realizó en la empresa Durocrom de Venezuela mediante un proceso de electrodeposición (véase Figura 2.5).



Figura 2.5 a) Tina electrolítica que contiene las soluciones de cromo que se depositan sobre el substrato., b) Unidad de regulación de la corriente aplicada en el proceso

En la Tabla 2.4. se indican los parámetros para realizar la electrodeposición del recubrimiento de Cromoduro.

Tabla 2.4 parámetros para realizar el recubrimiento de Cromoduro.

Corriente por decímetro cuadrado	25 Ampers
Concentración de Cromo	250 gr/Lt
Tiempo de electrodeposición	3 horas
Temperatura del proceso	55 °C

2.6 Cálculo de la densidad

Dado que las fórmulas para determinar la resistencia a la abrasión y a la erosión requieren la determinación de la densidad de los recubrimientos y solo se cuenta con la densidad de los materiales de alimentación, se realizó un estudio previo sobre la densidad de los recubrimientos.

Este valor se obtuvo mediante la aplicación del método de inmersión, el cual consiste en pesar y hallar el volumen tanto del substrato como de la probeta recubierta, estos volúmenes se hallaron mediante la inmersión en un cilindro graduado con una precisión de 0.1 ml. Para hallar los pesos se empleó la balanza analítica Scientch SA310. Luego se restó al peso de la probeta recubierta el peso del substrato y al volumen de la probeta recubierta el volumen del substrato, para así obtener el peso y el volumen del recubrimiento exclusivamente y poder aplicar la ecuación para el cálculo de densidad.

$$\rho = \frac{m(\text{gr})}{V(\text{mm}^3)} \quad (\text{Ec.2.1})$$

Donde:

ρ = es la densidad del recubrimiento

V = es el volumen.

M = es la masa.

2.7 Ensayo de Abrasión

Este ensayo se realizó bajo la norma ASTM G65-00, [17]. Ella exige que las probetas tengan una rugosidad de $0.8 \mu\text{m}$. Deben ser planas con las dimensiones especificadas por la norma y estar completamente libre de impurezas para así evitar imprecisiones en los resultados de los ensayos.

El abrasivo utilizado es arena de cuarzo redondeado (Sílice) exigida por la American Foundry Sand N° AFS 50-70) con una granulometría entre 212 y $300 \mu\text{m}$ según lo especifica la norma del ensayo. Para verificar esta condición se procedió a tamizar la arena empleando tamices con diferentes números hasta alcanzar la granulometría deseada.

La Figura 2.6a corresponde a una fotografía del banco de ensayos de abrasión, construido por Pinto y Rangel, (1999). En la Figura 2.6b. Se puede observar el equipo en el cual se aprecia en detalle el disco de goma, el porta probetas y la boquilla por donde sale la arena.

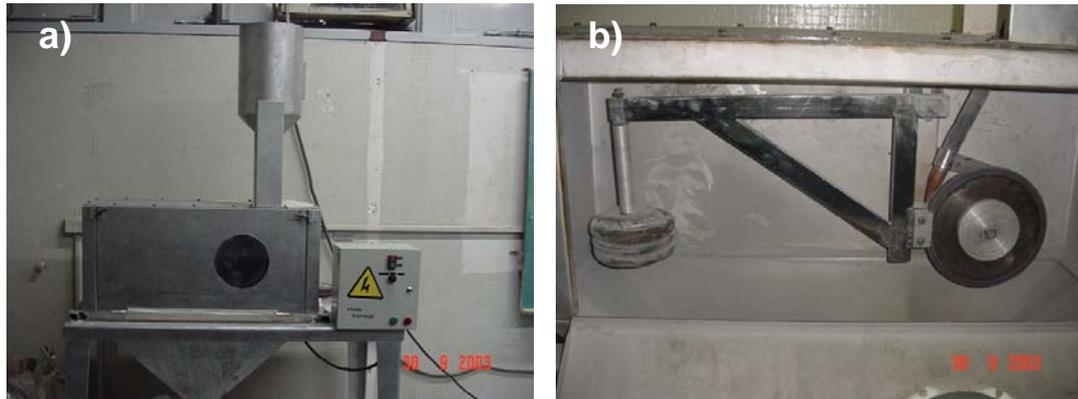


Figura 2.6 a) Máquina de abrasión, b) Detalle interior de la máquina de abrasión.

Los parámetros utilizados para el ensayo de abrasión se detallan en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Parámetros del ensayo de abrasión.

Procedimiento	Fuerza contra la probeta		Pesos contra la probeta	Revoluciones de la rueda	Tiempo de cada prueba
	N	Lbf	gr.	rpm	min
B	130	30	5,159	2000	10
C	130	30	5,159	100	0.5
E	130	30	5,159	1000	5

Una vez finalizado el ensayo las probetas se limpian cuidadosamente con thinner como lo indica la norma, se secan y se pesan, para calcular el peso perdido en el ensayo. Finalmente se calculó la pérdida de masa de las probetas ensayadas de acuerdo a las ecuaciones (2.2), (2.3), (2.4) y (2.5):

$$VPA = VPx \frac{228.6}{df} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

$$VP = \frac{mp}{\rho} x 1000 \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$$mp = ms - msr \quad (\text{Ec. 2.4})$$

$$\rho = \frac{mr}{vr} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Donde:

VPA = volumen perdido ajustado (mm³).

VP = volumen perdido (mm³).

df = diámetro del disco después del ensayo (mm).

mp = masa perdida (gr).

ρ = densidad del recubrimiento (gr/cm³).

ms = masa del substrato (gr).

msr = masa del substrato con recubrimiento (gr).

mr = masa del recubrimiento (gr).

vr = volumen del recubrimiento (cm³).

2.8 Ensayo de Erosión

El ensayo se realizó bajo la norma ASTM G 76 – 95 [18] el material erodante utilizado fue alúmina el cual según la norma debe tener un tamaño de grano de $50\mu\text{m}$, para verificar esta condición se procedió a tamizar hasta obtener la granulometría deseada.

El banco de ensayos de erosión (véase Figura 2.7). se encuentra en los galpones de la escuela de Ingeniería mecánica.

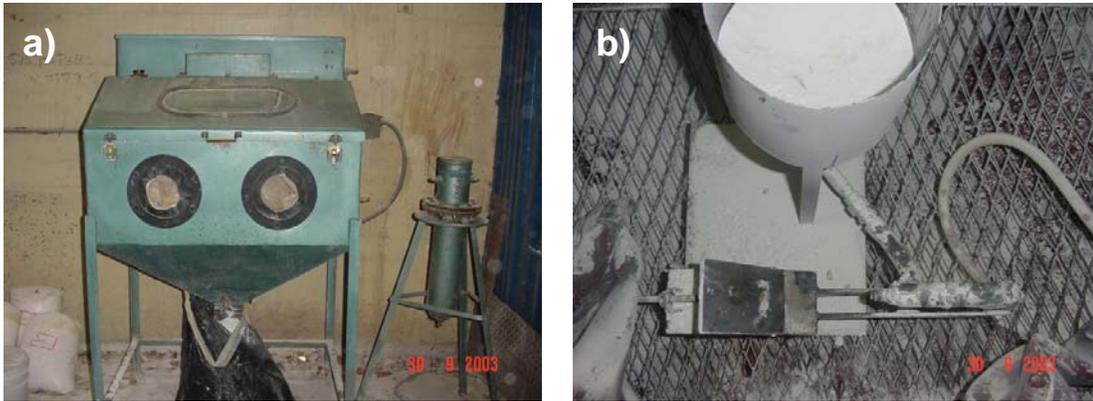


Figura 2.7 a) Banco de Ensayo de Erosión, b) Detalle interior de la maquina de erosión.

La presión de trabajo utilizada fue de 0.68 MPa y la distancia entre la boquilla de la pistola y la probeta fue de 9 cm. Una vez finalizado el ensayo las probetas se limpian cuidadosamente con thinner como lo indica la norma, se secan y se pesan, para calcular el peso perdido en el ensayo.

Los resultados del ensayo de erosión se reportaron basándose en la pérdida de peso de las distintas muestras por kilogramo de erodante para cada ángulo de incidencia.

Para cuantificar la resistencia al desgaste erosivo, se calculó la tasa de erosión (RE). Según la ecuación (2.6)

$$RE = \frac{\Delta P}{\rho * ma} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Donde:

RE = tasa de erosión (mm³/gr).

ΔP = pérdida de masa (gr).

ρ = densidad del material (gr/mm³).

ma = masa del abrasivo (gr).

De igual manera se reportó el Factor de Erosión Normalizado, el cual nos permite calcular la erosión del recubrimiento relativo a la erosión del material de referencia.

$$FEN = \frac{Re_{recubrimiento}}{Re_{control}} \times 100 \quad (\text{Ec.2.7})$$

Donde:

FEN = Factor de erosión normalizado (%).

Rerecubrimiento = Tasa de erosión del recubrimiento (mm³/gr).

Recontrol = Tasa de erosión del material de referencia (mm³/gr).

2.9 Ensayo de Desgaste por Deslizamiento (Pin on Disk)

El ensayo se realizó de acuerdo a la norma ASTM G99-95^a [19]. Las muestras se ensayaron en un tribómetro marca CSEM, modelo 2-115 de simulación de fricción y desgaste con una configuración bola sobre disco (Pin on Disk) (ver Figura 2.8).

Las muestras fueron sometidas a una limpieza ultrasónica de inmersión en acetona durante 15 minutos y luego 15 minutos en alcohol, posteriormente fueron secadas para eliminar la humedad. La bola utilizada fue una de alúmina cuyo diámetro era de 6mm.



Figura 2.8 Tribómetro.

Por último fueron colocadas la muestra y la bola de forma perpendicular en el equipo para proceder a realizar el ensayo bajo condiciones de desgaste acelerado sin lubricación, a una velocidad de 10 cm/s, con una carga constante de 5N y una distancia recorrida de 1 Km. Las condiciones ambientales constantes medidas fueron de 25°C y 58% de humedad.

Para calcular la pérdida de volumen de pin, y el coeficiente de desgaste se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$V = \frac{\pi}{6} \times \left(3 \frac{d^2}{4} + h^2 \right) = \frac{1}{3} \pi r^2 (3r - h) \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Donde:

V = Volumen perdido del pin (mm³).

d = Diámetro promedio de la huella de desgaste del pin (mm).

r = Radio del pin (mm).

$$h = r - \sqrt{r^2 - \frac{d^2}{4}} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

si $\frac{h}{r} \leq 1$ entonces:

$$h = \frac{d^2}{8r} \quad (\text{Ec. 2.10})$$

$$V = \frac{\pi d^4}{64r} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

$$K = \frac{V}{SP} \quad (\text{Ec. 2.12})$$

Donde:

K = Coeficiente de desgaste (mm³/N.m).

S = Carga normal utilizada (N).

P = Distancia de deslizamiento (m).

2.10 Ensayo de la Microdureza

El ensayo se realizó bajo la norma ASTM E 384 – 99 [20]. La microdureza se obtuvo a través de un Microdurómetro marca Leco modelo M-400-H, el cual se muestra en la Figura 2.9.



Figura 2.9 Microdurómetro.

Los resultados son obtenidos mediante 6 indentaciones distribuidas en 2 filas y 3 columnas, estas espaciadas una distancia de $100\ \mu\text{m}$ aplicadas sobre el recubrimiento, con una carga de 300 gr durante 15 segundos.

2.11 Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)

Para realizar el estudio morfológico de los recubrimientos se tomaron 2 muestras de cada recubrimiento.

Las muestras fueron cortadas en una cortadora de disco abrasivo marca Buehler, la cual se puede observar en la Figura 2.10. la cual evita desprendimiento del recubrimiento.

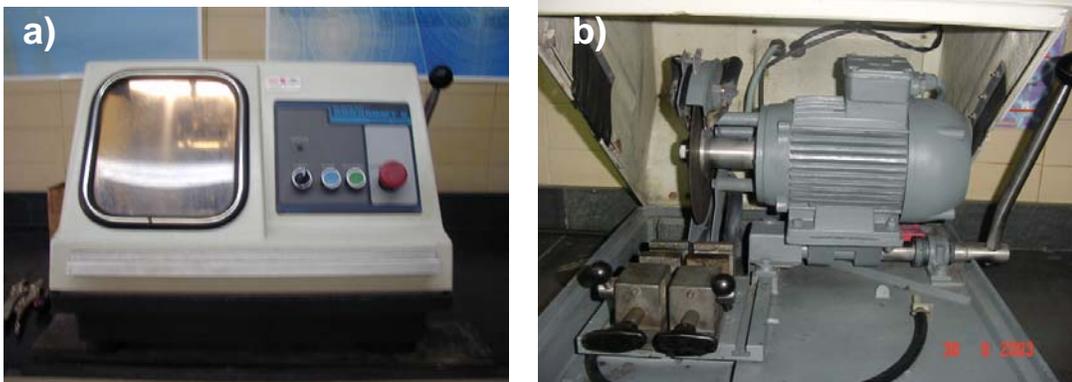


Figura 2.10 a) Cortadora de precisión, b) Detalle interior de la cortadora de precisión

Luego las piezas fueron embutidas en baquelita a una temperatura de $150\ ^\circ\text{C}$ con una presión de 30 Mpa (4200 psi) durante un tiempo de 2 minutos (véase Figura 2.11).



Figura 2.11. Muestras embutidas.

Las muestras fueron preparadas metalográficamente, para lo cual fueron primeramente desbastadas utilizando papeles de carburo de silicio con diferentes granulometrías y luego pulidas en una pulidora marca Buehler la cual se muestra en la Figura 2.12.



Figura 2.12. Pulidora de plato giratorio.

La microestructura y composición química elemental de los recubrimientos fueron estudiadas mediante un microscopio electrónico de barrido marca Philips. Modelo XL 30, acoplado con un espectrómetro de dispersión de energía de rayos X . (véase Figura 2.13).



Figura 2.13. Microscopio Electrónico de Barrido.

CAPITULO III

3. Análisis de Resultados

3.1 Análisis de la Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

La Figura 3.1a corresponde a una micrografía de la sección transversal del recubrimiento de WC-10%Co+4%Cr a un aumento de 300X, en la cual podemos observar la interfase entre el recubrimiento y el sustrato, apreciándose la presencia de algunas cavidades ocasionadas por el proceso de granallado (ver flechas rojas).

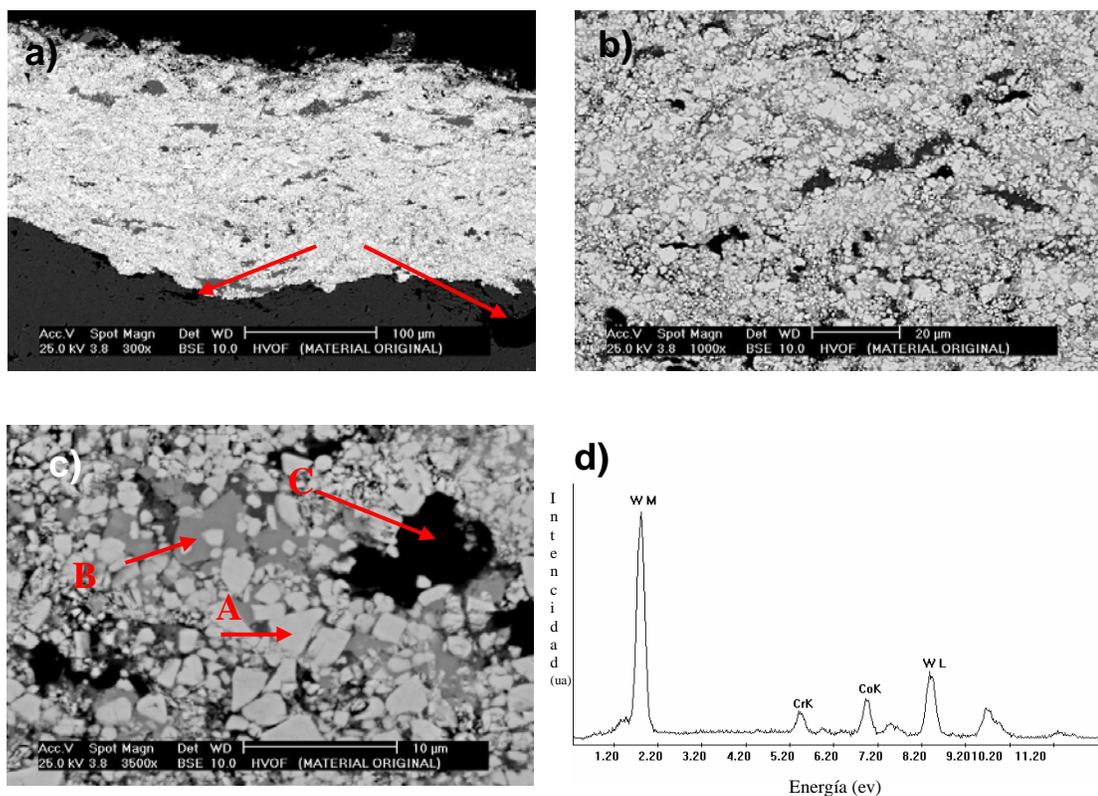


Figura 3.1 Micrografía en modo de electrones primarios (BSE) de la sección transversal del recubrimiento WC-10%Co+4%Cr. a) 300X, b) 1000X, c) 3500X, d) Análisis químico general (EDS).

La Figura 3.1b muestra el mismo recubrimiento a una mayor magnificación, (1000x), en la cual se observa una fase mayoritaria de color blanca, algunas partículas de color gris claro y oscuro.

En la Figura 3.1c a una mayor magnificación se aprecian tres fases claramente definidas, una blanca (detalle A) cuyo análisis químico puntual realizado por

Espectroscopia por dispersión de energía de rayos X (EDS) reveló tungsteno 100% en peso, el cual se observa con su morfología angular característica, una fase gris clara identificada con la letra B la cual contiene un 68.42% tungsteno, 22.95% cobalto y 8.63% cromo en peso y una fase oscura (detalle C) la cual estaba compuesta casi en su totalidad por Cr con un 61.37% en peso.

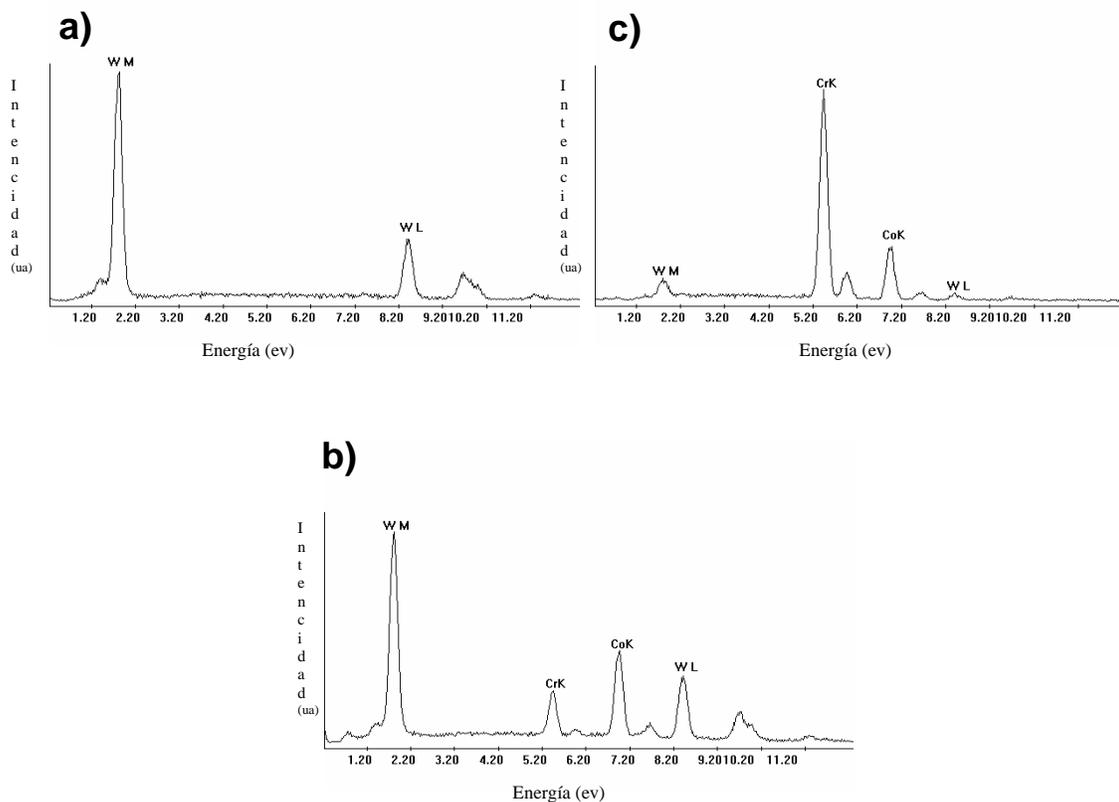


Figura 3.2 Análisis químico puntual (EDS) de las tres fases observadas. a) Fase blanca, b) Fase gris clara, c) Fase oscura.

Las fases oscuras observadas en la Figura 3.1c (detalle C) pueden ser producto de algunas partículas de material que no llegó a fundir durante el proceso de deposición, generándose de esta manera un aglomerado que en este caso es de cromo, tal como lo demuestra un análisis químico puntual (EDS) en la mencionada zona oscura (ver Figura 3.2c). Sin embargo, en líneas generales podemos observar una buena cohesión entre las fases.

En la Figura 3.3a se observa la sección transversal del recubrimiento de Cromoduro a un aumento de 3500X, en este caso no se aprecia claramente la interfase entre el recubrimiento y el substrato. Esto puede ser debido a que las densidades de ambos materiales, el substrato y el recubrimiento, son similares, es por ello que en algunas oportunidades no se logra el contraste deseado.

Una importante característica de los recubrimientos depositados de Cromoduro es su homogeneidad y su excelente adhesión con el metal base el cual no sufre daños microestructurales en el proceso de deposición [16].

La Figura 3.3b muestra una ampliación a 5000x del recubrimiento de Cromoduro en el cual se observa una fase uniforme, cuyo análisis químico puntual (EDS) contenido en la Figura 3.3d reveló un contenido de cromo 95.63% en peso y hierro en un 4.37% en peso. En las Figuras 3.3b y 3.3c también pueden apreciarse algunas grietas (ver flechas rojas), estas grietas por lo general no están vacías, sino llenas de cromo u óxido de cromo[2]. Las mismas se forman durante la deposición cuando los esfuerzos internos de tracción, propios del proceso de electrodeposición del cromo, exceden la fuerza de cohesión de éste. Por lo tanto, la formación de microgrietas es un mecanismo de liberación de tensiones internas durante la deposición del recubrimiento.

Las microgrietas disminuyen los esfuerzos residuales de tracción en la medida en que aumenta el espesor del depósito. Por tanto, los esfuerzos residuales de tracción son inversamente proporcionales al número de grietas [2,4].

La densidad de las microgrietas en los depósitos de cromo varía entre 0 y 1200 grietas/cm², dependiendo de la composición química del baño, de la densidad de corriente y de la temperatura. A medida que se incrementa la concentración del catalizador en la solución electrolítica se incrementa el número de grietas [2].

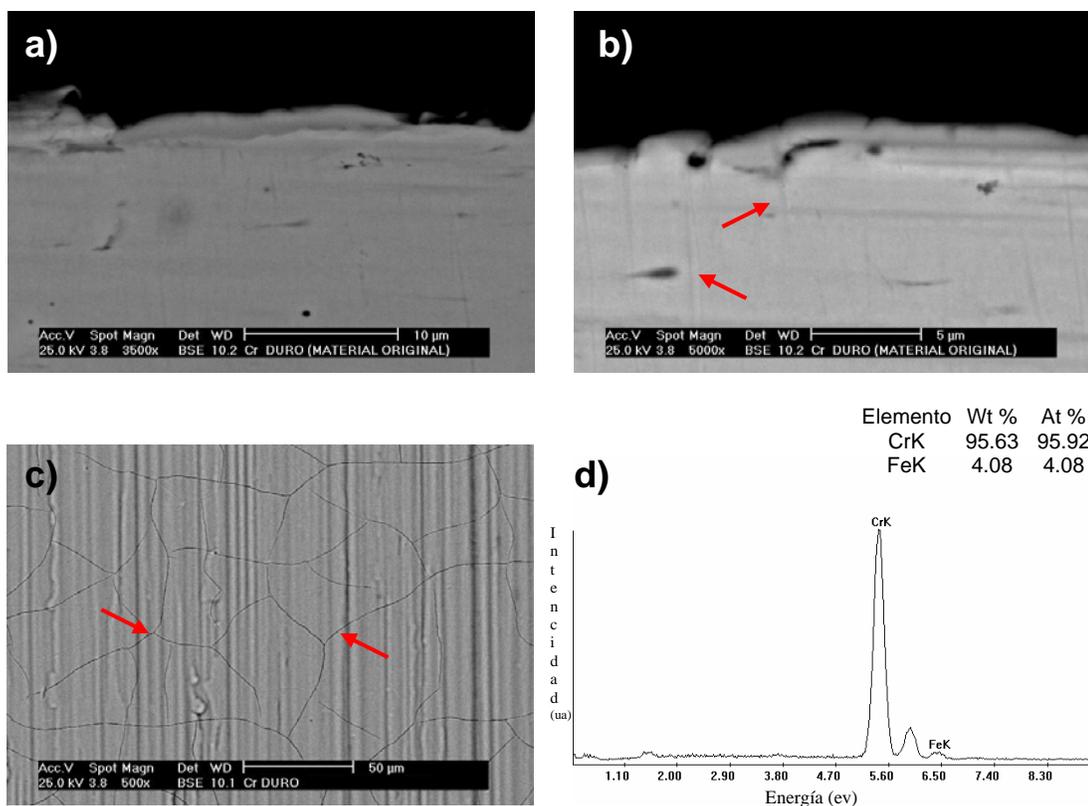


Figura 3.3 Sección transversal del recubrimiento de Cromoduro. a) 3500X, b) 5000X, c) vista superior del recubrimiento de cromo a 500x, d) Análisis químico general (EDS).

3.2 Análisis de la Microdureza

La Tabla 3.1 contiene los resultados de los ensayos de microdureza realizados para cada recubrimiento estudiado.

Tabla 3.1. Valores de dureza para los materiales estudiados.

Material	Valores de Dureza (Vickers)	
	Dureza	Desv. Prom
WC-10%Co+4%Cr	970	54,40
Cromoduro	553	43,09
Acero 1020	240	27,06

Estos resultados son obtenidos mediante 6 indentaciones distribuidas en 2 filas y 3 columnas, espaciadas una distancia de 100 μm sobre la superficie del recubrimiento.

En la Figura 3.4 se pueden apreciar los valores de la microdureza para las muestras estudiadas. Se observa que la dureza más elevada es la del WC-10%Co+4%Cr luego la del Cromoduro y finalmente la del acero 1020.

La desviación promedio de la muestra WC-10%Co+4%Cr es ligeramente superior a la del Cromoduro, lo cual puede ser atribuido a que la desviación estándar está relacionada con la heterogeneidad del depósito rociado térmicamente. El simple hecho de ser una mezcla mecánica como un agregado multifásico particulado, genera poca uniformidad en los valores de dureza, sobre todo al ser evaluados a través de un ensayo de micro punzamiento estático, en donde la reacción al estímulo mecánico externo producto del ensayo son generados en áreas muy pequeñas.

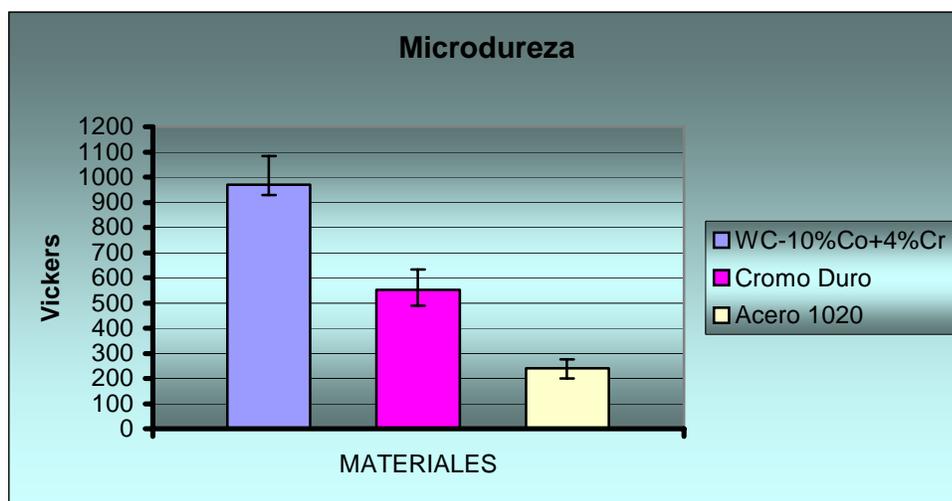


Figura 3.4. Microdureza en Vickers de los materiales estudiados.

La dureza del WC-10%Co+4%Cr es 1.75 veces mayor que la del Cromoduro y 4 veces mayor que la del acero, igualmente la dureza del Cromoduro en comparación al acero es de 2.3 veces mayor.

Los valores de microdureza del Cromoduro fueron comparados con los obtenidos por Nascimento y colaboradores [16], evidenciándose una similitud, en los valores promedio obtenidos por el mismo ensayo de microdureza.

En el caso de los resultados de la microdureza del WC-10%Co+4%Cr se realizó una comparación con los obtenidos por Galarraga y colaboradores (2002) [5], existiendo también una similitud entre los resultados obtenidos.

3.3 Análisis de la Rugosidad Superficial

En la Tabla 3.2 se pueden apreciar los valores obtenidos de la rugosidad de los recubrimientos, del sustrato, las mismas fueron el resultado de 5 mediciones sobre las probetas previamente rectificadas.

Tabla 3.2. Rugosidad superficial en μm de los materiales estudiados.

Materiales	Rugosidad en μm	Desviación promedio
WC-10%Co+4%Cr	0.701	0.07
Cromoduro	0.442	0.13
Acero AISI 1020	0.788	0.33

Se observa que la rugosidad del acero es la más elevada, siendo 1.12 veces más alta que la del WC-10%Co+4%Cr y 1.78 veces mayor a la rugosidad obtenida por el Cromoduro.

Cabe destacar que la rugosidad obtenida para cada uno de los materiales cumple con los parámetros exigidos por la norma *ASTM G65-00* para la realización de los ensayos de abrasión y la norma *ASTM G76-95* en los ensayos de erosión, la cual no debe superar $0.8 \mu\text{m}$.

3.4 Análisis de la Densidad

En la Tabla 3.3 se pueden observar los distintos valores de densidad para los dos recubrimientos, estos valores fueron obtenidos mediante 5 ensayos utilizando el método de inmersión.

Tabla 3.3. Densidad en gr/mm^3 de los recubrimientos utilizados.

Material	Densidad gr/mm^3	Desviación promedio
WC-10%Co+4%Cr	0.011	0.03
Cromoduro	0.007	0.09

De la Tabla 3.3 se puede apreciar que la densidad del WC-10%Co+4%Cr es mayor que la del Cromoduro en un 36.3%.

Galárraga y colaboradores; (2002) [8]. Determinaron la densidad de los recubrimientos de WC-10%Co+4%Cr obteniendo valores similares a los reportados en la Tabla 3.3.

3.5 Análisis del Ensayo de Erosión

La Tabla 3.4. muestra la pérdida de masa para cada uno de los recubrimientos y para el acero AISI 1020 en un tiempo de 3 minutos. Los valores obtenidos son el promedio de 5 mediciones para cada caso con sus respectivas desviaciones promedio.

Tabla 3.4. Pérdida de masa en gramos de los diferentes materiales.

Material	Pérdida de masa en gramos							
	30°		45°		60°		90°	
	Masa. Perd.	Desv. Prom.	Masa. Perd.	Desv. Prom.	Masa. Perd.	Desv. Prom.	Masa. Perd.	Desv. Prom.
WC-10%Co+4%Cr	0,0045	0,0009	0,0053	0,001	0,0083	0,0010	0,0097	0,0017
Cromoduro	0.0024	0,0004	0,0035	0,0003	0.0031	0,0010	0,0043	0,0003
Acero 1020	0.0059	0,0001	0.0051	4,5E-05	0.0040	0,0002	0.0022	0,0002

En la misma Tabla 3.4 se observa que para un ángulo de 30° el (WC-10%Co+4%Cr) pierde 1.8 veces más masa que el Cromoduro. Para un ángulo de 45° el (WC-10%Co+4%Cr) perdió 1.5 veces más masa que el Cromoduro y para el ensayo a 60° se aprecia que el (WC-10%Co+4%Cr) pierde 2.7 veces más masa que el Cromoduro y 2 veces más que el acero. Finalmente para el ensayo a 90° la pérdida de masa del

(WC-10%Co+4%Cr) está a razón de 2.2 veces más que el Cromoduro y 4.5 veces más que el acero.

En la Figura 3.5 se aprecian gráficamente las pérdidas de masa en función de los ángulos de incidencia. Se refleja que el WC-10%Co+4%Cr es el recubrimiento que presenta mayor pérdida de masa en todos los ángulos del ensayo, esto en comparación del Cromoduro. También se observa que el ángulo mas desfavorable para los recubrimientos es el de 90°. Igualmente se observa en ambos recubrimientos una tendencia al comportamiento de materiales frágiles ya que a medida que aumenta el ángulo de incidencia de las partículas se presenta una mayor pérdida de peso, a pesar de esto el Cromoduro pareciera tener un comportamiento mas estable para los diferentes ángulos de ensayo combinando la dureza del recubrimiento con la ductilidad del sustrato posiblemente debido al tipo de adhesión entre el recubrimiento y el sustrato ya que este se presenta como un medio continuo, mientras que el acero pierde peso a medida que disminuimos el ángulo lo que es típico de los materiales dúctiles [2, 5, 6, 9, 10, 17, 18].

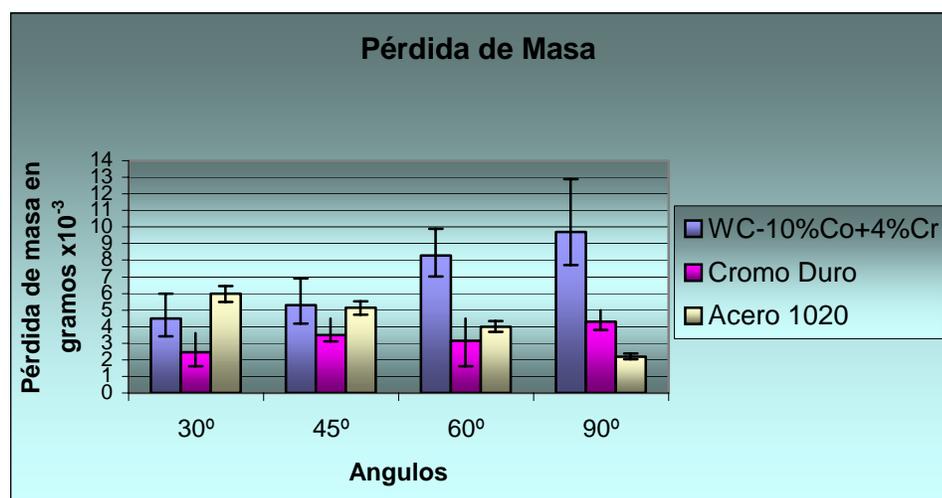


Figura 3.5. Pérdida de masa en gramos de los diferentes materiales.

La desviación estándar del recubrimiento rociado es en líneas generales mayor que el recubrimiento Cromoduro, lo cual puede ser debido a la heterogeneidad del recubrimiento y la falta de cohesión de algunas partículas con las fases cementantes.

Con el fin de observar la pérdida de volumen por kg de material erodante se calculó la tasa de erosión como se observa en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Tasa de erosión RE (mm^3/gr).

Material	Tasa de Erosión RE (mm^3/gr)							
	30°		45°		60°		90°	
	RE	Desv. Prom.	RE	Desv. Prom.	RE	Desv. Prom.	RE	Desv. Prom.
WC-10%Co+4%Cr	0,0745	0,014	0,0803	0,015	0,1281	0,015	0,1478	0,026
Cromoduro	0,0585	0,011	0,0861	0,008	0,0747	0,024	0,1009	0,008
Acero 1020	0,1264	0,003	0,1086	0,0009	0,0846	0,004	0,0465	0,004

Los valores contenidos en la tabla 3.5 fueron graficados y se encuentran en la Figura 3.6 en la cual se aprecia la tasa de erosión para los tres materiales estudiados. En ella se evidencia un comportamiento similar al de la gráfica de la pérdida de masa, es decir, las posiciones de pérdida de material con respecto a los ángulos permanecen iguales, sin embargo existe una aproximación del acero con respecto a los recubrimientos. Esto puede obedecer que en la evaluación de la tasa de erosión se esta normalizando por densidades, es decir que se esta tomando en cuenta la homogeneidad del medio que da respuesta durante el ensayo. Por esta razón en los resultados observamos que los valores absolutos comparando los distintos especímenes se acercan, manteniéndose la tendencia. También puede ser debido a que los recubrimientos presentan macro defectos tales como poros y grietas preexistentes, los cuales coadyuvaron en el proceso de deterioro físico, debido a la erosión.

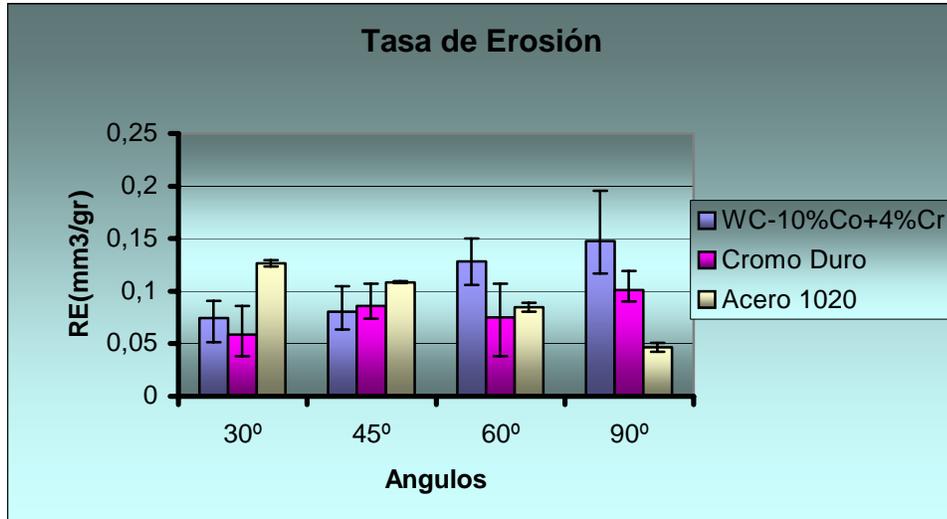


Figura 3.6. Tasa de erosión para los distintos materiales.

Finalmente para este ensayo de erosión se realizó el cálculo de Factor de Erosión Normalizado que no es más que la comparación entre la tasa de erosión de cada uno de los recubrimientos con respecto al acero, permitiendo calcular la erosión del recubrimiento relativo a la erosión del material de referencia (véase Figura 3.7).

En esta figura podemos apreciar que el recubrimiento que presentó los valores más bajos en el ensayo de erosión con respecto al acero es el WC-10%Co+4%Cr, también se aprecia que a medida que aumenta el ángulo de incidencia este factor de erosión normalizado aumenta para ambos recubrimientos.

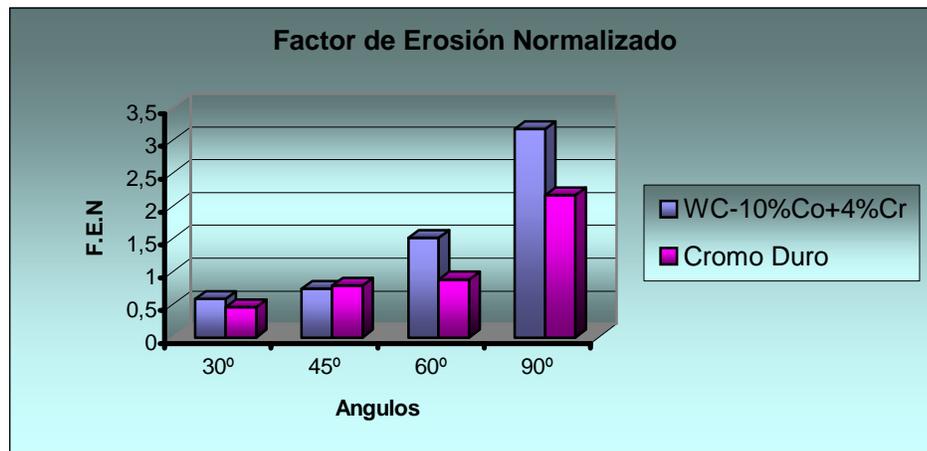


Figura 3.7. Factor de Erosión Normalizado (FEN).

A fin de determinar cuales fueron los posibles mecanismos de desgaste se realizó un estudio de la morfología de la superficie desgastada a través de la técnica de microscopía electrónica de barrido de las muestras que experimentaron altas tasas de erosión así como también los que presentaron bajas tasas de erosión.

En la Figura 3.8a corresponde a una micrografía obtenida por microscopia electrónica de barrido en modo de electrones secundarios (SE) de la superficie de una muestra ensayada la cual fue depositada con WC-10%Co+4%Cr y erosionada a un ángulo de 90°. Se observan zonas en las cuales se ha desprendido material (ver círculos rojos), posiblemente debido a deformación plástica de las fases blandas lo que trae como consecuencia que las fases duras queden expuestas, ya que ocurre una disminución en el área de anclaje de las mismas; también se observan fases duras fracturadas como se pueden apreciar en la Figura 3.8b (ver círculos azules), lo cual es característico de los materiales frágiles cuando son sometidos a desgaste erosivo con un ángulo de incidencia de 90°.

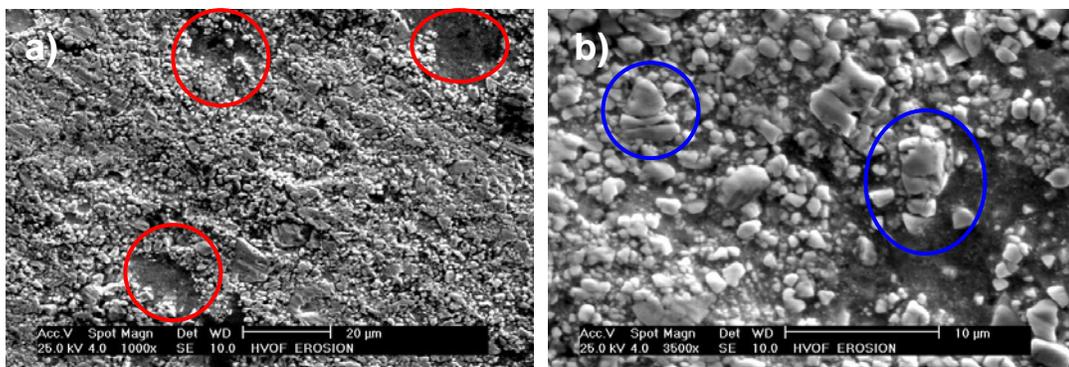


Figura 3.8. Muestras recubiertas con WC-10%Co+4%Cr erosionadas a 90°, a)1000x, b)3500x

La Figura 3.9a corresponde a una micrografía de la superficie de la muestra recubierta con WC-10%Co+4%Cr erosionada a un ángulo de 30°, en la cual podemos apreciar que existe un desgaste menos severo comparado con la muestra erosionada a 90°. Se observan zonas en las cuales se ha desprendido material (ver círculos rojos), lo que podría asociarse a que las fases dúctiles se endurecen debido al repetido impacto de las partículas erodantes lo cual hace que estas se fracturen debido al endurecimiento por deformación provocando su desprendimiento, las cuales son mas

susceptibles a ángulos agudos [24], también se observan algunas fases duras fracturadas (ver círculos azules),

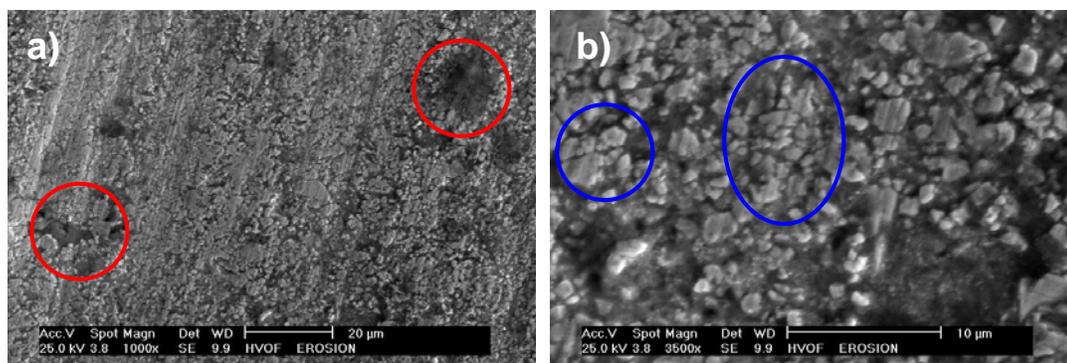


Figura 3.9. Muestras recubiertas con WC-10%Co+4%Cr erosionadas a 30°, a)1000x, b)3500x.

La Figura 3.10 corresponde a la microscopía electrónica de barrido en modo de electrones secundarios de la superficie recubierta con Cromoduro erosionada a 90° donde se aprecian zonas en las cuales se han desprendido capas del recubrimiento de cromo. Este fenómeno probablemente es debido a que el choque de las partículas va fracturando la capa de cromo hasta que ocurre el desprendimiento de la misma. En la zona encerrada en el círculo rojo se pueden observar zonas en las que se ha desprendido parte del recubrimiento. Deborah C. Bolles [9] realizó estudios de desgaste sobre recubrimientos de Cromoduro y concluyó que uno de los problemas del Cromoduro era que en ciertas ocasiones el recubrimiento tendía a desconcharse repentinamente durante los ensayos de desgaste.

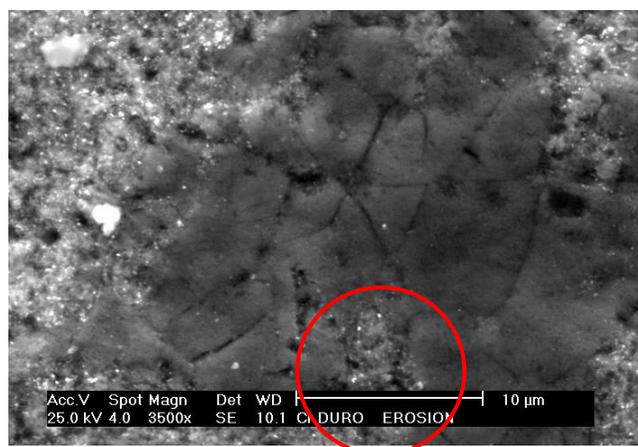


Figura 3.10. Muestras recubiertas con Cromoduro erosionadas a 90°

La Figura 3.11 corresponde a una micrografía de la superficie recubierta con Cromoduro realizada en modo de electrones secundarios (SE), luego de realizado el ensayo para un ángulo de 45° en la cual se aprecia que el desgaste es ligeramente menor que a 90° , observándose algunas zonas en las que se ha desconchado parte del recubrimiento como se muestra en el círculo rojo. También se observan algunas zonas deformadas plásticamente a causa de los impactos recibidos por el material erodante (ver círculos azules).

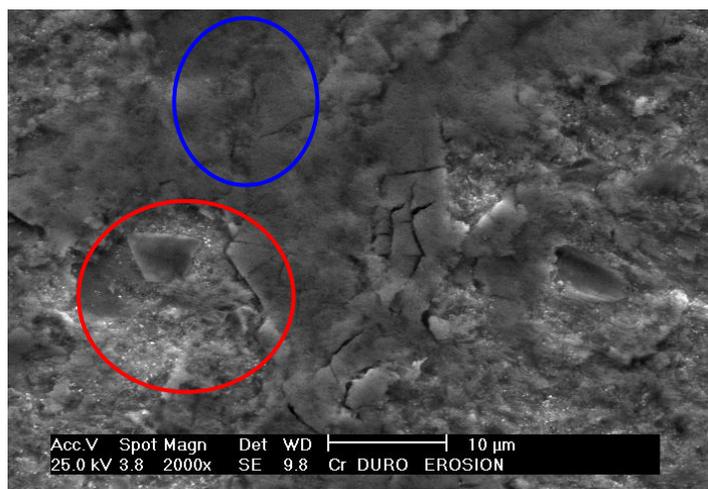


Figura 3.11. Muestras recubiertas con Cromoduro erosionadas a 45°

3.6 Análisis del Ensayo de Abrasión

La Tabla 3.6 contiene los valores promedios de pérdida de masa para los diferentes materiales ensayados, siendo el resultado de 5 mediciones para tres diferentes tiempos. En esta Tabla se puede observar que para un tiempo de ensayo de 30seg el Cromoduro pierde 3.1 veces más masa que el recubrimiento de WC-10%Co+4%Cr y a su vez el acero 1020 pierde 10.7 veces más masa que WC-10%Co+4%Cr. También se aprecia que el acero 1020 pierde 3.4 veces más masa que el Cromoduro para este mismo tiempo de ensayo. Estos resultados corroboran que los materiales frágiles presentan mayor resistencia a la abrasión.

Tabla 3.6. Pérdida de Masa por Abrasión.

Material	Pérdida de masa por abrasión (gr)					
	30 seg		5 min		10 min	
	Masa. Perd	Desv. Prom.	Masa. Perd	Desv. Prom.	Masa. Perd	Desv. Prom.
WC-10%Co+4%Cr	0,0584	0,0182	0,3290	0,0594	0,3918	0,0417
Cromo Duro	0,1815	0,0184	1,5974	0,0154	3,1069	0,0893
Acero 1020	0,6256	0,0375	2,5638	0,0612	4,5886	0,2344

Para un tiempo de ensayo de 5 minutos el recubrimiento de Cromoduro perdió 4.85 veces más masa que el de WC-10%Co+4%Cr. Mientras que para un tiempo de ensayo de 10 minutos la pérdida de masa del Cromoduro estuvo a razón de 7.9 veces más que la del WC-10%Co+4%Cr. Lo anteriormente expuesto puede ser observado gráficamente en la Figura 3.12.

Esto resultados presentan una tendencia similar con los obtenidos por Nascimento y colaboradores [11], los cuales realizaron estudios de desgaste abrasivo de materiales depositados con WC-12%Co y Cromoduro convencional obteniendo como resultados que el recubrimiento WC-12%Co es 2.2 veces mas resistente que el de Cromoduro frente al desgaste abrasivo.

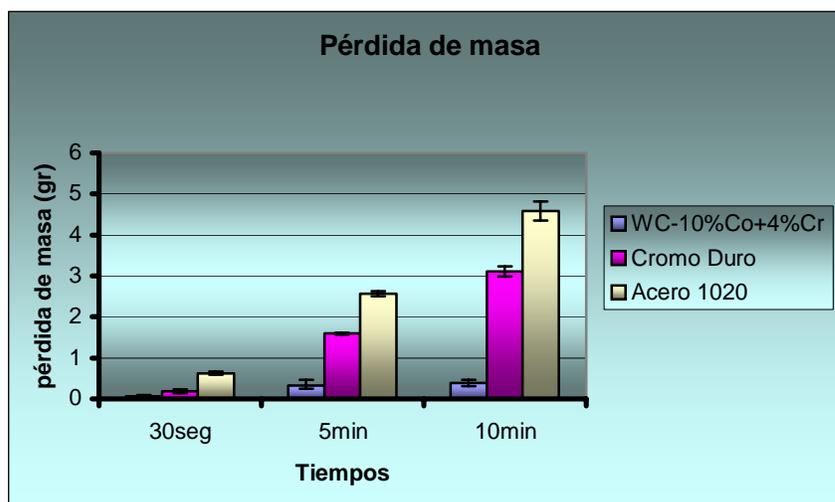


Figura 3.12. Pérdida de masa en abrasión para los materiales en estudio.

En la Figura 3.13 se observa la pérdida volumétrica de los materiales estudiados dando como resultado que el recubrimiento de WC-10%Co+4%Cr se presenta como el material que posee mayor resistencia a la abrasión, ya que este pierde menos volumen que el recubrimiento de Cromoduro para todos los tiempos ensayados .

Los valores obtenidos en la gráfica representan la razón entre la masa pérdida y la densidad, en función de los tiempos de ensayo. Aquí podemos apreciar que la pérdida volumétrica del WC-10%Co+4%Cr es muy poca en comparación con la del Cromoduro y el acero AISI 1020.

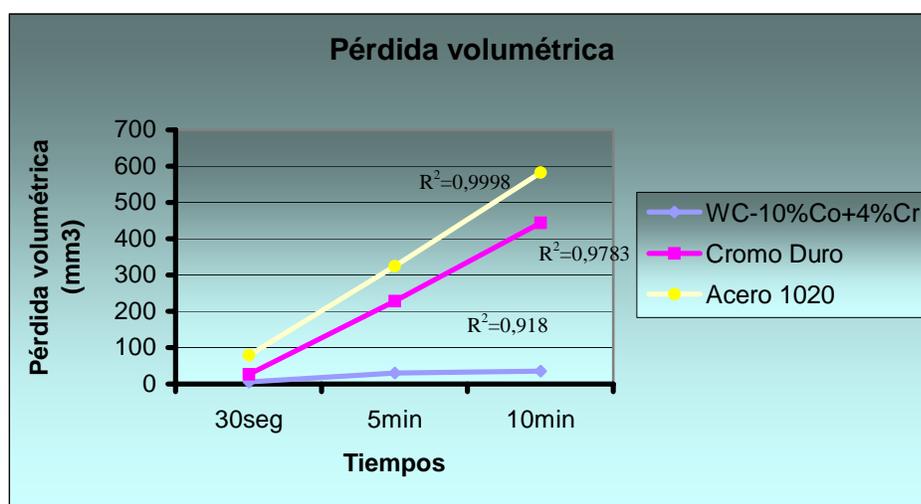


Figura 3.13. Pérdida de volumen en abrasión para los distintos tiempos de ensayos.

Finalmente y debido a que en el ensayo de abrasión existe una disminución del diámetro del disco de goma y los demás parámetros del ensayo permanecen constantes, se necesita calcular la abrasión real en términos de volumen perdido para los materiales en estudio. Para poder realizar esta corrección del volumen se debe tomar en cuenta la razón entre el diámetro real y el diámetro normalizado.

Tabla 3.7. Pérdida de volumen corregida.

Material	Pérdida volumetrica corregida (mm3)					
	30 seg		5 min		10 min	
	Vol. Perd.	Desv. Prom	Vol. Perd.	Desv. Prom	Vol. Perd.	Desv. Prom.
WC-10%Co+4%Cr	5,4703	1,70399	30,3664	5,5148	36,3936	3,8683
Cromo Duro	26,9927	2,7344	232,8060	2,4795	454,7614	13,5959
Acero 1020	80,0043	4,8367	328,2716	7,6975	588,1724	29,9221

En la Tabla 3.7 se aprecia que el recubrimiento con mayor pérdida volumétrica es el Cromoduro, en el ensayo a 30seg pierde 4.9 veces más volumen de material que el WC-10%Co+4%Cr, para 5 minutos 7.7 veces mas volumen y finalmente para 10 minutos la pérdida volumétrica de material esta a razón de 12.6 veces mayor que el recubrimiento de WC-10%Co+4%Cr. Este valor tan elevado se debe a que para tiempos de ensayos mayores de 5 minutos el recubrimiento de Cromoduro se desgasta totalmente

Para realizar una comparación entre los recubrimientos estudiados se debe hacer un análisis para tiempos cortos de ensayo ya que como se observa en la Figura 3.14 a medida que aumenta el tiempo de ensayo el recubrimiento de Cromoduro empieza a comportarse como el acero base por causa del desgaste. Las pendientes en esta Figura representan la velocidad de desgaste de los depósitos evaluados teniendo como referencia el acero base.

En términos generales el recubrimiento de WC-10%Co+4%Cr presenta un mejor desempeño en cuanto la resistencia abrasiva a medida que aumenta el tiempo del ensayo ya que existe un desprendimiento de material poco significativo en comparación del recubrimiento de Cromoduro.

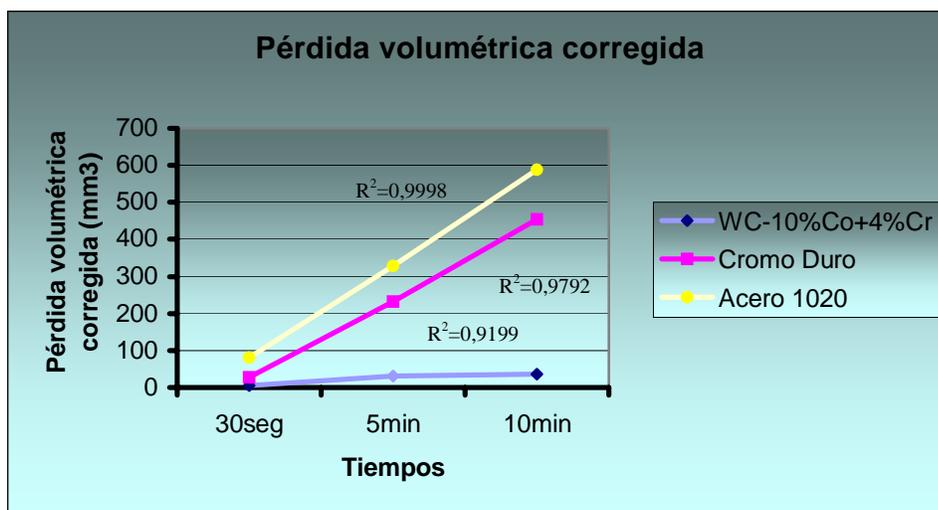


Figura 3.14. Pérdida Volumétrica Corregida.

Con el propósito de determinar cuales fueron los posibles mecanismos de desgaste se realizó un estudio de la morfología de la huella dejada por este ensayo en cada recubrimiento a través de una microscopía en el microscopio electrónico de barrido (MEB).

Para visualizar el desgaste producido en el ensayo de abrasión mediante (MEB), se tomaron las muestras más desfavorables o las muestras que presentaron mayor pérdida de material.

En las Figuras 3.15a y 3.15b (la cual es una magnificación de la micrografía presentada en la Figura 3.15a) se puede apreciar la huella de desgaste generada por el ensayo abrasivo sobre el recubrimiento de WC-10%Co+4%Cr, en la cual se observa huecos dejados por el desprendimiento de material (ver círculos rojos) así como también las huellas de desgaste en dirección al sentido de giro del disco del equipo de ensayo (ver flechas), lo cual posiblemente sea ocasionado por las partículas de abrasivo y partículas desprendidas que son arrastradas sobre la superficie por un mecanismo de micro maquinado o arado permitiendo que las fases cementantes de Co y Cr, que componen el recubrimiento de WC-10%Co+4%Cr, sufran un endurecimiento por deformación lo cual ocasiona su fractura y desprendimiento de material.

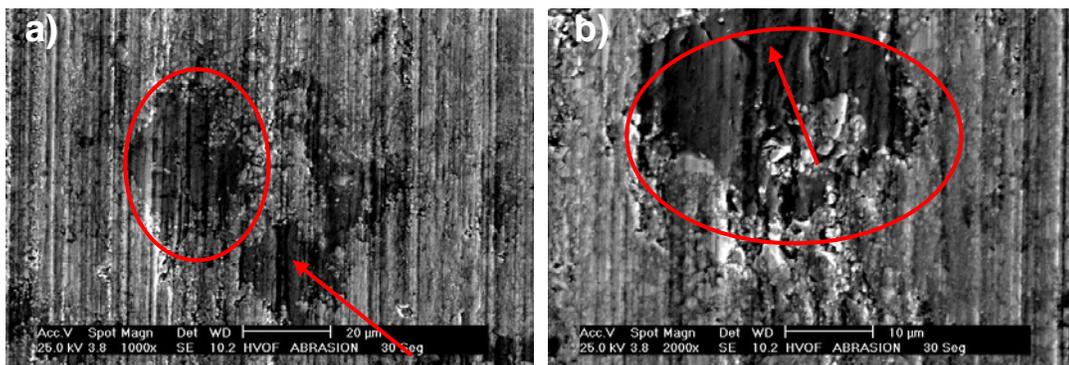


Figura 3.15. Muestras recubiertas con WC-10%Co+4%Cr luego del ensayo de abrasión, a)1000x, b)2000x.

La Figura 3.16a corresponde al recubrimiento de Cromoduro sin ensayar, apreciamos las huellas del rectificado previo y las grietas características del recubrimiento (ver flechas). En las Figuras 3.16b y 3.16c se observa la microscopía en modo de electrones primarios (BSE) y electrones secundarios (SE) respectivamente. En ella se puede observar una interfase difusa entre el recubrimiento sin ensayar y la zona ensayada en la cual se aprecia que las marcas del mecanizado han desaparecido y se pueden observar incrustaciones (ver circulo rojo) las cuales al realizarse un análisis químico puntual (EDS) resultaron ser partículas de sílice (ver Figura 3.17) provenientes del material erodante. En la Figura 3.16d se observan el severo daño ocasionado a la superficie a causa del proceso abrasivo, posiblemente causado por un mecanismo de arado el cual produce un endurecimiento por deformación y finalmente la fractura y desprendimiento de las capas de cromo del recubrimiento.

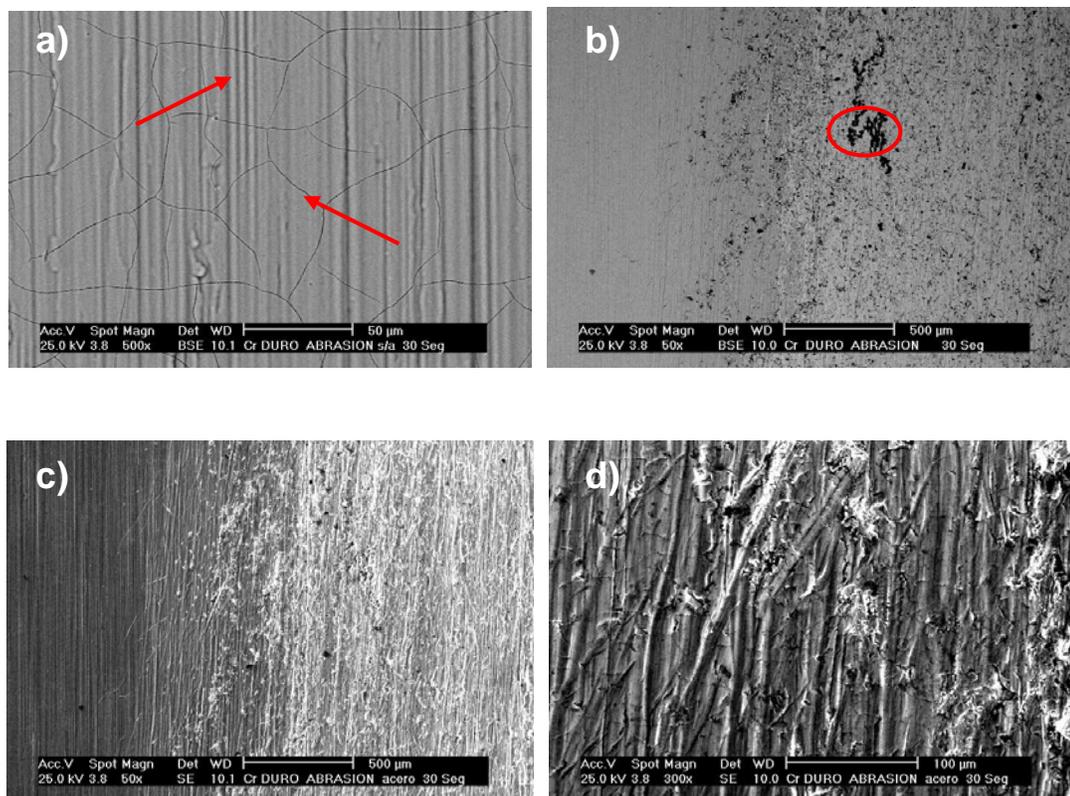


Figura 3.16. Muestras recubiertas con Cromoduro a) 500x (BSE) antes de ensayar, b) 50x (SE) luego del ensayo de abrasión, c) 50x (SE) luego del ensayo de abrasión, d) 300x (SE) luego del ensayo de abrasión.

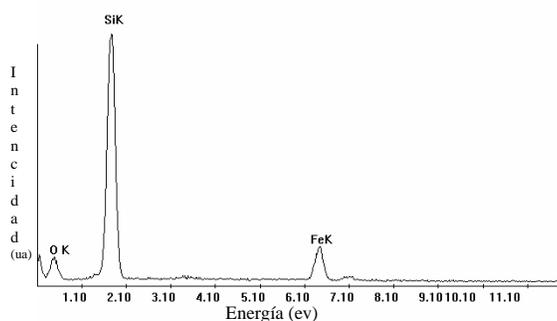


Figura 3.17 análisis químico puntual (EDS) de la Fase oscura.

3.7 Análisis del Desgaste por Deslizamiento

En la Figura 3.18. podemos apreciar el comportamiento de los recubrimientos a la fricción para una distancia de 1 Km, el mayor coeficiente de fricción lo presentó la muestra recubierta con WC-10%Co+4%Cr, mientras que la muestra recubierta con Cromoduro presentó un coeficiente de fricción menor, lo que puede atribuirse a la homogeneidad de los recubrimientos de cromo y a su menor rugosidad superficial la cual se puede apreciar en la Tabla 3.2.

También se puede observar un aumento del coeficiente de fricción al comienzo de todos los ensayos, este efecto se conoce como “running in” el cual se caracteriza por cambios significativos del coeficiente de fricción debido a que la superficie del pin al hacer contacto con los picos que se encuentran en la superficie de la muestra los deforma produciendo un aumento del área de contacto entre la bola y el disco. Finalmente, el coeficiente de fricción va acercándose a un valor aproximadamente constante durante el transcurso del ensayo y hasta su final.

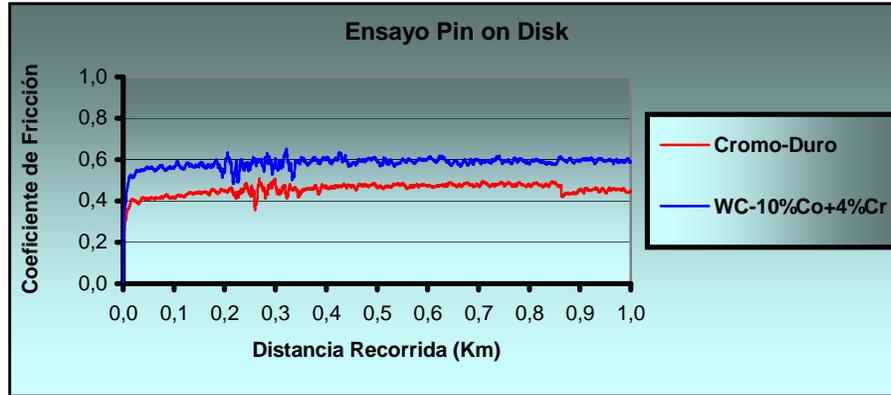


Figura 3.18. Ensayo de Pin on Disk

En la Figura 3.19, observamos las pérdidas de volumen de los pines utilizados para los ensayos de desgaste por deslizamiento (Pin on Disk), en la cual se observa que el mejor comportamiento al desgaste por deslizamiento es el presentado por el recubrimiento de WC-10%Co+4%Cr puesto que el pin utilizado para estos recubrimientos presentó mayor pérdida de volumen en comparación con el pin utilizado para el recubrimiento de Cromoduro. Porcentualmente el pin usado en el recubrimiento de WC-10%Co+4%Cr pierde un 38% más volumen que pin utilizado en el recubrimiento de Cromoduro. Estos resultados son comparables con los obtenidos P.L.Ko y colaboradores [12], quienes realizaron estudios de resistencia al desgaste por deslizamiento de recubrimientos de WC-10%Co+4%Cr y Cromoduro, observando una mayor pérdida volumétrica del pin utilizado en el ensayo sobre el recubrimiento de WC-10%Co+4%Cr que el utilizado sobre la muestra recubierta con Cromoduro.

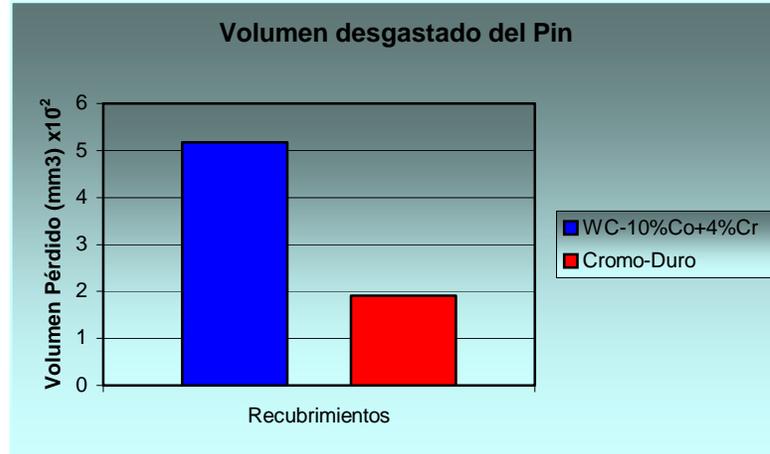


Figura 3.19. Volumen desgastado del Pin.

De las Figuras 3.18 y 3.19 es posible verificar que el coeficiente de fricción está relacionado con el volumen desgastado del pin. Es decir, a mayor coeficiente de fricción mayor es el volumen desgastado.

La figura 3.20a corresponde a una micrografía realizada en modo de electrones secundarios del pin utilizado en el ensayo de desgaste del recubrimiento de Cromoduro, en ella se observa que la huella de desgaste del pin no se generó de forma circular, sino que se observó una raspadura y rayado en la zona de contacto con la muestra durante el ensayo de desgaste. Ello permite inferir que el mecanismo de desgaste en el pin fue principalmente del tipo abrasivo. Además, un análisis químico puntual (EDS), (ver Figura 3.20b) reveló trazas de cromo sobre la superficie del pin, lo que evidencia un mecanismo de desgaste del tipo adhesivo, debido a la presión ejercida por el pin sobre el disco lo cual genera un esfuerzo que tiende a ocasionar la nucleación y propagación de grietas generando un intercambio de material entre ambas superficies. Estos mecanismos de desgaste obtenidos sobre los pines también fueron registrados en los estudios realizados por P.L.Ko y colaboradores [12], sobre muestras similares.

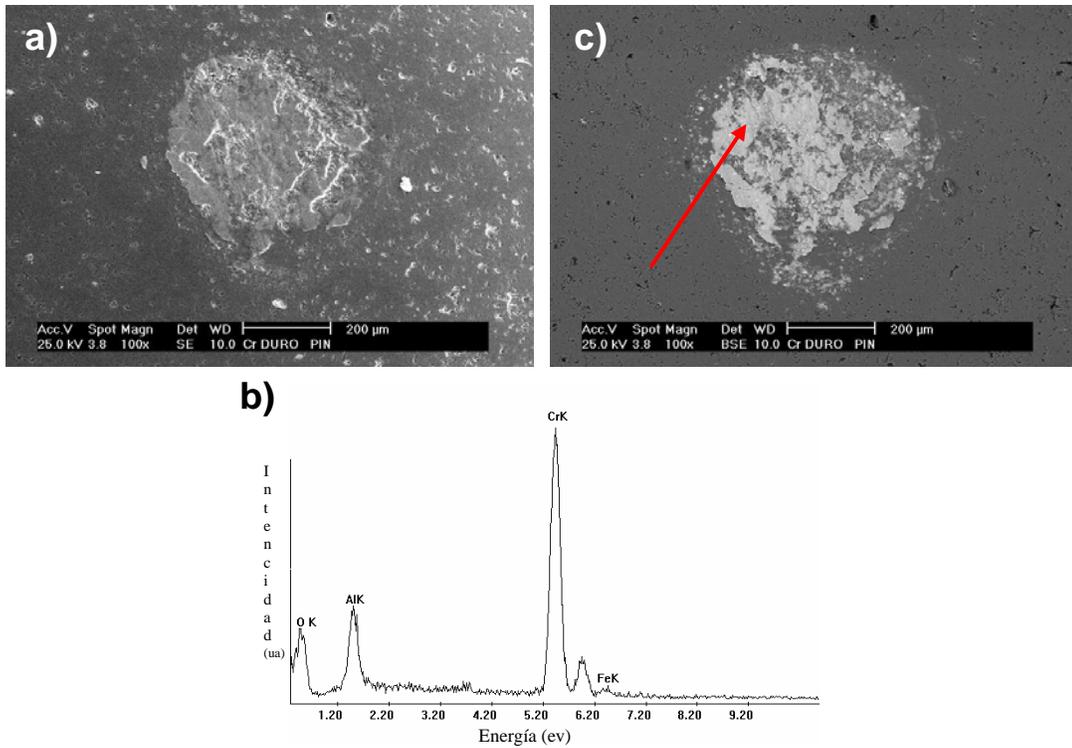


Figura 3.20 Micrografía del pin utilizado sobre la muestra de Cromoduro a) 100X (SE), b) Análisis químico puntual EDS del pin zona clara., c) 100X(BSE)

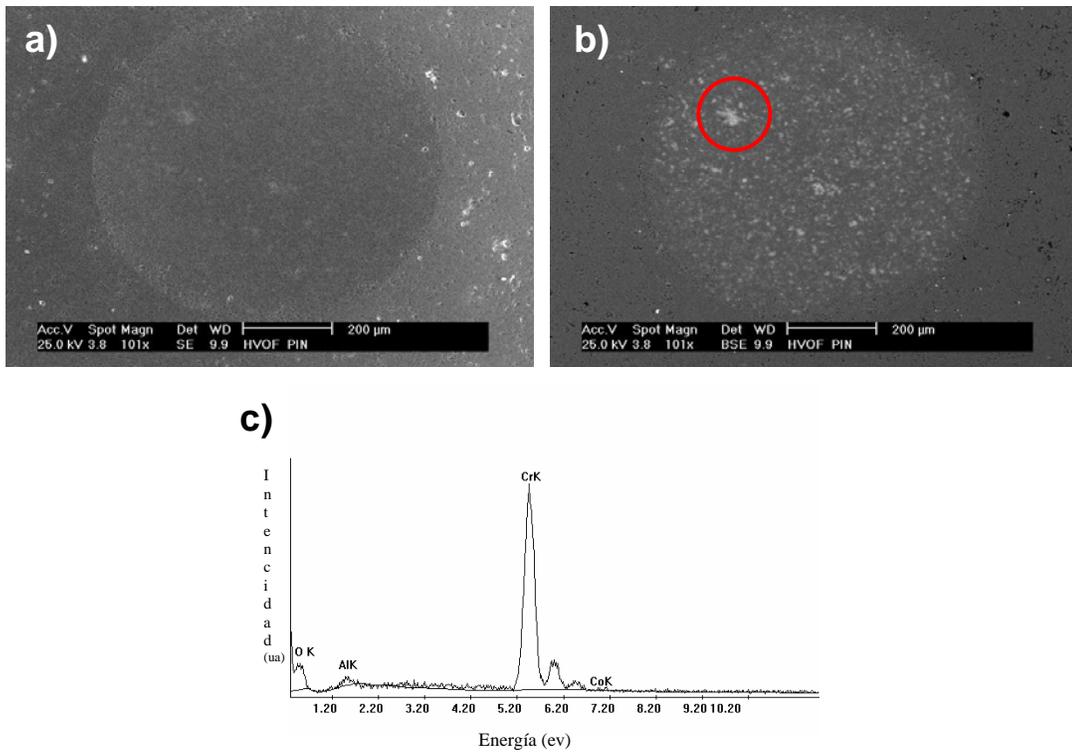


Figura 3.21 Micrografía del pin utilizado sobre la muestra de WC-10%Co+4%Cr. a) 100X (SE), b) Análisis químico puntual EDS del pin zona clara, c) . 100X(BSE)

En la Figura 3.21a se observa el pin utilizado sobre el disco recubierto con WC-10%Co+4%Cr, en ella apreciamos la huella de desgaste generada por el pin, la cual presenta una forma circular. En la Figura 3.21b podemos observar algunas fases claras en la zona desgastada (ver círculo rojo), las cuales al ser analizadas mediante la técnica (EDS) (ver Figura 3.21c), resultó contener cromo y cobalto. Esto obedece que el cromo y el cobalto representan la fase cementante del recubrimiento de WC-10%Co+4%Cr, siendo la más susceptible al desgaste adhesivo.

A través de las Figuras 3.20 y 3.21 se pudo determinar el diámetro aproximado del pin desgastado, el cual permitió la obtención de los valores de los coeficientes de desgaste de los pines contenidos en la Tabla 3.8. En ella es posible verificar que la coeficiente de desgaste es mayor para la muestra de WC-10%Co+4%Cr lo que se corresponde con un mayor volumen desgastado del pin.

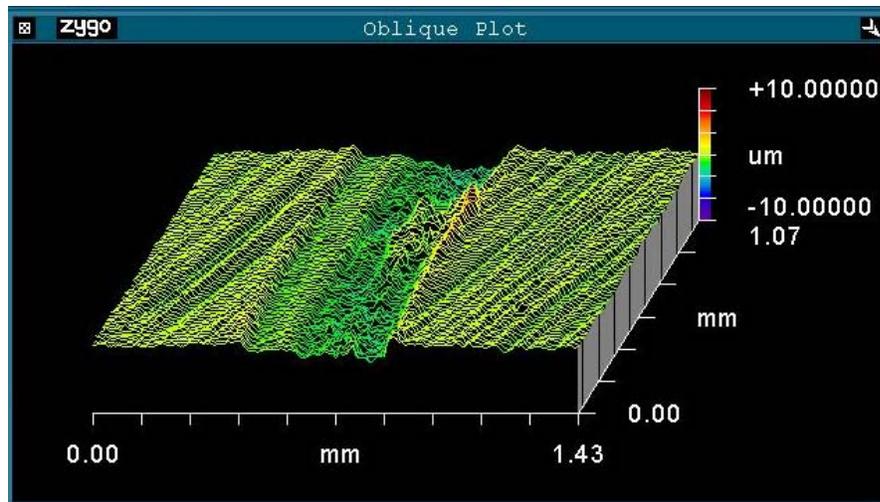
Tabla 3.8. Coeficientes de desgaste de los pines.

Tipo de muestra	Coefficiente de Desgaste K(mm³/N*m)
WC-10%Co+4%Cr	1.03E-5
Cromoduro	3.81E-06

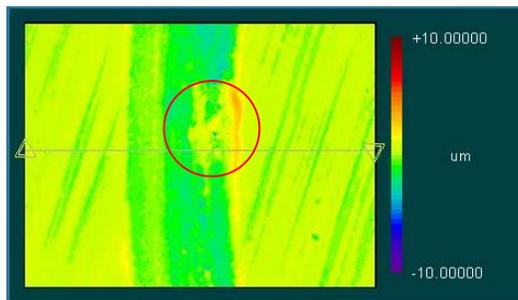
En la Figura 3.22a se observa un perfil en 3 dimensiones de la muestra recubierta con Cromoduro, se puede apreciar la huella generada por el pin sobre el recubrimiento la cual no posee una forma geométrica regular. En la Figura 3.22b se observa en 2 dimensiones la huella y lo que pareciera ser material adherido (ver círculo rojo). En la Figura 3.22c. se observa una imagen en la cual se evidencia la huella dejada por el pin sobre el recubrimiento, en ella se aprecian áreas de color oscuro, las cuales corresponden a los diferentes mecanismos de desgaste sobre las muestras, que serán analizados en el estudio de (MEB). Finalmente en la Figura 3.22d se aprecia el perfil superficial de la huella, sobre el cual es posible medir el diámetro de la huella generado por el pin. El volumen desgastado se puede apreciar en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9. Volumen desgastado del disco

Material	Volumen desgastado del disco (mm³)
Cromoduro	3.90E-03



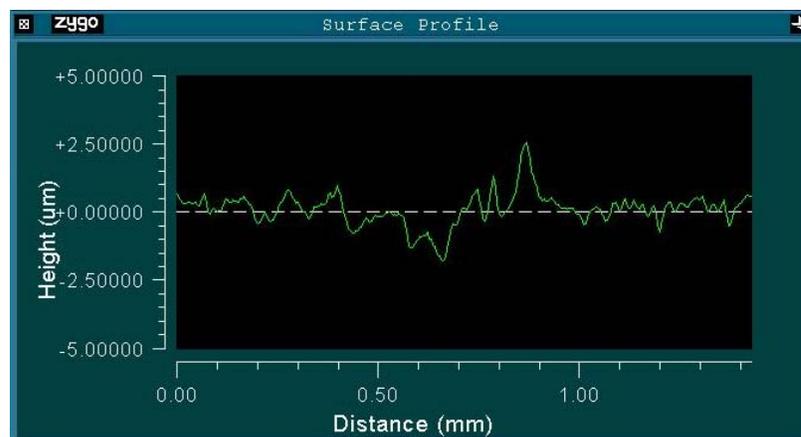
a)



b)

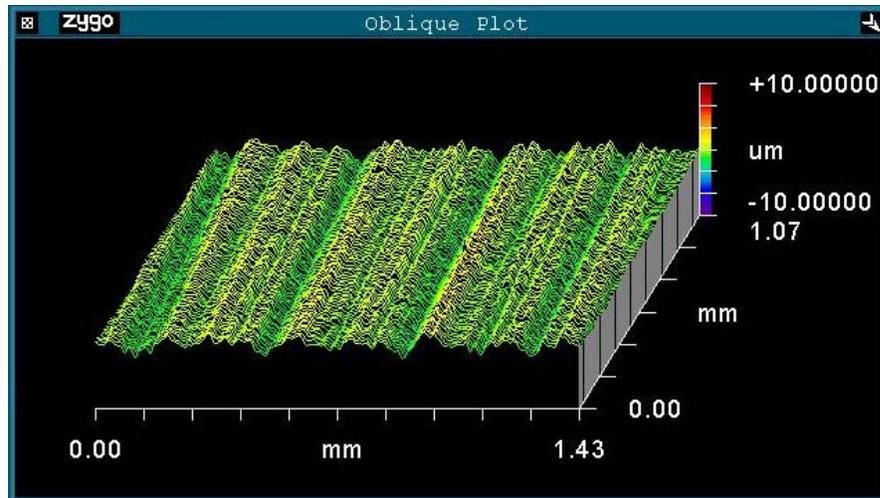


c)

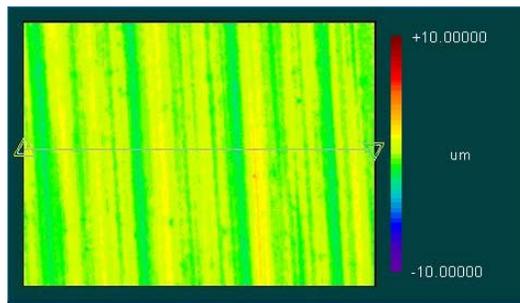


d)

Figura 3.22. Huella de desgaste de la muestra de Cromoduro. a) topografía de la huella de pin on disk, b) superficie de la huella, c) fotografía de la huella de pin on disk, d) perfil de la sección transversal de la huella de pin on disk.



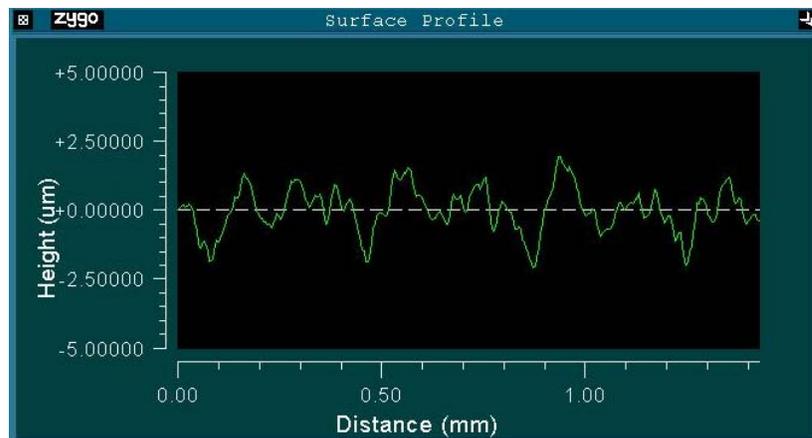
a)



b)



c)



d)

Figura 3.23. Huella de desgaste de la muestra de WC-10%Co+4%Cr. a) topografía de la huella de pin on disk, b) superficie de la huella, c) fotografía de la huella de pin on disk, d) perfil de la sección transversal de la huella de pin on disk.

La Figura 3.23a. se observa la perfilometría de la muestras recubiertas con WC-10%Co+4%Cr, donde es claro que el pin no pudo eliminar las líneas de rectificado. En la Figura 3.23b. se observan que las huellas del rectificado permanecen inalterables lo que indica que no hay evidencias de desgaste del recubrimiento. Luego en la figura 3.23c tenemos una fotografía en la que tampoco se evidencia una huella definida de desgaste. Finalmente en la Figura 3.23d se puede apreciar el perfil superficial en el cual no es posible medir el diámetro de la huella. Impidiendo el cálculo del volumen desgastado de la muestra.

Para el estudio de la morfología de las huellas de los recubrimientos se realizó un estudio de microscopía electrónica de barrido para así poder determinar posibles mecanismos de desgaste como consecuencia de este ensayo.

En la Figura 3.24a podemos apreciar la huella generada por el pin para una magnificación de 100x sobre el recubrimiento de Cromoduro en la modalidad de electrones secundarios (SE), en ella se observa que el pin logra eliminar totalmente las huellas previas del rectificado con evidencias claras de una fuerte abrasión. En la Figura 3.24b se aprecia la huella a una magnificación de 100x en modalidad de electrones primarios (BSE) en la cual se evidencias dos áreas una clara y una oscura. En la Figura 3.24c a una magnificación de 500X en la modalidad de electrones primarios observamos algunas grietas producto de la fatiga (ver círculo rojo) las cuales pueden ser producidas por el efecto cizallante que el pin ejerce sobre el disco, debido a la presión ejercida por el pin sobre el disco en condiciones de deslizamiento. Este mecanismo corresponde al usualmente denominado desgaste adhesivo.

Un análisis químico puntual realizado en la zona oscura (ver flecha roja) se presenta en la Figura 3.24d evidenciando la presencia de cromo en un porcentaje atómico del 39.18% y oxígeno en un 52.02% posiblemente como producto de la oxidación de la muestra debido al calentamiento producido durante el ensayo.

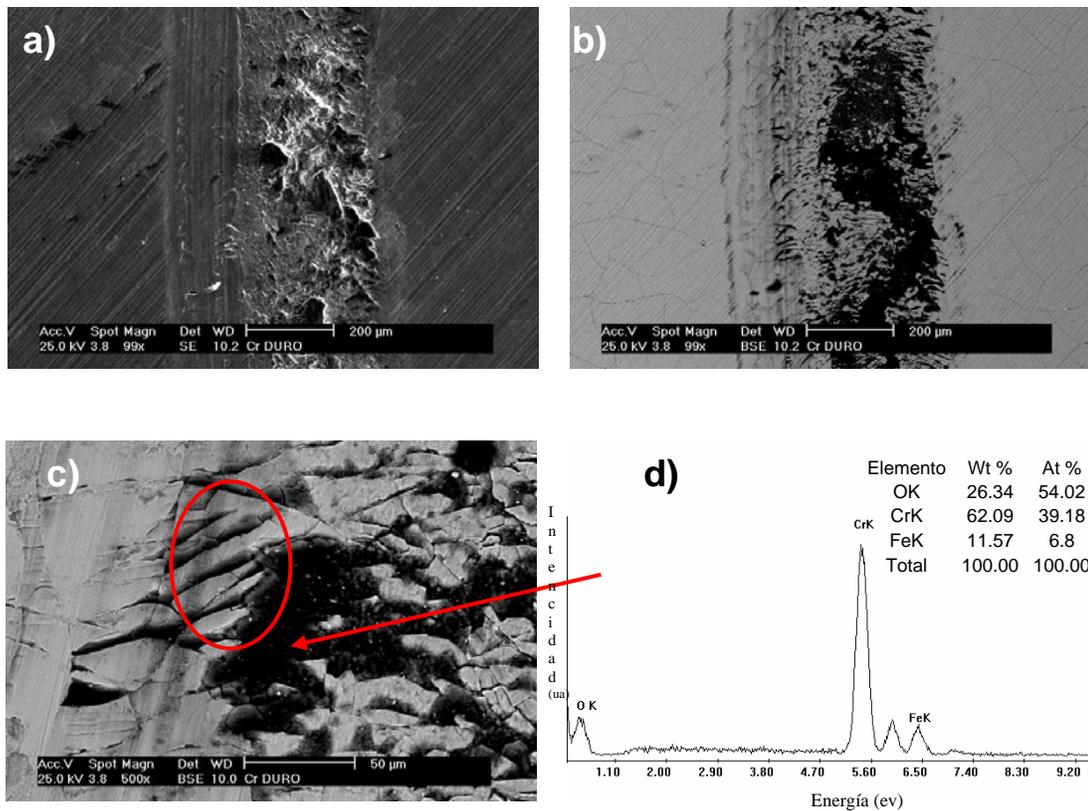


Figura 3.24. Huella producida por el pin sobre el recubrimiento de Cromoduro. a) 100X (SE), b) 100X (BSE), c) 500X (BSE), d) análisis químico puntual (EDS) realizado en la fase oscura.

En la Figura 3.25a se observa la huella dejada por el pin para una magnificación de 100x sobre el recubrimiento de WC-10%Co+4%Cr en la modalidad de electrones secundarios (SE), en la cual es evidente que el pin no logró eliminar las huellas de rectificado. La Figura 3.25b corresponde a la misma huella a una magnificación de 500x, en la cual se aprecia desgaste adhesivo (ver flechas rojas), posiblemente formado por la acumulación del material del pin sobre la muestra. La Figura 3.25c a una magnificación de 500X en la modalidad de electrones primarios observamos una zona oscura (ver flecha roja) a la cual se le realizó un análisis químico puntual (Figura 3.25d) que evidencia la presencia de aluminio y oxígeno depositado en el borde de la huella de rectificado, lo cual puede atribuirse a la presencia del material desgastado del pin sobre la muestra.

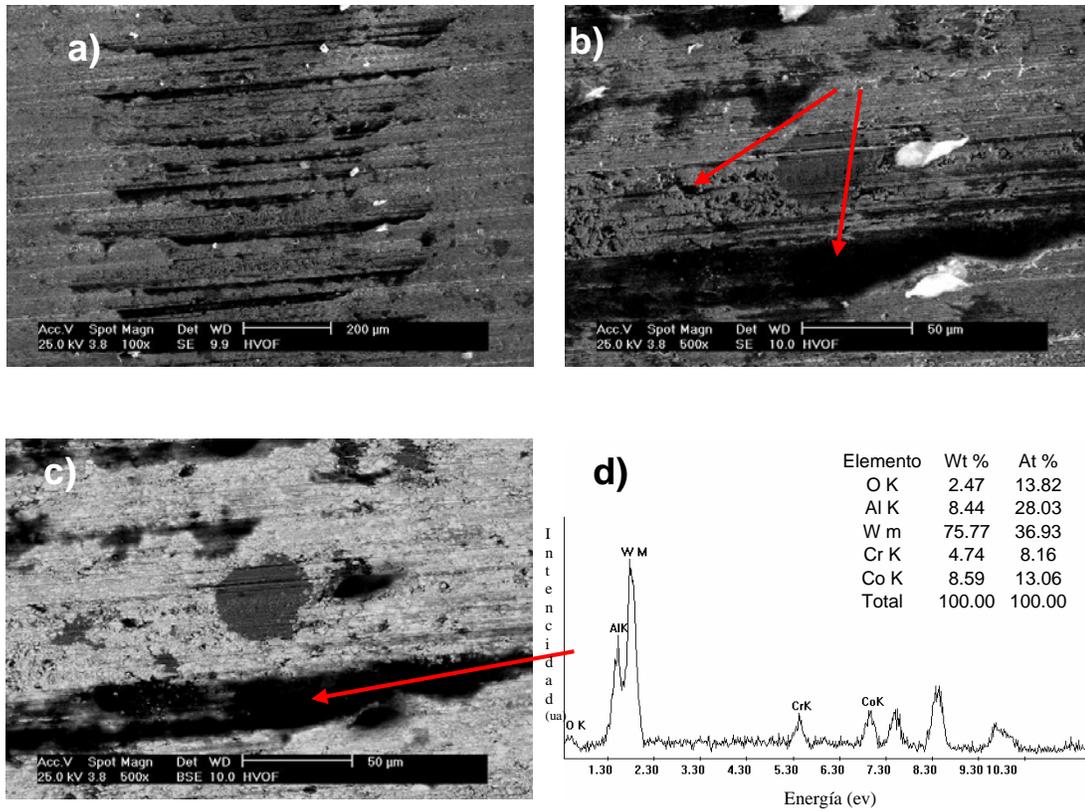


Figura 3.25. Huella producida por el pin sobre el recubrimiento de WC-10%Co+4%Cr e. a) 100X (SE), b) 500X (SE), c) 500X (BSE), d) análisis químico puntual (EDS).

CAPITULO IV

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

Se determinó la dureza de los recubrimientos, resultando la aleación de (WC-10%Co)+4%Cr un 43% mayor en comparación al Cromoduro.

A partir del ensayo de erosión se pudo determinar que los materiales dúctiles como el acero AISI 1020 presentan un mayor desgaste erosivo a medida que disminuye el ángulo de choque de las partículas erosionantes, de manera contraria los materiales frágiles, en este caso los recubrimientos en estudio, sufren un mayor desgaste por erosión a medida que se incrementa el ángulo de ataque de las partículas erosionantes.

A pesar de que el recubrimiento Cromoduro presentó una menor dureza obtuvo un mejor comportamiento al desgaste erosivo que el recubrimiento de (WC-10%Co)+4%Cr, esto puede ser atribuido a una mayor heterogeneidad presentada por el recubrimiento depositado por HVOF.

A través del análisis por Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) sobre las superficies sometidas al ensayo de erosión, el deterioro erosivo observado en la superficie del recubrimiento de (WC-10%Co)+4%Cr evidenció básicamente un mecanismo de deformación plástica y endurecimiento por deformación de la fase cementante (Co y Cr) dejando expuestas a las partículas de WC, facilitando su desprendimiento.

Se determinó que el recubrimiento que presentó mejor resistencia a la abrasión fue el (WC-10%Co)+4%Cr en comparación con el recubrimiento de Cromoduro y el acero AISI 1020.

Se pudo determinar que para un ensayo de 30 seg. la resistencia a la abrasión del recubrimiento de Cromoduro resultó ser 4.9 veces menor que la del recubrimiento de (WC-10%Co)+4%Cr. Incrementándose este valor para mayores tiempos de exposición.

A través de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) se determinó que el desgaste abrasivo producido por las partículas de sílice (material erodante), se traduce morfológicamente en una superficie desgastada definida por la presencia de surcos o canales en forma de arado plástico, incorporado a esto un mecanismo de arrastre de las partículas sobre la superficie del material. En el caso del recubrimiento de (WC-10%Co)+4%Cr también se observó la fractura y desprendimiento de las partículas de WC.

En el ensayo de desgaste por deslizamiento se determinó que el desgaste de los pines resultó ser 2.67 veces mayor para las muestras con el recubrimiento de WC-10%Co+4%Cr en comparación con las muestras recubiertas con Cromoduro. Esto evidenció un mayor desgaste para el pin en el ensayo aplicado al recubrimiento de WC-10%Co+4%Cr, lo cual indica que este recubrimiento tiene una mejor resistencia al desgaste por deslizamiento comparado con el Cromoduro.

4.2 RECOMENDACIONES

Es necesario el reacondicionamiento del Banco de Ensayos para el desgaste erosivo, debido a que el mismo presenta un deterioro considerable de sus componentes.

Realizar un mejor control de los parámetros para efectuar de rociado térmico por HVOF, y así garantizar un espesor de buena calidad del recubrimiento depositado.

Realizar un mantenimiento de la fresa de control numérico y de esta manera facilitar los procesos de rectificadas previos a los ensayos de desgaste.

Seguir un procedimiento de limpieza y manipulación de las probetas para evitar imprecisión en las mediciones de peso antes y después de cada ensayo.

Es conveniente realizar una microscopia electrónica de barrido de las superficies antes ser ensayada para satisfacer que los recubrimientos cumplan con todas las características deseadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] Kenneth R. Newby. “Industrial (Hard) Chromium Plating”. ASM Handbook. 1997. Vol 9 Surface Engineering.

[2] A. R Jones. “Microcracks in hard chromium electrodeposits”. Plating and Surface Finishing. April 1989.

[3] B. Meyers and S. Lynn. “Chromium Elimination”. ASM Handbook. 1997. Vol 9 Surface Engineering.

[4] A. R Jones. “Corrosion of electroplated Hard Chromium”. ASM Handbook. 1997. Vol 9 Surface Engineering.

[5] Bilbao S., Carolina y Moreno A., Ivan J.; (2002) “Evaluación de la resistencia al desgaste de recubrimientos tipo cermet depositados por HVOF con tratamiento térmico posterior”. Trabajo especial de grado, Facultad de Ingeniería, Escuela de Mecánica.

[6] Bangueses, Ana M. y Rodríguez, José; (2000). “Influencia del tratamiento térmico sobre la resistencia a la erosión de un recubrimiento de aleación autofundente obtenidos por rociado térmico high velocity oxy-fuel”. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.

[7] Díaz N., Siul J. y Franco S., Adolfo A.;(2002). “Análisis comparativo de la resistencia al desgaste de piezas sinterizadas y piezas recubiertas por rociado térmico HVOF. Trabajo especial de grado. Caracas: Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.

[8] Galárraga G., Michael X. y González F., Fernando.; (2002) “Evaluación de la resistencia al desgaste abrasivo y erosivo sobre recubrimientos tipo cermet depositados por HVOF”. Trabajo especial de grado, Facultad de Ingeniería, Escuela de Mecánica.

[9] Deborah C. Bolles. “HVOF thermal spraying an alternative to hard chrome plating”. Welding Journal. 1995. Vol 74. Pág 31-34.

[10] Malaver V., Iginio R. y Barbera S., Luis J.; (1995). “Evaluación de la resistencia al desgaste por erosión de recubrimientos termo-rociados”. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.

[11] Marcelino P. Nascimento, et.al; (2001). “ Effects of tungsten carbide thermal spray coating by HP/HVOF and hard chromium electroplating on AISI 4340 high strength steel”. Surface & Coating Technology. Volumen 138. Pag. 113-124.

[12] P. L. Ko; M. F. Robertson; (2002) “Wear characteristics of electrolytic hard chrome and thermal sprayed WC-10Co-4Cr coatings sliding against Al-Ni-bronze in air at 21 °C and at -40 °C”. Wear. Vol 252. Pag 880-893.

[13] J. K. N. Murthy, et, al; (2001) “Effects of grinding on the erosion behaviour of a WC-Co-Cr coatings deposited by HVOF and detonation gun spray processes”. Wear. Vol 249. Pág 592-600.

[14] Bruce D. Sartwell. “HVOF thermal spraying as an alternative to hard chrome plating”. Welding Journal. 2000. Vol 79. Pág 39-43.

[15] Ferrara, Salvador y Pérez, Rafael. (2001). “Evaluación de la resistencia al desgaste de un recubrimiento depositado por rociado térmico (HVOF)”. Trabajo especial de grado, Facultad de Ingeniería, Escuela de Mecánica.

[16] Hutchings, I. M. “Mechanical and Metallurgical Aspects of the Erosion of Metals”. Cambridge, s.p.i.

[17] ASTM G 65 – 00. Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus.

[18] ASTM G76-95. Standard Test Method for Conducting Erosion Tests By Solid Particle Impingement Using Gas Jets.

[19] ASTM Designation: G99-95A. Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus.

[20] ASTM E 384 – 99. Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials.

[21] Bavaresco R., Luis A. y Klisans F., Jorge A.; (2000). “Estudio de la resistencia al desgaste de recubrimientos rociados mediante la técnica alta velocidad oxígeno combustible (HVOF)”. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.

[22] Pinto M., Nicola y Rangel C., Aldrin.; (1999). “Diseño, construcción y puesta a punto de una máquina para ensayo de abrasión según la norma ASTM G-65”. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.

[23] García Euro V. y Redden, Emmett E.; (1998). “La influencia del método de deposición sobre la resistencia a la erosión de acero 1020 termorociado con una aleación base níquel por la técnica H.V.O.F.” Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.

[24] Kosel, Thomas; (1992). “ Solid Particle Erosion”. ASM Handbook Friction, Lubrication and wear Technology. Vol 18. USA.

[25] Lathabai S.; M. Otmuller; I. Fernández; (1998) “Solid Particle erosion behaviour of thermal sprayed ceramic, metallic and polymer coatings”. Wear. Vol 221. Pag 93-108.

[26] D. Toma, W. Brandl, G. Marginean; (2001). “ Wear and corrosion behaviour of thermally sprayed cermet coatings”. Surface & Coating Technology. Volumen 138. Pag. 149-158.

CAPITULO V

Anexo 1:
**Procedimiento de los ensayos de abrasión y
erosión**

Procedimiento para la realización de los ensayos de abrasión.

Luego de verificar las condiciones de la arena se procedió a la realización del ensayo como se explica a continuación:

- Se verificó que las revoluciones de la rueda fueran de 200 rpm, por medio de un contador de revoluciones.
- Se midió el flujo de arena calculando el tiempo que tardaba en vaciarse 500 gr de arena, y se verificó que dicho flujo fuese el establecido en la norma.
- Se aplicó la carga necesaria en el brazo de la palanca, según el tipo de ensayo a realizar.
- Se hizo la medición del peso a cada muestra mediante el empleo de una balanza analítica de precisión (0.0001) marca Scientech SA310, véase Figura 5.1.



Figura 5.1 Balanza Analítica

- Se colocó la probeta en el porta probeta sin dejar que esta hiciera contacto con el disco de goma.
- Se encendió la máquina.
- Se abrió el flujo de arena.

- Posteriormente se bajo la palanca para permitir que la probeta estuviese en contacto con el disco de goma.
- Se procedió a medir el tiempo para cada uno de los ensayos.
- Al finalizar el tiempo del ensayo se detuvo el motor y se cerró el paso de arena.
- Se toma nota del diámetro del disco.

Procedimiento para la realización de los ensayos de erosión

Luego de tener la granulometría necesaria del material erodante (alúmina) para realizar el ensayo, se procedió de la siguiente manera:

- Se realizó el montaje del sistema de inyección de aire comprimido poniendo en operación al compresor.
- Se midió con un manómetro la presión de aire comprimido para corroborar que esta fuera la exigida por la norma.
- Se colocó la alúmina en la tolva.
- Se hizo la medición del peso a cada muestra mediante el empleo de una balanza analítica de precisión (0.0001) marca Scientech SA310, véase Figura 5.1.
- Se colocaron las probetas en el porta probetas ajustando el ángulo de impacto de la alúmina requerido y se verificó que la distancia entre la boquilla de la pistola y la probeta fuera de 9 cm.
- Se abrió el flujo de aire, hasta alcanzar la presión de trabajo de 0.68 Mpa.
- Se cerro la maquina y se procedió a medir el tiempo de proyección de las partículas erodantes sobre las probetas.

Anexo 2:

Durezas de las Muestras

Tabla 5.1 Resultado de microdureza para el Cromoduro a una carga de 300gf

# 4	X Position	Y Position	Distance	Hardness	Height	Width	Status
1	0	0	0	527,8	14,607	12,703	Ok
2	200	0	200	538,7	14,607	12,432	Ok
3	400	0	400	629,6	12,64	12,432	Ok
4	600	0	600	631,8	11,517	13,514	Ok
5	800	0	800	552,3	13,202	13,514	Ok
6	0	200	200	603,5	12,079	13,514	Ok

Tabla 5.2 Resultado de microdureza para el WC-10%Co+4%Cr a una carga de 300gf

# 13	X Position	Y Position	Distance	Hardness	Height	Width	Status
1	0	0	0	1083,9	20,506	22,162	Ok
2	200	0	200	1019,7	21,91	22,162	Ok
3	400	0	400	929,4	23,315	22,973	Ok
4	0	200	200	929,4	23,315	22,973	Ok
5	200	200	282,84	929,4	23,315	22,973	Ok
6	400	200	447,21	929,4	23,315	22,973	Ok

Anexo 3:
**Valores de pérdida de peso en gramos para los
ensayos de erosión y abrasión**

Tabla 5.3 Pérdida de peso (gr) en erosión del WC-10%Co+4%Cr

Muestra	Ángulos de ataque			
	30°	45°	60°	90°
	Pérdida de masa (gr)			
1	0,006	0,0062	0,007	0,0087
2	0,0041	0,0069	0,009	0,0077
3	0,0034	0,0046	0,0099	0,0129
4	0,0055	0,0046	0,0073	0,0085
5	0,0056	0,0042	0,0091	0,011

Tabla 5.4 Pérdida de peso (gr) en erosión del Cromoduro

Muestra	Ángulos de ataque			
	30°	45°	60°	90°
	Pérdida de masa (gr)			
1	0,0024	0,0033	0,0021	0,0039
2	0,0022	0,0036	0,0045	0,005
3	0,0016	0,0045	0,0042	0,0041
4	0,0025	0,0031	0,0016	0,0044
5	0,0036	0,0036	0,0033	0,0038

Tabla 5.5. Factor de Erosión Normalizado (FEN) de los recubrimientos.

Material	Factor de Erosion Normalizado			
	30°	45°	60°	90°
	FEN	FEN	FEN	FEN
WC-10%Co+4%Cr	0,5896	0,7392	1,5149	3,1776
Cromoduro	0,4632	0,7934	0,8835	2,1692

Tabla 5.6. Pérdida de peso (gr) en abrasión del WC-10%Co+4%Cr

Muestra	Tiempos		
	30 seg	5 min	10 min
	Pérdida de masa (gr)		
1	0,0965	0,2615	0,4688
2	0,0615	0,3446	0,3044
3	0,0628	0,3211	0,375
4	0,0129	0,256	0,4189
5	0,0584	0,462	0,3921

Tabla 5.7. Pérdida de peso (gr) en abrasión del Cromoduro

Muestra	Tiempos		
	30 seg	5 min	10 min
	Pérdida de masa (gr)		
1	0,2277	1,5758	2,9848
2	0,1734	1,5803	3,0057
3	0,1812	1,6092	3,107
4	0,1438	1,6047	3,2381
5	0,1814	1,617	3,1989