

TRABAJO ESPECIAL

**INFLUENCIA DEL TRATAMIENTO TERMICO SOBRE LA
RESISTENCIA A LA EROSION DE UN RECUBRIMIENTO DE
ALEACION AUTOFUNDENTE OBTENIDOS POR ROCIADO TERMICO
HIGH VELOCITY OXI-FUEL.**

PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE
UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA

POR LOS BRS:

BANGUESES, ANA MARIA.

RODRIGUEZ, JOSE.

PARA OPTAR POR EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO.

DEDICATORIA

A mis padres, que siempre han estado allí cuando los necesitabas,
A mí adorado hermano, "KIKE", que me ha guiado en toda mi carrera;
A la tieta, quien siempre ha estado a mi lado;
A la gorda más linda de la casa, Ana Valentina;
A la tía, por preocuparse que no estudiara demasiado,
Al tío, por hacerme más corto los días de espera en " coordenadas", y
A mi futuro esposo, quien desde un principio siempre me comprendió;
A todos Ustedes les doy las Gracias y espero seguir contando siempre
con su cariño y nunca defraudarlos.

Ana María Bangueses

A mis padres: Antonio y Josefa, quienes con su aprecio, apoyo y
educación, me ayudaron a ser mejor persona.
A mi hermano: Emilio y su esposa Marisol, porque fueron en todo
momento de gran ayuda para mí.
A mi ahijada Endrey, que fue de gran inspiración.
A mi novia: Marielisa, por lograr que yo llegara a donde estoy.

José Rodríguez

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestros agradecimientos:

A nuestra Tutora: **Prof. María de los Ángeles de Prato,**

A la empresa Plasmatec Ingenieros S.A., y al Ing. Andrea Scagni,
por brindarnos ayuda en la realización de los recubrimientos,

A las Escuelas de Mecánica Y de Metalurgia de la Facultad de
Ingeniería por su incondicional ayuda, y en especial al Prof. Edwin
Carrasquero y a Carlos Sánchez, de la escuela de Metalurgia,

Al Laboratorio de Microscopía Electrónico del Instituto Universitario
de Tecnología (I.U.T.), en especial al Prof. Freddy Arenas, por su
colaboración en la realización de la microscopía electrónica,

A la empresa Bauxilum, por su gran aporte del material necesario
para los ensayos erosivos,

A la Prof. Mirian Renault, por su colaboración y ayuda,

A nuestros amigos, en especial Marielisa y Oscar, que desde un
principio siempre nos ayudaron.

A la Familia Fernández por la gran ayuda que nos brindaron desde
el inicio de la carrera, hasta la culminación de este trabajo especial.

Bangueses P., Ana María y Rodríguez V., José.

INFLUENCIA DEL TRATAMIENTO TERMICO SOBRE LA RESISTENCIA A LA EROSION DE UN RECUBRIMIENTO DE ALEACION AUTOFUNDENTE OBTENIDOS POR ROCIADO TERMICO HIGH VELOCITY OXY-FUEL.

TUTOR ACADEMICO: PROF. MARÍA DE LOS A. DE PRATO.

TESIS. U.C.V. FACULTAD DE INGENIERIA. ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA, CARACAS, 2000.109 PAGINAS.

Palabras claves: Desgaste, Erosión, Rociado Térmico, Tratamiento Térmico.

El objetivo del presente trabajo ha sido determinar la influencia del tratamiento térmico posterior sobre la resistencia a la erosión de una aleación base níquel autofundente. Un acero AISI 1020 fue utilizado como sustrato. Polvos de aleación NiCrBSiW, conocida comercialmente como Colmonoy 88, fue mezclada con polvos de WC-12%Co en una relación 20-80 respectivamente. La mezcla fue depositada mediante la técnica de rociado térmico HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) utilizando para ello una pistola JP-500. Llama oxipropano fue utilizada para realizar el tratamiento térmico posterior. La superficie de la muestra fue calentada hasta obtener un brillo glaseado.

Las muestras fueron preparadas siguiendo el procedimiento estándar de preparación metalográfica. El recubrimiento fue caracterizado mediante el uso del microscopía óptica y electrónica, así mismo la superficie de desgaste fue observada mediante microscopía electrónica de barrido.

Ensayo de dureza Vickers bajo una carga de 300 gramos, fue utilizada para determinar la microdureza del recubrimiento.

El ensayo de erosión se realizó para tres ángulos de incidencia: 30°, 45° y 60°, bajo la norma ASTM G76-83. Se determinó el coeficiente de fricción mediante el ensayo de Pin on Disk, bajo la norma ASTM G99-95 así mismo se determinó la microdureza, rugosidad, así como también microscopía electrónica de barrido (MEB).

Se determinó que la microdureza superficial no se altera con la aplicación del tratamiento térmico, en cambio la resistencia al desgaste erosivo aumentó con la aplicación del tratamiento térmico para todos los ángulos estudiados menos 60°. La microscopía electrónica de barrido (MEB) evidenció la densificación y distribución homogénea de las fases. Se demostró que el coeficiente de fricción disminuyó con el tratamiento térmico.

INDICE:

	Págs.
PORTADA	I
DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	IV
INTRODUCCIÓN	VI
Capitulo I	
1.FUNDAMENTO TEORICO	18
1.1.Teoría del desgaste	18
1.2.Tipos de desgastes	19
1.2.1 Abrasivo	20
1.2.2 Adhesivo	20
1.2.3 Erosivo	21
1.3.Fenómeno de Erosión	23
1.4.Consecuencias del Impacto de partículas.	26
1.5.Tribología.	27
1.6.Rociado térmico	29
1.6.1 Aplicación del Rociado Térmico	35
1.6.2 Clasificación del Rociado térmico	36
1.6.2.1 Rociado Térmico por Arco Eléctrico	36
1.6.2.2.Rociado Térmico por Plasma	36
1.6.2.3.Rociado Térmico por Llama Oxígeno Combustible (subsónico)	37
1.6.2.4 Rociado Térmico por Llama Oxígeno Combustible (supersónico)	37
1.7.Aleaciones Autofundentes	41
1.8.Tratamiento Térmico	42

	Págs.
Capitulo II	
2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	46
2.1. Materiales	46
2.2. Procesos	47
2.3. Tratamiento térmico	49
2.4. Tipos de ensayo	49
2.4.1 Ensayo de erosión	49
2.4.2 Ensayo de Desgaste (Pin on Disk)	52
2.5. Determinación de la Microdureza y Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)	54
2.5.1. Preparación Metalográfica	54
2.5.2. Microdureza	54
2.5.3. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)	55
2.6. Rugosidad	55
Capitulo III	
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	57
3.1. Resultados de la Microscopía Electrónica de Barrido.	57
3.2. Microdureza	59
3.3. Erosión	60
3.4. Ensayo de desgaste	67
Capitulo IV	
4 CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES	77
4.1. Conclusiones	77
4.2. Recomendaciones	78

	Págs.
Capitulo V	
5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	80
Capitulo VI	
6. ANEXOS	84

INDICE DE TABLAS

	Págs.
Tabla 1. Variación del número de Best con el tipo de daño	22
Tabla 2. Valores de K calculados a partir de tasa de erosión obtenidas experimentalmente	25
Tabla 3. Composición química del Colmonoy 88	47
Tabla 4. Parámetros del rociado térmico	48
Tabla 5. Agrupación de Muestras	49
Tabla 6. Valores promedios de microdureza	60
Tabla 7. Datos de perdidas de peso promedio	61
Tabla 8. Datos de ratas de erosión	62
Tabla 9. Datos del Factor de Erosión Normalizado	63

INDICE DE FIGURAS

	Págs.
Figura 1. Tipos de corte producidos por el impacto de partículas.	27
Figura 2. Pistola HVOF	29
Figura 3. Morfología de un recubrimiento rociado térmicamente.	30
Figura 4. Equipo HVOF	38
Figura 5. Esquema de la pistola HVOF	39
Figura 6. Geometría y dimensiones de las muestras de erosión.	46
Figura 7. Muestras granalladas	47
Figura 8. Rociado térmico	48
Figura 9. Tribómetro.	53
Figura 10. Perfilómetro	53
Figura 11. Identificación de las zonas indentadas	54
Figura 12. Equipo de microscopia electrónica de barrido	55
Figura 13. Microscopía MST	58
Figura 14. Microscopía MCT	58
Figura 15. Microscopía Cermet	59
Figura 16. Valores de pérdida de peso promedio	61
Figura 17. Valores de Rata de Erosión promedio	62
Figura 18. Valores de Factor de Erosión Normalizado	64
Figura 19. Morfología de la muestra sin tratamiento	65
Figura 20. Morfología de la muestra con tratamiento	66
Figura 21. Morfología de la muestra WC-10%Co-4%Cr	67
Figura 22. Coeficiente de fricción	68

Figura 23. Morfología y Perfilometría de la superficie	70
Figura 24. Morfología y Perfilometría de la huella	71
Figura 25. Análisis puntuales en las huellas	73

INDICE DE ECUACIONES

		Págs.
Ecuación N°1	Modulo de resistencia de un material	21
Ecuación N°2	Número de Best	22
Ecuación N°3	Factor Erosivo	24
Ecuación N°4	Densidad	51
Ecuación N°5	Rata de Erosión	52
Ecuación N°6	Factor de Erosión Normalizado	52

INTRODUCCION

El desgaste se puede definir como el desplazamiento de material de zonas que se encuentran en contacto hacia lugares libres de carga. Normalmente el desgaste no ocasiona fallas violentas pero puede traer como consecuencias: la perdida de potencia por fricción, el aumento del consumo de lubricante, la disminución del rendimiento de operación y en el peor de los casos el reemplazamiento de distintos componentes desgastados. Por esta razón surge la iniciativa de realizar estudios con la finalidad de encontrar soluciones efectivas las cuales logren prolongar la vida útil de los distintos elementos de máquina y así disminuir los gastos por concepto de mantenimiento.

Ningún elemento de máquina es inmune al desgaste; este fenómeno se manifiesta siempre que exista carga y movimiento.

Una de las formas de prolongar la vida de componentes es a través de recubrimientos, como una técnica para evitar el deterioro superficial.

El proceso de rociado térmico no es nuevo, ya que se viene utilizando desde hace mas de 100 años. A finales del siglo XIX se comenzó con el estudio de la llama oxiacetilénica . En el año 1910 gracias a Schoop y sus colaboradores (1911), se inventó el proceso de Arco Eléctrico.

El rociado térmico tiene como finalidad proyectar partículas de un material metálico o no metálico, el cual es suministrado en forma de polvo o alambre, en la pistola de rociado el material alcanza temperaturas en las cuales adopta características de partículas fundidas

o semi-fundidas, que impactan sobre el material base o substrato, para así formar un recubrimiento.

Son muchos los métodos de aplicación de recubrimientos que existen en la actualidad. High Velocity Oxi-Fuel (HVOF) es uno de los más novedosos actualmente ya que ha despertado un considerable interés en el sector industrial debido a su capacidad de producir recubrimientos de excelente calidad en lo que se refiere a porosidad, contenido de óxido, densidad, dureza y distribución de las estructuras presentes en el material de deposición (Wang, 1995).

Diversos investigadores se han dedicado a estudiar distintas aleaciones a fin de obtener recubrimientos con una mejor resistencia al desgaste. Fillion en el año 1994 observó un incremento de 5 a 10 veces en el tiempo de servicio de las piezas utilizando como recubrimiento la aleación comercialmente conocida como Colmonoy 88 (NiCrWBSi).

Con el objeto de estudiar las propiedades mecánicas y metalúrgicas de un recubrimiento depositado con aleación Colmonoy 88, los bachilleres García y Redden (1998) determinaron que la microestructura superficial y la resistencia al desgaste erosivo aumentaron con la aplicación del tratamiento térmico posterior con Llama oxiacetilénica para todos los ángulos estudiados. . Los recubrimientos rociados térmicamente con polvo y posteriormente fundidos demostraron tener mayor resistencia a la erosión y un mejor acabado superficial.

Para esto se realizaron ensayos erosivos realizado en el equipo diseñado por los bachilleres I. Malaver y Luis Barbera en el año 1995, utilizando como material erodante alúmina (Al_2O_3), la cual fue facilitada por la empresa Bauxilum.

Algunas investigadores han estudiado sobre la dureza de las partículas erosivas. Tu et. al (1995) observaron que a temperatura ambiente, la diferencia de dureza entre las partículas y la dureza del material que esta sufriendo erosión será de importancia sólo cuando el material erosionado alcance la mitad de la dureza de las partículas. De igual manera evidenciaron que la tasa de erosión es inversamente proporcional a la dureza del recubrimiento.

Edwin J. Carrasqueño (1999) observó el comportamiento tribológico y microestructural de un recubrimiento WC-Co obtenido por deposición vía HVOF. En este trabajo se determinó que la prueba de ensayo de desgaste fue satisfactoria, ya que presentó una alta resistencia al desgaste.

Es por esta razón que existe un gran interés por parte de la Empresa Plamatec Ingenieros C.A., conjuntamente con la Prof. Ma Rodríguez en implementar la técnica de rociado térmico para la recuperación de elementos de máquina.

Es de ahí donde radica la importancia de determinar si la técnica de recubrimientos por rociado térmico de una mezcla a base de WC-Co y cierto porcentaje de Colmonoy puede reducir la tasa de erosión.

En este trabajo se pretende determinar si mediante la utilización del tratamiento térmico sobre el recubrimiento 80% (WC-12%Co) y 20%

Colmonoy, depositado por HVOF se puede aumentar la resistencia al desgaste.

1. FUNDAMENTO TEORICO

1.1. TEORIA DEL DESGASTE:

El desgaste puede definirse como el deterioro de la superficie debido al uso. El desgaste es también muy importante en la práctica de la ingeniería; en muchos casos constituye el principal factor que limita la vida y el rendimiento de los elementos de máquinas.

En general, el desgaste puede ser definido como un daño a una superficie sólida provocado por la remoción o desplazamiento de material por la acción mecánica de ponerlo en contacto con un sólido, líquido o gas. No siempre el desgaste es perjudicial, ya que en determinados usos, como lo es la preparación de superficies antes de la aplicación de cualquier recubrimiento (rociado térmico, pintura, etc.), es beneficioso.

El desgaste es un deterioro inevitable siempre y cuando existan cuerpos en contacto bajo carga y con movimiento relativo entre sí. Normalmente, el desgaste no ocasiona fallas violentas.

El desgaste trae como consecuencia:

- Reducción de la eficiencia.
- Pérdidas de potencia por fricción
- Incremento del consumo de lubricantes.
- Eventualmente conduce al reemplazo de componentes desgastados y a la obsolescencia de las máquinas en su conjunto.

Es de destacar que, en ocasiones, pequeñas variaciones en la velocidad, carga o condiciones, pueden influir notablemente en la tasa de desgaste de una pieza.

La complejidad del desgaste se acentúa al considerar el número de factores necesarios para describirlo. Los principales factores que intervienen en el desgaste pueden enumerarse en la forma siguiente:

- a. Variables relacionadas con el servicio:
 - Áreas en contacto
 - Presión
 - Temperatura
 - Velocidad.
- b. Variables relacionadas con la estructura metalúrgica:
 - Composición Química.
 - Rugosidad.
 - Microdureza.
 - Microestructura.
 - Dureza.
- c. Otras variables que contribuyen:
 - Lubricación
 - Características del medio ambiente circundante (temperatura, etc.)
 - Geometría (dimensiones).

1.2. Tipos de Desgaste

Existen diferentes tipos de desgastes los cuales habitualmente actúan en forma combinada. Se realizara una breve descripción de los tipos de desgaste más comunes:

1.2.1. Desgaste por Abrasión:

El desgaste abrasivo ocurre cuando partículas duras en movimiento unidireccional penetran en la superficie de una pieza y desplazan el material con o sin formación de viruta. Las partículas duras pueden pertenecer al segundo cuerpo (asperezas duras), puede ser la misma viruta endurecida por oxidación y deformación, o pueden ser partículas ajenas provenientes del ambiente.

En las superficies desgastadas se notan canales paralelos casi regularmente distribuidos, obtenidos sea solamente por deformación plástica (identación de las partículas duras en la superficie), o por deformación y desprendimiento del material en virutas alargadas.

Este tipo de desgastes es el que más frecuentemente se encuentra en la industria. El caso típico, es el desgaste de las piezas metálicas en contacto con partículas de rocas duras, es decir de las herramientas de perforación, herramientas agrícolas, transportadoras de minerales, etc.

1.2.2. Desgaste Adhesivo:

El desgaste adhesivo esta caracterizado por la interacción de las asperezas superficiales, que chocan, se adhieren (por microsoldadura u otro proceso) y al fracturarse, se transfiere material de una pieza a otra o se desprende como viruta. En la industria, cuando se utilizan máquinas nuevas, sus piezas sufren un período de adaptación (rodaje) durante el cual las superficies se acoplan mediante la disminución de las asperezas más sobresalientes, las cuales son redondeadas por procesos adhesivos o corrosivos. Durante este período la probabilidad de falla de

una pieza nueva es muy alta y decae una vez que se han acoplado las piezas.

1.2.3. Desgaste Erosivo:

Se considera a la erosión como una forma de abrasión, en el cual la pérdida de material es el resultado de repetidos impactos de pequeñas partículas sólidas, las cuales son impulsadas por un fluido, el cual puede ser líquido o gaseoso.

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

La velocidad de desgaste por erosión aumenta con la velocidad de las partículas; de igual manera si los ángulos de impacto son pequeños, es decir casi paralelo a la superficie erosionada es llamada erosión abrasiva; siendo la dureza superficial un factor crítico. Si los ángulos de impactos son grandes el desgaste es debido principalmente a deformaciones y fractura.

Existe un parámetro que nos permite representar la cantidad de energía que puede ser absorbida por un cuerpo antes de que ocurra deformación plástica o fractura por impacto; este parámetro viene dado por una correlación entre la resistencia a la erosión y el módulo de resistencia (R) de un material (ecuación N° 1):

$$R = \frac{S_y^2}{2 \times E} \quad (1)$$

De donde: S_y : resistencia a la fluencia
E: Módulo de elasticidad de Young

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

La extensión del daño se obtiene por el valor adimensional denominado numero de Best (B), (ecuación N° 2):

$$B = \frac{\rho \times V^2}{Y} \quad (2)$$

De donde: ρ : es la densidad del material.
 V: Velocidad de impacto
 Y: esfuerzo de fluencia del material.

La Tabla 1 presenta el tipo de deformación producto del impacto de las partículas en relación con el numero de Best.

Tabla 1. Variación del número de best con el tipo de daño.

Numero de Best	Tipo de Daño
10^{-5}	Cuasi- estático, elástico
10^{-3}	Inicios de deformación plástica
10^1	Deformación plástica extensiva
10^3	Fenómeno de hipervelocidad

Tomado de Malaver et al, 1995

En la erosión por partículas sólidas, el fluido que las transporta puede ser líquido o gas, en ambos casos las partículas pueden ser aceleradas o desaceleradas, como también cambiar la dirección de sus movimientos. En medios gaseosos las partículas tienen un tamaño

cercano a los 50 μm , la desviación de estas partículas por el flujo de gas a menudo es ignorada en los ensayos de erosión.

Haciendo referencia a Finnie (1980) las variables que afectan la erosión pura puede ser ampliamente separadas en tres tipos; las referidas a las características del impacto del fluido, las características de la partícula y las del material.

Las variables básicas de impacto son: ángulo de incidencia (θ), velocidad de la partícula (γ), concentración de las partículas en el flujo.

El ángulo de incidencia esta definido como el ángulo que toma la dirección del flujo de las partículas abrasivas y la superficie proyectada.

Las variables referidas a las partículas pueden ser: la forma, tamaño, dureza, facilidad para la fractura, etc.

En cuanto a las características del material, se incluye: dureza, capacidad de endurecimiento, microestructura.

1.3 FENOMENO DE LA EROSION

El valor de la erosión viene dada por la perdida de masa o volumen de material removido por unidad de masa erodante proyectado.

Se utiliza el volumen como medida, porque permite comparar la perdida de espesor entre materiales de diferentes densidades.

La teoría predice que la tasa de erosión podría ser inversamente proporcional a la dureza de los metales, así como también que el tamaño de las partículas no tiene una gran influencia en la tasa erosiva.

Se define el Factor de Erosión Normalizado (FEN) como un factor que mide la tasa de erosión de un material relativa a la tasa de erosión de un material de referencia.

Las partículas responsables del desgaste erosivo varían en tamaño; el cual se encuentra en el rango de 5 a 500 μm y las velocidades de impacto entre 5 y 500 m/s. Generalmente las partículas erosivas varían en composición y son generalmente más duras que el material de la superficie a desgastar. Para este tipo de estudio se puede utilizar como material erodante el cuarzo, óxido de aluminio y el carburo de silicio, los cuales tienen unas durezas de 1300, 1750 y 2000 Kg/mm^2 respectivamente.

Para la mayoría de los metales, la tasa de erosión (ecuación N° 3) se ve afectada por el ángulo de impacto y la velocidad de la partícula erodante acorde a la relación de la forma:

$$E = K V^n f(\theta) \quad (3)$$

En donde E es el factor de erosión, V velocidad de impacto de la partícula y $f(\theta)$ es una función adimensional del ángulo de impacto, medido este con respecto al plano del objetivo. El valor del exponente de la velocidad n se encuentra en un rango de 2,3 a 2,5 para los metales.

Para calcular los valores de K, el cual define la magnitud absoluta de la erosión puede ser derivado de datos publicados de una variedad de materiales. La tabla 2 lista los valores de K calculados de ratas de

erosión publicadas, conjuntamente con los detalles de las condiciones experimentales bajo las cuales fueron obtenidas.

Tabla 2. Valores de K calculados a partir de datos de tasas de erosión obtenidos experimentalmente.

Material	Abrasi vo	V (m/s)	Angulo (°)	K (10 ⁻⁸)	Referencia
Al 2024	Cuarzo	125	20	0.83	Gat y Tabacoff 1978
"	Cuarzo	117	60	0.38	"
"	Cuarzo	122	90	0.41	"
Al6061-T6	SiC	90	30	1.46	Sheldon 1977
Al 6061	SiC	91	20	2.28	Tilly y Sage 1970
Al-puro	SiC	282	20	0.31	"
Al-aleación	Cuarzo	244	90	2.20	"
Al-puro	Al ₂ O ₃	129	20	1.49	Neilson y Gilchrist 1968
"	Al ₂ O ₃	129	30	1.30	"
"	Al ₂ O ₃	129	90	1.46	"
Al 1100-0	SiC	76	20	1.46	Finnie 1967
"	SiC	137	20	1.32	"
Al-4,75%Cu	SiC	30,5	30	0.68	Brass 1977
Cu	SiC	76	20	2.54	Finnie 1967
"	SiC	137	20	2.55	"
"	Cuarzo	82	20	1.17	Taldolder 1966
Ni	Cuarzo	82	20	0.56	"
"	SiC	90	30	1.82	Sheldon 1977
Ti-aleación	Cuarzo	128	90	2.32	Tilly y Sage 1970
"	Cuarzo	242	90	1.85	"
Ti-puro	Cuarzo	82	45	0.69	Taldolder 1966
"	Cuarzo	82	90	1.11	"
Ti 6A14B	Cuarzo	122	20	0.83	Gat y Tabacoff 1978
"	Cuarzo	116	60	0.59	"
Fe-puro	Cuarzo	82	20	0.59	Taldolder 1966
"	SiC	76	20	2.44	Finnie 1967

Tomado de Malaver et al, 1995

Estos valores fueron calculados para unos valores de n= 2,4 en la ecuación N^o3. La posible variación mostrada en la tabla anterior es

debido a la variación del material de la partícula, ya que no solo afecta el tamaño real de la misma sino también a través del efecto aerodinámico de la partícula; el cual es producido por el flujo de gas que actúa sobre la partícula, la cual podría cambiar el ángulo de incidencia y las velocidades originales de las partículas, hasta el punto de desviarse de la superficie de choque.

Tilly (1969) ha estudiado y calculado las trayectorias de las partículas de $5 \mu\text{m}$ 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 se esperarían que choque la superficie de la probeta a un ángulo de 45° de incidencia.

Otra posible causa de la variación ha sido demostrada por Smeltzer (1970) en donde demostró que las partículas alcanzan la velocidad del flujo del gas aproximadamente a 3 metros de proyección.

1.4. CONSECUENCIAS DEL IMPACTO DE PARTICULAS

La remoción de material se produce a consecuencia del impacto de partículas abrasivas sobre el recubrimiento, lo que ocasiona un desgaste erosivo. Este impacto provoca una deformación del material, lo cual es un componente esencial en el mecanismo de la erosión.

El impacto de las partículas con una superficie metálica puede inducir a una deformación elástica o permanente, o a una deformación plástica siempre y cuando sea excedido el esfuerzo de deformación del material.

El daño provocado por la partícula en la superficie de un blanco semi-infinito es obtenido por el valor adimensional denominado número de Best (B), ecuación N° 2, definido anteriormente.

La fracción del volumen desplazado por una partícula durante un impacto simple varía considerablemente con la forma de la partícula abrasiva, orientación, velocidad y ángulo de impacto. Existen diferentes tipos de deformación, entre ellos se encuentra el "ploughing" (arado),

ilustrado en la Fig. 1., el cual tiene como característica que el material deformado es desplazado hacia un borde al final del cráter de impacto; otro tipo es el Corte I el cual presenta un corte en la superficie levantando un gran fragmento de viruta al final del cráter, el cual es vulnerable a la

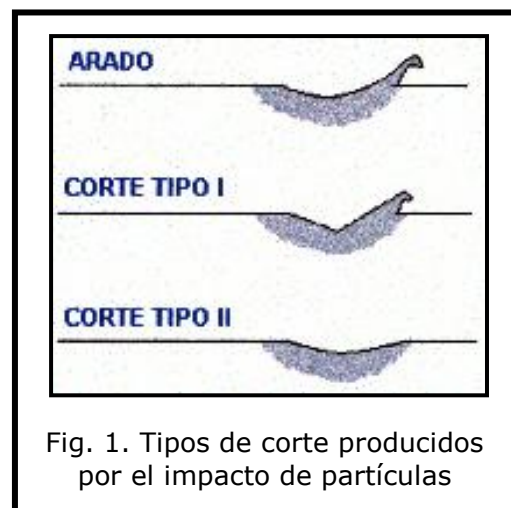


Fig. 1. Tipos de corte producidos por el impacto de partículas

remoción por el impacto de otra partícula. Otra deformación es el denominado Corte II en el cual la partícula rota en sentido contrario a la trayectoria del impacto, provocando una remoción directa del material bajo la acción de un maquinado.

1.5. TRIBOLOGIA

Dada la problemática existente en las industrias debido al desgaste que sufren algunos elementos de máquinas, se han visto en la necesidad de obtener un mejor rendimiento de las superficies con la finalidad de evitar los altos costos de reposición de componentes.

Debido a las numerosas investigaciones científico-tecnológicas realizadas en las ultimas décadas, con el objeto a determinar las causas del desgaste y así poder predecir sus consecuencias, es que nace la TRIBOLOGIA

La Tribología es la ciencia y técnica que interpreta la totalidad de los fenómenos emergentes de superficies que interactúan con movimiento relativo entre si, en presencia o ausencia de algún medio circundante. Del griego surge la tribología como el estudio de los mecanismos de fricción. A esta se incorporan ciertos tópicos que incluyen la fricción, el desgaste, la lubricación y el comportamiento de materiales dentro de la industria.

Todo diseño industrial es afectado por estos tópicos y es por esta razón que es necesario realizar un estudio tribológico para así evitar posibles fallas que produzcan la paralización d la maquinaria.

Paralelo a esta ciencia surge las áreas como Tribociencia, Tribotecnología, Triboquímica y Tribofísica, las cuales son ciencias vinculadas a la práctica de la Tribología.

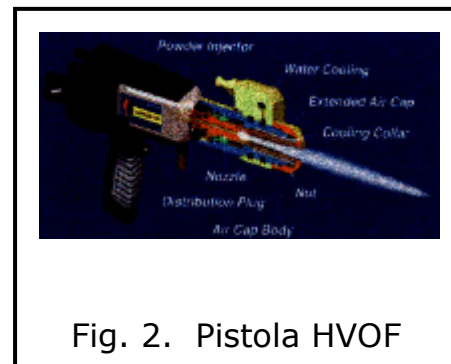
La naturaleza de la superficie es muy importante en el estudio Tribológico, debido a que la fricción surge a partir de las fuerzas generadas por dos cuerpos en contacto. El área aparente de contacto entre estas dos superficies es usualmente más pequeña que el área aparente y ésta a su vez esta directamente relacionada con el acabado superficial de la misma, esto no implica que a medida que se mejora el acabado superficial aumente los puntos de contacto entre las superficies y se obtengan mayores fuerzas de fricción.

Otra característica de gran importancia en el material es la rugosidad que posee. La rugosidad es sin duda uno de los aspectos más importantes en la durabilidad y el correcto funcionamiento de una superficie. La rugosidad de una superficie es difícil de evaluar, debido a que existen superficies similares pero no iguales ya que es difícil poder contar con un parámetro de referencia.

1.6. ROCIADO TÉRMICO

El proceso de rociado térmico es una técnica de deposición de recubrimientos metálicos y no metálicos, en la cual el material es proyectado en forma atomizada sobre el sustrato. El material de aporte puede estar inicialmente en forma de barra, alambre o polvo.

Para la aplicación del rociado térmico se usa una pistola especial en la cual el material es calentado hasta temperaturas cercanas o relativamente superiores a las de su punto de fusión, para luego a través de una corriente de aire o gases comprimidos (Fig.2) ser rociados en estado plástico o en estado de fusión, a velocidades que exceden los 600



m/s para el proceso a alta velocidad oxígeno-combustible conocido por las siglas HVOF, la cual permite que sobre el sustrato las partículas impacten fuertemente en forma de gotas semifundidas dando como resultado una forma de "splat", haciendo posible que se vayan formando capas delgadas relativamente homogéneas con una microestructura refinada (Fig.3). Estas capas se van enfriando y solidificando progresivamente adhiriéndose en forma continua sobre la superficie

rugosa y preparada del sustrato. El espesor total del revestimiento es conseguido normalmente a través de múltiples pasadas.

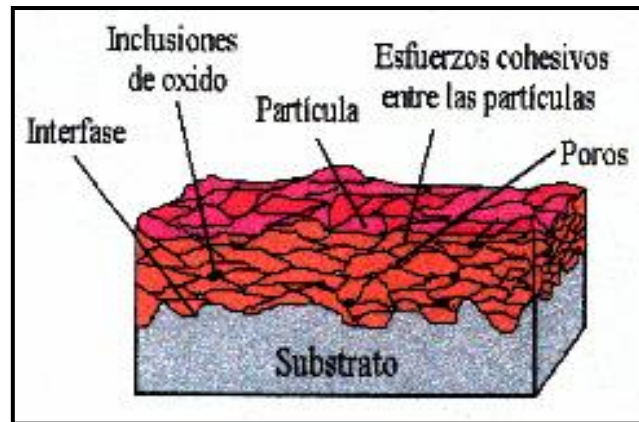


Fig. 3 Morfología de un recubrimiento Rociado Térmicamente

Por otra parte esta técnica permite aplicar revestimientos sin llegar a calentar significativamente la superficie del sustrato. Por lo general esta temperatura se encuentra por debajo de los 200 °C (400 °F) eliminándose así los posibles cambios metalúrgicos y las posibles distorsiones en el sustrato (Smith, 1958).

El enlace entre el sustrato y el recubrimiento, y la conformación misma del material depositado, generalmente se realiza por medio de:

- Enlace mecánico
- Enlace metalúrgico
- Enlace químico

El enlace mecánico es la unión de las partículas cuando chocan con el sustrato, este es el principal mecanismo de adhesión del material depositado al sustrato, por lo cual es necesario que la superficie del

mismo este correctamente preparada. La adherencia depende de varios factores como:

- Material utilizado para el recubrimiento.
- Rugosidad de la superficie.
- Estado de limpieza superficial.
- Temperatura de la superficie antes, durante y después del rociado.
- Velocidad de las partículas.

La estructura del recubrimiento rociado térmicamente depende de:

- Propiedades del material rociado (constitución, morfología, etc)..
- Propiedades físicas y estabilidad química del sustrato.
- Interacciones del sistema de deposición con el material de aporte.
- La atmósfera circundante al material mientras se encuentra en estado fundido.
- Preparación de la superficie del sustrato.

Este último factor es el paso más crítico en la operación de rociado térmico; la calidad de adherencia de los recubrimientos se relaciona directamente con la limpieza y la rugosidad de la superficie del sustrato. Es necesario para asegurar un buen recubrimiento aplicado por rociado térmico la adherencia del recubrimiento a la superficie del sustrato.

El material de aporte y el tipo de sustrato son los factores más determinantes para la preparación de superficies, los materiales aportados por el método de rociado térmico no incrementan la resistencia del sustrato (American Welding Society).

En la preparación del substrato se deben seguir los siguientes pasos:

- Limpieza y manejo:

Para la preparación de un substrato que va a ser rociado térmicamente lo primero que se hace es remover todos los contaminantes de la superficie (costras, pinturas, grasas, aceites, etc.). El calor suministrado por la aplicación del rociado térmico no removerá los contaminantes, lo cual provocara la inhibición de la adherencia. Luego de que todos los contaminantes hayan sido removidos la limpieza debe ser mantenida hasta que el rociado se haya completado, las piezas deben ser protegidas de la transferencia aérea de escoria, y de huellas digitales, estas piezas deben ser manipuladas con sujetadores y con mucha pulcritud.

- Generación de rugosidad:

Una rugosidad apropiada es tan importante como la limpieza. Durante el rociado térmico las partículas fundidas forman plaquetas en el momento del impacto con el substrato. Las capas rociadas mientras se enfrían se endurecen y deben adherirse a una superficie mediante una adherencia mecánica, (American Welding Society).

Luego de la limpieza, para producir una superficie a la cual se adhiera el recubrimiento, se aplican importantes métodos: Macrorugosidad, aplicación de unas capas de enlace, pero él más importante es el método de granallado abrasivo.

Granallado abrasivo es el proceso para otorgar rugosidad mas utilizada. La superficie a ser previamente recubierta es perturbada por el choque de partículas abrasivas.

El efecto del granallado depende del tamaño y tipo del abrasivo, las partículas angulares, duras y afiladas proveen el mejor resultado. Todos los abrasivos deben estar secos, limpios y libres de contaminantes.

Tipos de arenillas abrasivas:

Oxido de aluminio.

Hierro templado superficialmente.

Gránate.

Carburo de silicio.

Acero angular.

Acero.

Los óxidos refractarios con bordes afilados y cortantes pueden penetrar en substratos blandos tales como el aluminio. La arenilla de hierro templado en frío generalmente produce mas esfuerzos en la superficie que los óxidos de aluminio, por estas razones no deben ser aplicada en substratos delgados los cuales puedan alabearse por el estallado.

Los óxidos de aluminio pueden utilizarse en substratos duros (aceros martensíticos). Cuando se usa en substratos blandos cualquier partícula que halla quedado incrustada puede removerse por sopladura. Los carburos de silicio tienen mayor tendencia a quedarse incrustados y de romperse más rápido que los óxidos de aluminio.

- Remoción de polvo abrasivo:

Otras variables del proceso de preparación superficial son: la presión del aire, ángulo de estallado, distancia y tiempo. Todas las superficies del sustrato que deban ser recubiertas deben ser protegidas por una máscara adecuada. El polvo o la arenilla adherida a la superficie del sustrato debe ser removida por un chorro a presión de aire antes de comenzar el rociado térmico. La presión del aire para aplicar el chorro debe estar en el rango de 0.21 a 0.69 MPa, dependiendo del material del sustrato, del acabado superficial, del flujo, tamaño de las partículas abrasivas, etc. La corriente abrasiva debe estar dirigida hacia la superficie del sustrato con un ángulo de 75° a 90° y desplazándose de lado a lado. La distancia de la tobera al sustrato variara de 101.6 a 304.8 mm, dependiendo del tipo y tamaño del abrasivo utilizado, el tamaño de la apertura de la tobera y la capacidad del chorro de aire suministrado.

- Limpieza después de la generación de la rugosidad:

Cuando se produce rugosidad por granallado, el sustrato fresco está expuesto a los contaminantes, el contacto con las manos por las huellas digitales o por tener en ellas otro tipo de impurezas puede afectar en la adherencia del recubrimiento. Estos sustratos deben ser rociados antes de que la oxidación ocurra sobre su superficie. La superficie rugosa y limpia se degrada por la humedad o el condensado, inclusive una ligera corrosión es un indicativo de humedad. La humedad dentro de las posibilidades debe mantenerse al 60% o menos en el rociado y en la preparación de la superficie, en algunos casos un precalentamiento antes del granallado puede ser de gran utilidad.

1.6.1. Aplicaciones del Rociado Térmico

La mayor ventaja de los procesos de rociado térmico es la amplia variedad de materiales que pueden ser utilizados como recubrimientos, siempre que cumpla con el requisito de que debe fundirse sin descomponerse. Otra ventaja es la capacidad de la mayoría de los procesos de rociado térmico de poder aplicar recubrimientos sin llegar a calentar significativamente el sustrato, de este modo, materiales con alto punto de fusión pueden ser aplicados.

Los recubrimientos de metales, carburos, cerámicos o plásticos rociados térmicamente son ampliamente utilizados en distintas ramas industriales, en las áreas de mantenimiento y producción, entre las cuales se encuentran:

- Recuperación y construcción: Permite la reconstrucción de piezas que presentan defectos de fabricación.
- Protección contra la corrosión: Aplicando una deposición de materiales con conocida resistencia a un medio determinado.
- Creación de barreras térmicas (aislantes).
- Conductividad o resistividad eléctrica.
- Biomedicina.
- Resistencia al desgaste

La resistencia al desgaste es uno de los usos más importantes del rociado térmico, generalmente la resistencia al desgaste de los revestimientos aumenta con su densidad y fuerza cohesiva, por lo general la dureza de los revestimientos se encuentra en un rango comprendido entre 20 y 70 Hz.

1.6.2. Clasificación del Rociado Térmico

Las técnicas de rociado térmico, según la fuente de energía y el sistema de proyección de material empleado, pueden clasificarse como:

1.6.2.1 Rociado térmico por arco eléctrico

En esta técnica de rociado térmico la fuente de poder para fundir el material de aporte proviene de la energía eléctrica.

Los recubrimientos o capas que se logran a través de este proceso son normalmente más densos y de una mejor calidad en comparación con procesos equivalentes por combustión, este proceso es de gran eficacia para la proyección de recubrimientos en áreas de grandes dimensiones, pero tiene una gran desventaja que solo puede ser rociados térmicamente alambres eléctricamente conductivos.

1.6.2.2 Rociado térmico por plasma

En esta técnica de rociado térmico se encuentra que el plasma es producido por una descarga de alto voltaje consecuencia de una ionización localizada y un conductor que sirven para la formación de un arco de corriente continua formado por el cátodo y el ánodo. A esta llama de plasma se le inyecta un material en forma de polvo el cual se calienta rápidamente y es acelerado proyectándose sobre el sustrato.

En el rociado térmico por plasma, los recubrimientos demuestran una gran resistencia a la corrosión y también pueden hacerse recubrimientos con materiales cuyos puntos de fusión sean muy

altos, pero este proceso tiene sus desventajas que son la complejidad del proceso y el alto costo.

1.6.2.3. Rociado térmico por llama oxígeno-combustible (subsónico)

En este proceso de rociado térmico el material de aporte es calentado en una cámara de combustión a la cual converge una corriente gaseosa desde el alimentador hasta la llama. El material toma un estado pastoso adquiriendo así energía calórica y cinética hasta ser proyectado hacia el substrato.

El gas de transporte de los polvos es oxígeno, pero también puede ser aire comprimido o gas inerte, y su flujo puede ser convergente, divergente o paralelo respecto a la llama. La alimentación del polvo al gas de transporte puede realizarse por gravedad o por presurización empleando el efecto Venturi.

En este tipo de procesos debido a que tienen una baja velocidad de impacto los recubrimientos presentan una menor adhesión al substrato y un incremento en la porosidad, comparándolos con otros procesos cuya temperatura del material de alimentación sea la misma.

1.6.2.4. Rociado térmico por llama oxígeno-combustible (supersónico)

En esta técnica se ubica el proceso HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) debido a que la partícula alcanza velocidades superiores a la del sonido.

HVOF se define como un proceso de rociado térmico de hipervelocidad en el cual se combina fusión e impacto sobre un sustrato previamente preparado.

Los componentes principales en un equipo de HVOF como se ve en la Fig (4) son los siguientes:



Fig. 4. Equipo HVOF

- Control de flujo y enfriamiento de la boquilla.
- Circuito de agua o aire de enfriamiento.
- Bombas de inyección de combustible y agua.
- Control de la mezcla oxígeno / combustible.
- Inyectores de los gases de combustión.
- Tipo y geometría del inyector de los polvos.
- Control de flujo del gas transportador.

La continua alimentación tanto de los gases como del polvo hacen que este proceso pueda incrementar la presión en la cámara, lo cual trae como consecuencia el aumento de la velocidad de la partícula. Esta energía de presión se transforma en energía cinética ($\frac{1}{2}$ de la masa por la velocidad al cuadrado) a través de una tobera convergente divergente la cual se puede apreciar en la Fig. (5).



Fig.5. Esquema de la pistola HVOF.

En la mayoría de los casos, los recubrimientos depositados por la técnica HVOF son de mejor calidad que los ofrecidos por otras técnicas de rociado térmico. El espesor de los recubrimientos obtenidos por HVOF están normalmente en el rango de 0,05 a 0,5 mm. Como resultado de las altas velocidades alcanzadas por las partículas la calidad de estos recubrimiento es superior.

La velocidad de la partícula es un parámetro crítico en un proceso de rociado térmico. El proceso HVOF produce velocidades de partículas considerablemente mas altas que los demás procesos de rociado térmico. Las velocidades de los gases oscilan entre los 1370 m/s y 2930 m/s, con velocidades de partícula de polvo correspondientes a 480 m/s 1020 m/s, es de notar que puede llegar a ser hasta tres veces superior a la velocidad del sonido (360 m/s). Las temperaturas del gas en la cámara de combustión del sistema HVOF están típicamente entre 1650 y 2760 °C, dependiendo del combustible usado y la relación estequiométrica de la combustión.

La gran velocidad alcanzada por las partículas produce una característica única en el método por HVOF llamado "Choque de Diamante" el cual puede visualizarse en la llama a la temperatura de combustión en forma de rombos. (ver Fig. 5)

Las velocidades de la partícula alcanzadas en el sistema de HVOF son la causa principal de los beneficios que este sistema trae consigo.

- Calentamiento de la partícula mas uniforme y eficiente.
- Implanta una barrera anticorrosiva a través de la baja porosidad.
- Energía cinética más alta en el impacto.
- Superficies más lisas debido a una energía de impacto más alta.
- Densidad más alta debido a la gran energía de impacto.
- Porosidad más baja.
- Tiempo de la exposición mas corto.
- Capas mas espesas a través del mejoramiento en las tensiones residuales.
- Ambiente más favorable (atmósfera menos oxidante).
- Dureza mas alta debido a una menor degradación y una mejor fuerza de adhesión.
- Mayor retención de las propiedades químicas del polvo y sus fases debido al tiempo reducido de exposición a altas temperaturas.
- Mejor resistencia al desgaste debido a una mayor dureza en el recubrimiento.
- Mayor cantidad en el volumen de las partículas fundidas debido a un mejor calentamiento de estas.

- Adherencia más alta y mayor fuerza cohesiva porque mejora la unión entre las partículas.
- Volumen de óxido más bajo por el menor tiempo de exposición con el aire.

Las superficies rociadas térmicamente pueden ser esmeriladas y acabadas de muchas maneras, los métodos elegidos pueden variar desde una simple operación de pulido a mano a un esmerilado manual con correas abrasivas o maquinados más complejos, tal como es el caso de la esmeriladora de precisión. Los factores que influyen la decisión del método de acabado incluyen el tipo de material a ser esmerilado, forma de la pieza, requerimientos de acabado, tolerancia, tipo de equipo disponible y economía (American Welding Society).

1.7. ALEACIONES AUTOFUNDENTES

La aplicación de los recubrimientos rociados térmicamente con aleaciones autofundentes base níquel, tienen una amplia aplicación en la industria, mejorando la resistencia al desgaste abrasivo y/o erosivo.

Una de estas aleaciones es la conocida con el nombre de Colmonoy 88 (Fillion, 1994), la cual está compuesta por níquel, cromo, tungsteno, silicio y boro entre otros. La tabla 3 se presenta la composición química de esta aleación en porcentaje de cada elemento. Estos elementos reaccionan durante la fusión y están presentes en las partículas pulverizadas después del rociado térmico.

Los elementos Ni, Cr, y C proveen las propiedades primarias de los recubrimientos, otorgándoles alta tenacidad, resistencia a la oxidación y resistencia a la abrasión; Si y B actúan como fundentes en la aleación.

Se han obtenido resultados satisfactorios en los sistemas Ni/WC depositados por rociado térmico con tratamiento térmico de llama oxiacetilénica. Lira y Grigorescu (1993) han obtenido recubrimientos rociados térmicamente de Ni-Cr-B-Si/WC en un amplio rango de proporción de carbono, aun cuando no fueron realizados análisis de su constitución microestructural, se encontró que las mejores composiciones de mezcla para la obtención de depósitos compactos y con distribución uniforme de constituyentes fueron para 85% WC y para 55% WC.

1.8 Tratamiento Térmico

1.8.1. Tratamiento Térmico por Llama

Todas las aleaciones autofundentes tienen un amplio rango de fusión y exhiben un comportamiento muy viscoso en su estado plástico. En el tratamiento térmico, el recubrimiento es calentado a un punto entre sólido y líquido donde la superficie alcanza una reflectividad o apariencia vidriosa. Esto logra una combinación óptima de partículas fundidas, cerrando los poros entre estas y fundiendo los óxidos, esto logra una reducción del 20% aproximadamente de la porosidad en el recubrimiento.

El tratamiento térmico por antorcha o llama, es uno de los mas comúnmente realizados en la industria. Esta puede emplear llama oxiacetilénica o de oxipropano. La técnica varía con el tamaño de las piezas, forma y metal base. Una llama neutral es usada en aleaciones base níquel y una reducción ligera de la llama es realizada para

aleaciones base cobalto. Una baja velocidad de la llama es usada para prevenir el flujo de la superficie fundida. Las partes cilíndricas, se rotan a bajas velocidades con el fin de:

- Causar una menor pérdida de metal fundido debido a la fuerza centrífuga.
- Otorgar a la superficie un buen acabado superficial.

El conjunto substrato/recubrimiento es gradual y uniformemente conducido a un color rojo mate (cercano a los 760-870 °C). La temperatura del recubrimiento es elevada al rango de fusión por un calentamiento progresivo de la banda delgada del recubrimiento, a través del tiempo, mientras la antorcha se mueve de un extremo a otro. La antorcha debe moverse a una velocidad constante, lo suficientemente lento para que el calor se extienda y lo suficientemente rápido para prevenir las escoriaciones. Es obvio que para el control de la temperatura, se requiere que el operador tenga una extensa experiencia en este tipo de procesos, sin embargo el color de la superficie del recubrimiento, una buena apariencia reflectiva (brillo vidrioso) y la ayuda de equipos para la medición de la temperatura (pirómetros), pueden ser utilizados como indicadores seguros.

Existen equipos semiautomáticos que muchas veces son usados en el rociado y tratamiento térmico de piezas cilíndricas muy largas. Las piezas son rotadas por medio de un torno, una o varias antorchas son distribuidas transversalmente a lo largo de la pieza. La velocidad, posición de las antorchas y el flujo son controladas del tal manera de proveer al recubrimiento las propiedades requeridas en un solo pase, la óptima temperatura de fusión es suplida por la última antorcha de montaje.

Sistemas de instrumentación han sido desarrollados para controlar el proceso automático de la aplicación de tratamiento térmico por antorcha. La operación consiste en captar por medio de instrumentos sensitivos la emisividad o reflectividad de la superficie y convertirla en una señal eléctrica la cual es usada para gobernar el movimiento de la antorcha.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 MATERIALES

Como material base se utilizó acero AISI 1020 certificado. Las muestras fueron fabricadas como lo indica la norma ASTM G76-83, con la finalidad de garantizar que toda el área de la muestra quedara expuesta en su totalidad al flujo de partículas erodantes.

Las dimensiones de las probetas son de 30mm X 10mm X 0.425mm para los ensayos de erosión (Fig.6 a) y de 25.4 mm X 25.4 mm para los ensayos de Pin on Disk (Fig.6 b)

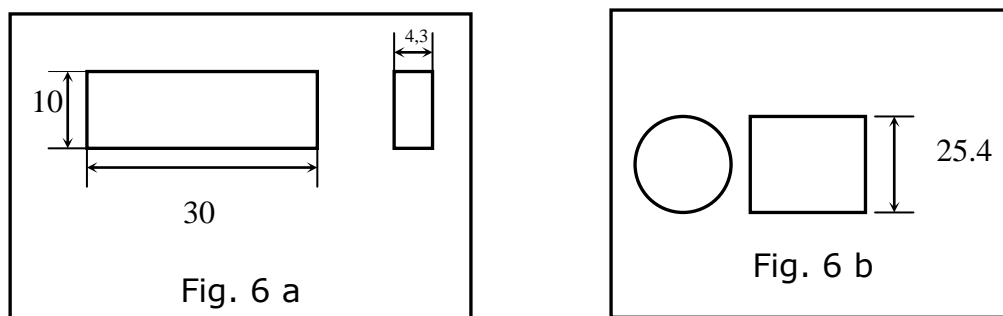


Fig.6 (a,b) Geometría y Dimensiones de las probetas.

Los recubrimientos utilizados tienen en común la presencia del carburo de tungsteno con la diferencia que un recubrimiento es la mezcla de 80% WC + 20% Colmonoy, y el otro recubrimiento compuesto de WC-4%Cr-10%Co (comúnmente llamados cermets).

De las 48 muestras rociadas, 32 muestras fueron de la mezcla 80% WC + 20% Colmonoy y 16 muestras de WC-4%Cr-10%Co.

Tabla 3. Composición Química del Colmonoy 88

Cr	W	B	Si	Fe	C	Ni
15.00	17.30	3.00	4.00	3.50	0.80	Resto

2.2. PROCESOS

Antes de realizarles el rociado térmico a las probetas, estas fueron precalentadas, con la finalidad de eliminar la humedad en la superficie, para luego realizarles el granallado con alúmina a una presión aproximada de 0.69 MPa y con una dirección perpendicular a la superficie de las muestras, para así garantizar una buena adherencia del recubrimiento con el sustrato.

En las Fig. 7 (a,b) se presentan las probetas después de haberles realizado el granallado.

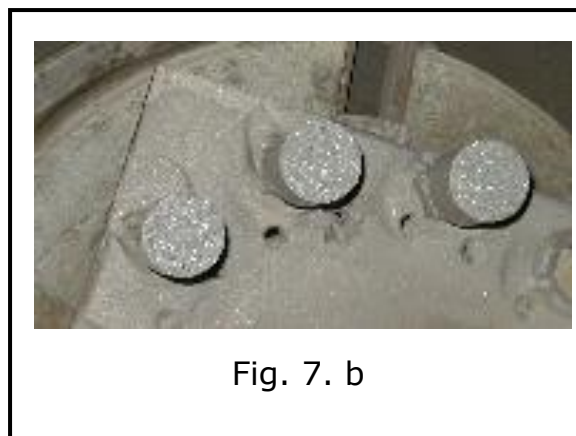
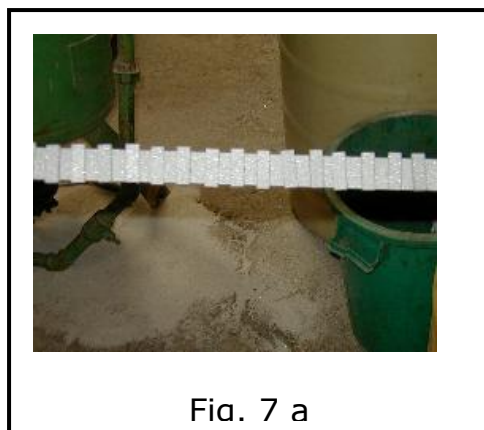


Fig.7 (a,b) Muestras Granalladas.

Seguidamente se realizó el rociado térmico vía HVOF a 48 muestras como se muestra en la Fig 8 (a,b), el cual se llevó a cabo en las instalaciones de Plasmatec Ingenieros C.A., utilizando para ello una

pistola modelo JP 5000, cuya alimentación era en forma de polvo, para poder realizar el recubrimiento.

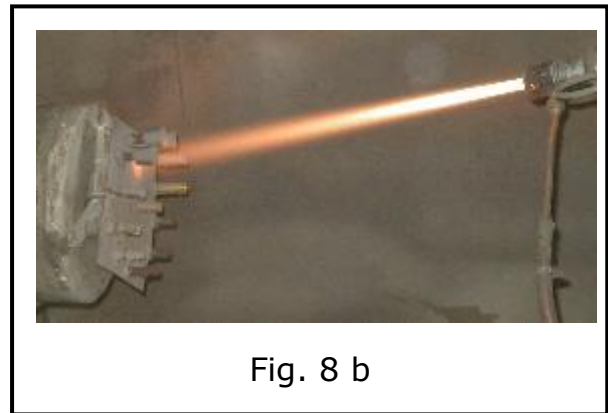
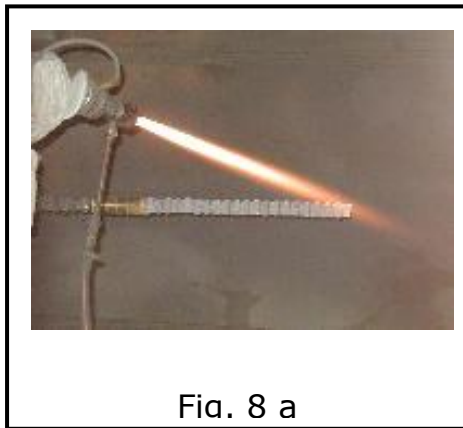


Fig.8 (a,b) Rociado Térmico.

La siguiente tabla presenta los parámetros del rociado térmico.

Tabla 4. Parámetros del Rociado Térmico

Temperatura de precalentamiento del substrato(°C)	84
Distancia del rociado térmico (mm)	431.8
Presión de oxígeno (MPa)	3.86
Flujo de oxígeno (l/min)	705
Presión de Kerosén (MPa)	0.10
Flujo de Kerosén (l/min)	0.38
Presión de la cámara de combustión (MPa)	0.88
Flujo de nitrógeno (l/min)	14

2.3. TRATAMIENTO TERMICO

Por último se realizó el tratamiento térmico de llama oxipropano, alcanzando una temperatura de aproximadamente 1100 °C , la cual fue medida por medio de la utilización de un pirómetro y con la ayuda del operador para visualizar el brillo vidrioso (Glaze Shine) en la superficie de la muestra

2.4. ENSAYOS

2.4.1. Ensayo de Erosión: El ensayo se realiza bajo la norma ASTM G76-83 a las 45 muestras, las cuales se dividieron en tres grupos de acuerdo al ángulo de incidencia para la erosión.

Los ángulos estudiados fueron 30°, 45° y 60°. En la tabla 5. se muestran como fueron agrupadas las mismas.

Tabla 5. Agrupación de Muestras

Angulo de Ataque	Material			
	MB	CER	MST	MCT
30	5	5	5	5
45	5	5	5	5
60	5	5	5	5

En donde :

MB: Material Base, Acero 1020

CER: Mezcla Wc-4%Cr-10%Co

MST: Mezcla 80% (WC-12%Co)-20% Colmonoy, sin Tratamiento Térmico.

MCT: Mezcla 80% (WC-12%Co)-20% Colmonoy, con Tratamiento Térmico.

El material erodante utilizado fue alúmina, la cual siguiendo los requerimientos de la norma debía ser de tamaño aproximadamente de 50 μm , la cual fue donada por la Empresa Bauxilum.

El tiempo de ensayo según la norma antes mencionada es de 10 minutos, pero para nuestro estudio y por la falta de alúmina, sólo se realizó el ensayo de cada muestra con un tiempo de 3 minutos, lo cual en estudios anteriores se comprobó que se garantizaba una significativa variación del peso de la muestra. Es importante destacar que antes de realizar el ensayo a la siguiente muestra se procedía a tamizar la alúmina, para así garantizar que se mantuviese el tamaño de la alúmina a 50 μm .

Descripción del banco de ensayos:

El banco de ensayos utilizado, fue desarrollado por Ignacio R. Malaver y Luis J. La Barbera en 1995. Tesis U.C.V.

Consta de: bastidor, porta probetas, una tolva, manguera de alimentación de polvo abrasivo, y una pistola de chorro abrasivo.

El procedimiento del banco de ensayos fue el siguiente:

- se realizó el montaje de todos los componentes del banco de ensayos, conectando el sistema de inyección de aire y colocando en funcionamiento el compresor.

- Se tomó muestra por muestra, a la cual se le realizó medición del peso; luego se le colocó en el porta probetas con la

orientación del ángulo de estudio, y a una distancia de 76.2 mm de la boquilla.

- Se abrió la válvula de la compuerta y se ajustó una presión de aire de 0.34 MPa a la entrada de la pistola.

- Se cargó la tolva con 700 gramos de abrasivo (alúmina)

- Se cerró la puerta de la cámara de granallado

-Se proyectó el polvo de erosión, y luego de esto se cierra la válvula de la compuerta y se abre la cámara de granallado para así retirar la muestra del portaprobetas.

-Se le realizaron mediciones de peso, dureza y rugosidad superficial.

-Se realizaron así todas las restantes probetas, para luego finalmente poder calcular la Rata de Erosión (RE) y el Factor de Erosión Normalizado (FEN)

A través de estudios realizados se comprobó que no existe desgaste considerable del diámetro interno de la boquilla de la pistola, lo cual garantiza la uniformidad de los ensayos en cuanto a la velocidad de la partícula(30 m/s).

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; esta pérdida fue obtenida por medio de la utilización de una balanza analítica marca Metter Toledo, modelo AG 245, la cual nos permite obtener una precisión de 0.00001 gr.

Para la determinación de la Rata de Erosión (RE) se procedió a calcular la densidad de los recubrimientos mediante la ecuación N° 4)

$$\rho_{\text{recub}} = (P_{(\text{acero} + \text{recub})} - P_{\text{acero}}) / (\pi/4) * (\phi_{\text{recub}}^2 - \phi_{\text{acero}}^2) * L \quad (4)$$

Donde: ρ_{recub} = densidad del recubrimiento (gr/mm^3)
 $P_{\text{acero} + \text{recub}}$ = Peso de la muestra recubierta (gr)
 P_{acero} = Peso de la muestra sin recubrimiento (gr)
 ϕ_{recub} = Diámetro de la muestra con recubrimiento (mm)
 ϕ_{acero} = Diámetro de la muestra sin recubrimiento

Para cuantificar la resistencia erosiva, se calculó la fase de erosión (RE) de acuerdo a la ecuación N° 5:

$$RE = \Delta P / \rho * ma \quad (5)$$

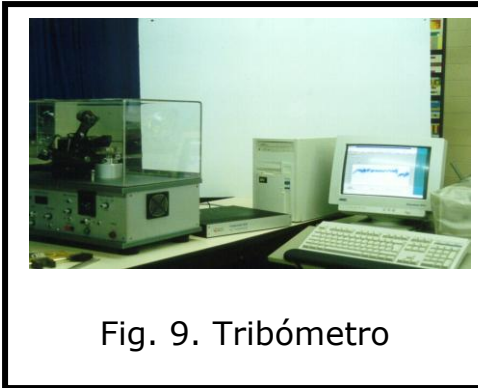
Donde:

RE = Rata de erosión (mm^3/gr)
 ΔP = Perdida de peso (gr)
 ρ = Densidad del material (gr/mm^3)
 ma = Masa del abrasivo (gr)

De igual manera se reporto el Factor de Erosión Normalizado (ecuación N° 6), el cual nos permite calcular la erosión del recubrimiento relativa a la erosión del material de referencia; estos valores nos permiten comparar estos resultados con otros resultados o estudios previos.

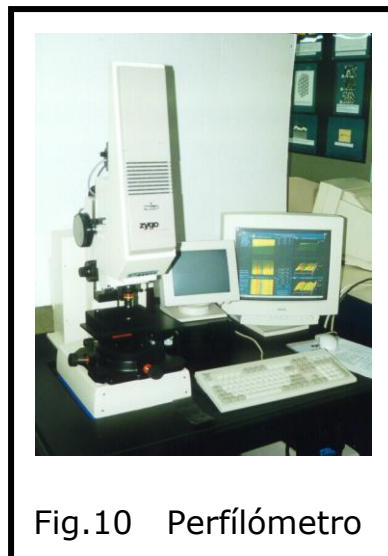
$$F.E.N. = (Re_{\text{control}} / Re_{\text{recubrimiento}}) \times 100 \quad (6)$$

2.4.2. Ensayo de Desgaste: El comportamiento tribológico de estos recubrimientos se estudió en base a pruebas de desgaste acelerado sin lubricante, los cuales se realizaron en un tribómetro, marca CSEM, modelo 2-115, tipo Bola sobre Disco (Pin on Disk), como se muestra en la Fig. 9.



Para este ensayo se utilizó como Pin una esfera de acero AISI 52100 y un diámetro de 5 mm. De igual manera los ensayos se realizaron bajo unas condiciones ambientales constante de temperatura 23°C y una humedad entre 60% y 70%. De igual manera la velocidad de desgaste fue de 10 cm/s y una carga de 5 N los cuales se mantuvieron constante para los 3 ensayos realizados (una muestra para cada tipo de recubrimiento); y una distancia 26528 vueltas.

Para la determinación del desgaste y la rugosidad de las muestras, se utilizó un perfilómetro de marca ZYGO, el cual se observa en la Fig. 10



2.5. DETERMINACION DE LA MICRODUREZA Y MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO (MEB)

Para realizar el estudio de los recubrimientos se tomo una (1) muestra de cada condición.

2.5.1 Preparación Metalográficas

El corte de las muestras se realizó en una cortadora de precisión

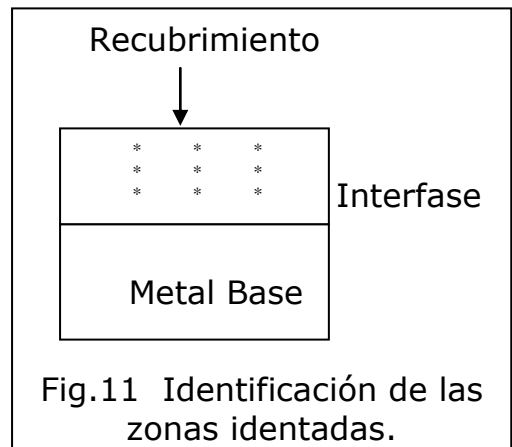
Pulido de las muestras:

Las muestras fueron preparadas metalográficamente en un equipo LECO VP-50 a 240 r.p.m. y siguiendo los siguientes pasos:

1. Lija de agua 400
2. Lija de agua 600
3. Alúmina de 5 μm en paño Chemomet (Buehler).
4. Alúmina de 0.05 μm en paño Chemomet (Buehler).

2.5.2. Microdureza:

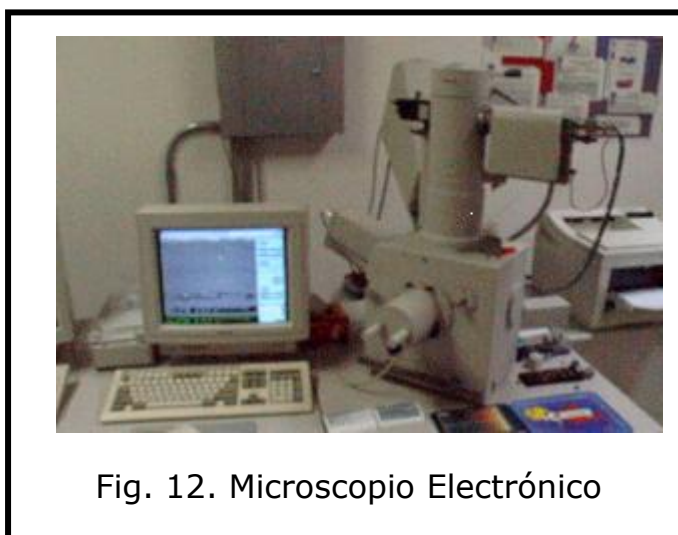
La microdureza Vickers se midió sobre la superficie transversal del recubrimiento; en una zona a lo largo de la interfase, en la zona media del recubrimiento y otra cercana a la superficie, estas zonas pueden ser identificadas con mayor claridad en la Fig 11. Para la medición de la microdureza se utilizó un durómetro Leitz Wetzlar



7520. Los resultados se reportaron por zonas y fueron el promedio de 9 indentaciones aplicadas con una carga de 300gr.

2.5.3. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB):

La microestructura y composición del recubrimiento fueron analizados mediante microscopía electrónica de barrido marca Philips, modelo XL 30. (Fig. 12)



La composición química fue determinada mediante el uso de energía dispersiva de rayos x(EDS) .

2.6. RUGOSIDAD

Para la medición de la rugosidad se utilizó un rugosímetro marca Mitutoyo Sj-201, el cual midió la Desviación Promedio Aritmética del Perfil (Ra), la cual consiste en el promedio aritmético de los valores absolutos de las distancias desde la línea media al perfil.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

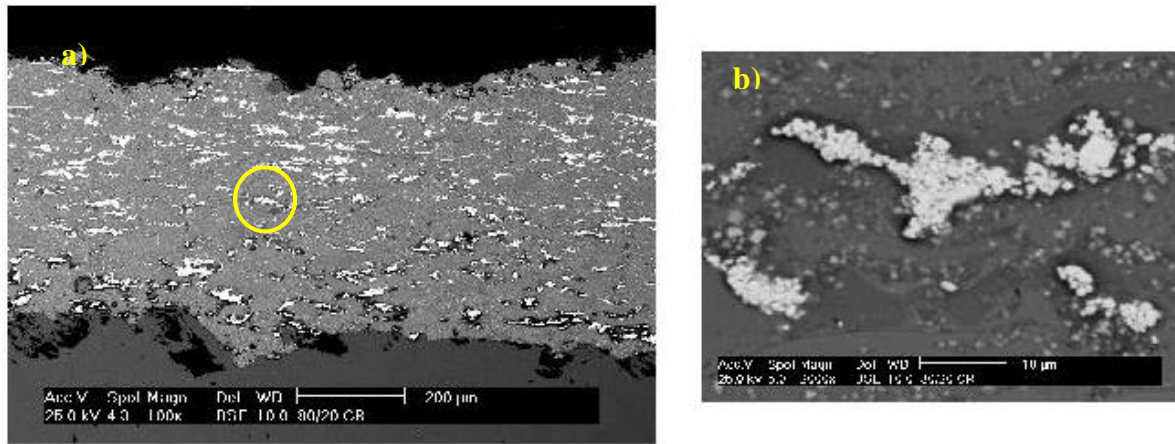
3.1. Resultados de la Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

A fin de caracterizar los recubrimientos obtenidos con cada material seleccionado estos fueron observados mediante un microscopio electrónico de barrido. Para las tres condiciones en estudio, se observó gran cantidad de cavidades en la zona de la interfase, producto del granallado sobre el substrato antes de ser rociado térmicamente.

En la Fig.13.a se puede apreciar como el recubrimiento MST presenta poca homogeneidad, ya que las fases duras no se encuentran bien distribuidas a lo largo del mismo, adicionalmente se puede apreciar que existe porosidad y mal acabado superficial. En el análisis químico general del recubrimiento (Fig. 13.c), se muestra que el elemento de mayor porcentaje fue el WC, con un tamaño de partícula aproximado de 5 μ m, tal cual se muestra en el detalle (Fig. 13.b).

Con el tratamiento térmico se logró un mejor acabado superficial, una disminución de la porosidad y se apreció una homogeneización del WC a lo largo de todo el recubrimiento (Fig.14.a), manteniéndose los porcentajes de los elementos similares a los de la mezcla sin tratamiento térmico (Fig. 14.c).

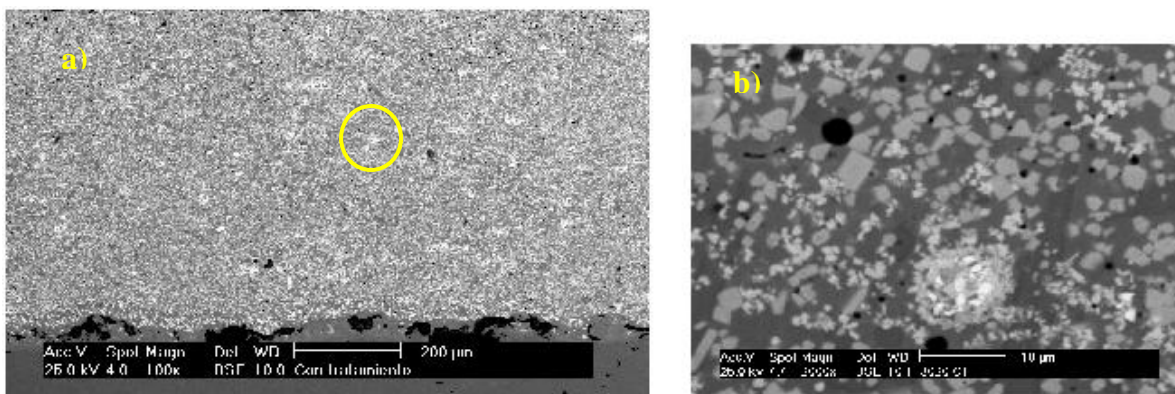
En la parte inferior de la Fig. 14.b (detalle). Se observó una disminución del tamaño de partícula debido al tratamiento térmico, en relación con la muestra recubierta sin tratamiento térmico (MST). Esto podría ser debido a la carburización del WC como ha sido reportado por otros autores.



c)

Elemento	% Wt	% At	Relación K
WM	44.73	20.04	0.2807
CrK	12.11	19.19	0.1183
FeK	3.04	4.48	0.0320
CoK	1.44	2.02	0.0145
NiK	38.67	54.27	0.4163
Total	100	100	

Fig. 13 a. Microestructura MST; b. Detalle en circulo; c. Composición Química(EDS).



c)

Elemento	% Wt	% At	Relación K
WM	44.24	19.73	0.2764
CrK	11.78	18.57	0.1152
FeK	3.80	5.58	0.0400
CoK	1.29	1.80	0.0130
NiK	54.32	54.32	0.4177
Total	100	100	

Fig. 14 a. Microestructura MCT; b. Detalle en circulo; c. Composición Química(EDS).

En el recubrimiento obtenido con cermets (Fig.15.a) se puede apreciar un mal acabado superficial y una distribución uniforme de las partículas de WC; además se puede evidenciar un incremento de la porosidad y un aumento del porcentaje de WC, comparado con las muestras estudiadas anteriormente, Figs. 15.b. y 15.c. respectivamente.

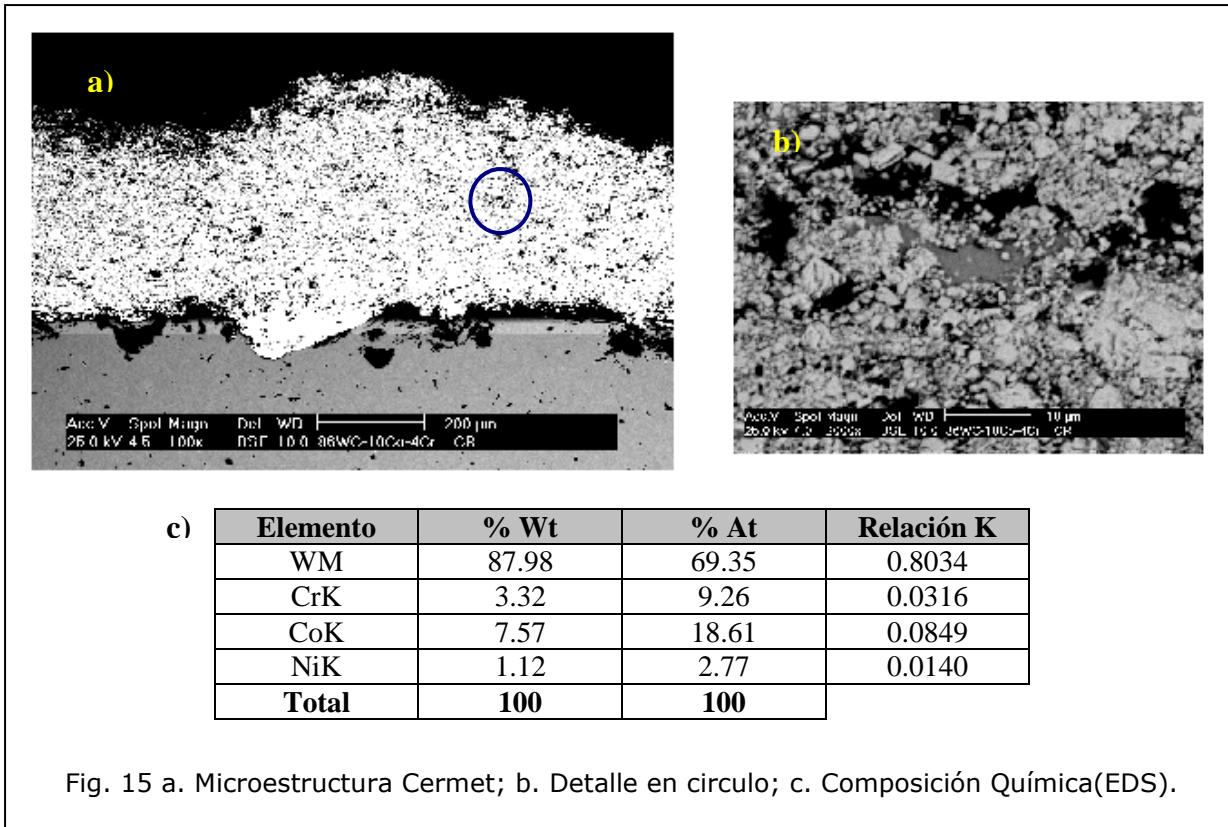


Fig. 15 a. Microestructura Cermet; b. Detalle en círculo; c. Composición Química(EDS).

3.2. Microdureza.

La microdureza se midió de acuerdo a lo establecido en el procedimiento experimental. Los valores de la determinación de la microdureza pueden ser observados en la Tabla 6.

Tabla 6. Valores Promedio de Microdureza

Material	Microdureza Promedio (HV₃₀₀)
Cermet	1072.17
MST	674.25
MCT	647.22
Material Base	181.67

Se observa que la microdureza de los recubrimientos con y sin tratamiento térmico es similar, esto nos indica que el tratamiento térmico no logró mejorar la dureza del recubrimiento.

En el recubrimiento WC-10%Co-4%Cr se observó que la microdureza era mayor que en los otros recubrimientos, ya que presenta mayor cantidad de partículas endurecedoras carburos de tungsteno (WC) los cuales se encuentran bien distribuidas.

3.3. EROSION.

Para el cálculo de la tasa de erosión se obtuvieron los siguientes resultados de pérdida de peso (tabla 7) los cuales fueron graficados en la Fig. 16.

Tabla 7. Datos Pérdida de Peso Promedio

Angulo Ataque	Pérdidas de peso promedio (gr)			
	MCT	CER	MST	Desviación
30°	0.002412	0.005337	0.00005	Max
	0.007258	0.006043	0.00787	Promedio
	0.004678	0.003693	0.00259	Min
45°	0.003717	0.001855	0.000205	Max
	0.010023	0.008395	0.005935	Promedio
	0.005613	0.000385	0.000165	Min
60°	0.000722	0.00015	0.000195	Max
	0.012638	0.00981	0.007745	Promedio
	0.007438	0.00018	0.001325	Min

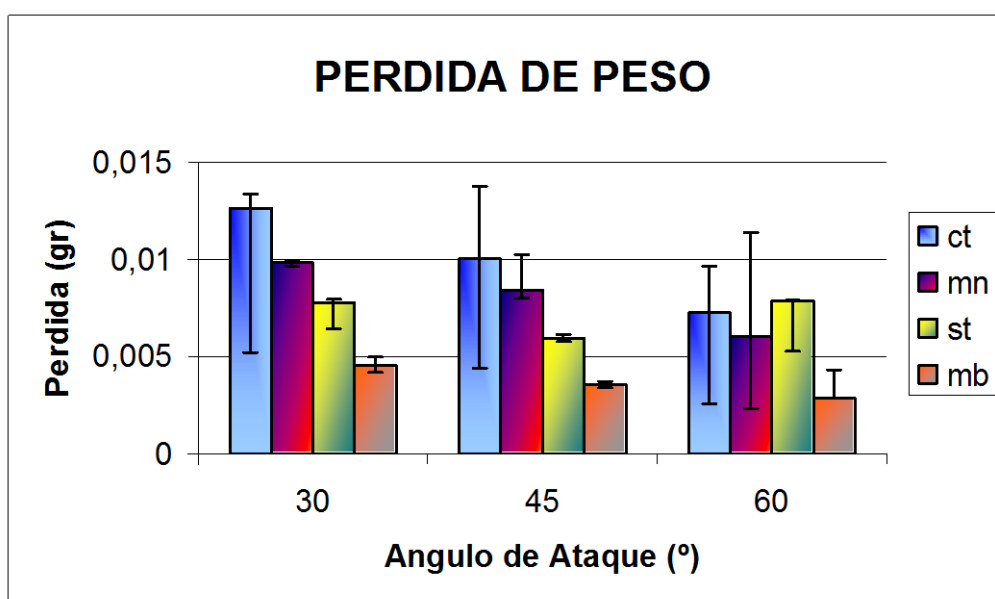


Fig. 16. Valores de Pérdida de Peso Promedio

Con el objeto de visualizar la resistencia a la erosión, por medio de la variación de los ángulos de ataque, los resultados de la Tabla 8, fueron graficados como se muestra en la Fig. 17

Tabla.8. Rata de Erosión

Angulo Ataque	Nº Probeta	Rata de Erosión (10^{-4} mm ³ /gr)			
		MST	MCT	CER	MB
30°	1	11.4286	14.3075	14.0999	7.3108
	2	15.5411	12.3288	9.0003	7.3082
	3	18.9827	14.1553	10.9760	8.9861
	4	16.4721	14.8076	8.9328	3.8411
	5	17.1429	13.1333	17.0213	11.3123
	Promedio	17.0361	13.7465	10.2043	7.3134
45°	1	12.4892	9.5894	16.9875	7.1636
	2	13.0952	29.2890	17.3083	11.4892
	3	12.5110	18.4170	10.8409	5.0800
	4	13.2900	29.8761	15.3495	8.1521
	5	9.0260	33.1376	13.5258	5.6050
	Promedio	12.8463	22.2439	14.1675	7.1532
60°	1	18.3766	29.0498	16.8186	7.0806
	2	13.8961	29.1585	16.5147	7.0683
	3	16.3203	35.9861	13.6272	7.0875
	4	15.1732	15.7208	16.6667	7.0583
	5	17.1861	11.3068	16.2614	7.0558
	Promedio	16.7641	27.4799	16.5653	7.0585

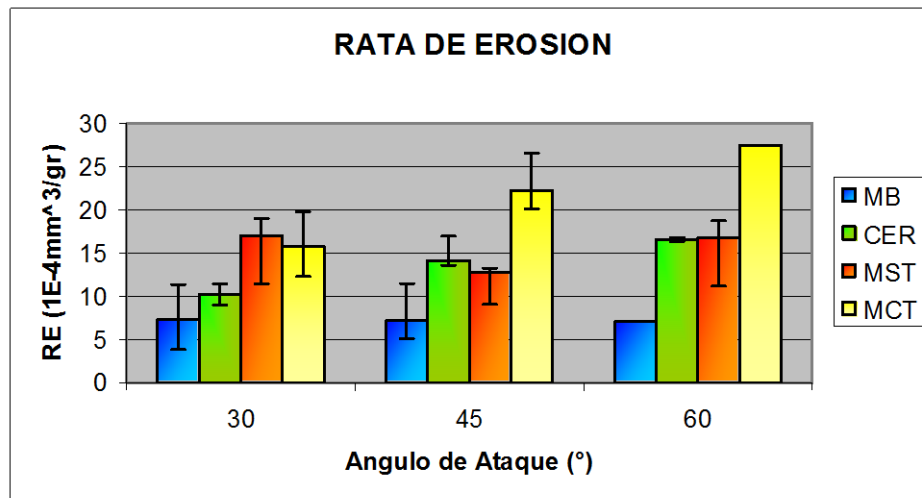


Fig. 17. Valores de la Rata de Erosión promedio

En la Fig. 17 se puede observar que a mayor ángulo de ataque la rata de erosión disminuye, lo cual es característico de materiales frágiles aunque el recubrimiento sin tratamiento térmico para el ángulo de 60° aumenta. Así como también se puede evidenciar que el recubrimiento con tratamiento térmico presenta la mayor rata erosiva exceptuando para un ángulo de ataque de 60°, en donde la mayor rata erosiva la presenta el recubrimiento sin tratamiento térmico.

Comparando los Factores de Erosión Normalizados, las tres condiciones presentan un comportamiento similar al del Acero en la orientación de 60° que en los otros ángulos (Fig. 18).

Tabla 9. Factor de Erosión Normalizado

Angulo Ataque	N° Probeta	Factor de Erosión Normalizado (%)		
		MST	MCT	CER
30°	1	52.78	42.16	42.78
	2	38.81	48.92	67.02
	3	31.77	42.61	54.95
	4	36.62	40.73	67.52
	5	35.18	45.93	35.44
	Promedio	35.40	38.22	59.11
45°	1	56.05	73.01	41.21
	2	53.46	23.9	40.44
	3	55.95	38.01	64.57
	4	52.67	23.43	45.61
	5	77.56	21.13	51.76
	Promedio	54.49	31.47	49.41
60°	1	45.36	28.69	49.56
	2	59.98	28.58	50.47
	3	51.07	23.16	61.16
	4	54.93	53.02	50.01
	5	48.50	73.71	51.26
	Promedio	49.72	30.33	50.31

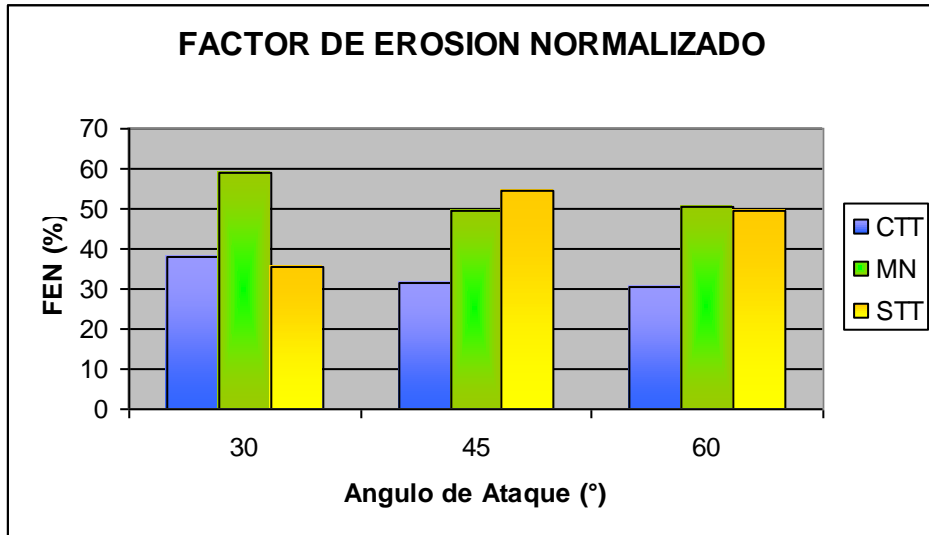


Fig. 18. Valor de Factor de Erosión Normalizado promedio

Para poder visualizar el comportamiento erosivo de cada condición respecto al ángulo de ataque, se baso en su morfología.

Se puede observar como la erosión ha modificado la superficie del recubrimiento; esto debido al choque del abrasivo sobre la superficie.

Para el caso MST (Fig.19) se observa que para un ángulo de 30° la superficie presenta un aplastamiento, lo cual es debido a la deformación y pérdida de material con respecto a la superficie inicial. Para el caso de 45° la superficie presenta mayor rugosidad, lo cual nos indica que la erosión para este ángulo fue menor. En el caso de 60° la figura nos presenta un nuevo aumento debido a que las partículas al impactar sobre la superficie en esta dirección provoca que las superficies más salientes sean eliminadas.

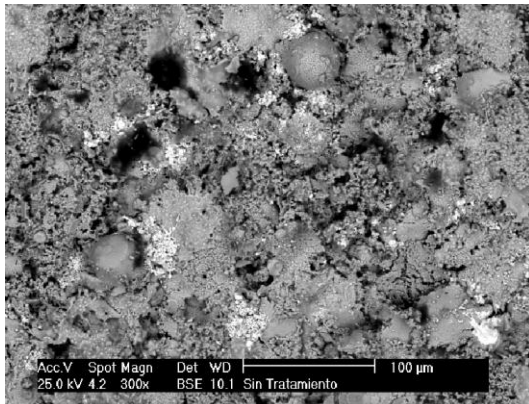


Fig.19.a. Muestra sin erosionar (300X)

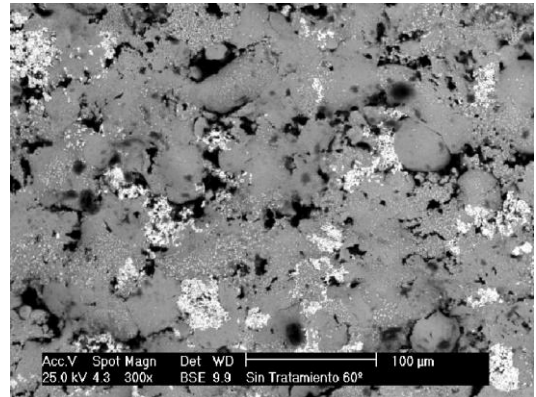


Fig.19.b. Muestra erosionada 30° (300X)

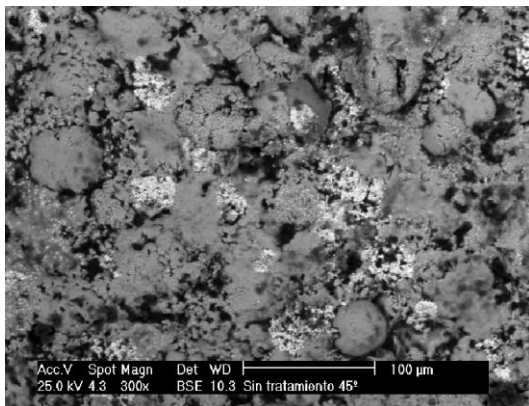


Fig. 19.c. Muestra erosionada 45° (300X)

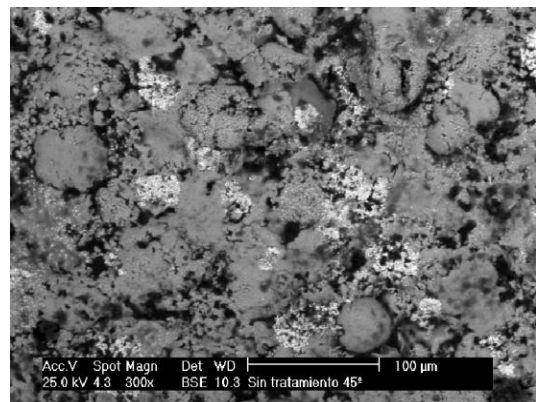


Fig.19.d. Muestra erosionada 60° (300X)

Para el caso de MCT, (Fig. 20) se observa como la superficie inicial del recubrimiento presenta menor rugosidad comparada con la superficie MST, esto debido al tratamiento térmico. Con respecto a la superficie que se presenta para el ángulo de 30° se observan entalladuras superficiales, las cuales fueron causadas por el abrasivo, produciendo en su mayoría deformación, más no pérdida de material. A continuación se presenta la superficie a 45° donde se observa con mayor nitidez, lo cual nos da a suponer que existió mayor cantidad de pérdida de material lo cual fue corroborado con los datos obtenidos anteriormente. Para el

ángulo de 60° estas entalladuras presentan mayor profundidad debido no solo a la deformación sino también a la pérdida de material.

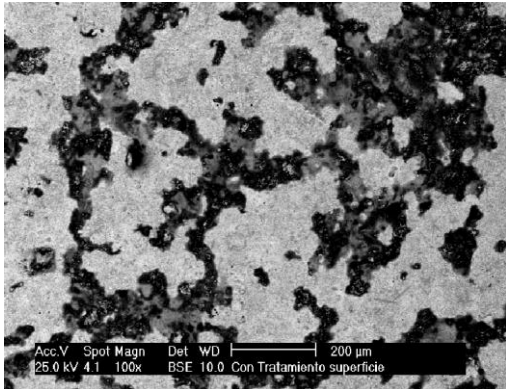


Fig.20.a. Muestra sin erosionar (300X)

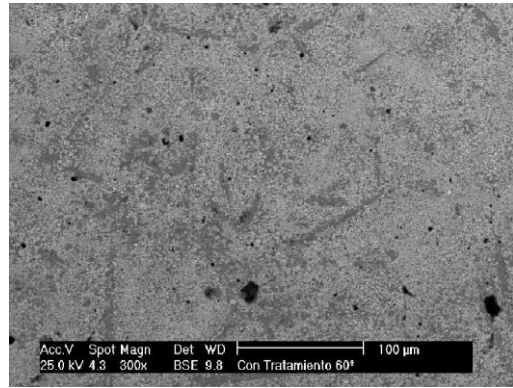


Fig.20.b. Muestra erosionada 30° (300X)

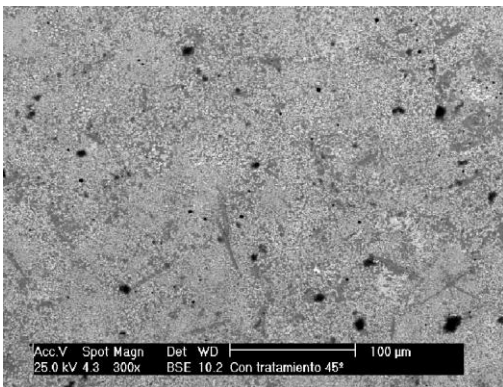


Fig. 20.c. Muestra erosionada 45° (300X)

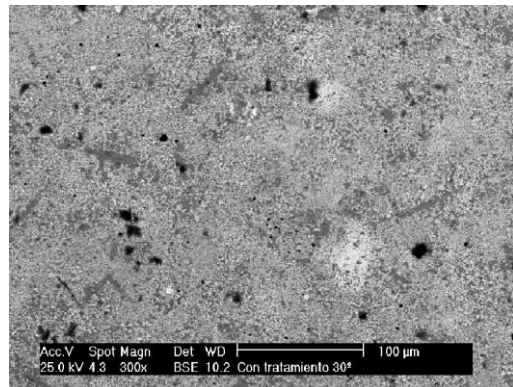


Fig.20.d. Muestra erosionada 60° (300X)

El recubrimiento Cermet (Fig.21) tiene un comportamiento similar al anterior (MCT), ya que para un ángulo de 30° se observa que la superficie no ha sufrido grandes cambios, pero en cambio para un

ángulo de 45° esta superficie presenta un aumento en la deformación de su superficie lo cual se aprecia ya que muchas gotas iniciales han desaparecido, lo cual es producto de deformación y en algunos casos pérdida de material. En el caso de 60° se presenta claramente una mayor erosión, lo cual es debido al ángulo de impacto de las partículas que ocasionaron la deformación inicial del material y luego la fractura de este.

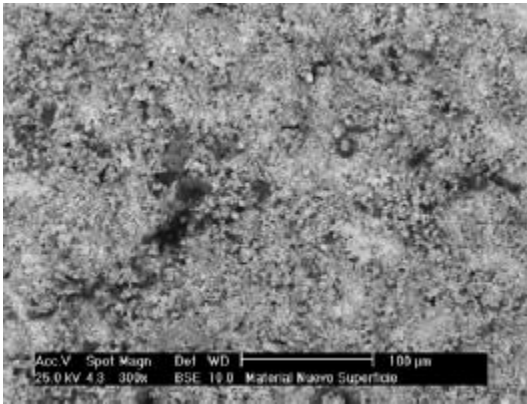


Fig.21.a. Muestra sin erosionar (300X)

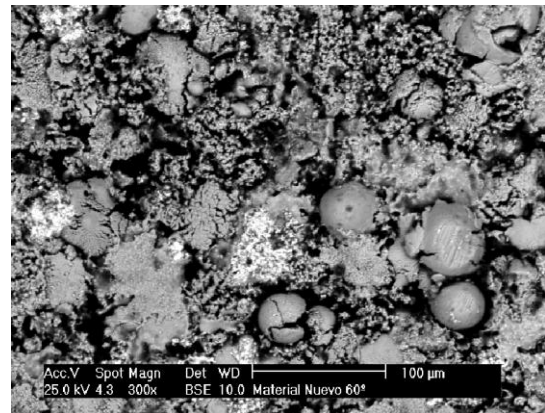


Fig.21.b. Muestra erosionada 30° (300X)

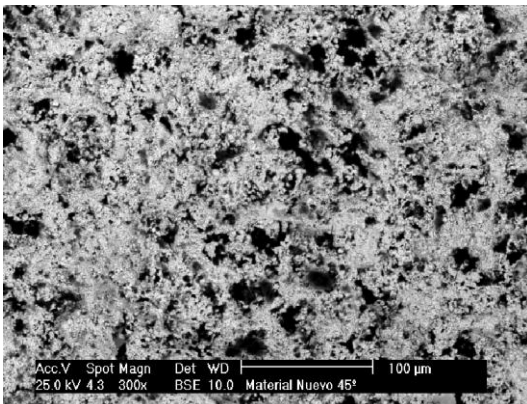


Fig. 21.c. Muestra erosionada 45° (300X)

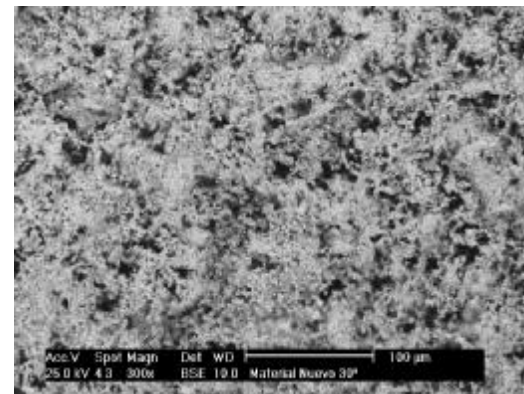


Fig.21.d. Muestra erosionada 60° (300X)

3.4. ENSAYO DE DESGASTE DESLIZANTE

El coeficiente de fricción tiende a aumentar hasta llegar a un valor máximo donde posteriormente desciende hasta permanecer constante. Esta situación se debe según J.M. Castaño y colaboradores (1998) a que en los primeros vueltas del ensayo las dos superficies hacen contacto en las picos de unas pocas asperezas. A medida que el número de vueltas aumenta las asperezas que están en contacto se deforman produciendo un aumento en el área de contacto entre ellas y permitiendo al mismo tiempo a otras asperezas que hagan contacto. Se presenta lo que se conoce como "running-in" o estado transitorio el cual se caracteriza por cambios muy significativos del coeficiente de fricción seguido por un estado estacionario en donde el coeficiente de fricción permanece constante sin sufrir bruscas variaciones.

Una vez alcanzado el valor máximo del coeficiente de fricción uno de los dos materiales del par tribológico comienza a sufrir lo que es conocido como un desgaste adhesivo. Esta forma de desgaste ocurre cuando dos superficies están deslizando una sobre otra y los fragmentos son expulsados de una superficie para adherirse a la otra, que en nuestro caso fue del pin al disco.

Una vez formada esta película adherida al recubrimiento, el coeficiente de fricción disminuye debido a que el pin está deslizando ahora sobre el acero y no directamente sobre el recubrimiento, como se observa en la Fig. 22.

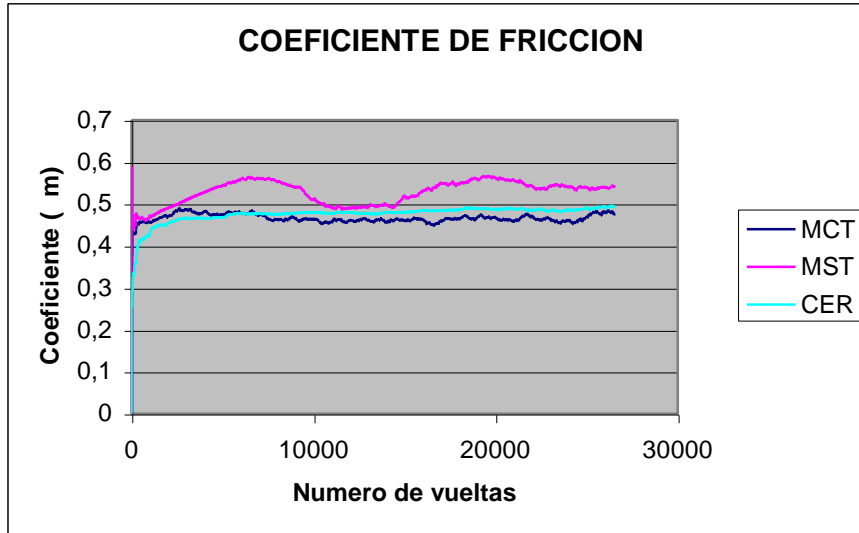


Fig. 22. Coeficiente de Fricción

Como se observa en el gráfico, el coeficiente de fricción no se mantiene constante sino comienza a aumentar progresivamente, esto se debe a que a medida que se genera la película adherida llega un momento en que el material que ha sido depositado sobre el recubrimiento sufre un desgaste por fatiga, el cual es el resultante del esfuerzo mecánico repetitivo de un cuerpo rodante sobre una superficie en contacto.

Es por ello que el material comienza a desprenderse generando residuos conocidos como "debris", cuando esto ocurre el contacto entre el pin y el recubrimiento es en las mismas condiciones que al inicio del ensayo y como consecuencia el coeficiente de fricción aumenta progresivamente hasta llegar a un valor promedio. Con la ayuda del perfilómetro se ha podido observar como es la superficie de la muestra antes de realizarle el ensayo de desgaste (Fig. 23); estas superficies presentan altos valores de rugosidad provenientes de la aplicación del rociado térmico.

En la Fig. (24 a,b,c) es de notar como la superficie ha sufrido cambios en la rugosidad debido al paso del pin; ya que este realiza un proceso tanto de aplastamiento de los picos mas altos como deposición de material del mismo. En la parte inferior de la Fig. (24 d) se observa como el pin ha sufrido desgaste del tipo abrasivo, lo cual se evidencia en los surcos de su superficie.

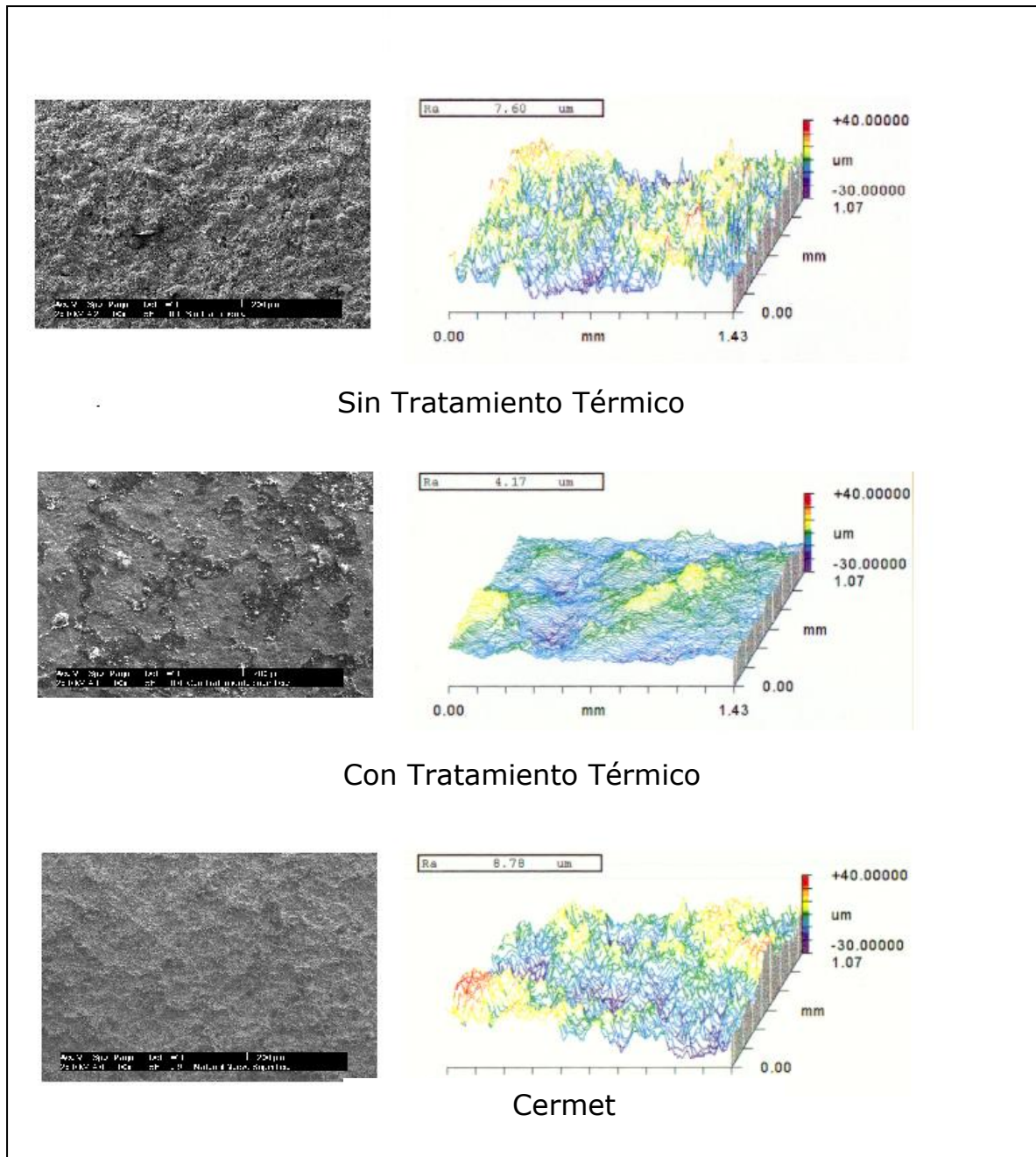


Fig. 23. Morfología y Perfilometría de las Superficies

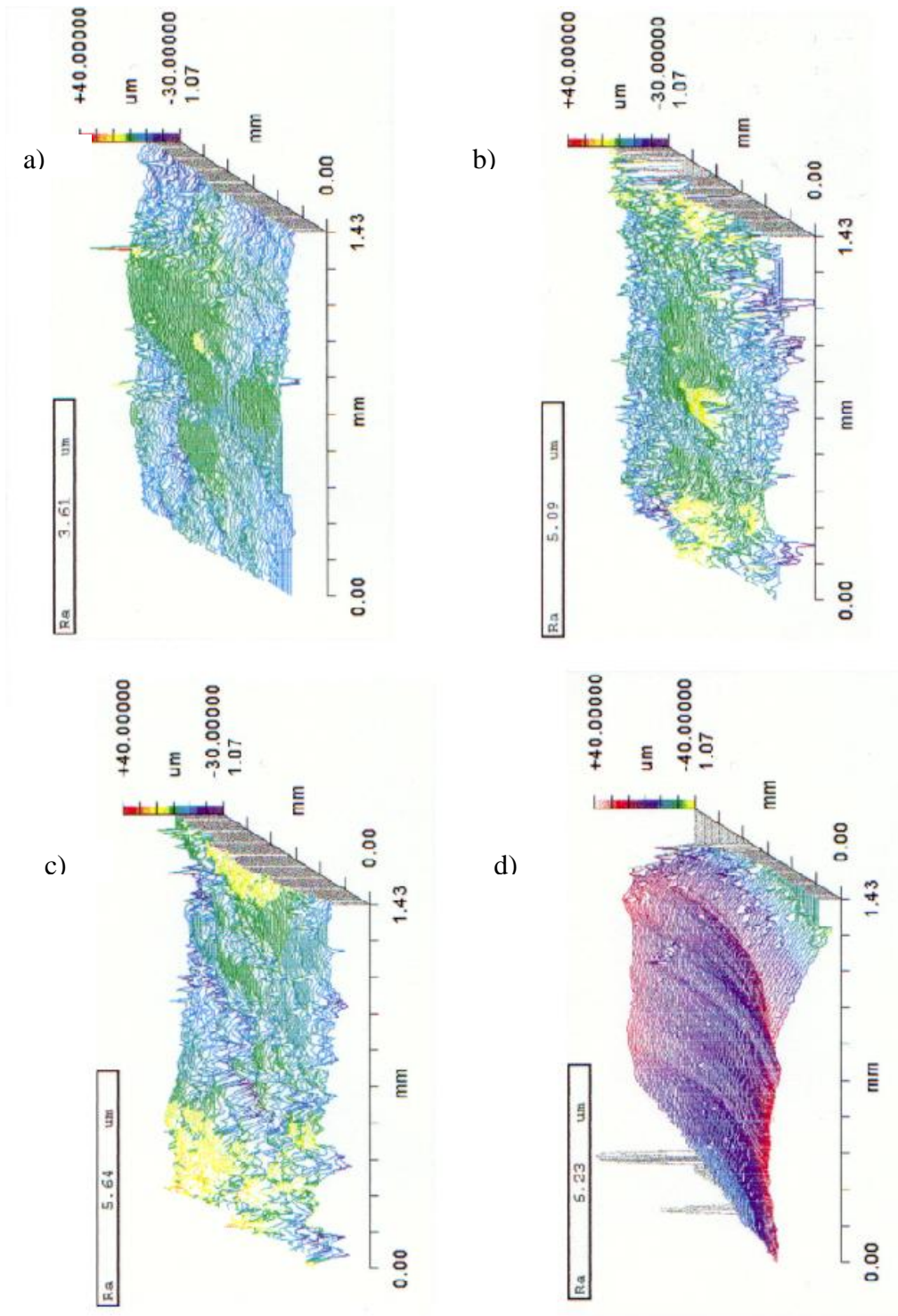


Fig. 24 Morfología y Perfilometría de las huellas
a.. MCT b.CER c. MST d. Pin

Esta deposición de material del pin se puede apreciar mediante el análisis puntual realizado a cada condición, el cual indica la presencia de hierro en la superficie.

Esta deposición de material ocurrió para las tres condiciones, ya que la dureza de los recubrimientos es mayor a la del pin, lo que hace que este se desgaste.

En la Fig. 25 se observa el detalle de la huella producida por el paso de pin. En esta figura se destacan tres zonas importantes en las cuales se pueden observar tanto el recubrimiento como material depositado. En el círculo de color azul se observa por medio del EDS que la zona gris oscura representa el material depositado por el pin, ya que su composición es de óxido de hierro. Para el círculo de color amarillo se aprecia una zona de color blanca, la cual está formada por carburo de tungsteno, el cual proviene del recubrimiento.

El círculo rojo representa una zona de color gris clara la cual se observa mediante el EDS que el elemento de mayor presencia es el níquel proveniente este del Colmonoy.

Para la Fig. 26 se aprecia que existen las mismas zonas nombradas anteriormente, con la diferencia que en la zona gris clara se presenta una mayor cantidad de hierro presente, debido a la deposición del pin sobre el recubrimiento. También se observa con claridad la existencia de grietas en la parte superficial del material depositado, el cual es producto de constante paso del pin sobre la zona provocando fatiga, lo cual ocasiona luego desprendimiento del mismo.

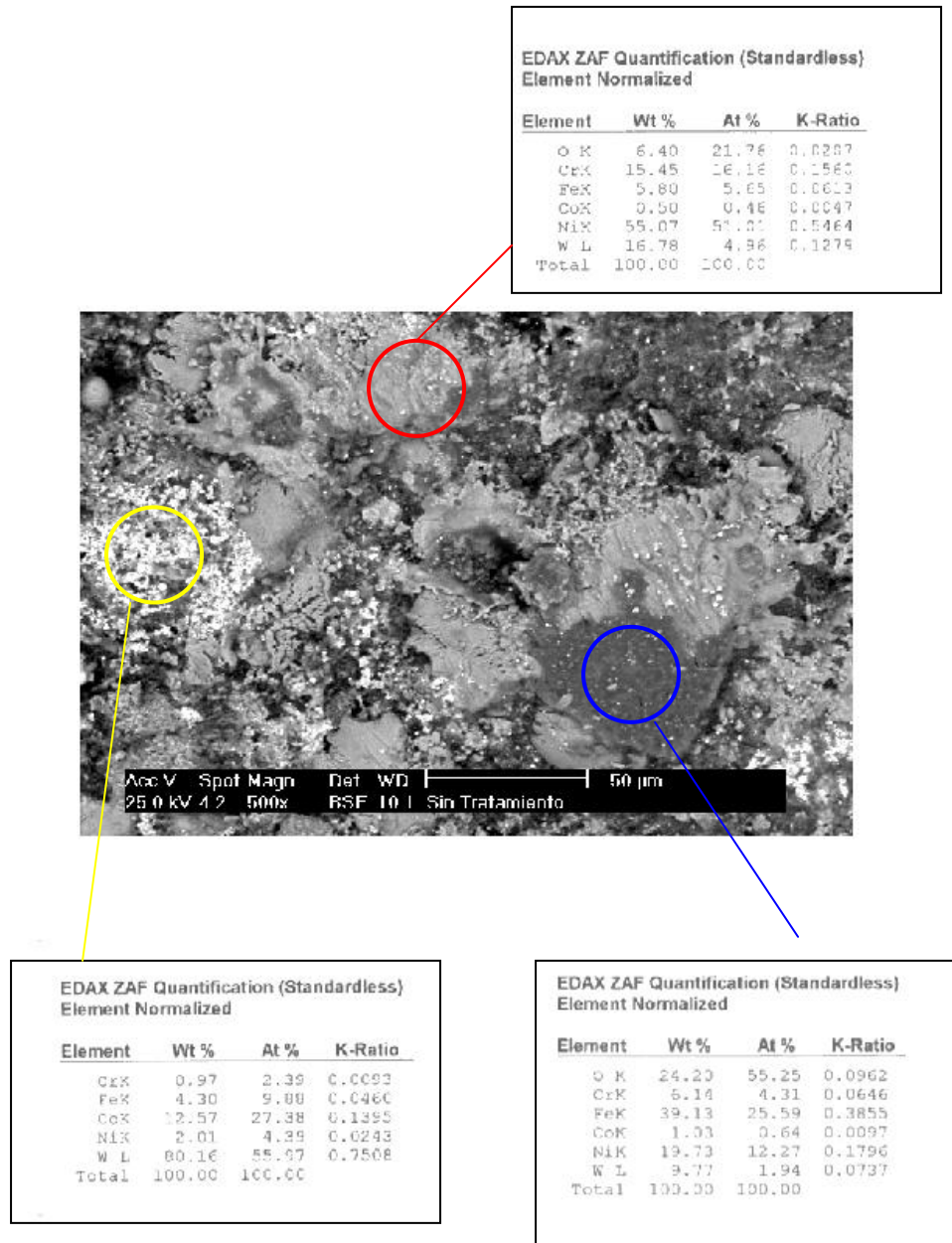


Fig. 25 Superficie de Desgaste MST

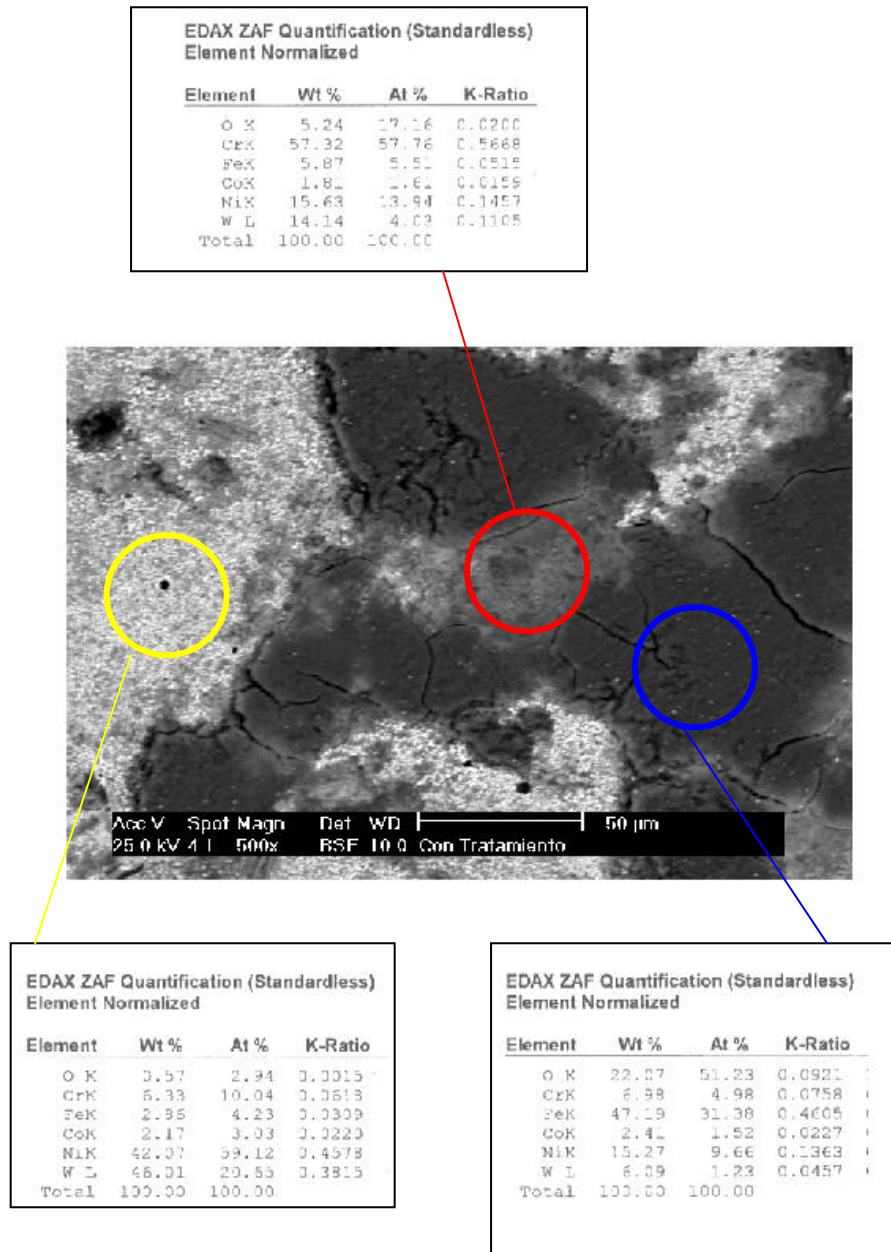


Fig. 26 Superficie de Desgaste MCT

Para el caso de la Fig. 27. se observa una gran cantidad de material ubicado a un lado de la huella, los cuales son llamados "debris", lo cual es producto del desprendimiento de material de pin sobre el recubrimiento.

De igual manera existen tres zonas claramente representadas, en donde la zona blanca se aprecia la cantidad de carburo de tungsteno en mayor presencia, y cobalto como segundo elemento predominante, los cuales provienen del recubrimiento.

Para la zona de color gris claro y gris oscuro se observa que el elemento más representativo es el hierro, el cual proviene de la deposición del material del pin sobre la superficie.

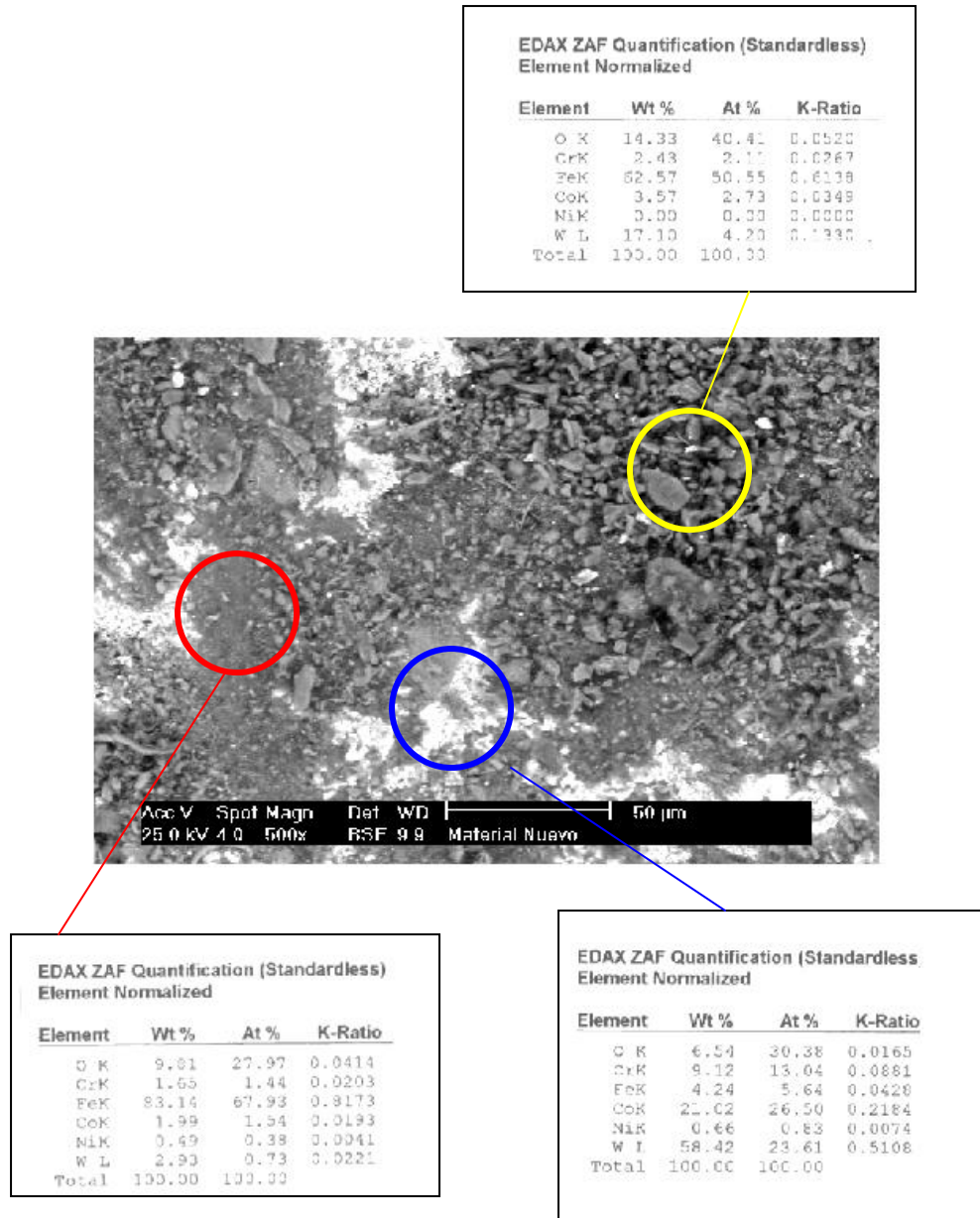


Fig. 27 Análisis puntual de la huella del recubrimiento CER

4. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

El tratamiento térmico no mejoró la dureza del recubrimiento 80% (Wc-12%Co)+ 20% Colmonoy lo cual pudo deberse a la descarburización y afinamiento de las partículas de segunda fase.

La mejor resistencia al desgaste erosivo lo obtuvo el recubrimiento depositado con Cermet (WC-10%Co-4%Cr) para el ángulo de 30 grados.

Todos los recubrimientos estudiados mostraron un buen comportamiento al desgaste deslizante siendo el recubrimiento depositado con Cermet (WC-10%Co-4%Cr) el mejor.

Para los recubrimientos estudiados en este trabajo no pudo establecerse una relación entre el acabado superficial y la resistencia al desgaste.

4.2. Recomendaciones

Mejorar el control de los parámetros para la aplicación del tratamiento térmico por llama, con la finalidad de no sobre pasar la temperatura adecuada.

Realizar el granallado de las muestras con una alúmina de menor tamaño, para así evitar cavidades en la interfase.

Aumentar el numero de muestras a ensayar, para así tener valores más confiables.

Realizar una optimización del equipo de desgaste, para obtener una mayor precisión en los resultados.

Para ampliar los conocimientos referentes al fenómeno del desgaste (Pin on Disk) se recomienda la realización de pruebas, variando los parámetros de ensayos, tales como: radio, distancia y carga aplicada.

5. REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

1. ASTM G76-83; "Standard Practices for Conducting Erosion Test by Solid Particle Impingement Using Gas Jets".
2. BLANN G.A.,(1994) "The Effects of Thermosetting and Castable Encapsulation Methods on the Metallographic Preparation of Ceramic Thermally Sprayed Coating A Technical Note", Journal Thermal Spray Technology.
3. CADENAS P. y MACHADO S, (1992), " Evaluación del desgaste por rodadura de materiales rociados térmicamente usados para cigüeñales de motores fuera de borda". Tesis. Caracas. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.
4. CASTAÑO J.M., VIEIRA M.T., (1998), "The Influence of the Interstitial Element on Tribological Behaviour of Tungsten Coatings", Surface & Coatings Technology.
5. CHANG JIU LI and A. OHMOVI, Y. HARADA. (1996), "Effect of Powder Structure on the Structure of Thermally Sprayed WC-CO Coatings", Journal of Materials Science 31.
6. FERVEL V., NORMAND B., LIAO H., CODDET C., BÊCHE E. and BERJOAN R.,(1998), "Friction and Wear Mechanisms of Thermally Sprayed Ceramic and Cermet Coatings", Surface & Coatings Technology.

7. GARCIA E. y REDDEN E. (1998) "Influencia del Tratamiento Térmico sobre la resistencia a la erosión de un acero 1020 termorociado con aleación base níquel por la técnica High Velocity Oxy-Fuel". Tesis. Caracas: Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela Mecánica.
8. GIL L. y MARTINEZ M.; "Efecto del tratamiento de densificación sobre la resistencia a la corrosión de recubrimientos de NiCrWBSi obtenidos por termorociado HVOF.
9. KOSEL T, (1992),"Solid Particle Erosion", ASM Handbook, 6ta edition, Friction, Lubrication and Wear Technology. ASM International, Volume 18.
10. LIRA J., (1993), " Estudio de Recubrimientos antidesgaste a base níquel", Tesis. Caracas. Universidad Simón Bolívar.
11. MALAVER I. y BARRERA L. (1995), "Evaluación de la resistencia al desgaste por Erosión de Recubrimientos Termorociados" Tesis. Caracas. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela Mecánica.
12. MOSKOWITZ L.N., (1992) " Application of HVOF Thermal Spraying to Solved Corrosion Problems in the Petroleum Industry", Proceeding of the International Thermal Spray Conference & Exposition, Orlando, Florida U.S.A.

13. NERZ J.E. y colaboradores, (1991) "Reduction of Solid Particle Erosion by using HVOF and HEP coating deposition methods", Proceedings of the Fourth National Thermal Spray Conference. Pittsburg, P.A. USA.
14. SARKAR B. (1990), "Desgaste de Materiales" 1era edición, Editorial Lumusa
15. SMITH M.I., Mc GOFFIN D.T, HENFLING J.A. and LENLING W.B., (1991), "A Companson of Techniques for the Metallographic Preparation of Thermal Sprayed Samples", Proceedings of the 4th National Thermal Sprayed Conference Edit ASM International.
16. TU J. y colaboradores, (1991), " Erosion Behaviour of Thermally Sprayed Ni-WC coating at High Temperature.
17. WANSTRAND O., LARSSON M. and HEDENQUIST P., (1999) "Mechanical and Tribological Evaluation of PVD WC/C Coatings", Surface & Coatings Technology.

6. ANEXOS

1. VALORES DE PERDIDA DE PESO

Angulo Ataque	Nº Probeta	Perdida de peso (gr)			
		CER	MCT	MST	MB
30°	1	0.00835	0.00658	0.00528	0.00510
	2	0.00533	0.00567	0.00718	0.00432
	3	0.00650	0.00651	0.00877	0.00258
	4	0.00529	0.00681	0.00761	0.00210
	5	0.01008	0.00604	0.00792	0.00243
45°	1	0.01006	0.00441	0.00577	0.00489
	2	0.01025	0.01347	0.00605	0.00349
	3	0.00642	0.00847	0.00578	0.00339
	4	0.00909	0.01374	0.00614	0.00372
	5	0.00801	0.01524	0.00417	0.00364
60°	1	0.00996	0.01336	0.00849	0.00480
	2	0.00978	0.01341	0.00642	0.00420
	3	0.00807	0.01655	0.00754	0.00261
	4	0.00987	0.00723	0.00701	0.00477
	5	0.00963	0.00520	0.00794	0.00420

2. VALORES DE DENSIDADES

MATERIAL	DENSIDAD (10^{-3}gr/mm^3)
MST	6.60
MCT	6.57
CERMET	8.46
MB	7.81

3. VALORES DE RUGOSIDAD

Material	Rugosidad (Ra)			
	1	2	3	4
Cermet	5.54	3.78	6.03	5.64
Con Tratamiento	1.98	1.73	1.44	1.66
Sin Tratamiento	6.55	5.51	7.13	5.72

4. VALORES DE MICRODUREZA

Material	Microdureza (HV_{300})								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Cermet	966	1325	1390	1051	1051	1390	823	763	890
Con Tratamiento	481	511	823	890	763	579	406	966	406
Sin Tratamiento	710	579	763	662	690	662	618	710	385

5. PERDIDA DE PESO DE LAS MUESTRAS ANTES Y DESPUES DEL ENSAYO DE EROSION

Angulo Ataque	N° Probeta	Antes del Ensayo				Después del Ensayo			
		CER	MCT	MST	MB	CER	MCT	MST	MB
30°	1	12.37332	11.21654	11.54243	7.38634	12.36497	11.20996	11.53715	7.38124
	2	12.63261	11.28517	11.45236	7.36933	12.62728	11.27950	11.44518	7.36501
	3	12.70489	11.47673	11.48860	7.27730	12.69839	11.47022	11.47983	7.27472
	4	11.46648	11.55573	11.83513	7.31497	11.46249	11.54892	11.82752	7.31287
	5	12.79398	11.50981	11.32156	7.31988	12.78260	11.50377	11.31364	7.38945
45°	1	12.05487	11.49182	11.38384	7.35850	12.04481	11.48741	11.37807	7.35361
	2	12.91539	11.54323	11.18051	7.31461	12.90514	11.52976	11.17446	7.31112
	3	12.96976	11.37849	11.48090	7.38232	12.96118	11.36976	11.47512	7.37893
	4	12.42082	11.48089	11.19128	7.36870	12.41173	11.46715	11.18514	7.36498
	5	12.32084	11.30634	11.49778	7.40926	12.31283	11.29110	11.49361	7.40562
60°	1	12.60519	11.43653	11.23449	7.18621	12.59523	11.42317	11.22600	7.18141
	2	13.01878	11.61006	11.53580	7.33490	13.00900	11.59665	11.52938	7.33070
	3	12.08789	11.44813	11.50941	7.40234	12.07982	11.43158	11.50187	7.39973
	4	12.12544	11.57055	11.43735	7.33352	12.11557	11.56332	11.43034	7.32890
	5	12.28089	11.51452	11.26549	7.41865	12.27126	11.50932	11.25755	7.41440

