

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE
PIEZAS SINTERIZADAS Y PIEZAS RECUBIERTAS POR ROCIADO
TÉRMICO HVOF.**

*TUTOR ACADÉMICO:
Prof. ING. MARIA RODRÍGUEZ DE PRATO*

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

*DIAZ N., SIUL J.
FRANCO S., ADOLFO A.*

*PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO MECÁNICO.*

CARACAS, 2.002.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE
PIEZAS SINTERIZADAS Y PIEZAS RECUBIERTAS POR ROCIADO
TÉRMICO HVOF.**

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

DIAZ N., SIUL J.
FRANCO S., ADOLFO A.

PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO.

CARACAS, 2.002.

DEDICATORIA

A mis padres por su gran apoyo, ayuda y motivación a lo largo de mi carrera.

A mi abuela por su gran estímulo e incentivo para mi formación como profesional.

A mi abuelo por ser mi orgullo como persona y ejemplo a seguir.

A todas aquellas personas que de una u otra forma han contribuido para formarme como futuro ingeniero.

Siul J., Díaz N.

A Dios todo poderoso.

A mis padres por apoyarme y creer en mi.

A mis hermanos.

A Sady Ovalles por su apoyo incondicional.

A todos mis amigos.

A todos aquellos que de una u otra forma han hecho de esto una realidad.

Adolfo A., Franco S.

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestros más sinceros agradecimientos:

- ✍ A nuestra Tutora: **Prof. María de los Ángeles Rodríguez de Prato**, por su gran apoyo y orientación durante la realización de éste Trabajo Especial de Grado.
- ✍ Al Prof. Ing. Crisanto Villalobos por su invalorable ayuda, colaboración y asesoría en la realización de nuestro trabajo.
- ✍ Al Prof. Freddy J. Arenas, por su apoyo en la elaboración del presente trabajo.
- ✍ A la Escuela de Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la UCV, en especial al Dpto. de Tecnología y Producción.
- ✍ Al Laboratorio de Microscopia Electrónica del Instituto Universitario de Tecnología “Dr. Federico Rivero Palacios”.
- ✍ A la Empresa Plasmatec Ingenieros S.A., y al Ing. Andrea Scagni por brindarnos su ayuda en la aplicación de los recubrimientos.
- ✍ A la Empresa Rias C.A., por su gran aporte del material (sílice) necesario para la realización de los ensayos abrasivos.
- ✍ Al Ing. Jorge Shell de la Empresa Gomainca, por su gran colaboración en la fabricación de los discos de goma necesarios para la realización de los ensayos abrasivos.
- ✍ A todas aquellas personas que de alguna u otra forma contribuyeron a la realización de este Trabajo Especial de Grado.

RESUMEN

Díaz N., Siul J. y Franco S., Adolfo A.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE PIEZAS SINTERIZADAS Y PIEZAS RECUBIERTAS POR ROCIADO TÉRMICO HVOF.

TUTOR ACADÉMICO: PROF. MARÍA RODRÍGUEZ DE PRATO

TESIS. U.C.V. FACULTAD DE INGENIERÍA. ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA, CARACAS, 2.002. 111 PÁGINAS

En el presente trabajo se realizó un estudio comparativo del comportamiento frente al desgaste erosivo y abrasivo de piezas fabricadas por sinterizado y piezas que fueron recubiertas por la técnica de rociado térmico de Alta Velocidad Oxígeno Combustible (HVOF). Las piezas estudiadas en el presente trabajo fueron muestras sinterizadas con las aleaciones WC-6%Co, WC-12%Co, WC-6%CoAl y WC-12%CoAl y muestras rociadas térmicamente con la aleación WC-12%Co. Se realizaron pruebas de dureza, rugosidad y ensayos para determinar la resistencia al desgaste abrasivo y erosivo según las normas ASTM G65-C y ASTM G99-95^a respectivamente. Se realizó Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y análisis químicos mediante la técnica de Espectroscopia por Dispersión de Energía de Rayos X (EDS), para caracterizar de manera semi-cuantitativa las fases presentes, obteniéndose básicamente una fase clara carburo de tungsteno y una fase oscura de cobalto y/o cobalto-aluminio, actuando éstos últimos como la fase aglomerante de la mezcla. Finalizados los ensayos se realizó nuevamente MEB para el estudio morfológico, permitiendo observar los cambios a que son sujetos a las propiedades mecánicas de cada mezcla en particular. A partir de los resultados obtenidos se concluye que la micro-dureza disminuye a medida que aumenta la fase aglomerante. El material que presentó menor desgaste erosivo a 30° fue el sinterizado WC-6%Co y a un ángulo de 90° fue el WC-12%Co (SPR); en cambio el material más desfavorable en ambas condiciones fue el sinterizado WC-12%CoAl, por presentar gran porosidad lo que condicionó su comportamiento frente al desgaste erosivo y abrasivo. Por último, el sinterizado de WC-6%Co fue el que presentó mayor resistencia al desgaste abrasivo, manifestando 8 veces menos desgaste que recubrimiento de WC-12%Co.

INDICE GENERAL

	Pag.
PORTADA	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	iv
INDICE GENERAL	v
INDICE DE FIGURAS	ix
INDICE DE TABLAS	xii
INDICE DE ANEXOS	xiii
INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES	4

CAPÍTULO I - MARCO TEÓRICO **08**

1.1.- SINTERIZADO	09
1.1.1.- Carburos Cementados	09
1.1.2.- Manufactura de los Carburos Cementados	10
1.1.3.- Sinterización	10
1.1.4.- Carburo de Tungsteno	11
1.1.5.- Factores que influyen en las propiedades de compuestos a base de Carburo de Tungsteno	12
1.1.6.- Aleaciones de Carburo de Tungsteno Cobalto (WC-Co)	13
1.1.6.1.- Tamaño, forma y distribución de los granos	14
1.1.7.- Propiedades Tribológicas de los Carburos Cementados	14
1.1.8.- Clasificación de los Carburos Cementados	15
1.1.8.1.- Sistema de Grado C	15
1.1.8.2.- Clasificación ISO	15

1.2. - ROCIADO TÉRMICO	17
1.2.1. - Generalidades	17
1.2.2. - Aplicaciones	20
1.2.3. - Aspectos Fundamentales en los Métodos de Deposición	20
1.2.4. - Tipos de Recubrimientos	22
1.2.4.1. - Rociado Térmico por Llama	22
1.2.4.2. - Rociado Térmico por Arco	24
1.2.4.3. - Rociado Térmico por Plasma	25
1.2.4.4. - Rociado Térmico por Detonación (D-Gun)	26
1.2.4.5. - Rociado Térmico por HVOF (High Velocity Oxi-Fuel)	27
1.2.5. - Características de los Recubrimientos	32
1.2.6. - Adherencia y Estructura de los Recubrimientos	33
1.2.7. - Preparación de la Superficie	34
1.2.7.1. - Limpieza y manejo	35
1.2.7.2. - Rugosidad	35
1.2.7.3. - Proceso de arenado	36
1.3. - DESGASTE	37
1.3.1. - Generalidades	37
1.3.2. - Tipos de Desgaste	38
1.3.2.1. - Desgaste Adhesivo	38
1.3.2.2. - Desgaste Abrasivo	39
1.3.2.3. - Desgaste Corrosivo	39
1.3.2.4. - Desgaste por Fatiga Superficial	40
1.3.2.5. - Desgaste Erosivo	40
1.3.3. - Erosión	41
1.3.4. - Abrasión	45

CAPITULO II - PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL **49**

2.1.-	Material	50
2.2.-	Preparación superficial	51
2.3.-	Procesos	52
	2.3.1.- Sinterizado	52
	2.3.2.- Rociado Térmico	53
2.4.-	Rectificado de las muestras	55
2.5.-	Determinación de la Densidad	56
2.6.-	Ensayos a realizar	56
	2.6.1.- Ensayo de Erosión	56
	2.6.2.- Ensayo de Abrasión	59
	2.6.3.- Ensayo de Microdureza	62
2.7.-	Determinación de la Rugosidad	63
2.8.-	Preparación metalográfica	63
2.9.-	Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Análisis Microestructural	65

CAPÍTULO III - ANÁLISIS Y RESULTADOS **66**

3.1.-	Resultados de la Microscopía Electrónica de Barrido	67
	3.1.1.- Muestras Sinterizadas	67
	3.1.2.- Muestras Rociadas Térmicamente	74
	3.1.3.- Material Abrasivo	75
3.2.-	Análisis de la Microdureza	76
3.3.-	Resultados de la Rugosidad Superficial	78
3.4.-	Análisis del Ensayo de Erosión	80
3.5.-	Análisis del Ensayo de Abrasión	89

CAPÍTULO IV - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES **93**

4.1.-	Conclusiones	94
4.2.-	Recomendaciones	97

CAPÍTULO V - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS **98**

CAPÍTULO IV - ANEXOS **104**

INDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1.1. - Representación esquemática de la formación del recubrimiento en los procesos de rociado térmico	16
Figura 1.2. - Clasificación de las técnicas de rociado térmico	17
Figura 1.3. - Pasos elementales en un proceso de rociado térmico	19
Figura 1.4. - Proceso de rociado térmico por llama alimentado con polvo	21
Figura 1.5. - Esquema de la pistola de rociado por llama alimentado con alambre	21
Figura 1.6. - Esquema de la pistola de rociado térmico por Arco Eléctrico	22
Figura 1.7. - Esquema de la pistola de rociado térmico por Plasma	24
Figura 1.8. - Esquema de la pistola de rociado térmico modelo D-GUN	25
Figura 1.9. - Esquema de la pistola de rociado térmico HVOF	26
Figura 1.10. - Esquema de un sistema de rociado térmico HVOF	27
Figura 1.11. - Efecto de la velocidad del rociado sobre la calidad del recubrimiento	28
Figura 1.12. - Parámetros generales del proceso HVOF	29
Figura 1.13. - Sección transversal de un metal rociado térmicamente	31
Figura 1.14. - Variación de la erosión con el ángulo de impacto característico de materiales dúctiles y frágiles	42
Figura 1.15. - Tipos de corte producidos por el impacto de las partículas	43
Figura 1.16. - Clasificación del desgaste abrasivo	44
Figura 2.1. - Muestras granalladas	51
Figura 2.2. - Horno Tubular usado para la sinterización	52
Figura 2.3. - Ciclo térmico de la sinterización	53
Figura 2.4. - Equipo de Rociado Térmico HVOF y pistola JP-5000	53
Figura 2.5. - Rociado térmico de las muestras utilizando una Pistola JP-5000	54
Figura 2.6. - Centro de mecanizado de control numérico	55
Figura 2.7. - Banco de ensayo de erosión	57
Figura 2.8. - Balanza analítica	59
Figura 2.9. - Banco del ensayo de abrasión	62

Figura 2.10. - Microdurómetro	62
Figura 2.11. - Cortadora de precisión	64
Figura 2.12. - Equipo de plato giratorio	64
Figura 2.13. - Microscopio electrónico	65
Figura 3.1. - Microscopía Electrónica de Barrido y análisis puntual de las fases presentes en el sinterizado de WC-6%Co a)1500x; b) 5000x; c)EDS en A, d)EDS en B y e)EDS en C	67
Figura 3.2. - Microscopía Electrónica de Barrido y análisis puntual de las fases presentes en el sinterizado de WC-12 %Co a)1500x; b) 5000x; c)EDS en A, d)EDS en B	68
Figura 3.3. - Microscopía Electrónica de Barrido y análisis puntual de las fases presentes en el sinterizado de WC-6% CoAl a)1500x; b)5000x; c)EDS en A, d)EDS en B y e)EDS en C	69
Figura 3.4. - Microscopía Electrónica de Barrido y análisis puntual de las fases presentes en el sinterizado de WC-12% CoAl a)1500x; b)3000x; c)EDS en A, d)EDS en B y e)EDS en C	70
Figura 3.5. - Microscopía Electrónica de Barrido y análisis puntual de las fases presentes en el sinterizado de WC-12% Co – SPR a)1500x b) 5000x c)EDS en A, d)EDS en B.	71
Figura 3.6. - Serie de Sinterizados: a) WC-6%Co, b) WC-12%Co, c) WC-6%CoAl, d) WC-12%CoAl, e) WC-12%Co (SPR)	73
Figura 3.7. - Microscopía Electrónica de Barrido y análisis puntual de las fases presentes de las muestras rociadas térmicamente a)a 50x; b)a 3000x; c)EDS en A, d)EDS en B	74
Figura 3.8. - Microscopía y análisis puntual EDS de la alúmina utilizada para los ensayos de erosión	75
Figura 3.9. - Microscopía y análisis puntual EDS de la sílice utilizada para los ensayos de abrasión	76
Figura 3.10. - Microdureza Vickers de diferentes materiales	78
Figura 3.11. - Rugosidad de las diferentes muestras estudiadas	79

Figura 3.12.- Gráfica de pérdida de peso de las muestras erosionadas durante los primeros 3 min	80
Figura 3.13.- Gráficas de pérdida de peso vs. tiempo de ensayo a los diferentes ángulos de ataque en erosión	81
Figura 3.14.- Gráfica de porcentaje de pérdida de peso de los diferentes materiales a) 30° b)60° y c) 90°	82
Figura 3.15.- Tasa de Erosión de las muestras estudiadas	83
Figura 3.16.- F.E.N. de las muestras estudiadas	84
Figura 3.17.- Muestras rociadas térmicamente erosionadas a: a) a 90° (500x); b) a 90° (2000x); c) a 30° (500x); d) a 30° (2000x)	85
Figura 3.18.- Comparación de muestras sinterizadas antes y después del ensayo de erosión a un ángulo de ataque de 90°	87
Figura 3.19.- Comparación de muestras sinterizadas antes y después del ensayo de erosión a un ángulo de ataque de 30°	88
Figura 3.20.- Pérdida volumétrica de las muestras después del ensayo de abrasión	90
Figura 3.21.- Representación macro del conjunto de muestras luego de ser sometidas al desgaste abrasivo	91
Figura 3.22.- Representación del conjunto de muestras luego de ser sometidas al desgaste abrasivo a una resolución de 2000x	93

INDICE DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1.1.- Propiedades de los componentes del WC-Co	12
Tabla 1.2.- Ventajas del proceso HVOF y las causas que la generan	32
Tabla 1.3.- Variación del número de Best con el tipo de daño	42
Tabla 2.1.- Dimensiones de las probetas	50
Tabla 2.2.- Parámetros del proceso HVOF	54
Tabla 2.3.- Parámetros del proceso de rectificado	55
Tabla 2.4.- Parámetros del ensayo de abrasión	60
Tabla 3.1.- Microdureza Vickers	77
Tabla 3.2.- Rugosidad superficial	79
Tabla 3.3.- Pérdida de volumen de las muestras luego del ensayo abrasivo	89

INDICE DE ANEXOS

	Pag.
Anexo 6.1.- Valores de K calculados de tasas de erosión de datos publicados	104
Anexo 6.2.- Porta probeta	105
Anexo 6.3.- Cálculos tipo	106
Anexo 6.4.- Tabla de valores de pérdida de masa en el ensayo de erosión	109
Anexo 6.5.- Tabla de valores de tasa de erosión	110

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el avance y desarrollo de nuevas tecnologías se ha volcado al estudio de soluciones que de una u otra manera son empleadas en satisfacer nuevas demandas y necesidades.

Tal es el caso del desarrollo industrial moderno en el cual su tecnología involucra una amplia gama de maquinarias, equipos y elementos de máquinas. Estos tienen una gran importancia, sea cual sea el área donde se utilicen, de ahí que el deterioro de componentes vitales en un equipo signifique la paralización del mismo, interrumpiendo de forma directa o indirecta un proceso o actividad productiva y generando así considerables pérdidas económicas. Por lo tanto, a la hora de realizar mantenimiento y reparación de dichos componentes es necesario ofrecer el mejor y más eficaz método técnico y tecnológico a los mejores costos y en el menor tiempo posible.

Ningún elemento de máquina es inmune al desgaste, ya que éste fenómeno se manifiesta siempre que exista carga y movimiento relativo entre dos o más elementos. Materiales metálicos, cerámicos, carburos, entre otros; son utilizados en la actualidad para reconstruir piezas desgastadas, producir superficies resistentes al desgaste, etc. No se puede generalizar sobre un solo tipo de desgaste, ni un material especial que resista todos los tipos de desgaste que pueden presentarse, sino que por el contrario, es necesario estudiar cada fenómeno y material en particular. De ésta forma se seleccionarían los materiales más idóneos para cada requerimiento, prolongando la vida útil de los elementos de máquina y por ende disminuyendo gastos por concepto de reparación y/o sustitución.

La situación de Venezuela en los últimos años ha llevado a que se le dé una importancia creciente a la Ingeniería de Mantenimiento y en los actuales momentos parece más adecuado dirigir esfuerzos hacia la prolongación de la vida útil de los elementos de máquinas, antes que a la fabricación de piezas de reposición. El desarrollo de la tecnología del proceso de sinterizado y el rociado térmico, se presentan

como unas de las alternativas más importantes para ser empleada en la fabricación y recuperación de elementos de máquinas.

Entre las principales aplicaciones del sinterizado encontramos las siguientes: herramientas de corte, válvulas petroquímicas, piezas de equipos de minería, componentes de válvulas de control de flujo, impulsores de bombas de alta presión y en general en aquellas aplicaciones donde se necesita una alta resistencia al desgaste, las cuales en los últimos años, han mostrado una evolución y desarrollo importante en lo que se refiere a inserciones de materiales metálicos (ferrosos y no ferrosos), así como materiales no metálicos; en cuanto al rociado térmico tenemos que éstos se aplican con el fin de mejorar la resistencia a la corrosión y al desgaste de una superficie y podemos citar las siguientes aplicaciones en la industria: la aeroespacial, implementos de agricultura, automóviles, industrias metales, minería, papel, refinerías, químicas y biomédicas; otras aplicaciones comprenden el uso para la restauración dimensional de piezas desgastadas, barreras térmicas, conductores térmicos, protección electromagnética, etc.

Dándole continuidad al desarrollo de nuevas tecnologías, el objetivo principal del presente Trabajo Especial de Grado es estudiar la resistencia al desgaste erosivo y abrasivo de piezas que serán recubiertas por la técnica de rociado térmico HVOF y piezas sinterizadas con diferentes aleaciones de WC-Co y WC-CoAl, para así abrir un abanico de posibilidades en la elección de materiales resistentes al desgaste en una aplicación dada.

ANTECEDENTES

ANTECEDENTES

- ✍ Los bachilleres Mayren y Medina Dayana (1999), basaron su trabajo en el estudio del procesamiento pulvimetalurgico y la evaluación micro estructural del íter metálico Cobalto-Aluminio. Este proceso se realizó mezclando los polvos finos de cobalto y aluminio en un molino con recipiente y esferas de WC a 60 rpm durante un período de 2 horas. Luego se procedió a compactar y posteriormente a sinterizar a una temperatura de 700 °C, 800°C y 1000°C durante un tiempo de 1 hora y 2 horas respectivamente. El análisis micro estructural se obtuvo mediante Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) y difracción de Rayos X (EDS). Los resultados obtenidos en el presente trabajo no fueron satisfactorios o acordes con objetivos planteados, ya que se formó gran porosidad en las muestras, comprobando que las cavidades encontradas son los espacios dejados por el aluminio que debería haber reaccionado con el Co, produciéndose contracciones, ya que el aluminio funde a 660°C, dejando espacios vacíos y evitando la formación del íter metálico deseado, también cabe señalar que la combinación de estos elementos producen una reacción exotérmica. Por tanto, los ensayos de dureza planteados en los objetivos del trabajo, no se realizaron debido a la gran porosidad presentada por los compactos.
- ✍ Los bachilleres Chirinos y León (2000) estudiaron la técnica de rociado térmico hipersónico HVOF como una alternativa en el proceso de fabricación de plaquitas intercambiables para el torneado, comparándolo así con las más avanzadas técnicas de sinterizado y rectificado, los cuales cuentan actualmente con insertos para tornear de alta calidad.

Los materiales rociados térmicamente fueron WC-12%Co, 50% (WC-12%Co) – 50% Colmonoy y 90%(WC-12%Co) – 10% Colmonoy, siendo éste último el

que presentó mejores propiedades de adhesión al sustrato, mejores propiedades cohesivas y mejores condiciones frente al desgaste.

Se realizaron los ensayos respectivos para observar el comportamiento frente al desgaste por maquinado (torneado) de las plaquitas termo rociadas y de las plaquitas sinterizadas. Concluidos los ensayos, se realizaron mediciones del cambio de rugosidad superficial, se tomaron muestras de los materiales ensayados y se le realizó análisis por microscopía óptica y electrónica, permitiendo observar los cambios a que son sujetos los recubrimientos en el mecanizado, específicamente en el filo de corte, el cual permite mecanizar piezas dentro de parámetros aceptables.

- ✍ Los bachilleres La Barbera y Malaver (1995), diseñaron un equipo de ensayos erosivos, utilizando como material erodante Alúmina (Al_2O_3). Se hicieron evaluaciones a tres recubrimientos de WC-16%Co, Carburo de Cromo y Níquel-Cromo-Boro-Silicio usados para la recuperación de elementos de máquinas expuestos a desgastes erosivo y concluyeron 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. Los materiales presentaron como mecanismos de remoción la formación de micro grietas, propagación y remoción final de material. Por último, se concluye que un buen acabado superficial del recubrimiento proyectado por rociado térmico favorece la resistencia al desgaste por erosión.
- ✍ Pinto y Rangel (1999) basaron su trabajo en la realización de un banco de ensayo de abrasión según la norma ASTM G-65 C. Los ensayos no consistieron en predecir la resistencia exacta de un material dado en un ambiente específico, sino en clasificar el rango de materiales ensayados en un orden relativo de méritos similar al que ocurriría en un ambiente abrasivo. Los materiales

evaluados fueron un tipo de acero comercial del tipo AISI 4340 templado 52-54 RC y dos tipos de recubrimiento depositados por HVOF. Los materiales rociados térmicamente fueron Carburo de Tungsteno 12% Cobalto (WC-12%Co) y Colmonoy (NiWCrBSi), aplicados en un material base de acero AISI 4340. En orden, para el tiempo correspondiente a la prueba de 30 segundos, el material que presentó la menor pérdida volumétrica fue el carburo de tungsteno, seguido del Colmonoy 88 y por último el acero templado AISI 4340, en términos de proporción, la resistencia del recubrimiento de carburo de tungsteno fue 15 veces mayor que la del acero base y la del Colmonoy 8 veces mayor.

MARCO TEÓRICO

1.1.- SINTERIZADO

1.1.1.- CARBUROS CEMENTADOS.

Los carburos cementados son materiales compuestos, que se obtienen por la combinación de dos (2) o más elementos, generalmente sinterizados, cuya dureza, resistencia al desgaste, tenacidad, resistencia a la abrasión, entre otras, los han convertido en materiales importantes para la elaboración de herramientas de corte, válvulas petroquímicas, piezas de equipos de minería, y en general, en aquellas aplicaciones donde se necesite una alta resistencia al desgaste. Entonces debido a que sus propiedades físicas están directamente relacionadas con sus constituyentes, como lo son: las partículas de carburo y la fase cementante. Con esta combinación, las propiedades positivas de los componentes se superponen: el componente principal (la fase carburo) provee la dureza y la resistencia al desgaste mientras que la fase dúctil (cementante) contribuye a la tenacidad necesaria.

Es importante señalar, que el comportamiento de los carburos para piezas de corte depende mucho de la composición, el tamaño de grano y la microestructura generada. La microestructura ideal de las aleaciones de WC-Co debe exhibir solamente dos fases: granos angulares de WC y una fase de Co aglomerante. El contenido debe ser controlado dentro de los límites más estrechos. Contenidos de carbono demasiado altos resultan en la presencia de grafito libre dividido finamente, el cual en pequeñas cantidades no tiene efectos adversos en aplicaciones de maquinado. La deficiencia de carbono de cualquier manera, resulta en la formación de una serie de carburos dobles (por ejemplo: $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ ó $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$) comúnmente conocidos como fase γ , la cual causa severa fragilización, ya que la formación de fase γ envuelve la disolución de los carburos originales dentro de los aglomerantes de cobalto, la fase γ aparece como una forma irregular en la microestructura. (Santhanam, 1990).

Es importante destacar que un incremento en el contenido de cobalto, conlleva a una disminución de la dureza y en la resistencia al desgaste de materiales duros como WC-Co. (Reshetnyak, 1997).

1.1.2.- MANUFACTURA DE LOS CARBUROS CEMENTADOS.

Los carburos cementados son producidos por el proceso de pulvimetalurgia, que consiste en una secuencia de pasos en los cuales cada uno debe ser cuidadosamente controlado para obtener un producto final con las propiedades deseadas, microestructura y desempeño.

Estos pasos incluyen:

- ✍ Procesado del mineral y la preparación del polvo de carburo de tungsteno.
- ✍ Preparación de los otros polvos de carburos.
- ✍ Producción de los grados de polvos.
- ✍ Compactación y consolidación de los polvos.
- ✍ Sinterizado.
- ✍ Remoción de Lubricantes.
- ✍ Postsinterizado.

1.1.3.- SINTERIZACIÓN.

La sinterización de carburos cementados consiste en la remoción de lubricantes del prensado, densificación y desarrollo de la microestructura, obteniéndose la consolidación de un material por efectos del calor, produciéndose un aumento de la resistencia mecánica y generalmente una reducción en la porosidad.

Dos métodos básicos son usados para sinterizar carburos cementados:

- ✍ Sinterización por Hidrógeno: Es realizada en una atmósfera a base de hidrógeno a presiones atmosféricas. Tienen relativamente altos potenciales de oxidación debido a las fugas de aire y las reacciones con los componentes cerámicos del horno.
- ✍ Sinterización por Vacío: Tiene un alto uso comercial, debido a los bajos costos de operación, por esto se considera el proceso predominante para el sinterizado

de los carburos cementados. Permite un mejor control de la composición (oxígeno contenido en los polvos carburados).

1.1.4- CARBURO DE TUNGSTENO.

El carburo de tungsteno (WC) es un carburo con metal de transición, el cual es empleado en la elaboración de herramientas de corte. Este se obtiene mediante la reducción del óxido de tungsteno y la subsecuente carburización a 1400 o 1500 °C.

El WC, conserva el primer lugar en la tecnología de los carburos cementados y esto se debe a su estabilidad termodinámica. Además, tiene un alto módulo de elasticidad, el cual es excedido sólo por el diamante y una alta conductividad térmica, las cuales son unas propiedades ventajosas en aplicaciones de corte. (Exner,1997).

Los carburos cementados con tamaño de grano micrométrico de WC se caracterizan por tener una alta resistencia al desgaste abrasivo y considerable dureza, pero una baja ductilidad. (Prakash, 1995).

Las propiedades específicas de los grados individuales de carburos cementados dependen no sólo de la composición de los carburos, sino también de su tamaño de partícula, cantidad y tipo de cementante.

La Tabla 1.1 muestra las propiedades de los componentes del WC-Co.

Tabla 1.1. - Propiedades de los componentes del WC-Co.

PROPIEDADES	WC	CO
Estructura	Hexagonal	Hcp-410°C
		Fcc-1493°C
Parámetro de Red (nm)	a=0,291	A=2,057
	c=0,284	C=4,086
Temperatura de Fusión (°C)	2800	1493
Dureza HV (50 g)	(0001)=2200	-
	(1010)=1300	
Densidad Teórica (g/cm ³)	15,77	8,83
Módulo de Elasticidad (Gpa)	696	210
Coeficiente de Expansión Térmica 10 ⁻⁶ K ⁻¹	(0001)=5,5	6,8
	(1010)=7,3	

Tomado de Roebuck B., 1995.

1.1.5.- FACTORES QUE INFLUYEN EN LAS PROPIEDADES DE COMPUESTOS A BASE DE CARBURO DE TUNGSTENO.

Dentro de los factores más importantes que influyen en las propiedades de compuestos a base de carburo de tungsteno, se encuentran los siguientes:

- ✍ Composición química.
- ✍ Propiedades de los constituyentes individuales.
- ✍ Tamaño, forma y distribución de la fase dura.
- ✍ Presencia de exceso o deficiencia de carbono.
- ✍ Variación composicional.
- ✍ Métodos de producción (Compactación, Sinterización).

Para que las propiedades de un compuesto a base de WC sean óptimas, es importante mantener un bajo nivel de porosidad, uniformidad en el tamaño de grano de los carburos a través de la matriz y mantener un contenido de carbono estequiométrico en la fase de carburos (Matos,1999).

1.1.6.- ALEACIONES DE CARBURO DE TUNGSTENO COBALTO (WC-Co).

El carburo de tungsteno-Cobalto (WC-Co) es ampliamente utilizado en la industria por su elevada resistencia al desgaste abrasivo, además de poseer cierta tenacidad que es proporcionada por la fase de cobalto que actúa como cementante y como fase enlazante en el compuesto.

Para obtener una microestructura ideal del compuesto WC-Co se deben tener dos fases: los granos angulares del WC y la fase cementante de cobalto. Es importante destacar que el contenido de carbono debe ser controlado ya que un exceso produciría grafito libre y un faltante produciría la formación de la fase γ (carburos dobles), causando fragilización; ya que esta fase involucra la disolución de los carburos originales dentro del cobalto y consume Co que proporciona cierta tenacidad (Rodríguez E., 2000).

El cobalto es usado más ampliamente como aglomerante de los metales como los de base carburo de tungsteno, mostrando destacadas características de mojabilidad y adhesión; además presenta una fase hexagonal a bajas temperaturas y una fase cúbica a altas temperaturas, con una fase de transición cercana a los 415 °C. El cobalto es manufacturado a través de reducciones de óxido de cobalto o de derivados de sales orgánicas (particularmente oxalato de cobalto).

La primera disponibilidad del carburo cementado consistió en partículas de carburo de tungsteno mezclado con cobalto, referidas comúnmente como grados puros. Estas aleaciones exhiben una excelente resistencia al desgaste abrasivo, y de este modo, tienen muchas aplicaciones en metales cortantes. La segunda, consistió en aleaciones cortantes comercialmente significativas, conteniendo cobalto en los rangos de 5 hasta 20 % en peso, teniendo un tamaño de grano de un rango de 2-10 μ m. (Quercia, 1999).

1.1.6.1.- Tamaño, forma y distribución de los granos.

El tamaño de los carburos y de la fase de Co depende básicamente del tamaño y distribución de los polvos originales, la molienda, las condiciones de sinterización y la composición de la aleación. En carburos cementados las distribuciones tienen una forma bastante constante, la distribución de tamaño de granos de WC en Co puede ser muy cerrada, aunque ocasionalmente pueden aparecer granos grandes. (Exner, 1979).

1.1.7.- PROPIEDADES TRIBOLÓGICAS DE LOS CARBUROS CEMENTADOS.

Las propiedades que controlan la resistencia en los carburos y en general en los materiales sinterizados son el tamaño de grano, dureza y tenacidad de las partículas de carburos. Se han realizado estudios en los cuales se muestra que la resistencia al desgaste abrasivo aumenta con el decrecimiento del porcentaje de cobalto y del tamaño de grano, aunque esta se ve más influenciada por el tamaño de grano que por el Cobalto. (Milensky Martinez M, 2001).

En el caso de las aleaciones WC-Co, la dureza y la resistencia a la abrasión disminuyen con el aumento del contenido de cobalto. También se dice que los aumentos de dureza pueden disminuir la velocidad de desgaste, siempre que se mantengan ciertos valores constantes, pero es importante señalar que si el incremento es muy elevado, conllevaría a originar fallas por fragilidad y a una tenacidad insuficiente.

La principal característica que poseen los carburos cementados para aplicaciones donde se necesite una alta resistencia al desgaste son los valores de dureza alcanzados por estos, que van desde los 1100 a los 2500 Kg/mm² (Hv₃₀₀).

Se han estudiado una serie de carburos de tungsteno de diferentes grados (6-11% Co) para medir la resistencia a la abrasión, utilizando un equipo que simula las condiciones

presentadas en herramientas de corte y equipos de transporte de minerales y encontraron una pérdida de volumen de éstos entre 0.163 y 0.245 mm³ (Matos, 1.999).

1.1.8.- CLASIFICACIÓN DE LOS CARBUROS CEMENTADOS.

No existe ningún sistema universalmente aceptado para clasificar los carburos cementados. Los sistemas comúnmente utilizados por fabricantes y usuarios, tienen inherentes pros y contras en lo que se refiere a la descripción de materiales específicos. Por esta razón, es necesaria una estrecha cooperación entre el usuario y el fabricante, con la finalidad de seleccionar el grado más adecuado para cualquier aplicación dada.

1.1.8.1.- Sistema de grado C.

El sistema de grado C, no requiere del uso de nombres comerciales para identificar el grado de carburos específicos. Si bien, esta clasificación simplifica las aplicaciones de las herramientas, esto no refleja las propiedades del material que significativamente influyen en la selección del grado de las propiedades de carburos. Adicionalmente, la definición de los materiales de trabajo envueltos en esta clasificación esquemática es impreciso. El uso de estos términos para describir las diferentes aplicaciones categóricas, no se encuentra estandarizado. A pesar de estas limitaciones, la clasificación de grado C tiende a ser usada satisfactoriamente por la industria de la manufactura desde 1942.

1.1.8.2.- Clasificación ISO.

En 1964, la Organización Internacional de Estandarización (ISO) publicó la recomendación “ISO R513” (Aplicación de carburos para remoción de virutas). En este sistema, todos los grados de maquinado son divididos dentro de un grupo de códigos con tres colores:

- ✍ Los carburos de tungsteno calificados como los altamente aleados (letra P, color azul) para maquinado de acero.

- ✍ Los carburos de tungsteno calificados como medios aleados (letra M, color amarillo, generalmente con menos cantidad de carburo de titanio que el correspondiente a la serie P).
- ✍ Los carburos de tungsteno calificados como exactos (letra K, color rojo) para cortes de fundición gris, metales no féreos, y materiales no metálicos.

A cada grado dentro de un grupo le es asignado un número que representa su posición de máxima dureza y tenacidad. Para los grados P con valores de 0.1 a 50, los de grado M con valores de 10 a 40, y los de grado K de 0.1 a 40. Aplicaciones típicas son descritas por los calificativos a más o menos intervalos numéricos regulares. Aún cuando los carburos recubiertos no habían sido desarrollados al mismo tiempo que el sistema ISO, su clasificación es similar a los no recubiertos.

1.2.- ROCIADO TÉRMICO

1.2.1.- GENERALIDADES.

El rociado térmico es un conjunto de procesos para la deposición de materiales tanto metálicos como no metálicos; donde metales, carburos cerámicos y hasta polímeros (plásticos) son semi-fundidos mediante calentamiento suministrado por un proceso de combustión o arco eléctrico a través de su energía térmica. Mediante la ayuda de un gas comprimido se aceleran las gotas semi-fundidas y se proyectan en forma de rocío sobre la superficie de un sustrato que previamente ha sido preparado. Al golpear la superficie las gotas semi-fundidas se aplastan y construyen una capa fina que se adhiere a las irregularidades de la superficie, formando así el recubrimiento.

Entre los grupos de materiales que pueden ser depositados mediante el proceso por HVOF, se tienen:

- ✍ Cerámicos (Cr_2O_3 , Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 , SiO_2).
- ✍ Compuestos (WC-Co , WC-CoCr , WC-Ni , $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$).
- ✍ Metales puros (Al , Zn , Ni , Cu).
- ✍ Aleaciones (Acero inoxidable, Inconel, Bronces).
- ✍ Aleaciones Metálico-Refractarias (Mo-Ta base).
- ✍ Metales preciosos (Aleaciones de Plata).
- ✍ Semi-conductores (Óxido de Titanio).
- ✍ Lubricantes sólidos (Base Granito, Nitrato de Boro).
- ✍ Super aleaciones (Base de Cobalto, Ni-Fe).

Cuando estos materiales en forma de gotas semi-fundidas chocan con la superficie se forma un “splat” que es el resultado de este impacto; los choques sucesivos de las partículas vienen a formar el revestimiento. La Figura 1.1 ilustra de forma esquemática la formación del recubrimiento. Desafortunadamente, estos tipos de procesos producen óxidos, poros y partículas no fundidas.

Durante la formación del recubrimiento queda gas atrapado entre los “splats” adyacentes, entre los valles que se forman entre el “splat” y la superficie del sustrato, formándose microporos al solidificar.

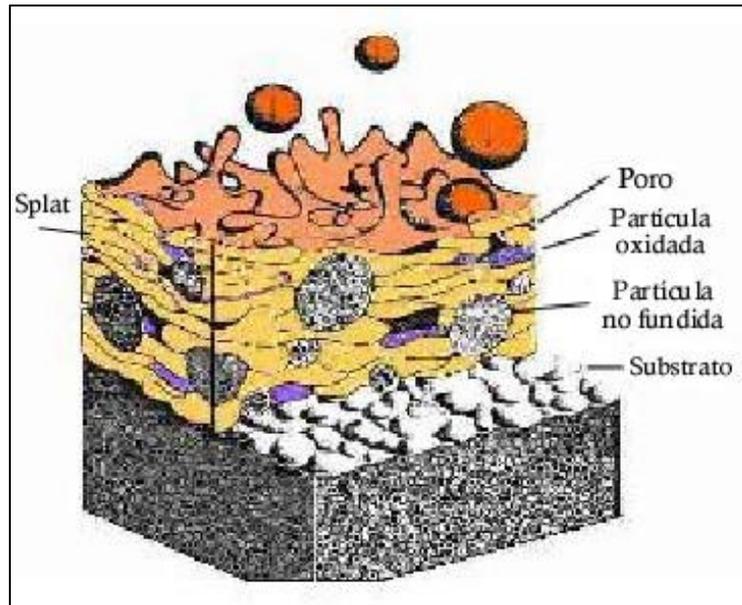


Figura 1.1.- Representación esquemática de la formación del recubrimiento en los procesos de Rociado Térmico.

El rociado térmico es un proceso muy similar a otro proceso como lo es la soldadura. Una diferencia esencial es, sin embargo, que con la soldadura el material agregado realmente se funde al metal base (formando un enlace metalúrgico); mientras que a través del rociado térmico, las gotas fundidas se adhieren a través de un enlace mecánico. A pesar del hecho que la unión es mecánica, pueden lograrse fuerzas de adhesión muy altas. Algunos procesos son capaces de lograr fuerzas de enlace que exceden a los 69 Mpa.

Siempre y cuando un material no sublime o descomponga a temperaturas cercanas a su punto de fusión, puede ser aplicado a través de rociado térmico. El mismo debe

estar disponible en forma de alambre o polvo. Una clasificación de los diferentes procesos puede encontrarse en la Figura 1.2.

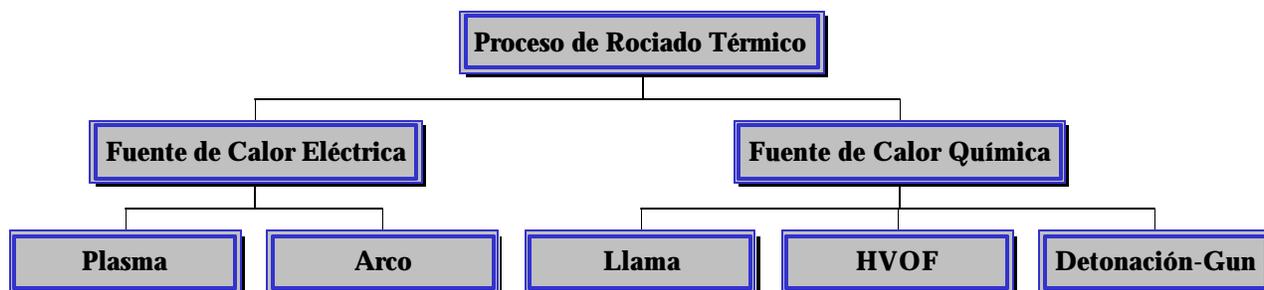


Figura 1.2.- Clasificación de las técnicas de rociado térmico.

El primer proceso de rociado térmico inventado se le atribuye a M.U. Scoop of Switzerland en 1911 y se conoce hoy día como termo rociado por combustión. Los otros procesos de rociado térmico, como el de arco eléctrico y pistola de detonación (D-GUN) fueron introducidos en 1955 por R.M. Poorman, H.B. Sargent y H. Lamprey, respectivamente. El rociado térmico vía plasma fue desarrollado por R.M. Gage, O.H. Nestor y D.M. Yenni en 1962, mientras que la técnica de High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) fue inventada en 1958 por G.H. Smith, J.F. Pelton y R.C. Eschebach.

La principal ventaja de los procesos de rociado térmico es la amplia variedad de materiales que pueden utilizarse como materia prima para ser depositados como recubrimiento, siempre y cuando tengan la capacidad de fundirse sin descomponerse. La segunda gran ventaja es la capacidad que tienen la mayoría de los procesos de rociado térmico, de poder aplicar recubrimientos sin llegar a calentar significativamente el sustrato.

1.2.2.- APLICACIONES.

Los recubrimientos rociados térmicamente se aplican con el fin de mejorar la resistencia a la corrosión y al desgaste de una superficie o sustrato. Otras aplicaciones comprenden el uso para la restauración dimensional de piezas desgastadas, barreras térmicas, conductores térmicos, protección electromagnética, etc. Estos recubrimientos son esencialmente usados por muchas industrias, incluyendo la aeroespacial, agraria, automotriz, industrias primarias de metales, minería, refinerías, químicas y biomédicas. Debido a esto, el campo de aplicación se cataloga en función de una serie de requerimientos mínimos involucrados en el proceso, tales como:

- a) Anti-adherencia para fácil limpieza.
- b) Conductividad o resistividad eléctrica.
- c) Creación de barreras térmicas (aislantes).
- d) Recubrimientos biomédicos.
- e) Reconstrucción o restauración de dimensiones.
- f) Resistencia a altas temperaturas.
- g) Resistencia a cavitación.
- h) Resistencia a la corrosión atmosférica y soluciones químicas.
- i) Resistencia al desgaste, erosión y adhesión.
- j) Resistencia a la oxidación.
- k) Rugosidad controlada para tracción óptima.

1.2.3.- ASPECTOS FUNDAMENTALES EN LOS MÉTODOS DE DEPOSICIÓN.

Los procesos de rociado térmico difieren básicamente en tres aspectos fundamentales:

- 1) Material de alimentación.
- 2) Método de calentamiento aplicado.
- 3) Método de proyección del material sobre el sustrato.

El material de alimentación puede ser incorporado al proceso en forma de polvo (por

medio de una tolva), alambre y barra cerámica (a través del uso de rodillos). En la Figura 1.3 se muestran los pasos para llevar a cabo el proceso de rociado térmico.

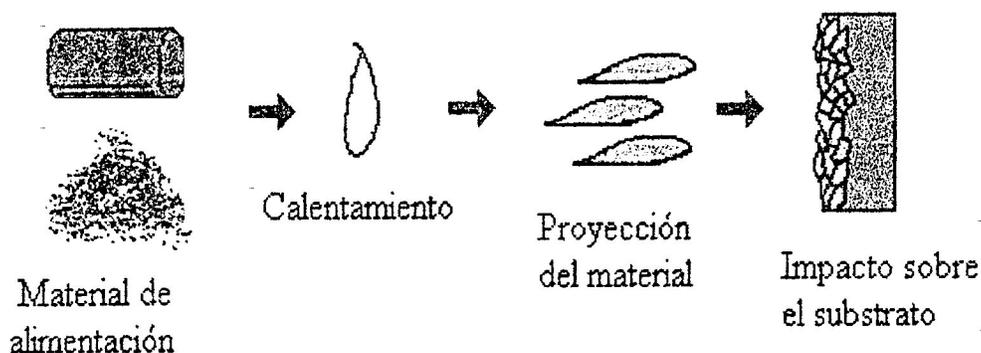


Figura 1.3. - Pasos elementales en un proceso de rociado térmico.

El calentamiento del material consiste en la preparación del mismo para ser proyectado a través de una corriente de gas a alta presión. El sistema que se utiliza para generar la energía necesaria es producto de la energía térmica del proceso de combustión o un arco eléctrico capaz de semi-fundir las partículas de material a ser rociado. El calentamiento debe ser homogéneo pues es un factor que determina las propiedades del recubrimiento.

Tanto la proyección, como el impacto de las partículas sobre el sustrato determinan las características finales del recubrimiento, además para obtener un recubrimiento aceptable en cuanto a calidad, se debe controlar la formación de poros e inclusiones de óxidos.

De acuerdo a la velocidad que adquieran las gotas semi-fundidas del material a ser rociado, el proceso puede ser clasificado como supersónico (se alcanzan velocidades mayores a la velocidad del sonido), o subsónico (velocidades menores a la velocidad del sonido). La velocidad dependerá, de los componentes del sistema de rociado, fundamentalmente de la pistola de rociado, de la cual se han diseñado muchos modelos, con el interés común de mejorar las condiciones operacionales de trabajo.

1.2.4.- TIPOS DE RECUBRIMIENTOS.

1.2.4.1.- Rociado Térmico por Llama

En el proceso de rociado térmico por llama se funde el material (polvo o alambre) a través de la descarga de energía química como resultado de un proceso de combustión. El proceso de combustión consiste en quemar un gas combustible (a veces líquido) en presencia de oxígeno (o aire comprimido). El gas combustible usado comúnmente para el rociado térmico por llama, es el acetileno debido a su alta temperatura de combustión (3100 °C) y a su bajo costo. Otros gases combustibles como el propano, hidrógeno o gas natural también se usan. El aire comprimido se usa de ayuda en la proyección de las partículas. Si la oxidación de las partículas proyectadas es un problema, gas inerte comprimido como argón o nitrógeno son usados para proteger las partículas fundidas.

En el proceso de rociado térmico con llama alimentado con polvo (Figura 1.4), las partículas impactan a bajas velocidades sobre el sustrato. El polvo es transportado por el flujo de gas dentro de la cámara de combustión donde es semi-fundido y proyectado al sustrato por la fuerza de la llama. La tasa de alimentación del polvo dentro de la cámara de combustión es importante en este proceso, si ésta es baja, algunos polvos pueden volatilizarse, incrementando los costos de operación y deteriorando la calidad de la superficie; de lo contrario si la velocidad es alta, el polvo no puede ser totalmente semi-fundido, entonces disminuye la eficiencia y aumenta la posibilidad de que existan partículas sin fundir atrapadas dentro del recubrimiento. Usualmente las pistolas poseen un dispositivo para ajustar la tasa de alimentación del polvo dentro del flujo de gas.

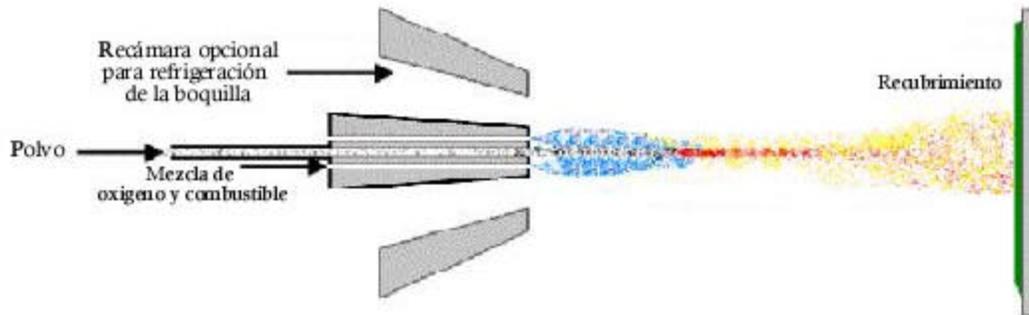


Figura 1.4.- Proceso de rociado térmico por llama alimentado con polvo.

En el proceso de rociado por llama alimentado con alambre (Figura 1.5), el mismo es fundido y atomizado a altas temperaturas proyectando las partículas a bajas velocidades sobre el sustrato. La baja velocidad de la partícula al impactar con el sustrato puede producir una baja adherencia y alta porosidad, al compararlo con otros procesos de rociado térmico.

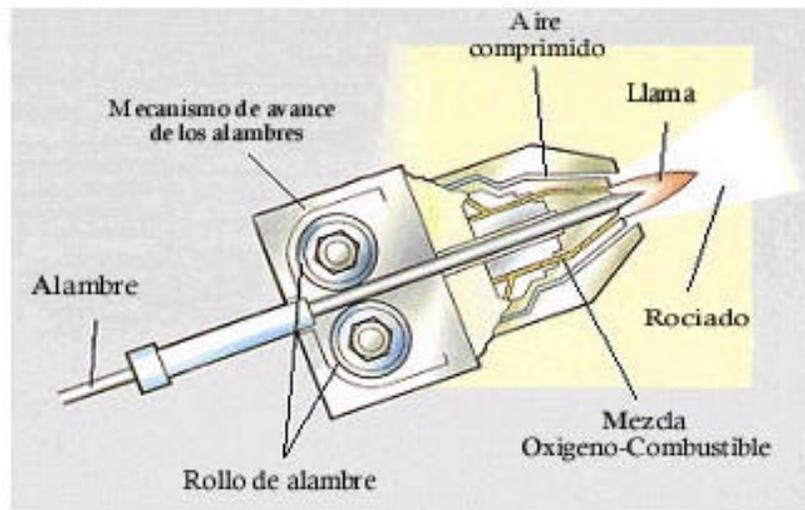


Figura 1.5.- Esquema de la pistola de rociado por llama alimentado con alambre.

1.2.4.2- Rociado Térmico por Arco.

El proceso de rociado térmico por arco utiliza un par de alambres eléctricamente conductores (electrodos) que se funden a través de un arco eléctrico. Los alambres se alimentan en forma continua y automáticamente a un punto enfrente de una nariz atomizadora (Figura 1.6). Una diferencia de potencial de 15 a 50 voltios es aplicada, formándose un arco eléctrico, fundiéndose el alambre a temperaturas superiores a los 5000 °K; el calor que se genera funde las puntas de los alambres y el material semi-fundido es atomizado y propulsado por una corriente o chorro de aire comprimido o gas inerte impactando al sustrato a grandes velocidades, solidificándose rápidamente y formando la capa del recubrimiento.

El gas atomizado normalmente es aire comprimido pero también puede hacerse con un gas inerte como Nitrógeno o Argón. Usando aire comprimido, los metales o aleaciones rociados se oxidan produciendo una gran cantidad de óxidos metálicos en la capa rociada. Debido a esto, la capa es más dura y más difícil de maquinar que una capa de material original.

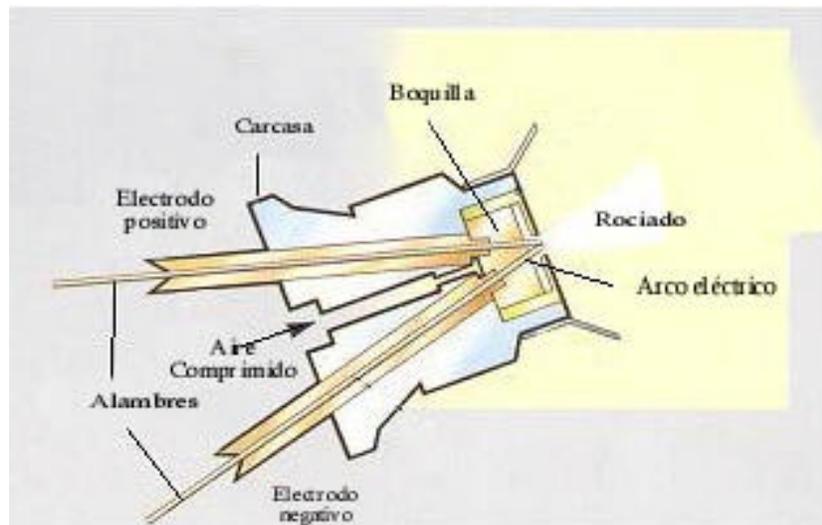


Figura 1.6.- Esquema de la pistola de rociado térmico por Arco Eléctrico.

La temperatura del arco mayormente excede las temperaturas de fusión de los materiales rociados, dando como resultado partículas supercalientes, es decir, que la temperatura de las partículas son sumamente altas, y pueden en algunos casos producir interacciones metalúrgicas localizadas o zonas de difusión. Debido a estos procesos microscópicos, pueden lograrse buenos enlaces cohesivos y adhesivos usando el proceso de arco por alambre.

1.2.4.3- Rociado Térmico por Plasma.

El plasma puede verse como un gas ionizado, separado total o parcialmente de sus electrones. Este método se logra mediante la aplicación de alta energía al gas seleccionado.

En el proceso de rociado térmico por plasma, se dispone de un material en forma de polvo el cual se inyecta en una llama de plasma de elevada temperatura (cercana a los 20.000 °C). Este se calienta rápidamente y es acelerado proyectándolo sobre el sustrato. El equipo comprende básicamente de un ánodo de cobre y un cátodo de tungsteno centralizados en la pistola que son refrigerados generalmente por agua, mientras que el gas del plasma (argón, nitrógeno, hidrógeno o helio) fluye alrededor del cátodo y a través del ánodo formando una boquilla estrecha.

El plasma es producido por una descarga de alto voltaje como consecuencia de una ionización localizada y un conductor que sirve para la formación de un arco de corriente continua formado entre el cátodo y el ánodo (Figura 1.7).

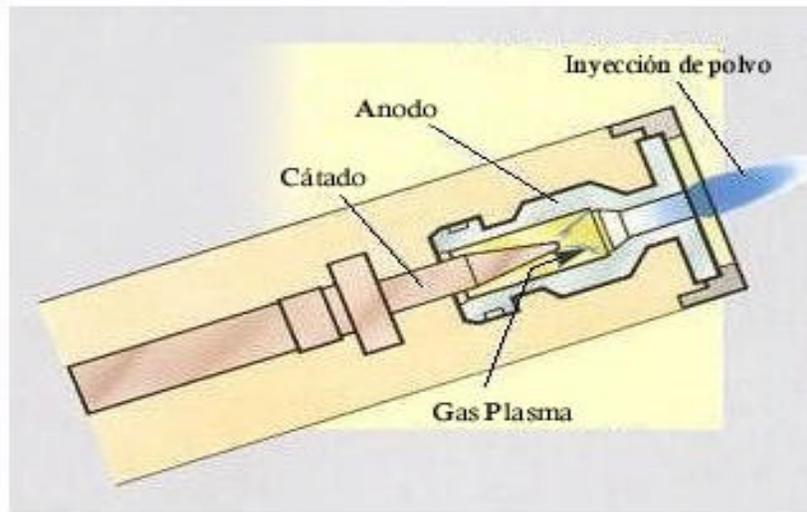


Figura 1.7.- Esquema de la pistola de rociado térmico por Plasma.

Este tipo de proceso ofrece una gran flexibilidad en cuanto a parámetros de control, versatilidad, resistencia a la corrosión de sus recubrimientos por ataque químico y además que pueden rociarse térmicamente materiales con punto de fusión muy altos. La desventaja principal del proceso del plasma son el alto costo relativo y complejidad del proceso.

1.2.4.4 - Rociado Térmico por Detonación (D-Gun) – Alta velocidad.

Es un proceso de combustión no continuo que usa una serie intermitente de explosiones para fundir e impulsar las partículas hacia el substrato. Un barril lleno con una cantidad adecuada de polvo y una mezcla de oxiacetileno explosivo, es encendido con el uso de una bujía. Después de la ignición, la detonación acelera y calienta las partículas entrantes, lográndose formar capas densas y con altas fuerzas de enlace contra el substrato. Después de cada detonación, el barril es purgado con gas de nitrógeno y el proceso se repite varias veces por segundo. El proceso produce niveles de ruido que pueden exceder 140 decibeles. Las capas producidas a través de este

proceso son de excelente calidad; el inconveniente es que éste proceso es relativamente costoso.

El equipo de rociado térmico por Detonación (D-Gun), consta básicamente de un tubo acelerador de gran longitud, generalmente refrigerado por agua y un juego de válvulas tal como lo indica la Figura 1.8. El oxígeno y el combustible (acetileno generalmente) junto con una distribución uniforme de polvo son intermitentemente inyectados, a una atmósfera de presión, en la cámara de forma cilíndrica. Una bujía enciende la mezcla y eleva la presión. Debido a la geometría alargada de la pistola, la partícula dentro de la llama logra acelerarse hasta alcanzar velocidades supersónicas, siendo estas velocidades dependientes de la presión en el cilindro o tubo.



Figura 1.8.- Esquema de la pistola de rociado térmico modelo D-GUN.

1.2.4.5.- Rociado Térmico por HVOF (High Velocity Oxi-Fuel).

El proceso de HVOF fue inventado en 1958 por G.H. Smith, J.F. Pelton, y R.C. Eschenbach de Unión Carbide y es semejante al proceso D-Gun (pistola de detonación) con combustión interna confinada. Sin embargo, en el proceso HVOF los gases son alimentados y carburados continuamente.

Los combustibles empleados en este proceso pueden ser propileno, hidrógeno y propano dependiendo de la disponibilidad del gas y del tipo de recubrimiento requerido. En algunas versiones se utilizan combustibles líquidos tales como el queroseno. El material de alimentación está generalmente en forma de polvo. En la Figura 1.9 se presenta un dibujo esquemático de una pistola de rociado térmico HVOF.

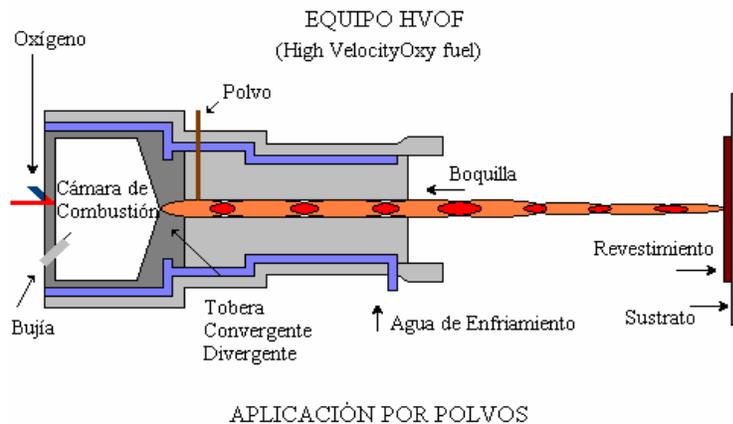


Figura 1.9.- Esquema de la pistola de rociado térmico HVOF.

La expansión del flujo de gas proveniente de la región de alta presión de la cámara de combustión (Figura 1.9) a la presión atmosférica, da como resultado una significativa caída de la temperatura. Los polvos son inyectados generalmente en dirección axial o formando un ángulo con el flujo supersónico, a una temperatura constante más baja que el punto de fusión del material pulverizado. Las partículas atomizadas son aceleradas alcanzando velocidades de hasta 750 m/s.

La pistola HVOF que se muestra en la Figura 1.9 posee una cámara de combustión interna por lo que requiere de un sistema de enfriamiento activo y un control de flujo de gas, debido a que las tasas de flujo son mucho más altas que en los procesos de combustión convencionales.

Los componentes claves en un equipo de HVOF son los siguientes:

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



Figura 1.10.- Esquema de un sistema de rociado térmico HVOF

Se ha encontrado que el enfriamiento de la boquilla del equipo HVOF es un aspecto importante para prevenir que los productos de la combustión fundan o vaporicen los polvos en el depósito o paredes del tubo y, a la vez, para prevenir el esfuerzo térmico residual del equipo. Finalmente, el transporte de los polvos y la inyección de los gases de combustión es más preciso en HVOF que en los procesos de combustión convencionales.

Una vez que las partículas semifundidas entran en contacto con el ambiente que las rodea, pueden sufrir procesos de oxidación o reducción. El calentamiento debido al

impacto funde el material cuando choca con el sustrato de tal manera que se forma la primera capa del recubrimiento.

La aceleración del gas producida por el proceso HVOF es más alta que la producida por combustión normal o por los procesos de rociado térmico vía plasma. Al incrementarse la velocidad de la partícula se incrementa la densidad y adherencia del recubrimiento, permitiendo de esta forma, una distribución más uniforme del mismo sobre el sustrato mejorando así su calidad.

Se han encontrado recubrimientos de alta densidad, debido a que la alta velocidad de impacto de la partícula, hace que se deforme fácilmente a pesar de no haber sido fundida totalmente. La Figura 1.11 ilustra el efecto de la velocidad de la partícula sobre la calidad del recubrimiento.

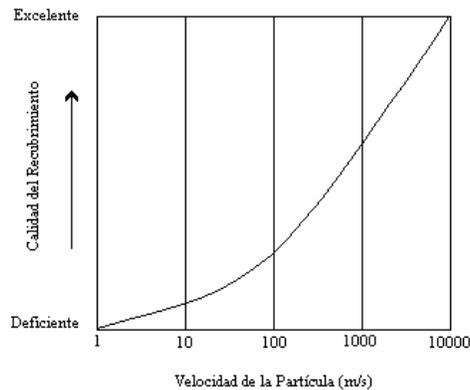


Figura 1.11.- Efecto de la velocidad del rociado sobre la calidad del recubrimiento.

Las principales variables en el proceso de HVOF son la presión de la cámara de combustión y la relación estequiométrica combustible/oxígeno. Si estas dos variables son modificadas entonces la temperatura, la velocidad y características del chorro de salida del equipo HVOF pueden ser alteradas.

La Figura 1.12 ilustra la mayoría de los parámetros involucrados en el proceso. La velocidad de flujo y los perfiles de temperatura, derivados ambos del calentamiento así como los parámetros del flujo de gas, son factores críticos que determinan si hay suficiente energía o tiempo para fundir las partículas del material de alimentación.

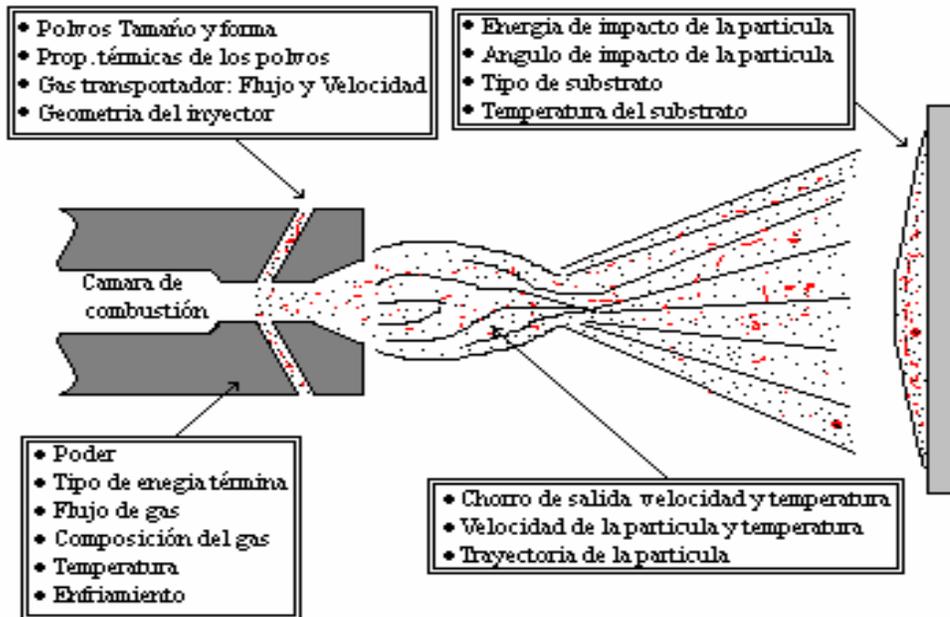


Figura 1.12.- Parámetros generales del proceso HVOF.

Dentro de las principales ventajas del proceso HVOF comparadas con otros procesos de rociado térmico podemos encontrar:

- ✍ Ambiente más favorable a causa de una atmósfera menos oxidante.
- ✍ Calentamiento más uniforme y eficiente de la partícula, debido a la micro turbulencia a la salida de la boquilla de la pistola.
- ✍ Menor tiempo de viaje debido a la alta velocidad de la partícula.
- ✍ Menor temperatura final de la partícula comparada con otros procesos de rociado térmico.

La Tabla 1.2 contiene las características básicas del proceso de HVOF que conlleva a una mejor calidad del recubrimiento y las causas que la producen.

Tabla 1.2. - *Ventajas del proceso HVOF y las causas que la generan.*

VENTAJAS	CAUSAS
Alta densidad, baja porosidad	Alta energía de impacto
Mejora la corrosión	Menor porosidad
Mayor resistencia al desgaste	Recubrimientos más duros
Mayor adhesión y resistencia cohesiva	Mayor enlace de partículas
Menor contenido de óxido	Menor tiempo de exposición al aire
Menor contenido de partículas no fundidas	Mejor calentamiento de las partículas
Menor rugosidad de la superficie rociada	Mayor energía de impacto

1.2.5.- CARACTERÍSTICAS DE LOS RECUBRIMIENTOS.

Dependiendo de la función final, existen varias características de la capa que pueden evaluarse para determinar su calidad. Unos ejemplos de estas características son:

- ✍ Microestructura (porosidad, material no fundido, nivel de oxidación)
- ✍ Dureza Macro (Rockwell B o C) y Dureza Micro (Vickers o Knoop)
- ✍ Fuerza (adhesiva y cohesiva)
- ✍ Resistencia a la corrosión
- ✍ Resistencia al desgaste
- ✍ Resistencia al choque térmico
- ✍ Fuerza dieléctrica

Para evaluar la calidad global de un recubrimiento rociado térmicamente es necesario examinar una sección transversal pulida que revele la microestructura de la capa (Figura 1.13).

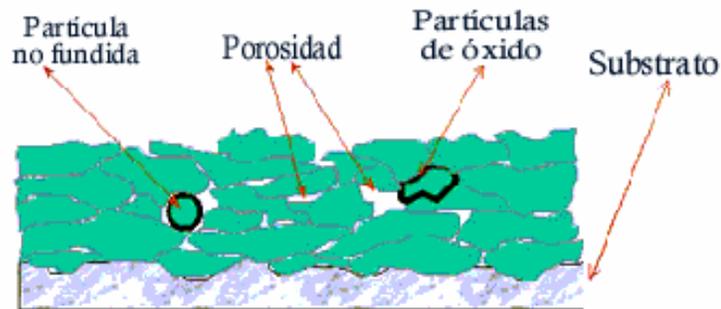


Figura 1.13.- Sección transversal de un metal rociado térmicamente.

En la mayoría de los casos la capa debe ser lo más densa posible. La porosidad de una capa puede ser tan alta como 20% o menor al 1%.

La cantidad de oxidación del material rociado depende fuertemente del proceso y sus condiciones. El rociado térmico de alambre por arco puede producir una gran cantidad de óxidos sobre todo en la última capa cuando se usa aire comprimido para atomizar las partículas. Sin embargo, no siempre el contenido de óxido presente en el recubrimiento es perjudicial, ya que los óxidos otorgan una capa más dura con un pequeño mejoramiento de las propiedades.

La microestructura de una sección transversal revela los óxidos como líneas circunferenciales oscuras que rodean las partículas individuales.

1.2.6.- ADHERENCIA Y ESTRUCTURA DE LOS RECUBRIMIENTOS.

La unión entre el revestimiento y el sustrato puede ser mecánica o metalúrgica, y está influenciada por varios factores: material de revestimiento, condición del sustrato, grado de rugosidad de la superficie antes, durante y después del rociado y la velocidad de impacto de las partículas.

Las diferencias en la estructura y composición química se debe a la naturaleza del recubrimiento, a la reacción del material con los gases del proceso, y con la atmósfera circundante mientras el material se encuentra en condición fundida. Por ejemplo, cuando el aire u oxígeno son utilizados como gases en el proceso, se forman óxidos y se convierten en parte del revestimiento.

1.2.7.- PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE.

La preparación de superficie del metal base es uno de los factores más importantes en el éxito o fracaso del proceso de rociado térmico.

La calidad de la adhesión del recubrimiento está directamente relacionada con la limpieza y rugosidad de la superficie del substrato. El uso debido de los procedimientos para preparar la superficie del substrato es necesario para asegurar la aplicación exitosa de la capa de rociado térmico. El material de recubrimiento y el tipo de substrato son los principales factores que determinarán que tipo de preparación de la superficie es necesaria para lograr una unión consistente.

Un proceso usual es recubrir rápidamente la superficie luego de haberse preparado, a menos que el recubrimiento se aplique inmediatamente después de la preparación, sin manipulación intermedia. Una pieza puede ser preparada y dejada en espera, únicamente si se protege bien de la humedad y otros contaminantes. De igual modo, no deben producirse cambios drásticos de temperatura que puedan generar condensación en la superficie.

En partes mecánicas que son sometidas a grandes esfuerzos, una inspección previa al recubrimiento es necesaria para detectar fallas en la base del metal. Esto se hace utilizando métodos de inspección no destructivos. Las fallas en la parte estructural pueden producir fallas similares en el recubrimiento. Las grietas del substrato no son reparadas por el rociado térmico.

1.2.7.1.- Limpieza y Manejo.

El primer paso en la superficie a rociar térmicamente, es remover todas las partículas contaminantes que en ella se encuentren, tal como aceites, grasa y pinturas. El calor del rociado térmico no quitará los contaminantes, y estos a su vez inhibirán la unión. Después de remover todos los contaminantes, la limpieza de la pieza debe mantenerse hasta completar el ciclo de rociado.

Entre estos procesos de limpieza se puede encontrar la utilización de: procesos de vaporizado (Desengrasante o Abrasivo), baños químicos, procesos de horneado, limpieza ultrasónica, entre otros.

1.2.7.2.- Rugosidad.

Después de la limpieza, se usa un método severo para producir una superficie ideal a la cual se pueda adherir el recubrimiento. Los principales métodos son:

1. Granallado.
2. Macrorugosidad.
3. Capa de recubrimiento.

A menudo se usan combinaciones de estos métodos, debido a que se necesita una rugosidad apropiada para asegurar una buena adhesión entre el sustrato y el recubrimiento.

La rugosidad adecuada en la superficie del sustrato sirve para:

- ✍ Proveer una superficie compacta y fuerte.
- ✍ Otorgar capas de agarre.
- ✍ Incrementar el área de agarre.
- ✍ Descontaminar la superficie.

1.2.7.3.- Proceso de Arenado.

La arena abrasiva proyectada (Arenado), es el método comúnmente utilizado en la generación de rugosidad. La superficie a recubrir es impregnada uniformemente por las partículas abrasivas.

La calidad del acabado depende del tamaño y tipo de abrasivo. Partículas duras y angulares proveen excelentes resultados. Todo el abrasivo debe estar limpio, seco, libre de aceites, u otros contaminantes. La apropiada selección de un desbaste medio depende de la dureza del substrato.

Los abrasivos más utilizados son:

- ✍ Óxido de aluminio.
- ✍ Hierro templado.
- ✍ Acero angular.
- ✍ Carburo de silicio.
- ✍ Granate.

1.3.- DESGASTE

1.3.1.- GENERALIDADES.

Para poder entrar en el tema del desgaste de materiales, se debe enunciar la ciencia que estudia todos los procesos que involucran este fenómeno. La TRIBOLOGIA es la ciencia y técnica que interpreta la totalidad de los fenómenos emergentes de superficies que interactúan con movimiento relativo entre sí en presencia o ausencia de algún medio circundante. Etimológicamente el termino griego “TRIBOS” significa frotar, rozar, luego la TRIBOLOGIA estudiara los mecanismos de fricción. A ésta se le incorporan una multitud de tópicos que incluyen la fricción, el desgaste, la lubricación y comportamiento de materiales vitales en la industria ingenieril. De tal manera que todo diseño mecánico, es afectado por estos tópicos, y sin la aplicación de una práctica tribológica firme, estos diseños serían incompletos, conllevando a una posible falla del componente en servicio antes de lo previsto.

El desgaste es una de las principales causas por la cual se hace necesario el mantenimiento industrial. Comprado con los otros dos problemas que ocasionan el reemplazo de máquinas y/o componentes: fatiga y corrosión; el desgaste ha sido el menos estudiado y probablemente por esta razón, aún no sea posible predecirlo con exactitud.

El desgaste puede definirse como el deterioro al uso, siendo el mismo una falla inevitable, siempre y cuando existan cuerpos en contacto bajo carga y con movimiento relativo entre sí. Normalmente, el desgaste no ocasiona fallas violentas, la fractura repentina no es aceptada universalmente como una forma de desgaste, pero podría ser considerada en el análisis de fallas por desgaste, debido a que los materiales más resistentes al desgaste son con frecuencia considerablemente frágiles y propensos a la fractura (García y Redden, 1998).

El desgaste trae entre otras, consecuencias tales como:

- ✍ Reducción de la eficacia de operación

- ✍ Pérdida de la potencia por fricción.
- ✍ Incremento del consumo de lubricantes.
- ✍ Eventualmente conduce al reemplazo de componentes desgastados.
- ✍ Obsolencia de las máquinas en su totalidad.

En general, el desgaste usualmente es perjudicial, pero en determinados usos tal como, la preparación de superficies para la aplicación de recubrimientos, es beneficioso. Cabe destacar que, en ocasiones, pequeñas variaciones en la velocidad, carga o condiciones, pueden influir notablemente en la tasa de desgaste de una pieza.

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.

1.3.2.- TIPOS DE DESGASTE.

Existen diferentes tipos de desgastes, que habitualmente actúan en forma combinada. En función de una amplia variedad de criterios se han logrado definir cinco tipos primarios de desgaste: (American Society for Metals, 1995)

1.3.2.1.- Desgaste Adhesivo.

Ocurre cuando dos superficies metálicas se deslizan entre sí bajo una presión local muy alta, creando uniones entre las irregularidades microscópicas o asperezas de la

superficie de deslizamiento. Subsecuentemente las fuerzas de deslizamiento fracturan las uniones separando el material de una superficie transfiriéndola a otra; esto resulta en la formación de pequeñas cavidades en una de las superficies y pequeñas proyecciones en la otra, que a su vez puede conducir a un daño adicional. El proceso podría también resultar en la formación de partículas desprendidas y podría contribuir al desgaste abrasivo.

Este tipo de desgaste se presenta típicamente en cojinetes de deslizamiento, chumaceras, bocinas, bujes, engranajes, motores de combustión interna, compresores reciprocantes, matrices, engranajes, etc.

1.3.2.2 - Desgaste Abrasivo.

Es el desplazamiento del material de una superficie por el contacto con proyecciones duras de otra superficie o con partículas duras que se mueven relativas a la superficie de desgaste.

También existe abrasión cuando partículas duras son atrapadas entre dos superficies deslizantes y desgastan por rozamiento una o ambas superficies o pueden quedar empotradas en cualquiera de las superficies y desgastar por rozamiento la superficie opuesta.

El desgaste abrasivo puede ocurrir en estado seco o en presencia de líquidos. Se hace evidente en equipos de perforación, trituradoras, molinos de bolas, cuerpos de contacto deslizante, entre otros.

1.3.2.3 - 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. (Pinto y Rangel, 1999).

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

1.3.2.4 - Desgaste por Fatiga Superficial.

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

Un ejemplo típico de este desgaste, es el ocurrido en las pistas de los rodamientos, donde estas cargas cíclicas producidas por las bolas sobre la pista, hacen que este fenómeno aparezca.

1.3.2.5 - Desgaste Erosivo.

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 es aplicada 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 es 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.

Este fenómeno es característico observarlo en procesos industriales que involucran chorros de líquidos o gases con sólidos en suspensión, como son: compresores, turbinas, equipos para granallado y otros.

1.3.3.- EROSIÓN.

La erosión podría ser convenientemente definida como el volumen o masa pérdida (o removida) de la superficie por la unidad de masa de las partículas erodantes. Es recomendable usar el volumen, ya que el mismo nos permite evaluar la pérdida de materiales de diferentes densidades.

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

$$R \propto \frac{S_y^2}{2 * E} \qquad \text{Eq. 1}$$

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 más duras que la superficie a desgastar. El cuarzo, óxido de aluminio y el carburo de silicio tienen durezas de 1300, 1750, 2000 Kg/mm² 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:

$$B = \frac{\rho * V^2}{Y} \quad \text{Eq. 2}$$

En donde:

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

En la siguiente tabla se presenta el tipo de deformación producto del impacto en relación con el número de Best.

Tabla 1.3. - 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

Tomado de Malave et. Al; 1995

Haciendo referencia a Finnie (García, 1998); 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), concentración de las partículas en el fluido. 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, facilidad para la fractura y dureza de la partícula.

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:

$$E = K * V^n * f(\theta) \quad \text{Eq. 3}$$

En donde:

- E: Factor de erosión
- V: Velocidad de la partícula
- K: Magnitud absoluta de la erosión
- f(θ): 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

La variación de la erosión con respecto al ángulo de impacto depende críticamente de la naturaleza del material que está siendo erosionado, la Figura 1.14 revela el comportamiento típico de un metal dúctil, como el aluminio, y de un material frágil como la alúmina. La forma general de la curva muestra para el aluminio valores de máxima erosión alrededor de 20° a 30°, éste ángulo de impacto ha sido establecido por muchos investigadores para una amplia variedad de metales.

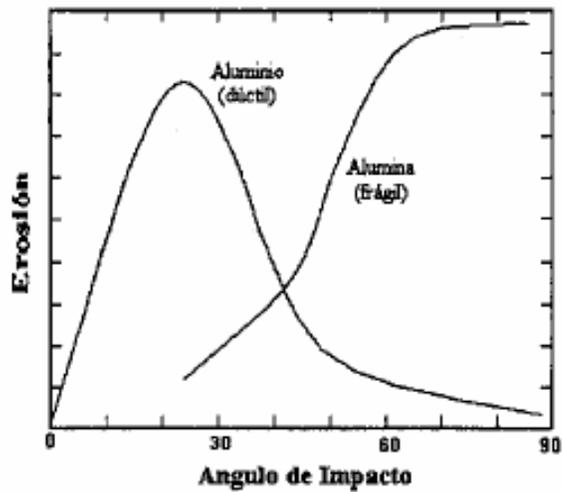


Figura 1.14.- Variación de la erosión con el ángulo de impacto característico de materiales dúctiles y frágiles.

Los valores de K, los cuales definen la magnitud absoluta de la erosión, pueden ser obtenidos de datos publicados de una variedad de materiales. El Anexo 1, lista los valores de K calculados de ratas de erosión, conjuntamente con los detalles de las condiciones experimentales bajo las cuales fueron obtenidas.

Tilly (Bangueses, 2000), estudió y calculó las trayectorias de las partículas de 5 μ 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 proyectadas se espera que choquen con la superficie de la probeta a un ángulo de incidencia de 45°.

Smeltzer (García, 1998), demostró 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.

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 (Figura 1.15) como sigue a continuación: (Hutchings, I. M.)

- ✍ 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.

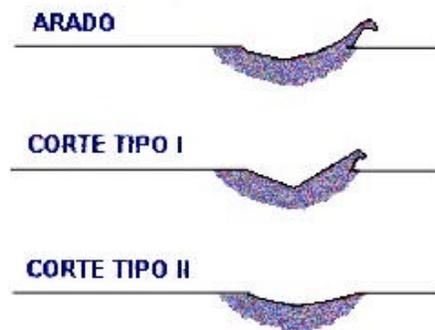


Figura 1.15.- Tipos de cortes producidos por el impacto de las partículas. (Hutchings, I. M.)

1.3.4.- ABRASIÓN.

La abrasión, según la ASTM (AMERICA SOCIETY TESTING MATERIALS) “se origina por partículas o protuberancias duras que son forzadas una contra otras y se mueven a lo largo de una superficie sólida”, y se define como “el daño a una superficie sólida que implica generalmente la pérdida progresiva de material y es debido al movimiento relativo entre la superficie y una o varias sustancias en contacto”.

La velocidad de abrasión depende de 4 factores:

- ✍ Las características de cada una de las superficies.
- ✍ La presencia de abrasivos entre ellas.
- ✍ La velocidad de contacto.
- ✍ Condiciones ambientales. (Pinto y Rangel, 1999)

El fenómeno abrasivo se categoriza fundamentalmente de acuerdo al tipo y al ambiente de contacto. Debido al tipo de contacto la abrasión se divide en:

- ✍ Contacto de dos cuerpos, ocurre cuando el abrasivo se desliza a lo largo de una superficie, también se le llama de abrasión por baja presión (Figura 1.16a).
- ✍ Contacto de tres cuerpos, ocurre cuando el abrasivo es atrapado entre dos superficies. También se le llama abrasión producida por alta presión (Figura 1.16b).



a) Abrasión de dos Elementos.

b) Abrasión de tres elementos

Figura 1.16. - Clasificación del desgaste abrasivo.

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 con 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:

$$W \propto A \cdot d \quad \text{Eq. 4}$$

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 términos, que la ecuación de Archard, sea igual a:

$$W \propto K_3 \cdot L \cdot d / H \quad \text{Eq. 5}$$

Siendo k_3 una constante que engloba las otras.

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

$$R \propto \frac{1}{W} \qquad \text{Eq. 6}$$

La ecuación de Archard, con pequeñas modificaciones es ampliamente utilizada como punto de partida para el desarrollo de ecuaciones más complejas. (Pinto y Rangel, 1999).

Los factores más importantes que afectan el desgaste abrasivo (Klisans y Bavaresco, 2000) son los siguientes:

- ✍ Tiempo
- ✍ Carga
- ✍ Temperatura
- ✍ Materiales
- ✍ Lubricantes
- ✍ Medio Ambiente
- ✍ Vibración
- ✍ Desgaste
- ✍ Fricción
- ✍ Acabado Superficial
- ✍ Geometría
- ✍ Velocidad.

El volumen desgastado aumenta con la distancia de resbamiento. Si ocurren desviaciones, éstas se deben generalmente a una reducción del tamaño del abrasivo o a una obstrucción o destrucción de la superficie. La presencia de humedad durante el desgaste ayuda a la acción abrasiva e incrementa la tasa de desgaste en un factor que algunos autores cuantifican entre 2 y 4. El daño causado por los abrasivos guarda relación directa con la carga aplicada

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1.- CONCLUSIONES

Las muestras sinterizadas de WC-12%CoAl evidenciaron gran cantidad de poros, lo que condicionó su comportamiento frente al desgaste erosivo y abrasivo, definiéndose como un material poco denso, un sólido no continuo y con una estructura inadecuada para su comparación.

Los sinterizados estudiados básicamente presentaron dos fases claramente distinguibles, una fase clara de WC con morfología angular y otra fase oscura de aglomerante (Co, CoAl). Sin embargo en las muestras de WC-6%Co se observó una fase gris, que de acuerdo a la morfología presentada y naturaleza química se asocia con la fase γ , pero no se demostró a través de técnicas especializadas su estequiometría y caracterización normal de la misma.

Se pudo observar que los valores de microdureza para las diferentes aleaciones en estudio presentaron un comportamiento acorde a lo mencionado en la teoría, en la cual a medida que aumenta la fase aglomerante la dureza disminuye.

El deterioro erosivo observado en la superficie de todas las muestras estudiadas evidenció básicamente una deformación plástica o aplastamiento de la fase aglomerante (Co, CoAl) la cual expuso a las partículas de WC facilitando el desprendimiento de material debido al impacto sucesivo de las partículas erodantes sobre la superficie de las muestras.

El material que presentó menor desgaste erosivo a un ángulo de 30° fue el sinterizado WC-6%Co, mientras que a ángulos de 60° y 90° fue el WC-12%Co (SPR); en cambio el material más desfavorable en todas las condiciones fue el WC-12%CoAl.

La tendencia presentada por los materiales por efecto del desgaste erosivo a diferentes ángulos de proyección y tiempos de exposición no es lineal, observándose un mayor

desgaste en la primera fracción de tiempo (3 min), pudiendo ser motivado por un posible endurecimiento por deformación plástica (ocurrida en la fase aglomerante de las muestras), producto de los sucesivos impactos de las partículas erosivas en la superficie de las muestras.

El desgaste abrasivo producido por las partículas de sílice en el ensayo de abrasión, se traduce morfológicamente en una superficie desgastada caracterizada por la presencia de surcos o canales, aunado a esto un mecanismo de desgaste por fractura y finalmente desprendimiento de material.

El sinterizado de WC-6%Co fue el que presentó mayor resistencia al desgaste abrasivo, presentando un desgaste 8 veces menor que el desgaste del recubrimiento de WC-12%Co; mientras que el sinterizado de WC-12%CoAl presentó la menor resistencia al desgaste abrasivo, siendo 5 veces mayor que la del recubrimiento WC-12%Co. Por último, el sinterizado WC-12%Co (SPR) se desgastó 4 veces más que el recubrimiento.

4.2.- RECOMENDACIONES

El reacondicionamiento del banco de ensayos de erosión, ya que el mismo presenta deterioro en varios de sus componentes.

Prestar especial cuidado en la parte experimental, sobre todo durante la manipulación de las muestras ya que en este punto se podrían generar resultados erróneos.

Modelar matemáticamente la tendencia al desgaste abrasivo y erosivo de los materiales a ser estudiados, con la idea de determinar un tiempo de vida útil de un material en función del desgaste ocasionado a unas condiciones dadas.

Realizar mediciones de dureza después de cada ensayo de erosión para verificar si hay un incremento de la dureza producto de los sucesivos impactos de las partículas erosivas sobre la superficie del material.

Cambiar la ubicación de los recipientes a presión de aire (bombonas) de su ubicación actual a un sitio adecuado, para evitar el contacto directo con el suelo, en vista de que se encuentran a la intemperie produciendo el deterioro de las mismas.

La utilización de otro material abrasivo (sílice) en los ensayos de erosión, ya que obtención de la alúmina se dificultad debido a lo lejos que queda la empresa que la puede suministrar (Bauxilum), siendo la sílice de mas fácil obtención y la cual también es recomendada por la norma.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ✍ American Society for Metals; (1995). “Failure Análisis and Prevention”. Ohio, A.S.M. Commitee on analysis of wear faulures.

- ✍ 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.

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

- ✍ Carrasquero, Edwuin; (1999). “Caracterización microestructural y tribológica de un revestimiento industrial de WC-Co obtenido por deposición vía HVOF”. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ing. Metalúrgica.

- ✍ Castro, Gustavo; (1999). “Caracterización de Wídias de cortes comerciales”. Trabajo Especial de Grado. Instituto Universitario de Tecnología Dr. Federico Rivero Palacios. Departamento de Tecnología de los Materiales. Mención Metalurgia.

- ✍ Chirinos, Lucrecia J. y León, Aristarco J.; (2000). “Estudio comparativo de la vida útil de herramientas comerciales y herramientas termo rociadas por proyección hipersónica HVOF”. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.

- ✍ Exner H; (1979). “Physical and chemical nature of cemented carbides”. International Metal Reviews, N° 4, Germany.
- ✍ Ferrara A., Salvador y Perez R., Rafael P.; (2001). “Evaluación de la resistencia al desgaste de un recubrimiento depositado por rociado térmico HVOF”. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.
- ✍ 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.
- ✍ González, Evelyn L. y Rangel, Jenkared R.; (1998). “Influencia del método de deposición sobre la resistencia a la erosión de un recubrimiento de Acero Inoxidable AISI 420 termorociado”. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.
- ✍ Hutchings, I. M. “Mechanical and Metallurgical Aspects of the Erosion of Metals”. Cambridge, s.p.i.
- ✍ 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.
- ✍ Matos M., Asdrúbal J. y Ruiz S., Ernesto J.; (1999). “ Estudio de la resistencia al desgaste de una serie de aleaciones de WC-Co modificados” . Trabajo Especial de grado I.U.T. Departamento de Tecnología de los Materiales.

- ✍ Milensky., Martinez M; (2001) “ Estudio del desgaste por deslizamiento y microabrasivo de metales duros de WC-VC-Co”. Trabajo especial de grado grado I.U.T. Departamento de Tecnología de los Materiales.
- ✍ Norma DIN 50320, 1975. Wear.
- ✍ PDVSA ; (1997). “ Propiedades de las Partículas Sólidas”. (Nº MDP-11-MP-01). Especialistas.
- ✍ 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.
- ✍ Prakash L.; (1995). “Physical and chemical nature of cemented carbides”. International Metal Reviews, Germany.
- ✍ Quercia G.; (1999). “Evaluación del comportamiento Tribológico de Materiales cerámicos, metálicos y compuestos”. Tesis de Grado. Universidad Simón Bolívar. Coordinación de Ing. de Materiales.
- ✍ Reshetnyak H., Kubarsepp J.; (1997). “Structure sensitivity of wear resistance of hardmetal. International Journal of Refractory Metal ? Hard Material. Gran Bretaña.
- ✍ Rodríguez, E.; (2000). “Evolución del comportamiento Tribológico del Carburos Cementados con Intermetálicos de Co”. Trabajo Especial de Grado. IUT. Departamento de Tecnología de Materiales.
- ✍ Roebuck B.; (1995). “Terminology, Testing, Properties, Imaging and Models for Fine Graines Hardmetals”, International Journal of Refractory Metals ?

Hard Materials, Pag. 265-279.

- ✍ Santhanam A., Tierney P. y Hunt L.; (1990). Cemented Carbides Vol. 2 Tenth Edition.
- ✍ ASTM G76-95. Standard Test Method for Conducting Erosion Tests By Solid Particle Impingement Using Gas Jets.
- ✍ ASTM G 65 – 00. Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus.
- ✍ ASTM G 99 – 95a. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus.
- ✍ ASTM B 311 – 93. Test Method for Density Determination for Powder Metallurgy (P/M) Materials Containing Less Than Two Percent Porosity.
- ✍ ASTM E 384 – 99. Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials.
- ✍ ASTM E 92 – 82. Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials.
- ✍ ISO 3369 – 1975. Impermeable sintered metal materials and hardmetals – Determination of density.
- ✍ ISO 513 – 1991. Application of hard cutting materials for machining by chip removal – Designation of the main groups of chip removal and groups of application.

Anexo 6.1.- Valores de K calculados de tasas de erosión de datos publicados.

Material	Abrasivo	V (m/s)	Angulo	K (10⁻⁸)	Referencia
Al 2024	Cuarzo	125	20°	0.83	Gat y Tabakoff, 1978
Al 2024	Cuarzo	117	60	0.38	Gat y Tabakoff, 1978
Al 2024	Cuarzo	122	90	0.41	Gat y Tabakoff, 1978
Al 6061-T6	SiC	90	30°	1.46	Sheldon, 1977
Al 6061-T6	SiC	91	20°	2.28	Tilly y Sage, 1970
Al - puro	SiC	282	20°	0.31	Tilly y Sage, 1970
Al - aleación	Cuarzo	244	90°	2.2	Tilly y Sage, 1970
Al - puro	Al ₂ O ₃	129	20°	1.49	Neilson y Gilchrist, 1968
Al - puro	Al ₂ O ₃	129	30°	1.3	Neilson y Gilchrist, 1968
Al - puro	Al ₂ O ₃	129	90°	1.46	Neilson y Gilchrist, 1968
Al 1100-0	SiC	76	20°	1.46	Finnie, 1967
Al 1100-0	SiC	137	20°	1.32	Finnie, 1967
Al - 4.75% Cu	SiC	30.5	30°	0.68	Brass, 1977
Cu	SiC	76	20°	2.54	Finnie, 1967
Cu	SiC	137	20°	2.55	Finnie, 1967
Cu	Cuarzo	82	20°	1.17	Tadolder, 1966
Ni	Cuarzo	82	20°	0.56	Tadolder, 1966
Ni	SiC	90	30°	1.82	Sheldon, 1977
Ti - aleación	Cuarzo	128	90°	2.32	Tilly y Sage, 1970
Ti - aleación	Cuarzo	244	90°	1.85	Tilly y Sage, 1970
Ti - puro	Cuarzo	82	45°	0.69	Tadolder, 1966
Ti - puro	Cuarzo	82	90°	1.11	Tadolder, 1966
Ti 6A14V	Cuarzo	122	20°	0.83	Gat y Tabakoff, 1978
Ti 6A14V	Cuarzo	116	60°	0.59	Gat y Tabakoff, 1978
Fe - puro	Cuarzo	82	20°	0.59	Tadolder, 1966
Fe - puro	SiC	76	20°	2.44	Finnie, 1967

Tomado de Malaver et. Al, 1995

Estos valores fueron calculados para un mismo valor de $n = 2,4$ en la ecuación del factor de erosión

ANEXO 6.3

CALCULOS TIPO

Determinación de la Densidad.

Sinterizado WC-6%Co

$$D = \frac{A * E}{A - B} \quad \text{Eq. 6}$$

A: Peso de la muestra en seco (grs)= 23,9315

B: Peso de la muestra suspendida (grs)= 22,3523

E: Densidad del agua en grs/cm³ a 21 °C= 0,9980

D: Densidad de la pieza (grs/cm³)

$D_{\text{WC-6\%Co}} = 15.12 \text{ grs/cm}^3$ para una muestra.

Ahora bien, el promedio obtenido de las diferentes densidades de cada material es el siguiente:

$$D_{\text{WC-6\%Co}} = 0.014607 \text{ grs/mm}^3$$

$$D_{\text{WC-12\%Co}} = 0.013819 \text{ grs/mm}^3$$

$$D_{\text{WC-6\%CoAl}} = 0.013803 \text{ grs/mm}^3$$

$$D_{\text{WC-12\%CoAl}} = 0.011644 \text{ grs/mm}^3$$

$$D_{\text{WC-12\%Co (SPR)}} = 0.013617 \text{ grs/mm}^3$$

$$D_{\text{Recub. WC-12\%Co}} = 0.013896 \text{ grs/mm}^3$$

Ensayo de Abrasión.

Sinterizado de WC-6%Co.

Diferencias de pesos.

Pérdida de peso = Masa Inicial (gr) – Masa Final (gr)

Pérdida de peso₁ = 22,4795 – 22,4666

Pérdida de peso₁ = 0,0129 gr.

Pérdida Volumétrica.

$$\text{Pérdida Volumétrica} = \frac{\text{Pérdida de Masa (gr)}}{\text{Densidad (gr / mm}^3\text{)}}$$

$$\text{Pérdida Volumétrica} = \frac{0,0129}{0,014607}$$

$$\text{Pérdida Volumétrica} = 0,88313 \text{ mm}^3$$

Ajuste de pérdida volumétrica.

$$\text{Ajuste de pérdida volumétrica} = \text{Pérdida Volumétrica (mm}^3\text{)} \times \frac{\text{Diámetro original de la rueda (228,6 mm)}}{\text{Diámetro de la rueda después del Ensayo}}$$

$$\text{Ajuste de pérdida volumétrica} = (0,88313 \times 228,6) / 222.$$

$$\text{Ajuste de pérdida volumétrica} = 0,90939 \text{ mm}$$

Ensayo de Erosión

Sinterizado de WC-6%Co.

Angulo 30°, 3 min

Masa del Abrasivo = 1115,7 gr.

Diferencias de pesos.

$$\text{Pérdida de peso} = \text{Masa Inicial (gr)} - \text{Masa Final (gr)}$$

$$\text{Pérdida de peso}_1 = (19,8401 - 19,8397) \text{ gr}$$

$$\text{Pérdida de peso}_1 = 0,0004 \text{ gr.}$$

Tasa de Erosión (mm³/gr).

$$\text{Tasa de Erosión (RE)} = \frac{\text{Diferencia de Peso}}{\text{Masa de Erosivo} * \text{Densidad}}$$

$$\text{Tasa de Erosión} = \frac{0,0004}{1115,7 * 0.014607}$$

$$\text{Tasa de Erosión} = 2,454 * 10^{-5}$$

Factor de erosión Normalizado.

$$\text{Factor de erosión Normalizado (FEN)} = \frac{\text{RE}_{(\text{material})}}{\text{RE}_{(\text{Control})}}$$

$$\text{FEN} = 3,55$$

ANEXO 6.4

VALORES DE PÉRDIDA DE PESO EN LOS ENSAYOS DE EROSION

PÉRDIDA DE PESO									
Material	30°			60°			90°		
	3 min	6 min	9 min	3 min	6 min	9 min	3 min	6 min	9 min
Acero 1020	0.0063	0.0084	0.0135	0.0042	0.0056	0.0094	0.0021	0.0040	0.0071
Recub. WC-12%Co	0.0032	0.0063	0.0131	0.0058	0.0089	0.0147	0.0088	0.0136	0.0165
Sint. WC-6%Co	0.0004	0.0007	0.0009	0.0009	0.0019	0.0027	0.0018	0.0028	0.0035
Sint. WC-12%Co	0.0012	0.0020	0.0024	0.0023	0.0032	0.0040	0.0021	0.0033	0.0042
Sint. WC-6%CoAl	0.0016	0.0032	0.0045	0.0022	0.0039	0.0054	0.0028	0.0056	0.0069
Sint. WC-12%CoAl	0.0082	0.0156	0.0191	0.0112	0.0157	0.0200	0.0121	0.0206	0.0259
Sint. WC-12%Co (SPR)	0.0009	0.0015	0.0021	0.0007	0.0008	0.0012	0.0002	0.0007	0.0012

ANEXO 6.5

TASA DE EROSION

TASA DE EROSIÓN									
Material	30°			60°			90°		
	3 min	6 min	9 min	3 min	6 min	9 min	3 min	6 min	9 min
Acero 1020	0.000722	0.000482	0.000516	0.000482	0.000321	0.000359	0.000241	0.000229	0.000271
Recub. WC-12%Co	0.000209	0.000202	0.000282	0.000372	0.000287	0.000317	0.000565	0.000438	0.000355
Sint. WC-6%Co	0.000026	0.000022	0.000018	0.000055	0.000057	0.000053	0.000107	0.000083	0.000069
Sint. WC-12%Co	0.000080	0.000066	0.000052	0.000148	0.000102	0.000087	0.000133	0.000106	0.000090
Sint. WC-6%CoAl	0.000112	0.000111	0.000103	0.000154	0.000134	0.000125	0.000192	0.000194	0.000159
Sint. WC-12%CoAl	0.000629	0.000599	0.000490	0.000862	0.000604	0.000512	0.000931	0.000793	0.000665
Sint. WC-12%Co (SPR)	0.000058	0.000049	0.000044	0.000043	0.000027	0.000025	0.000013	0.000023	0.000025