

*TRABAJO ESPECIAL DE GRADO*

**INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE  
ROCIADO TÉRMICO POR PLASMA  
SOBRE LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE  
RECUBRIMIENTOS CERÁMICOS**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela

Por los Bachilleres:

Guevara B., David M.

Páez H., Daniel A.

Para Optar al Título de  
Ingeniero Mecánico

**Caracas 2008**

*TRABAJO ESPECIAL DE GRADO*

**INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE  
ROCIADO TÉRMICO POR PLASMA  
SOBRE LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE  
RECUBRIMIENTOS CERÁMICOS**

Tutor Académico: Prof. María de los Ángeles Rodríguez

Tutor Industrial: Prof. Andrea Scagni

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela

Por los Bachilleres:

Guevara B., David M.

Páez H., Daniel A.

Para Optar al Título de  
Ingeniero Mecánico

**Caracas 2008**

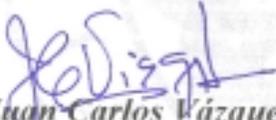
# ACTA

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres DANIEL PAEZ, y DAVID GUEVARA., intitulado:

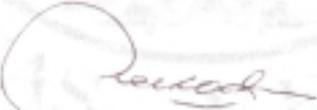
**“INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE ROCIADO TÉRMICO POR  
PLASMA SOBRE LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE  
RECUBRIMIENTOS CERÁMICOS”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el Plan de Estudios conducente al Título de Ingenieros Mecánicos.

En la ciudad de Caracas, al primer día del mes de julio del año dos mil ocho.

  
**Prof. Juan Carlos Vázquez**  
Miembro Principal

  
**Prof. José Gregorio La Riva**  
Miembro Principal

  
**Prof. María de los A. Rodríguez**  
Tutor

**Guevara B., David M., Páez H., Daniel A.**

## **INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE ROCIADO TÉRMICO POR PLASMA SOBRE LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE RECUBRIMIENTOS CERÁMICOS**

**Tutor Académico: Prof. María Rodríguez de Prato. Tesis. Caracas. U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2006, 100 Páginas.**

Desgaste por Abrasión, Plasma, Óxido de Cromo,  $5\text{SiO}_2 - 3\text{TiO}_2 - \text{Cr}_2\text{O}_3$ , parámetros óptimos, MiniTab, diseño factorial  $3^3$ , superficie de respuesta

Este trabajo cumple con el objetivo de determinar la influencia de los parámetros en la aplicación del recubrimiento  $5\text{SiO}_2 - 3\text{TiO}_2 - \text{Cr}_2\text{O}_3$  por rociado térmicamente por Plasma, frente a la resistencia al desgaste por abrasión. Se usó para ello un diseño experimental  $3^3$ , evaluando como parámetros Voltaje, Amperaje y Tasa de Alimentación de los Polvos, aplicados con una pistola de Plasma modelo Praxair SG-100. Se empleó ensayos de abrasión y Microdureza según norma ASTM G-65 y ASTM E 384-99 respectivamente para distintas combinaciones de parámetros. La Microestructura, composición de recubrimientos y superficie desgastada se evaluaron a través de Microscopía Electrónica de Barrido y Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDS) para las mejores y peores condiciones, incluyendo las condiciones adoptadas por el fabricante, obtenidas en el ensayo abrasivo. La significancia de los resultados se verificó por medio de un Análisis de Varianza (ANOVA) y software estadístico (MiniTab). Los parámetros más influyentes se determinaron mediante el método de superficie de respuesta, junto los más óptimos. El parámetro de mayor influencia resultó ser el voltaje, luego el amperaje y el menos significante la tasa de alimentación de los polvos. Como parámetros óptimos para este proceso se recomiendan los siguientes: 865-900 A, de 57,8 a 61g/min, 38,5 a 40 V.

## DEDICATORIA

Al Todopoderoso, Dios, porque gracias a él, frente a los obstáculos para lograr las buenas metas, nada es imposible.

A mis queridos y valiosos padres Amparo y Miguel, y mi hermano René, por estar en los momentos difíciles en toda mi vida, tanto en las mejores como en las peores, por apoyarme en la realización de este trabajo y por auxiliarme cuando más lo necesitaba. *Los amo*

A mi angelita y amor de mi vida, Yeni, por darme la oportunidad de compartir mi vida a su lado y de brindarme vital apoyo y consejos, esbozar una sonrisa de felicidad en mi rostro con tan solo existir y ganarse el amor infinito que le tengo. *Te Amo.*

A todos aquellos estudiantes que no se dejen vencer por las sombras en el camino de su éxito.

*A Ustedes...David*

Al ser más grande en el mundo, Dios, padre de todos nosotros por darnos el ser, guiarnos en el camino dándonos fuerzas y por estar presente siempre en todo momento.

A la Virgen y mi querida abuela María de los Ángeles, por estar viéndonos y cuidándonos en todo momento.

A mi madre Zulma, por estar siempre a mi lado, darme educación y apoyo incondicional en todo momento, por no dejarme caer en los malos momentos y ayudarme a vencer todos los obstáculos de mi vida. Para ella, todo el amor del mundo. *Cuentas conmigo para siempre.*

A mis hermanos Carlos, Adrián, Gustavo y Valentina, por vivir los mejores momentos de mi vida y apoyarme en todo día a día. Los quiero. Deseo que cumplan todas sus metas y siempre les daré mi apoyo incondicionalmente.

A mi Carito, por su apoyo en todo momento. *Te quiero. Que se realicen tus metas. Cuentas conmigo.*

A todos los profesores que Dios les de fuerza y tiempo para dar lo mejor, sin importar los problemas, y a todos los estudiantes con inconvenientes en el camino, que continúen. Lo importante es llegar al final. *Éxito para todos.*

*Los quiero...Daniel*

A nuestros amigos que nos apoyaron en las malas y en las buenas, en especial a los Ingenieros Lauren Chevron y Miguel Martín; a Gustavo Rojas, Glenda Castellanos, Gabriela Vargas, futuros ingenieros. *Que se cumplan todas sus metas.*

A todos los profesores, que en el camino tanto en la ciencia como en lo espiritual, nos aportaron todos sus conocimientos y que Dios les de fuerzas para que sigan adelante dando lo mejor de sí.

A nuestro hermano, Mahamud, donde quiera que esté, por sus sabios consejos que siempre tomamos. *Te tenemos siempre presente.*

## AGRADECIMIENTOS

En especial a Dios por brindarnos protección, fuerza, valor, fe y seguridad para lograr nuestro cometido cada día y hacer siempre lo correcto.

Agradecemos a la Universidad Central de Venezuela, ya que fue nuestro segundo hogar, albergando conocimientos, formándonos como futuros profesionales y mejores personas.

A nuestros padres Zulma, Amparo y Miguel, por apoyarnos, orientarnos y brindarnos amor y auxilio en este momento y todos los aspectos de nuestras vidas. Sin ellos, no hubiese sido posible la culminación de este trabajo. A mi padre Carlos, por estar conmigo en las primeras etapas de mi vida.

A nuestros hermanos René, Carlos, Adrián, Gustavo y Valentina, por su apoyo incondicional, orientación y brindarnos ayuda en este y todos los aspectos de nuestras vidas.

Al amor de mi vida, Yeni, por brindarme su vital ayuda, su apoyo, sus consejos en toma de decisiones y su primordial auxilio en todo momento.

A Carolina, por estar conmigo compartiendo los más bellos días de mi vida dándome su bella sonrisa, que no se borra de mi mente, la quiero...

A nuestra tutora académica Prof. María de los Ángeles Rodríguez por brindarnos gran parte de sus conocimientos acerca de la tribología y los materiales, su primordial y oportuna dedicación para con nosotros y por impartirnos no sólo su orientación académica sino su amistad, aconsejándonos tanto en la realización de este proyecto, como en cualquier meta que pensemos poner en marcha en nuestras vidas. Que Dios le de todo el tiempo a nuestra futura directora para que se cumplan sus metas.

Al profesor Andrea Scagni por facilitar las instalaciones de su empresa Plasmatec Ingenieros C.A. incondicionalmente, por aportarnos importantes conocimientos para la realización de los recubrimientos de forma óptima y satisfactoria, y por brindarnos su

amistad y apoyo incondicional. Que se hagan realidad todos los proyectos que tenga en mente. Cuenta con nosotros.

A todos los profesores que nos dieron todos sus conocimientos con un desprendimiento excepcional a lo largo de la carrera, en especial a los profesores José Luís Perera, Félix Flores, José G. La Riva, Juan Vásquez, Tibusay Zambrano, Enrique Limongi, Antonio Barragán, Pedro Lécue, Rafael Barrilla, Miguel Padilla, Carmen Rosa, Gustavo Delfino, Francisco García, Alberto Pertuzs, Frank Pietersz, Barbone, S. Hernández Edgar Toro, Rodolfo Berrios, César Ferrer, Nelson Fernández, José Chitty, Erika Stojanovich, Nelson McQuaick, Grullón, Barriola, Juvenal, Baduy, Bonna, Ignoto, Araujo. A todos ellos y los que nos faltaron por escribir. Que Dios les de fuerza para seguir dando lo mejor de si Gracias!!

A la Lic. María Antonieta Padrón, por su calor humano, su oportuna y sabia consulta, y primordial ayuda en momentos difíciles, no solo en nuestro trabajo de grado, si no en toda la carrera. La bendición!!

A los técnicos del taller de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UCV Araque, Joel, Rubén, Camacaro, Willi y Reyes por su incondicional apoyo en toda la carrera. Y en especial al Ing. Vizcaya, que se cumplan todos sus sueños a todos.

A las secretarias de los departamentos de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UCV, por el Departamento de Producción, Hanyit futura Lic. Estudios Internacionales; por el Departamento de Energética, Oneida; por el Departamento de Diseño, Carola futura Bibliotecóloga, con constancia lograrán todo lo que se propongan

A Denisse por auxiliarnos incondicionalmente a lo largo de nuestra carrera en el Departamento de Control de Estudios de la Facultad de Ingeniería y por su calor humano.  
*Nunca cambies*

A cada uno de los empleados de Plasmatec por su gran colaboración y por ser la semilla de la fuerza de trabajo en muchos avances de la empresa: a Jennifer, Yorli, Carmen, Alejandro, Anzony, Alfren, Yurelis, Gabriela, Johan y aquellos que no dejan de tener importancia para nosotros. Éxito en todo.

A los profesores Samuel, Ana Di Prinzio y Yenin, por su oportuno apoyo y participación en la toma de micrografías en la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la UCV. Les tenemos un cariño especial

Al Prof. Crisanto Villalobos por facilitarnos sus instalaciones en CITALA y brindarnos gran ayuda en cualquier inquietud presentada. Siga dando lo mejor de sí por siempre, nuestro mejor amigo.

Al profesor La Barbera por facilitarnos la balanza de precisión en la Escuela de Metalurgia de la UCV. Gracias hermano.

A Víctor, por ofrecernos su ayuda en el uso de los equipos en CITALA, para el manejo de las muestras en microscopia.

A la empresa GOMAINCA por su gran aporte en la vulcanización (engomado) de los discos en el ensayo de abrasión.

Al profesor Segura, por su oportuna e importante ayuda en el manejo de datos para las muestras empleadas para nuestra investigación. Siga dando su apoyo incondicional sin importar quien lo necesite.

A la profesora Santoromita por su auxilio en la culminación de nuestro trabajo. Nunca deje de sonreír y que se cumplan sus proyectos, que son de gran ayuda a la escuela como también los de muchos profesores de la escuela.

A Andrea y a Vicky por su gran ayuda en el ensayo de abrasión y otras deseándole que se cumplan sus metas.

A todas esas personas que nos ayudaron y participaron directa o indirectamente en la realización de este trabajo especial de grado muchas bendiciones.

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	III
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTOS.....	V
INDICE GENERAL.....	IX
INDICE DE FIGURAS.....	XIV
INDICE DE TABLAS.....	XIX
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I: DEFINICIÓN DEL PROYECTO.....	3
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.2 OBJETIVOS.....	4
1.2.1 <i>Objetivo General</i> .....	4
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	4
1.3 ALCANCES.....	5
1.4 ANÁLISIS PRELIMINAR Y ANTECEDENTES.....	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	9
2.1 PROCESO DE TERMOROCIADO.....	9
2.2 PROYECCIÓN TÉRMICA POR PLASMA.....	11
2.3 VARIABLES DEL PROCESO DE ROCIADO TÉRMICO POR PLASMA.....	12

2.3.1	<i>Gas Primario y Secundario</i> .....	13
2.3.2	<i>Características del material de alimentación</i> .....	14
2.3.3	<i>Efecto del tamaño de partícula del material de alimentación</i> .....	14
2.3.4	<i>Voltaje</i> .....	15
2.3.5	<i>Presión del Gas de Transporte</i> .....	15
2.3.6	<i>Distancia de Rociado</i> .....	15
2.3.7	<i>Velocidad de alimentación de los polvos y Caudal</i> .....	16
2.3.8	<i>Amperaje</i> .....	16
2.4	MATERIAL $5\text{SiO}_2 - 3\text{TiO}_2 - \text{Cr}_2\text{O}_3$ .....	17
2.5	MECANISMOS DE DESGASTE.....	19
2.5.1	<i>Desgaste Adhesivo</i> .....	20
2.5.2	<i>Desgaste por Fatiga</i> .....	21
2.5.3	<i>Desgaste Corrosivo</i> .....	21
2.5.4	<i>Desgaste por Erosión</i> .....	22
2.5.5	<i>Desgaste Abrasivo</i> .....	22
2.6	DISEÑO EXPERIMENTAL.....	31
2.7	DISEÑO EXPERIMENTAL FACTORIAL.....	33
2.8	ANÁLISIS DE VARIANZA.....	33
2.9	MÉTODO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA.....	37

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO.....	41
3.1 TIPOS DE INVESTIGACIÓN.....	41
3.1.1 <i>Investigación Aplicada</i> .....	41
3.1.2 <i>Investigación Documental</i> .....	41
3.1.3 <i>Investigación Experimental</i> .....	42
3.1.4 <i>Investigación Exploratoria</i> .....	42
3.1.5 <i>Investigación Descriptiva</i> .....	42
3.2 PROCEDIMIENTOS Y ACTIVIDADES.....	43
3.3 DISEÑO EXPERIMENTAL APLICADO.....	44
3.4 ENSAYOS PRELILMINARES.....	45
3.5 ESTABLECIMIENTO DE LOS VALORES DE LOS PARÁMETROS A EMPLEAR.....	46
3.6 MATERIALES.....	47
3.6.1 <i>Probetas</i> .....	47
3.6.2 <i>Composición del recubrimiento</i> .....	47
3.6.3 <i>Distribución de las probetas</i> .....	49
3.7 TRATAMIENTO PREVIO A LA DEPOSICIÓN DEL RECUBRIMIENTO.....	50
3.7.1 <i>Preparación Térmica</i> .....	50
3.7.2 <i>Arenado</i> .....	51
3.8 DEPOSICIÓN DEL RECUBRIMIENTO.....	51

3.8.1 <i>Pistola de Plasma</i> .....	51
3.8.2 <i>Acabado Superficial</i> .....	51
3.9 ENSAYO DE ABRASIÓN.....	53
3.9.1 <i>Equipo para Ensayo de Abrasión</i> .....	53
3.9.2 <i>Balanza de Precisión</i> .....	53
3.9.3 <i>Arena</i> .....	54
3.9.4 <i>Rueda de caucho</i> .....	55
3.9.5 <i>Parámetros del Ensayo de Abrasión</i> .....	56
3.9.6 <i>Procedimiento de pérdida volumétrica</i> .....	56
3.9.7 <i>Reporte de Pérdida Volumétrica</i> .....	57
3.10 ENSAYO DE DUREZA POR MICROINDENTACIÓN.....	59
3.11 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.....	60
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	61
4.1 ANÁLISIS DEL ENSAYO DE ABRASIÓN.....	61
4.1.1 <i>Resultados del Ensayo de Abrasión</i> .....	61
4.1.2 <i>Anova</i> .....	67
4.1.3 <i>Superficie de Respuesta</i> .....	71
4.2 ANÁLISIS DEL ENSAYO DE DUREZA POR MICROINDENTACIÓN .....	76
4.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.....	78

4.4 CONCLUSIONES.....	99
4.5 RECOMENDACIONES.....	102
4.6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	106

## INDICE FIGURAS

Figura 2.1 Proyección de partículas de material fundidas contra un material base.....	10
Figura 2.2 Procesos de termorociado más comunes Smith (1991).....	11
Figura 2.3. El "verde de cromo" (es el óxido de cromo (III), Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ).....	18
Figura 2.4. Diagrama esquemático del fenómeno de desgaste por adhesión.....	20
Figura 2.5 Secuencia del desgaste abrasivo.....	22
Figura 2.6. Clasificación del desgaste abrasivo.....	25
Figura 2.7. Representación esquemática del proceso de experimentación.....	32
Figura 2.8. Superficie de respuesta en dos dimensiones ( <i>MiniTab</i> ).....	38
Figura 2.9. Superficie de respuesta (tres dimensiones) <i>Fuente MiniTab</i> ).....	39
Figura 2.10. Gráfica de contornos ( <i>Fuente: MiniTab</i> ).....	40
Figura 3.1. Diagrama de Ishikawa acerca del trabajo de investigación.....	44
Figura 3.2. Dimensiones en milímetros de la probeta de acero AISI 1020.....	47
Figura 3.3. a) Pistola de Plasma SG-100 con acoplamiento a servomotor. b) Pistola de Plasma SG-100 de uso manual, empleada para el recubrimiento de esta investigación.....	52
Figura 3.4. Esquema de algunas partes de la Pistola SG-100.....	52
Figura 3.5. Balanza de precisión Denver Instrument APX 200.....	53

Figura 3.6. Tambor vibratorio OCTAGON para tamizado. a) Sin tamices. b) Con tamices 30, 40, 50, 70, 100, de arriba a abajo.....	55
Figura 3.7. Máquina para ensayo de abrasión.....	56
Figura 3.8. Partes de la Maquina para ensayo de Abrasión a) Pesos variables para la carga, b) Porta probetas, c) Disco de Goma, d) Boquilla de alimentación de arena abrasiva, e) Tolva Surtidora de arena, f) Bolsa para protección frente a contaminación de la tolva.....	57
Figura 3.9. Geometría del indentador.....	59
Figura 3.10. Huella arrojada por el mismo en la muestra ensayada.....	59
Figura 3.11. Durómetro Leitz Wetzlar Metallux.....	60
Figura 3.12 Equipo de Microscopía Electrónica de Barrido.....	60
Figura 4.1. Comportamiento al desgaste por abrasión a tiempos parciales.....	66
Figura 4.2. Significancia de los parámetros para la abrasión.....	68
Figura 4.3. Pérdida volumétrica para una Tasa de Alimentación de 42 g/min y distintos niveles de voltaje.....	69
Figura 4.4. Pérdida volumétrica para una Tasa de Alimentación de 52 g/min y distintos niveles de voltaje.....	70
Figura 4.5. Pérdida volumétrica para una Tasa de Alimentación de 61 g/min y distintos niveles de voltaje.....	70
Figura 4.6.a Superficie de respuesta para la combinación Voltaje/Tasa de Alimentación	72
Figura 4.6.b Curvas de nivel para la combinación Voltaje/Tasa de Alimentación.....	72
Figura 4.7.a Superficie de respuesta para la combinación Voltaje/Amperaje.....	73

Figura 4.7.b Curvas de nivel para la combinación Voltaje/ Amperaje.....	73
Figura 4.8. Curvas de nivel para la combinación Voltaje/ Amperaje.....	74
Figura 4.9. Promedios de dureza por microindentación para cada muestra seleccionada.....	76
Figura 4.10. Significancia de los parámetros en la dureza.....	78
Figura 4.11 Micrografía en electrones secundarios de la Superficie transversal del recubrimiento para la condición N° 7, a 100X.....	79
Figura 4.12 Micrografía en electrones secundarios de la Superficie transversal del recubrimiento para la condición N° 7, a 500X.....	80
Figura 4.13 a) Micrografía y b) EDS en electrones secundarios de la Superficie transversal del recubrimiento para la condición N° 7, a 1000X, con identificación del Hierro (Verde), Óxido de Cromo (Amarillo), Níquel (Azul claro), Molibdeno (Azul oscuro) y c) Aluminio (Rojo).....	81
Figura 4.14 Micrografía en electrones secundarios de la Superficie de Desgaste de la condición N° 7 a 100X.....	82
Figura 4.15 Detección de elementos a través de EDS en electrones secundarios de la Superficie de Desgaste de la condición N° 7.....	83
Figura 4.16 Micrografía en electrones secundarios de la Superficie de Desgaste para la condición N° 7 a 1500X.....	84
Figura 4.17 Micrografía en electrones secundarios de la Superficie de Desgaste para la condición N° 7 a 5000X.....	84
Figura 4.18 Micrografía en electrones secundarios de la Superficie transversal del recubrimiento para la condición N° 2 a) 100X y b) 500X.....	85

Figura 4.19 Micrografía en electrones secundarios de la Superficie transversal del recubrimiento para la condición N° 2 a 1000X.....	86
Figura 4.20 Micrografía en electrones secundarios de la Superficie desgastada del recubrimiento para la condición N° 2. a) 100X. b) 1500X.....	88
Figura 4.21 Micrografía en electrones secundarios de la Superficie transversal del recubrimiento para la condición N° 14. 100X.....	89
Figura 4.22 Micrografía en electrones secundarios de la Superficie transversal del recubrimiento para la condición N° 14. 500X.....	89
Figura 4.23 Micrografía en electrones secundarios de la Superficie de desgaste del recubrimiento para la condición N° 14 a 100X.....	90
Figura 4.24 Micrografía en electrones secundarios de la Superficie de desgaste del recubrimiento para la condición N° 14 a 500X.....	91
Figura 4.25 Micrografía en electrones secundarios de la Superficie transversal del recubrimiento para la condición N° 24. 100X.....	91
Figura 4.26 Micrografía en electrones secundarios de la Superficie transversal del recubrimiento para la condición N° 24. 500X.....	92
Figura 4.27 a) Micrografía y b) EDS en electrones secundarios de la Superficie transversal del recubrimiento para la condición N° 24, a 1000X, con identificación del Hierro (Verde), Óxido de Cromo (Amarillo), Níquel (Azul claro), Molibdeno (Azul oscuro) y c) Aluminio (Rojo).....	92
Figura 4.28 Micrografía en electrones secundarios de la Superficie de desgaste del recubrimiento para la condición N° 24. 100X.....	93
Figura 4.29 Micrografía en electrones secundarios de la Superficie de desgaste del recubrimiento para la condición N° 24. 1500X.....	94

Figura 4.30 Micrografía en electrones secundarios de la Superficie transversal del recubrimiento para la condición N° 27. 100X.....	95
Figura 4.31 Micrografía en electrones secundarios de la Superficie transversal del recubrimiento para la condición N° 27. 500X.....	96
Figura 4.32 Micrografía en electrones secundarios de la Superficie de desgaste del recubrimiento para la condición N° 27. 100X.....	97
Figura 4.33 Micrografía en electrones secundarios de la Superficie de desgaste del recubrimiento para la condición N° 27. 500X.....	98

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Variables que influyen en el Rociado Térmico por Plasma.....	13
Tabla 2.2 Representación de los resultados de un ANOVA.....	36
Tabla 3.1 Matriz de las diferentes combinaciones de parámetros para el diseño $3^3$ .....	45
Tabla 3.2. Ensayos preliminares.....	46
Tabla 3.3 Ensayos preliminares.....	47
Tabla 3.4 Aplicaciones de METCO 136CP 5 SiO <sub>2</sub> - 3 TiO <sub>2</sub> - Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fuente: PlasmaTec Ingenieros.....	48
Tabla 3.5. Características del Polvo METCO 136CP 5 SiO <sub>2</sub> - 3 TiO <sub>2</sub> - Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fuente: PlasmaTec Ingenieros.....	48
Tabla 3.6. Propiedades físicas del recubrimiento en Polvo METCO 136CP 5 SiO <sub>2</sub> - 3TiO <sub>2</sub> - Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fuente: PlasmaTec Ingenieros.....	48
Tabla 3.7. Rangos de valores durante el recubrimiento de Polvo METCO 136CP 5 SiO <sub>2</sub> - 3 TiO <sub>2</sub> - Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fuente: PlasmaTec Ingenieros.....	49
Tabla 3.8. Parámetros de rectificado del recubrimiento de Polvo METCO 136CP 5 SiO <sub>2</sub> - 3 TiO <sub>2</sub> - Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fuente: PlasmaTec Ingenieros.....	49
Tabla 3.9 Distribución de los tratamientos según los parámetros (la condición resaltada, representa la del fabricante).....	50

Tabla 3.10. Variables a emplear en la operación del equipo.....	51
Tabla 3.11. Composición de la rueda vulcanizada de la máquina de abrasión	
Fuente: Gomas Autoindustriales “GOMAINCA”.....	55
Tabla 3.12. Clasificación de los procedimientos para el ensayo de abrasión según la norma ASTM G-65.....	56
Tabla 4.1. Pérdida volumétrica por abrasión para los 27 tratamientos.....	64
Tabla 4.2. Comportamiento al desgaste por abrasión a tiempos parciales.....	66
Tabla 4.3. ANOVA para los diferentes parámetros con respecto al desgaste.....	67
Tabla 4.4. Rangos óptimos para valores de parámetros para la deposición en función de la influencia a la resistencia a la abrasión.....	75
Tabla 4.5. Promedio de durezas por microindentación de cada grupo de tasa de alimentación de los polvos.....	77
Tabla 4.6. ANOVA para los valores de dureza por microindentación.....	78
Tabla 5.1 Registro detallado de cada una de las 81 probetas ensayadas en abrasión.....	112

# INTRODUCCIÓN

Desde los años 70 comienza el rociado térmico a tomar auge, a raíz del estudio de la problemática que presentan ciertas superficies y sus propiedades sometidas a desgaste. Dichos estudios se hacen con el fin de estudiar influencias de parámetros que intervienen en el proceso y optimizar el recubrimiento, disminuyendo así el desgaste de los mismos y proporcionando gran avance para la industria en general, con ahorro de energía y material. Varias publicaciones califican al rociado térmico como capaz de proveer una excelente respuesta a la abrasión, fatiga, corrosión, erosión y otras requeridas por la industria. Hoy en día existen diversas técnicas de deposición que permiten mejorar significativamente la calidad de los recubrimientos, y también el desarrollo de materiales novedosos que respondan de manera satisfactoria a las distintas necesidades del sector público.

Esto nos lleva a continuar con la investigación para mejorar la protección de los sustratos la aplicación de recubrimientos, específicamente por medio de Plasma. El objeto de esta investigación está enfocado en una de las técnicas de deposición, en este caso el proceso de Rociado Térmico.

Por el comportamiento que presentan la composición y la microestructura de los materiales involucrados en el recubrimiento, deben tomarse en consideración ciertas variables de campo en los procesos de rociado térmico, como son la tasa de alimentación de los polvos, voltaje y amperaje a ser aplicados en el proceso de Rociado Térmico por Plasma, que son determinantes en las propiedades mecánicas presentadas por el recubrimiento.

En la actualidad, la empresa Plasmatec Ingenieros realiza trabajos de recuperación de piezas por diversos métodos para la reparación de máquinas a industrias nacionales. Dicha empresa realiza pruebas con materiales nuevos en busca de mejores resultados a los efectos del desgaste, producto del uso prolongado de equipos.

La importancia de estudiar el comportamiento de diferentes recubrimientos y analizar la influencia de los parámetros del rociado utilizados para lograr su deposición

frente a la resistencia al desgaste, nos lleva a encontrar mejores recubrimientos, más duraderos, alargando así la vida útil de los equipos, minimizando costos por reparaciones o cambio de piezas. El estudio del compuesto  $5\text{SiO}_2 - 3\text{TiO}_2 - \text{Cr}_2\text{O}_3$  como material de aporte en el proceso de Rociado Térmico por Plasma, es de gran importancia para la obtención de materiales más resistentes y con mejores resultados ante el desgaste.

# CAPITULO I: DEFINICIÓN DEL PROYECTO

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El análisis de un proceso busca obtener los mejores resultados en el mismo. Actualmente los recubrimientos depositados por el proceso de rociado térmico por plasma, solo son realizados en la empresa de Venezuela Plasmatec Ingenieros C.A., con lo cual, el desarrollo de este tipo de proceso tiene un gran campo de aplicación, sobre todo al tomar en cuenta que es posible ahorrar mucho dinero con la aplicación de recubrimientos que aumenten la vida útil de las máquinas (bombas, compresores, etc.) Además este tipo de proceso también ha despertado un gran interés en el campo de la biomecánica por el gran uso que se le puede dar a las biocerámicas.

En el caso de esta investigación, determinar la influencia de parámetros importantes para luego optimizar el proceso de Rociado Térmico por Plasma de la aleación  $5\text{SiO}_2 - 3\text{TiO}_2 - \text{Cr}_2\text{O}_3$ , implica el desarrollo de estudios con muestras sometidas a ensayos de desgaste, para llegar al margen de valores correctos y definitivos de las variables en juego. Para conseguir tal objetivo, se hacen pasar ciertas muestras (probetas) con el recubrimiento ya aplicado por un ensayo de abrasión y dureza por microindentación, que son estudiadas luego bajo un análisis de inspección microscópica, siendo de suma importancia para estudiar la influencia de los parámetros que intervienen en el proceso frente a la resistencia al desgaste. Las variables a considerar aquí, para este proceso de rociado térmico, son Voltaje, Amperaje y Tasa de Alimentación de los Polvos, que son las que darán de qué hablar para el ensayo de abrasión. Esto se debe a que son variables significativas, frente a ciertos estudios anteriores de otras variables que influyen en la resistencia al desgaste abrasivo para recubrimientos con  $5\text{SiO}_2 - 3\text{TiO}_2 - \text{Cr}_2\text{O}_3$ . Los valores de los parámetros mencionados son dados por el fabricante del material a depositar. La puesta en marcha del equipo facilitado por la empresa PLASMATEC INGENIEROS para el rociado térmico por plasma, requiere de la regulación de las variables que serán usadas en este proceso. Esto es porque en el uso que se les da a los equipos tales como bombas, turbinas, compresores, cigüeñales, pistones, carcasas, tuberías y otros elementos similares, el desgaste por abrasión, erosión y corrosión, entre otros, son los más comunes.

A nivel nacional, particularmente en la industria petrolera y química, los estudios de la resistencia al desgaste de este recubrimiento es muy significativo, ya que los mismos son utilizados al igual que en otros países, con el fin de alargar su vida útil y disminuir costos de mantenimiento, entre otros. Estos dispositivos por ejemplo, tienden a presentar problemas de resistencia a la erosión, corrosión y abrasión principalmente, lo que nos lleva a analizar dicho recubrimiento y así confirmar que este material es verdaderamente resistente al desgaste.

Debido a que la empresa Venezolana PLASMATEC INGENIEROS C.A. ha venido recuperando piezas utilizando el proceso de Rociado Térmico por Plasma para la deposición de recubrimientos cerámicos, el presente trabajo de investigación pretende analizar la influencia de las condiciones de aplicación de un recubrimiento con el compuesto  $5\text{SiO}_2 - 3\text{TiO}_2 - \text{Cr}_2\text{O}_3$  depositado térmicamente por plasma, caracterizando los recubrimientos obtenidos, para así evaluar sus propiedades frente a la resistencia al desgaste por abrasión y obtener los valores óptimos de aplicación del mismo, de Voltaje, Amperaje y Tasa de Alimentación de los Polvos, siendo el substrato a recubrir un acero AISI 1020.

## **1.2 OBJETIVOS**

### *1.2.1 Objetivo General*

Determinar la influencia de la velocidad de alimentación de los polvos, el voltaje y el amperaje sobre la resistencia al desgaste abrasivo de un recubrimiento cerámico depositado sobre un acero AISI 1020, mediante el proceso de Rociado Térmico por Plasma.

### *1.2.2 Objetivos Específicos*

- Determinar la influencia de la velocidad de alimentación de los polvos sobre la resistencia a la abrasión del recubrimiento de aleación  $5\text{SiO}_2 - 3\text{TiO}_2 - \text{Cr}_2\text{O}_3$  por Rociado Térmico por Plasma sobre un acero AISI 1020 siguiendo la norma ASTM G65.

- Determinar la influencia del voltaje sobre la resistencia a la abrasión del recubrimiento de aleación  $5\text{SiO}_2 - 3\text{TiO}_2 - \text{Cr}_2\text{O}_3$  por Rociado Térmico por Plasma sobre un acero AISI 1020 siguiendo la norma ASTM G65.
- Determinar la influencia del amperaje sobre la resistencia a la abrasión del recubrimiento de aleación  $5\text{SiO}_2 - 3\text{TiO}_2 - \text{Cr}_2\text{O}_3$  por Rociado Térmico por Plasma sobre un acero AISI 1020 siguiendo la norma ASTM G65.
- Determinar los probables mecanismos de desgaste que operan en cada proceso de desgaste (más por abrasión que por erosión) para la condición más favorable y menos desfavorable, y compararlas con la condición dada por el fabricante en cuanto a velocidad de alimentación de los polvos, voltaje y amperaje.
- Determinar la dureza por microindentación del recubrimiento cerámico  $5\text{SiO}_2 - 3\text{TiO}_2 - \text{Cr}_2\text{O}_3$  por Rociado Térmico por Plasma sobre un acero AISI 1020 para las condiciones más favorables, menos favorables y establecer una relación con la resistencia al desgaste.
- Determinar la influencia de los parámetros en estudio sobre la porosidad para la condición más favorable y menos desfavorable del recubrimiento cerámico  $5\text{SiO}_2 - 3\text{TiO}_2 - \text{Cr}_2\text{O}_3$  por Rociado Térmico por Plasma sobre un acero AISI 1020.

### 1.3 ALCANCES

- Utilizar un diseño factorial  $3^3$  para depositar los recubrimientos.
- Determinar los resultados de variación de rangos de la velocidad de alimentación de los polvos, el voltaje y el amperaje sobre la resistencia a la abrasión, siguiendo la norma ASTM G65. Se realizará esta prueba utilizando tres probetas para tiempos de 5 minutos, 15 minutos y 30 minutos.
- Determinar los parámetros óptimos de deposición del proceso en sus dos versiones utilizando un análisis de varianza (ANOVA) y un software estadístico (MiniTab).

- Determinar la dureza del recubrimiento por microindentación para una carga de 500g siguiendo la norma ASTM E92-82.
- Determinar a través de microscopía electrónica de barrido los probables mecanismos de desgaste que operan en el proceso de desgaste por abrasión evaluado.

#### **1.4 ANÁLISIS PRELIMINAR Y ANTECEDENTES**

Luego de recopilar información acerca de los distintos procesos de Rociado Térmico, características, parámetros y calidad de recubrimiento se obtuvo una serie de antecedentes descritos a continuación:

Por nuestro interés de determinar y comparar las condiciones óptimas de aplicación de un recubrimiento cerámico mediante el proceso de rociado térmico por plasma, para el año 2007, Dávila A y Conde V., realizan su investigación en la Universidad Central de Venezuela basado en un diseño experimental factorial  $3^3$  para alcanzar el objetivo planteado. Los recubrimientos base molibdeno-níquel, fueron aplicados mediante una pistola de plasma modelo Praxair SG-200, variando tres de los parámetros operacionales del proceso como lo son el voltaje, el amperaje y la tasa de alimentación de los polvos. Para caracterizar los recubrimientos y determinar su resistencia al desgaste, se realizaron ensayos de abrasión para las distintas combinaciones de parámetros según la norma ASTM G-65E. También se realizaron ensayos de microindetación estática para evaluar la dureza promedio de los recubrimientos según la norma ASTM E-384. Se determinó que la tasa de alimentación de los polvos es un parámetro clave en la resistencia a la abrasión de los depósitos estudiados, logrando establecer que los parámetros óptimos de aplicación de los recubrimientos base molibdeno-níquel vienen dados por: 794-800A, 57,5-70 gr/min, 36-37,5V. Igualmente se determinó que los tres parámetros evaluados son significativos para obtener mayores durezas, así como también la interacción de los mismos, y la combinación Voltaje- Amperaje. La Optimización de los parámetros en base a la dureza de los recubrimientos dio como resultado el siguiente rango de valores: 730-785A, 40-60 gr/min,

39,8-40V. Se encontró adicionalmente que no existe correlación entre la dureza y la respuesta ante el desgaste abrasivo en los recubrimientos evaluados.

Capote S. y Perdomo L. realizan en el 2006 una investigación en la Universidad Central de Venezuela con el objetivo de determinar parámetros óptimos de aplicación de un recubrimiento WC-CO rociado térmicamente por plasma, utilizando un diseño experimental factorial  $3^3$ , cuyos parámetros evaluados fueron voltaje, amperaje y velocidad de alimentación de los polvos los cuales se aplicaron utilizando una pistola de plasma modelo praxair SG-100. Se utilizaron ensayos de abrasión y Dureza según las norma ASTM G-65E y ASTM E-384-99 respectivamente para las distintas combinaciones de parámetros. La significancia de los resultados fueron verificadas por medio de un análisis de varianza (ANOVA) los parámetros óptimos de se determinaron mediante del método de superficie de respuesta. Se logro determinar que los parámetros óptimos de este proceso son los siguientes 700 -715A, de 39- 50 gr/min, 38,5 - 40V.

A manera de obtener información y valores sobre la resistencia al desgaste de los recubrimientos frente a la erosión y abrasión, para el año 2006, Ageorges y sus colaboradores, hicieron un trabajo con recubrimientos compuestos de Óxido de Cromo y acero blanco (aleación con carbono en forma de cementita o perlita sin presencia de grafito) depositados mediante la técnica de Rociado Térmico por Plasma. Se estudió la influencia en la capa microestructural y propiedades tribológicas, de varios porcentajes de peso de acero blanco en Óxido de Cromo. Todas los recubrimientos exhibieron una estructura laminar con una distribución al azar de los dos materiales. El hecho de que el porcentaje de acero blanco en la microestructura del recubrimiento estudiado y examinado bajo microscopía electrónica (SEM) haya aumentado, consiguió también el aumento en la cohesión de la capa. El incremento de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  en los recubrimientos produjo alta dureza y bajas pérdidas de peso durante las pruebas de desgaste en abrasión y erosión.

En el 2004, José R. Colmenares A., realizó un trabajo de grado cuyo objetivo fue el de encontrar los parámetros óptimos de aplicación para la aleación Super High Steel (SHS) 717 de base hierro-cromo depositada utilizando rociado térmico por HVOF y arco eléctrico. Se utilizó un diseño experimental factorial  $3^2$  para alcanzar el objetivo planteado. Los parámetros operacionales variados fueron la relación oxígeno/combustible y la

velocidad de alimentación del material para el rociado por HVOF. Para el rociado por arco eléctrico fueron variados el amperaje y la presión de aire. Se realizaron ensayos de abrasión y dureza a las distintas combinaciones de parámetros obtenidas, según las normas ASTM G-65 y E-384-99 respectivamente. La microestructura, composición de los recubrimientos y la superficie desgastada fueron evaluadas mediante Microscopía Electrónica de Barrido y Espectroscopia por dispersión en energía de rayos X. Se determinó que la relación oxígeno/combustible y el amperaje son parámetros claves en la resistencia a la abrasión del recubrimiento y que no existe una relación directa entre los parámetros de aplicación y la dureza del mismo.

Y por último, el trabajo que mejor nos hizo comprender la influencia de la composición y microestructura de los recubrimientos, en este caso Óxido de Molibdeno, sobre las propiedades tribológicas, fue el trabajo desarrollado en el 2002, por In-Woong Lyo y Hyo-Sok Ahn, estudiando recubrimientos de  $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-MoO}_3$  rociados térmicamente por plasma y sometidas a deslizamiento. Se fabricó polvo compuesto de  $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-MoO}_3$  y  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  usando un método de rociado en seco y se formaron capas plasma-rociadas de estos polvos para evaluar su actuación tribológica. El estudio mostró que la dureza de los recubrimientos que contienen  $\text{MoO}_3$  era más alta que las compuestas exclusivamente de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . El resultado del análisis en TEM indicó que el cromo-molibdeno se precipitó tanto en el grano como en sus bordes de grano. Los coeficientes de fricción de los recubrimientos con  $\text{MoO}_3$  eran más bajos que sin  $\text{MoO}_3$ , ambos a iguales temperaturas de prueba. Sin embargo, el agregar  $\text{MoO}_3$  en las capas de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  provocó una insignificante mejora en el comportamiento frente al desgaste de las capas en la temperatura de prueba. Películas lisas dispersas se formaron en la superficie desplazada para todos los recubrimientos. Éstos se desgastaban protegiendo las capas siguientes, formadas por deformación plástica de partículas-escombros adheridas y compactadas a la superficie, fuertemente influyendo en la fricción de las capas como lo observado por los autores en diferentes capas con rociado por plasma. La composición química de estas películas varió dependiendo de la temperatura de la prueba.

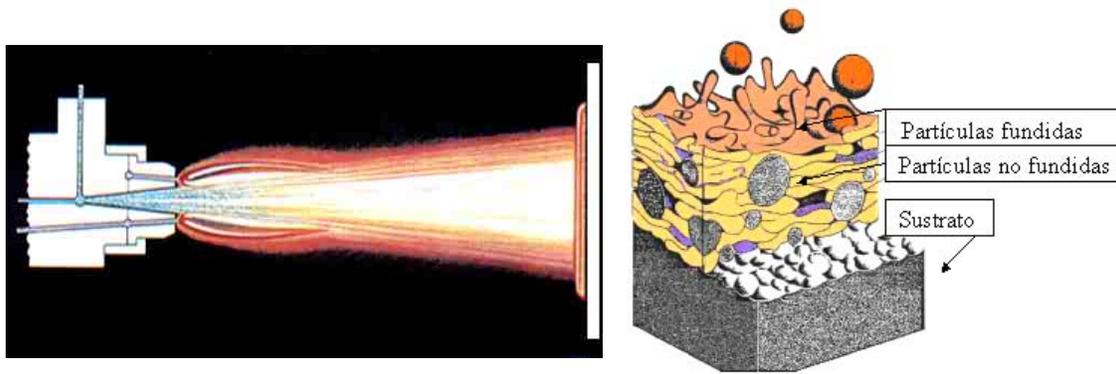
## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1 PROCESO DE ROCIADO TÉRMICO

El rociado térmico es un término que engloba una serie de procesos en los cuales, un material cerámico, metálico o compuesto es previamente preparado térmicamente para ser proyectado en forma fundida o semifundida sobre una superficie de un sustrato, para modificar las propiedades del material base (Ver figura 2.1).

Se requiere suficiente energía calorífica para las pistolas de rociado proveniente de gases combustibles, arco eléctrico o plasma, el cual se le cede a las partículas a proyectar para que las mismas se fundan a un estado plástico, sean transportadas por los gases, golpeen la superficie del sustrato y se aplanen en forma de discos (conocidos como *splats*) que se adhieren a las irregularidades del sustrato, previamente preparado. Cuando las partículas rociadas se adhieren al sustrato, se enfrían y agrupan *splat* sobre *splat*, formando una estructura laminar, la cual construye el recubrimiento por rociado térmico.

La energía cinética (asociada al voltaje) y energía calórica (asociada al amperaje) proporcionadas por la pistola juegan un papel muy importante en este proceso, ya que ambas influyen en las propiedades deseadas en el recubrimiento. Estas propiedades pueden ser: la porosidad, dureza, rugosidad, resistencia al desgaste o corrosión, entre otras. En el caso de la energía cinética, esta influye en la velocidad a la que viaja la partícula proyectada para luego hacer impacto. Actualmente hay nuevos desarrollos de pistolas, que proveen alta velocidad a las partículas, desarrollando con ellos recubrimientos con mejor adherencia y menor porosidad. Con respecto a la energía calórica, los últimos desarrollos han conllevado a procesos que son capaces de fundir materiales cerámicos de altos puntos de fusión, como en el caso del plasma.



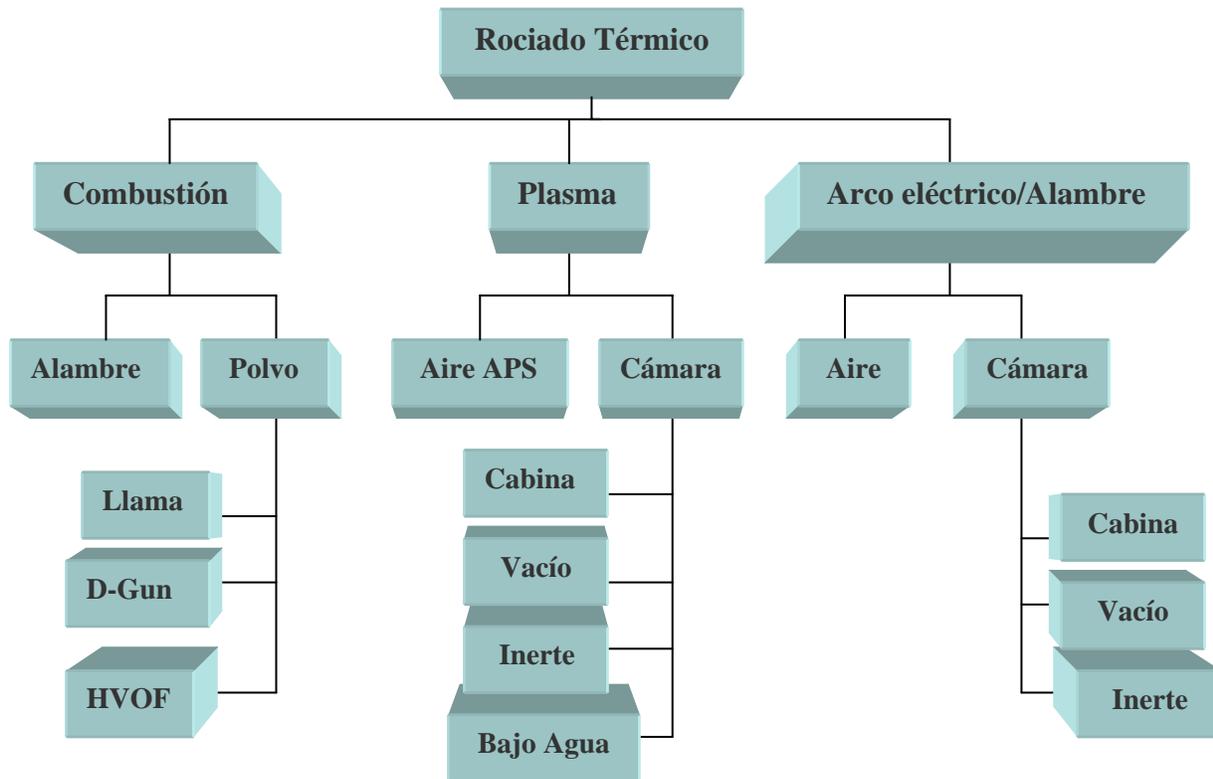
**Figura 2.1 Proyección de partículas de material fundidas contra un material base**

Diversos procesos de rociado térmico son aplicados en una gran diversidad de actividades e industrias, tales como en la industria automotriz, petro-química, papel, vidrio, aeronáutica, química y otras. Más que todo se utiliza en piezas que están sometidas a desgaste, corrosión y altas temperaturas. Además, estos procesos son de gran importancia en la recuperación de piezas deterioradas.

A continuación presentamos algunos de los beneficios que presentan los recubrimientos depositados por rociado térmico:

- Resistencia al desgaste.
- Resistencia a la corrosión.
- Recuperación de componentes desgastados.
- Control de tolerancias.
- Incremento de propiedades eléctricas.

En la figura 2.2 se puede observar la gran gama de procesos enmarcados en el rociado térmico.



**Figura 2.2 Procesos de rociado térmico más comunes Smith (1991)**

## 2.2 PROYECCIÓN TÉRMICA POR PLASMA

Este proceso es uno de los más versátiles, debido a que las altas temperaturas desarrolladas en el proceso son capaces de fundir materiales con altos puntos de fusión. Este proceso consiste en una pistola formada por un cátodo y ánodo con poca distancia entre ellos. Por el cátodo se hace pasar una corriente continua la cual forma un arco eléctrico con el ánodo, tanto el ánodo como el cátodo son electrodos no combustibles, los mismos son por lo general de cobre y tungsteno respectivamente. A través de ese arco eléctrico se hace pasar un gas inerte, el cual separa al gas en electrones para pasar a un estado de la materia denominado plasma. Debido a la inestabilidad del plasma y la recombinación de este plasma a su estado gaseoso, se libera una gran cantidad de energía térmica.

Se pueden llegar en este proceso a temperaturas de 18.000 °C, temperatura capaz de fundir cualquier material. En este punto se inyecta material de alimentación en polvo en la cámara de gas, en donde es fundido y disparado a alta velocidad por una corriente de gas

comprimido, propulsando de esta manera las partículas, las cuales se solidifican y se acumulan en el sustrato para formar el recubrimiento. El rango de energía utilizado está entre 40 y 100 KW.

Para producir el recubrimiento deseado, existen diferentes variables como son: el proceso de deposición, la composición química de los polvos, inyección del material de alimentación y las variables del proceso. En cuanto a las variables que entran en juego en los procesos de rociado, tenemos: el tipo de pistola, los gases de transporte, los caudales de los gases, voltaje, amperaje. En el caso del material de los polvos tenemos: composición química, morfología y tamaño de la partícula y el método de fabricación de los mismos. En cuanto a la inyección del material tenemos como variables: velocidad de alimentación, flujo de gas de transporte, número de inyectores, ángulo y lugar de inyección. Y por último, en las variables del proceso podemos identificar la distancia del rociado, velocidad de la partícula, número de pases y enfriamiento de la pistola.

### **2.3 VARIABLES DEL PROCESO DE ROCIADO TÉRMICO POR PLASMA**

Las propiedades tribológicas del recubrimiento depositado por rociado térmico y la calidad del anclaje, como hemos expuesto previamente, son afectadas por aquellas variables inherentes a la química de los materiales usados, y las características de la aplicación del rociado. En la planta, algunas de estas variables pueden ser controladas por el operario, y al ser manejadas de la manera correcta, se garantiza la obtención de un recubrimiento óptimo con el máximo aprovechamiento del potencial metalúrgico de cada material utilizado. Sin embargo, numerosos equipos de rociado cuentan con sistemas automatizados que permiten un mayor control de los parámetros y por ende recubrimientos de muy alta calidad.

Existen muchas variables inmersas dentro del proceso en el caso del rociado térmico por plasma. Hay autores como Fisher (2001) que aseguran que existen más de 200 parámetros que influyen en el proceso de rociado térmico por plasma, dentro de los cuales hay algunos parámetros que pueden ser cuantificables y otros que no. La Tabla 2.1 contiene algunas de estas variables que influyen este proceso.

### 2.3.1 Gas Primario y Secundario

Mezcla de gases se usan para controlar el nivel de energía y las características de formación de arcos de un sistema de rociado térmico por plasma. En esta oportunidad estaremos utilizando una mezcla de Argón como gas primario y Helio como gas secundario. La ventaja de usar un gas diatómico es que una gran cantidad de energía está disponible a bajas temperaturas, tal que las partículas pueden ser calentadas más rápidamente, a pesar de su alto costo, normalmente el helio es usado ya que permite alcanzar temperaturas en el plasma alrededor de los 16000 K. Los gases dentro del proceso del plasma son decisivos ya que son ellos los que aportan la energía necesaria para el calentamiento de las partículas. Los gases inertes como el argón y helio poseen una temperatura relativamente alta en relación a sus bajas entalpías. Los gases usados dentro del plasma normalmente poseen un grado de pureza 99,996%, este valor es el recomendado por la mayoría de los fabricantes para la obtención de recubrimientos de buena calidad.

**Tabla 2.1. Variables que influyen en el Rociado Térmico por Plasma**

<b>Variables Cuantificables</b>	<b>Variables No Cuantificables</b>
<b>Flujo, tipo y presión del Gas Primario</b>	<b>Tolerancia de la Boquilla</b>
<b>Flujo, tipo y presión del Gas</b>	<b>Electrodo</b>
<b>Flujo, tipo y presión del Gas de</b>	<b>Humedad e los Polvos</b>
<b>Intensidad de la Corriente Eléctrica</b>	<b>Fluctuación del Arco</b>
<b>Voltaje</b>	<b>Tolerancia de la Pistola</b>
<b>Eficiencia de Deposición</b>	<b>Aire de circulación en cabina de</b>
<b>Velocidad del material de alimentación</b>	<b>Desgaste de la tubería de los polvos</b>
<b>Temperatura del sustrato del material</b>	-----
<b>Tamaño y forma de los polvos a rociar</b>	-----
<b>Tasa de alimentación de los Polvos</b>	-----

### **2.3.2** *Características del material de alimentación*

El material de alimentación no constituye una variable que puede ser manipulada al realizar el recubrimiento, ya que el material es seleccionado debido a las propiedades requeridas. En muchos casos los materiales no poseen todas las propiedades mecánicas y químicas necesarias, por lo que no se justifica el esfuerzo técnico y económico para la aplicación requerida.

La composición química de los polvos debe garantizar que éstos no se degraden debido al proceso de rociado térmico. La sublimación de los polvos de alimentación es indeseada, así como también la reacción de los mismos con los gases de combustión aunque en muchos casos esto resulte inevitable en determinado nivel. Por lo tanto el material de alimentación debe ser calibrado para minimizar dicha degradación y mantener la calidad requerida por el usuario.

Es también necesario que el material de alimentación posea las características apropiadas de tamaño de grano, distribución, morfología, etc. Es deseable una morfología de los polvos esférica en lugar de irregular o con algunos pronunciados e imperfecciones tanto para garantizar adecuada de los splats, como para evitar esfuerzos residuales innecesarios en el recubrimiento (Colmenares, 2004).

### **2.3.3** *Efecto del tamaño de partícula del material de alimentación*

Los polvos pueden tener diferente tipo de tamaños y morfologías pudiendo ser esféricos o angulares. La morfología influye de manera directa en las características del recubrimiento, como por ejemplo las interacciones entre ellas, la fuente de calor, la atmósfera y el sustrato. Normalmente se desea que el tamaño de las partículas lo más semejante posible para garantizar que los parámetros puedan ser ajustados adecuadamente y garanticen el calentamiento óptimo de la partícula. Sin embargo, por razones de índole económica, los tamaños de los polvos se llevan a un rango amplio para ahorrar costos. Lo desfavorable de este ahorro es el incremento de la porción de partículas no fundidas y sobrecalentadas.

Es importante también la influencia de los tamaños, ya que para las partículas muy finas el recubrimiento tiende a generar esfuerzos residuales más altos y recubrimientos muy delgados. Mientras que para tamaños de polvo muy grandes puede haber problemas con la fundición de las partículas y la posible porosidad del recubrimiento. El tamaño de los polvos, por lo general oscila entre los 5 y 80 micrómetros a fin de alcanzar unas condiciones de velocidad y temperaturas aceptables para la generación de un recubrimiento de buena calidad.

#### **2.3.4 *Voltaje***

El arco total de voltaje está conformado por tres caídas de voltaje, dos de ellas ocurridas en el ánodo y el cátodo y una pequeña caída en la columna de plasma, donde los cambios de voltaje entre el ánodo y el cátodo son grandes comparados con el arco formado en la columna de plasma. Esto se debe a la relativa buena conductividad a lo largo del mismo (Andrews, 1974).

Para el proceso de rociado térmico por plasma, el voltaje resulta estar íntimamente ligado a la velocidad de los gases involucrados, gas de transporte, gas primario y gas secundario, el cual, proporciona la energía cinética de las partículas de deposición.

#### **2.3.5 *Presión del Gas de Transporte***

La presión del gas debe ser apta como para garantizar el paso del material por el eje central de la llama de la cámara y así permitir que las partículas se calienten lo suficiente, obteniéndose un recubrimiento de alta calidad.

#### **2.3.6 *Distancia de Rociado***

En general, si la pistola se encuentra relativamente alejada del substrato, la partícula se enfría, lo cual produce la solidificación de la misma, desmejorando así la calidad del recubrimiento, ya que la partícula rebota o se adhiere ligeramente al substrato. Por lo tanto,

si la pistola se encuentra relativamente cerca el sustrato, el choque violento favorece la pérdida de material dejando el recubrimiento de manera irregular, además de producir oxidación, porosidad y rugosidad del mismo (Hao Du, 2005).

En estudios anteriores se indica que la distancia de rociado óptima es función del tamaño de partícula usado. El tamaño de partícula no es de gran importancia en la velocidad promedio de partícula. Aunque las partículas más pesadas son más lentas al principio, su inercia evita que desaceleren, a diferencia de las más pequeñas, que tienen una velocidad inicial mayor, pero desaceleran muy rápidamente (Colmenares, 2004).

### **2.3.7 Tasa o Velocidad de alimentación de los polvos y Caudal**

La velocidad de alimentación de los polvos y su tasa de deposición afectan directamente la densidad del recubrimiento, debido a que si están en un valor relativamente alto, el material no posee tiempo suficiente para absorber todo el calor suministrado por la llama, afectando directamente la calidad del recubrimiento final. Si por el contrario, la velocidad y el caudal son relativamente bajos, se verá perturbada la productividad del proceso. Al ser menor la cantidad el material proyectado éste absorbe más calor llegando inclusive a vaporizarse afectando indudablemente la eficiencia de la deposición.

### **2.3.8 Amperaje**

El amperaje en este caso juega un papel muy importante debido a que nos proporciona la energía calórica para el calentamiento de los splats. Esta energía calórica aportada por el amperaje debe ser lo suficientemente alta como para derretir los polvos de alimentación que van a conformar el recubrimiento, pero también al mismo tiempo no debe ser tan alto ya que una temperatura muy elevada dentro de la pistola podría generar una evaporación de los mismos.

El amperaje depende íntimamente del voltaje y viceversa, debido a que la energía necesaria para la formación de los recubrimientos se debe ver como el conjunto amperaje-voltaje, que a su vez sería la potencia utilizada dentro del rociado térmico. Esta potencia

esta dentro de un rango de 30-80KW para el rociado de plasma con aire, y 50-100KW para rociado con plasma en vacío.

#### 2.4 MATERIAL $5\text{SiO}_2 - 3\text{TiO}_2 - \text{Cr}_2\text{O}_3$

El cromo es un metal de transición duro, frágil, gris acerado y brillante. Es muy resistente frente a la corrosión. Su estado de oxidación más alto es el +6, aunque estos compuestos son muy oxidantes. Los estados de oxidación +4 y +5 son poco frecuentes, mientras que los estados más estables son +2 y +3. También es posible obtener compuestos en los que el cromo presente estados de oxidación más bajos, pero son bastante raros. El cromo se utiliza principalmente en metalurgia para aportar resistencia a la corrosión y un acabado brillante.

En 1797 Nicolas-Louis Vauquelin recibió muestras del mineral. Fue capaz de producir óxido de cromo mezclando crocoita con ácido clorhídrico (HCl). En 1798 descubrió que se podía aislar cromo metálico calentando el óxido en un horno de carbón. También pudo detectar trazas de cromo en gemas preciosas, como por ejemplo, en rubíes y esmeraldas. Lo llamó cromo (del griego *chroma*, "color") debido a los distintos colores que presentan sus compuestos.

El cromo se empleó principalmente en pinturas y otras aplicaciones hasta que, a finales del siglo XIX, se empleó como aditivo en aceros. Este uso no se extendió hasta principios del siglo XX, cuando se comenzó a obtener cromo metálico mediante aluminotermia. Actualmente en torno a un 85% del cromo se utiliza en aleaciones metálicas.

El "verde de cromo" (es el óxido de cromo (III),  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , Ver figura 2.3) es un pigmento que se emplea, por ejemplo, en pinturas esmaltadas y en la coloración de vidrios. El uso de la cromita como refractante se debe a su alto punto de fusión, su moderada dilatación térmica y la estabilidad de su estructura química. Ciertamente, una de las cualidades más importantes de las cerámicas técnicas es su elevada resistencia al desgaste por lo que, éstas pueden ser utilizadas directamente como piezas que deban ofrecer dicha

característica o bien como recubrimiento de cualquier metal o sustrato inorgánico que deba responder a una mejora de su resistencia al desgaste.



**Figura 2.3.** El "verde de cromo" (es el óxido de cromo (III),  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ )

En general, los procesos de adhesividad termoquímica producen recubrimientos cerámicos que mejoran no solamente la resistencia al desgaste y a la abrasión sino también, a la corrosión y a las altas temperaturas de la mayoría de los sustratos inorgánicos.

El compuesto de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  es muy estable; este compuesto posee un punto de fusión,  $1990^\circ\text{C}$ , extremadamente alto, siendo prácticamente insoluble. La capa producida es casi tan porosa como la que se obtendría por rociado y llama (plasma) por lo que resulta conveniente densificar el recubrimiento como “ $5\text{SiO}_2 - 3\text{TiO}_2 - \text{Cr}_2\text{O}_3$ ”.

Los recubrimientos obtenidos por rociado térmico pueden conseguirse con diversos grados de calidad superficial, por el simple control de la composición cerámica, del tamaño de las partículas y del proceso. El aislamiento de las sucesivas capas puede realizarse controlando la porosidad de las multicapas aplicadas. Evidentemente, la capa superior debe densificarse y endurecerse al máximo para aumentar la resistencia al desgaste y a la abrasión del recubrimiento. El  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  que se forma en los poros de la pieza cerámica, densifica y endurece la superficie de la misma, resultando un material resistente al desgaste abrasivo, a la corrosión, al choque sobre un amplio campo térmico, con superficies de baja fricción y, en fin, con buenas propiedades para ser utilizado en moldes complicados para vidrios.

Los recubrimientos con  $5\text{SiO}_2 - 3\text{TiO}_2 - \text{Cr}_2\text{O}_3$  aplicados por procesos de rociado térmico por plasma muestran gran durabilidad en la industria. Los rangos de espesores de gran capacidad tienen un límite superior de 0,100 pulgadas (2,5 mm) como requerido para la resistencia al desgaste. Además presentan una gran resistencia al impacto, nada normal asociado con los recubrimientos cerámicos rociados. El dióxido de silicio actúa como medio amortiguador que absorbe impactos de carga y previene la pérdida de grano, en cual realiza la resistencia al desgaste del recubrimiento.

Dichos recubrimientos con  $5\text{SiO}_2 - 3\text{TiO}_2 - \text{Cr}_2\text{O}_3$  son recomendados para resistencia al desgaste de granos abrasivos, superficies duras, partículas erosivas y cavitación, sobre todo en temperaturas por debajo de 1000 °F (540 °C). Estos recubrimientos llevan excelente auto protección y propiedades anti-fricción frente a los deslizamientos. Los recubrimientos con este material son insolubles en ácidos, alquenos y alcoholes. Apropiadamente sellado el recubrimiento, se recomienda en medios químicamente corrosivos, por encima de los 400 °F (200 °C).

Estos recubrimientos son aplicados en la industria petroquímica, donde los espesores de los mismos resisten los desgastes tanto por deslizamientos como por flexión, según la necesidad de desarrollar dichas propiedades. Dichas necesidades se evalúan por la aplicación, como por ejemplo rodetes de bombas-compresores reciprocantes, cilindros de aire y gas, sellos de bombas centrífugas, carcasas y anillos de desgaste y componentes de sumergimiento. Los recubrimientos también se usan en elementos de máquina de la industria textil, donde se requiere resistencia a la corrosión y al desgaste por el contacto con las fibras.

## **2.5 MECANISMOS DE DESGASTE**

Se puede definir *desgaste* como todo material removido o indeseablemente desplazado por efecto de las superficies interactuantes dentro del medio en que trabajan. Es un valor que se debe cuantificar en todo fenómeno tribológico, debido a que se estima que existe una pérdida entre el 6% y 7% del precio interno bruto de un país, y solamente este

tipo de pérdida es comparable a la ocasionada por la corrosión. De ahí parte la importancia del estudio del desgaste.

Como en todo fenómeno no existe un solo tipo de desgaste, debido a lo complicado de estudio se ha decidido analizarlo desde cuatro (4) fenómenos básicos:

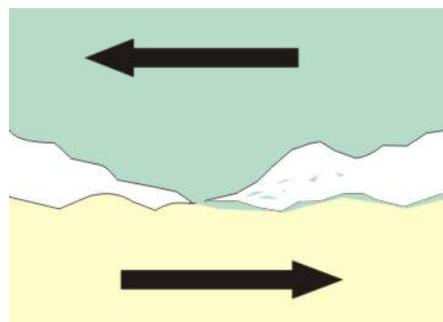
- Desgaste adhesivo
- Desgaste por fatiga
- Desgaste corrosivo
- Desgaste abrasivo.

### 2.5.1 *Desgaste Adhesivo*

El desgaste adhesivo, también llamado desgaste por fricción ó desgaste deslizante, es una forma de deterioro que se presenta entre dos superficies en contacto deslizante (Ver figura 2.4).

Tiene lugar típicamente en cojinetes de deslizamiento, chumaceras, bocinas, bujes, motores de combustión interna, compresores recíprocos, bielas, tornillos de potencia, matrices, estoperas, engranajes, guías en general, etc. La posibilidad de adhesión crece dependiendo de la estructura del material.

Debido a que dos superficies de un mismo material con un excelente acabado superficial, se adhieren perfectamente con el simple hecho de ponerlas en contacto, conlleva a concluir que a mejor acabado superficial (menor rugosidad), mayor será la fuerza producida por la adhesión a causa de ser mayor la superficie de contacto.



**Figura 2.4. Diagrama esquemático del fenómeno de desgaste por adhesión.**

Otro aspecto que hay que tomar en cuenta es la temperatura, ya que el desgaste aumenta con la temperatura, debido a incrementos en la ductilidad de las asperezas y del crecimiento resultante de las juntas metálicas. Sin embargo, se han encontrado temperaturas de transición, por encima de las cuales se producen notables reducciones en la velocidad de desgaste. Este fenómeno ha sido asociado a la formación de óxidos con muy buenas propiedades lubricantes; aunque es de advertir que la oxidación puede tener efectos opuestos, ya que una alta tasa de oxidación puede convertirse en un problema de desgaste mayor.

Además el desgaste adhesivo es comúnmente el primer mecanismo que actúa en los casos prácticos de desgaste, creando partículas que rápidamente son oxidadas, de alta dureza y por ello de gran poder abrasivo.

### **2.5.2 *Desgaste por Fatiga***

Este tipo de desgaste se produce por la aplicación continua de cargas que producen tensiones sobre las capas superficiales, creando fisuras sobre las mismas, y a medida que las fisuras crecen ocurre un repentino desprendimiento de material; un ejemplo típico de este tipo de desgaste es el ocurrido en las pistas de los rodamientos donde las cargas cíclicas producidas por las bolas sobre la pista hacen que este fenómeno aparezca.

### **2.5.3 *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 regular estas películas son duras y crean una capa protectora sobre la superficie, que llegan a crecer a un punto en que se vuelve frágil y por ende propensa a ser removida dejando expuesto al material nuevamente para que el ciclo se vuelva a repetir, lo cual trae como consecuencia que las partículas removidas se comporten como un tercer cuerpo y conduzca a la aparición de otro tipo de desgaste, el desgaste abrasivo.

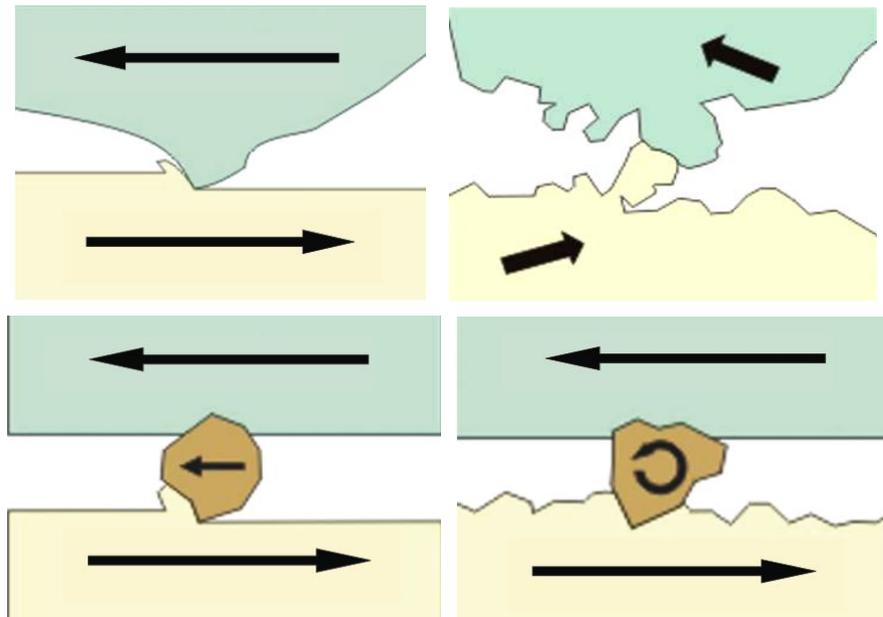
Se puede decir que este tipo de desgaste no actúa solo, sino que se relaciona con otros mecanismos, es más, para algunos autores este tipo de desgaste no es un mecanismo base sino que es un colaborador de los otros tipos.

#### 2.5.4 *Desgaste por Erosión*

La erosión puede considerarse como un caso particular de la abrasión donde la partícula abrasiva se pone en contacto con la superficie impulsada por un fluido en la que está en suspensión, el fluido puede ser líquido o gaseoso, la velocidad de impacto dependerá fundamentalmente del mapa de velocidades hidrodinámicas que se presente en el sistema. Más adelante se hará en este tipo de desgaste.

#### 2.5.5 *Desgaste Abrasivo*

Se produce por la interferencia entre los picos de las micro-irregularidades de las superficies en contacto (Ver figura 2.5). Se origina en el deslizamiento relativo y posterior remoción entre una superficie dura sobre una blanda.



**Figura 2.5** Secuencia del desgaste abrasivo

Debido al elevado número de factores que intervienen en el proceso de desgaste, se torna difícil poseer 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.

Comúnmente a los materiales que van a estar sometidos a desgaste abrasivo, se les evalúa su rendimiento en función del tiempo en servicio, en términos de efectividad de costos; de cualquier manera, es posible aislar las variables y evaluar, mediante ensayos, la tasa de desgaste, dimensiones de la huella de desgaste y/o mecanismos de desgaste.

Los ensayos de laboratorio generalmente se utilizan para:

- Estudiar los mecanismos de desgaste.
- Desarrollar mejoras en los materiales utilizados.
- Seleccionar materiales para determinadas condiciones de servicio.

Los daños superficiales que se producen por desgaste abrasivo pueden clasificarse básicamente en dos tipos *TOPOGRÁFICOS* y *MICROESTRUCTURALES*. A continuación se presenta una clasificación de estos daños superficiales, aunque lo habitual es que no se presente uno solo de estos fenómenos, sino la combinación de varios de ellos por lo que su interpretación no resulta siempre sencilla, y la interacción de varios de los mecanismos nombrados a continuación aumentan el daño que produciría cada uno de ellos de manera aislada.

#### **1- Sin modificación de la cantidad de materia**

- **Cambio Estructural:** Es debido a los procesos de envejecimiento, revenido, transformación de fase, recristalización, etc.
- **Deformación Plástica:** Se puede apreciar deformación plástica sobre la pieza, en forma localizada o en su totalidad.

- **Fisuración Superficial:** Se debe a excesivas tensiones de contacto locales o por ciclos de tensiones mecánicas o térmicas. Las primeras producen fisuras paralelas, y las segundas una red de fisuras.

## 2- Con pérdida de material

- **Desgaste:** Deja huellas de diferentes formas y tamaño; los mecanismos pueden ser fractura por corte, extrusión, formación de virutas, fractura frágil o por fatiga, disolución química, difusión.

## 3- Con ganancia de material

- **Adhesión:** Una superficie gana partículas perdidas de la otra superficie.
- **Corrosión:** Reacción química con los elementos del medio o con la otra superficie interactuante.

**LA ABRASIÓN**, según la *ASTM (AMERICAN 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:

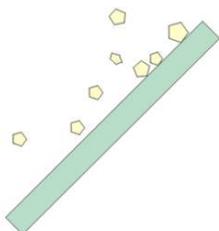
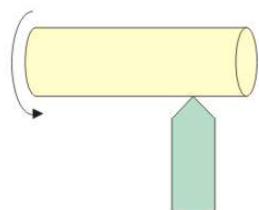
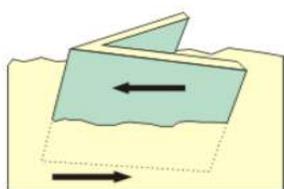
- La característica de cada una de las superficies.
- La presencia de abrasivos entre ellas.
- La velocidad de contacto.
- Condiciones ambientales.

El fenómeno abrasivo se clasifica 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 abrasión por baja presión.
- Contacto de tres cuerpos, ocurre cuando el abrasivo es atrapado entre dos superficies. También se le llama abrasión producida por alta presión.

Como se muestra en la figura 2.6, la clasificación debido al ambiente de contacto es como sigue:

- Abiertos. Fig 2.6 a) y c)
- Cerrados. Fig 2.6 b) y d)

Clasificación del desgaste abrasivo		
Según el contacto	Según el ambiente	
	Abiertos	Cerrados
Dos cuerpos	 <p>a) Caída de piedras sobre lámina</p>	 <p>b) Maquinado</p>
Tres cuerpos	 <p>c) Arado penetrando arena</p>	 <p>d) Rodillos triturando piedras</p>

**Figura 2.6. Clasificación del desgaste abrasivo**

Se dice que existe abrasión de baja presión cuando el abrasivo permanece relativamente intacto, así mismo se reconoce un fenómeno de abrasión por alta presión cuando el abrasivo o la partícula atrapada es triturada. También existe otro tipo de abrasión denominada por arranque, que se basa en que una partícula abrasiva relativamente grande deberá cortar el material que ha sido completamente endurecido por trabajo en frío, a causa de cualquiera de los fenómenos anteriores.

A causa de esto se han propuesto varios mecanismos para explicar como el material es removido de la matriz durante el proceso abrasivo, los cuales consideran fatiga, fractura y fusión.

*El arado* ocurre cuando se desplaza material de una muesca a los lados, generalmente se presenta bajo cargas ligeras y trae como consecuencia pérdida real del material, los daños se producen cerca de la superficie del material en forma parecida a lo que ocurre en un trabajo en frío. Sí posteriormente se produce el rayado sobre la superficie trabajada en frío, entonces la pérdida de material deberá estar a cargo de *la microfátiga*.

*El corte* es la forma más severa de desgaste para materiales dúctiles, ya que la punta del abrasivo remueve una viruta parecido a como lo haría una herramienta de maquinado lo que conlleva a una pérdida de material pero con poca remoción de material en comparación con el tamaño de muesca. Para una partícula abrasiva (de forma angular) existe un ángulo crítico para el cual ocurre el proceso de transición entre el arado y el corte, que depende del material que está sometido a abrasión, por ejemplo el ángulo varía de 45° para el Cu a 85° para el Aluminio (Sedriks, A. J., 1984). Para materiales dúctiles los mecanismos observados fueron el arado, **la formación de bordes**, y el corte; en cambio para materiales frágiles se observa un mecanismo adicional: **la microfractura**, la cual ocurre cuando las fuerzas aplicadas por el abrasivo exceden la tenacidad de fractura del material, este mecanismo de desgaste severo es el predominante en materiales cerámicos y activo en materiales tales como fundiciones blancas.

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

A causa de esto 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 en desgaste abrasivo. Cuando un grano abrasivo efectúa remoción de material de una superficie por corte, el máximo volumen de desgaste que puede obtenerse, está descrito por:

$$W = A*d$$

Ec. 2.1.

donde:

$W$  = Volumen de 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 de forma de grano  $k_1$  y de profundidad de penetración  $p$ :

$$A = k_1*p$$

Ec. 2.2.

A su vez la profundidad de penetración es función de la carga aplicada  $L_1$  la dureza del material  $H$ , y nuevamente de la forma del grano abrasivo, representado por el factor  $k_2$ :

$$p = (k_2 * L_1) / H$$

Ec. 2.3.

Dando como resultado, luego de reducir términos, que la ecuación de Archard sea igual a:

$$W = k_3 *(L*d/H)$$

Ec. 2.4.

siendo  $k_3$  una constante que engloba las otras ( $k_3 = k_1 * k_2$ ). Cabe destacar que existen muchos factores que afectan a  $k_1$ , por ejemplo que estemos en presencia de corte o arado, el

abrasivo puede deslizar y evitar el desgaste, por derrumbamiento puede no ser efectivo, durante el final de su trayectoria de contacto, etc.

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

$$R = 1 / W$$

Ec. 2.5.

La ecuación de Archard, con pequeñas modificaciones es aún ampliamente utilizada como punto de partida para el desarrollo de ecuaciones más completas.

Varios investigadores han detectado que la estructura y la orientación cristalina afectan al proceso de desgaste, por ejemplo Alison demostró que los metales cúbicos se desgastan dos veces más rápido que los metales hexagonales, lo que lo llevó a atribuirle a los metales hexagonales menor velocidad de endurecimiento. Steijn (1984) estudió el desgaste de monocristales en función de su orientación cristalina, llegó a la conclusión de que los metales BCC y FCC: con superficies preparadas en el plano (001), presentaban un desgaste mayor a lo largo de la dirección <100> que en la dirección <110>.

Existe una relación relativa entre las partículas y el tamaño del grano abrasivo vital: mientras más grande sea el tamaño del grano abrasivo, el desgaste tiende a ser mayor. A causa de esto, a la matriz se le adicionan partículas cuyos factores suministran una mayor protección contra el desgaste. Los factores que afectan fundamentalmente al desgaste abrasivo de los materiales:

- **Orientación** ya que si la segunda fase de refuerzo es paralela a la superficie, es removida más fácil que una que tuviera la orientación perpendicular a la misma.
- **Tamaño** Si el tamaño de la segunda fase es relativamente pequeño en comparación con la profundidad de la muesca abrasiva, esta segunda fase tendrá muy poco efecto o ninguno para resistir al fenómeno abrasivo. Se necesita considerable tamaño para soportar no solo el desgaste abrasivo sino el deslizamiento (Cellard 2006).

- ***Módulo de Elasticidad:*** Sí las partículas de refuerzo poseen un bajo módulo de elasticidad, la matriz tenderá a desunirse en la interfase, lo que conllevaría a un desprendimiento de las partículas.

- ***Dureza Relativa y Fragilidad de la Segunda Fase;*** Los materiales frágiles tienden a agrietarse y desprender virutas en un área mayor que la sección transversal del grano abrasivo que está desprendiendo material.

A continuación se citan algunos factores que afectan las pérdidas por abrasión:

### **Granulometría**

Todos los abrasivos, una vez sacados del horno en forma de bloques o extraídos de los yacimientos naturales, se reducen a granos por medio de máquinas trituradoras, de las cuales salen en diversas dimensiones que requieren una clasificación por tamaño. El sistema de clasificación es distinto según sea el volumen de dicho grano: se emplea un procedimiento basado en tamices en los granos más bastos y un sistema de decantación en los más finos.

En el primer caso, el tamaño del grano viene indicado por el número de mallas por pulgada lineal que tiene el tamiz empleado para su clasificación. Así un tamiz que tenga 12 mallas por pulgada será un grano número 12, mientras que uno que tenga 24 mallas por pulgada lineal, será indicado por el número 24, es decir, cuanto más grande sea el número de grano, tanto más pequeño será el molido.

El método de tamices es el empleado para clasificar granos comprendidos entre los números 8 al 240. A partir de 240 se utiliza el sistema de decantación, el cual está basado en que las partículas abrasivas suspendidas en un líquido se depositan en el fondo a distinta velocidad según su tamaño, lo que permite diferenciarlos por tamaños.

### **Forma**

Este es un factor muy importante en el fenómeno de desgaste, ya que afecta la forma de la huella producida en el material, al igual que la carga de contacto y la transición entre

el contacto elástico y plástico. De manera experimental se ha demostrado que a medida que el abrasivo presente forma redondeada en vez de angular, el desgaste ocurrido es menor.

### **Temperatura**

Es de esperarse que la rata de desgaste abrasivo aumentase a medida que aumenta la temperatura, ya que la dureza y el esfuerzo de fluencia disminuyen, sin embargo existen indicios, por ejemplo el Cu y el Al, que experimentalmente a medida que aumenta la temperatura a 673 K, se observa muy pocos cambios en el proceso de desgaste abrasivo.

### **Velocidad de Contacto**

Al igual que en el caso anterior, el estudio fue realizado de manera experimental, la velocidad de desgaste abrasivo se ha encontrado que aumenta ligeramente cuando la velocidad aumenta entre el rango de 0 a 2,5 m/seg. Este aumento puede ser atribuido al calentamiento friccional que ocurre en la superficie del material.

### **Carga**

Según la ecuación de Archard el desgaste abrasivo es proporcional a la carga aplicada; sin embargo esta proporcionalidad no se cumple cuando la carga es lo suficientemente alta para fracturar e incluso romper las partículas abrasivas.

Debido a esto se pueden enunciar dos casos:

- La fractura del abrasivo puede provocar nuevos puntos agudos que favorezcan al desgaste.
- La fractura del abrasivo puede provocar partículas redondeadas que desfavorezcan al desgaste abrasivo.

## **Humedad**

El efecto de la humedad atmosférica sobre el desgaste abrasivo no está del todo claro, a causa de encontrarse resultados experimentales contradictorios. Larsen - Basse (1975) estudiaron como la humedad afectaba a una variedad de metales puros 'y aceros, usando como abrasivo Carburo de Silicio (SiC), encontraron que se favorecía al desgaste en un 65%, a causa de la formación de bordes agudos resultado de la fractura asistida por la humedad del SiC.

## **Efectos Corrosivos**

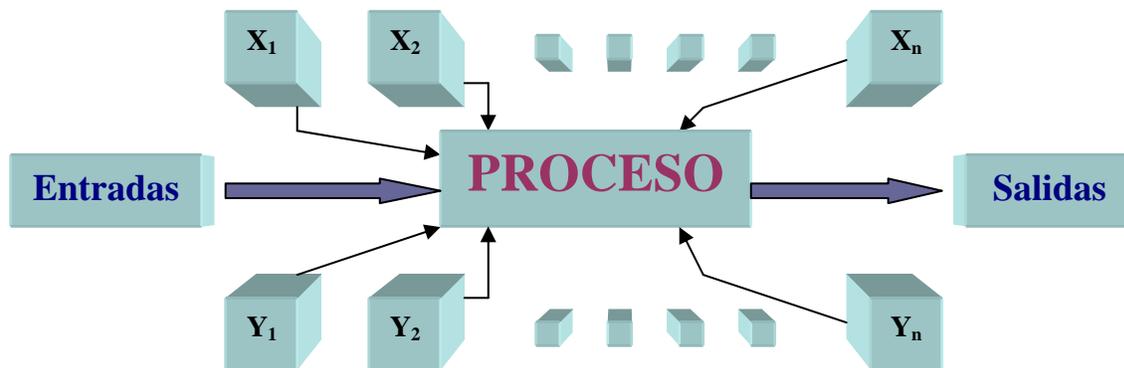
El fenómeno abrasivo es a menudo incrementado por las condiciones corrosivas encontradas en el lugar, especialmente si el PH reinante es bajo. En este caso se presenta un fenómeno de sinergismo entre el desgaste abrasivo y la corrosión, ya que la abrasión crea superficies frescas que rápidamente se corroen y la capa corroída es removida por el fenómeno abrasivo dejando así una superficie libre para volver a empezar el ciclo.

## **2.6 DISEÑO EXPERIMENTAL**

Trascendentalmente, el campo de la investigación experimental o diseño experimental se remota a los años 1980 con los trabajos realizados por un investigador inglés llamado Ronald Fisher en la Estación Agrícola Experimental de Rothamsted, Reino Unido. Este investigador introdujo el concepto de aleatorización y el análisis de varianza, los cuales fueron seguidos y desarrollados más ampliamente años después por el estadístico japonés Gen'ichi Taguchi quien generó avances importantes en este campo.

Los diseños permiten planificar un trabajo para evaluar el efecto combinado de dos o más variables de forma simultánea, obteniéndose información en cuanto a la posible interacción entre los diversos factores. Estos factores, consisten en un proceso donde se tienen entradas y salidas que pueden ser vistas por una especie de caja negra, en la cual, dichas variables de entrada se introducen al proceso, interactúan y ocasionan un resultado o variable de salida (Ver figura 2.7). Los niveles de salida dependen de los niveles de entrada

que estén implicados en el proceso. La búsqueda de las combinaciones óptimas de la variable de entrada son las que conllevan al nacimiento del diseño experimental, que consiste en un prueba donde se realizan cambios sistemáticos y controlados para medir las variables o efectos que ocurren sobre la salida cuando es cambiada cada una de las entradas.



**Figura 2.7. Representación esquemática del proceso de experimentación.**

Los principios básicos por los cuales se basa el diseño experimental, son los siguientes:

**Repetición:** Ocurre cuando un tratamiento es aplicado en más de un espécimen o muestra, esto tiene como función reducir la desviación estándar de las medias de los tratamientos y poder estimar el error experimental.

**Aleatorización:** Consiste en la asignación aleatoria de tratamientos a las muestras experimentales, con lo cual se logra que los factores no controlados en el experimento, los cuales pudieran influir en los resultados del mismo, sean distribuidos al azar dentro de las experimentaciones, asegurando que las medias de los tratamientos y el error experimental sean investigados.

**Control Local:** Este principio tiene como finalidad disminuir el error en los experimentos. Realizando tres acciones se puede lograr este cometido:

- **Agrupamiento:** Se colocan las muestras como unidades homogéneas en un grupo, pudiéndose así realizarse tratamientos diferentes a cada uno de los grupos.

- **Bloqueo:** Este es un procedimiento mediante el cual se realiza una distribución de las muestras de manera que las mismas queden dentro de un bloque, conformado por especímenes relativamente homogéneos. Con esto se logra que las mayorías de las variaciones predichas entre las unidades queden confundidas con el efecto de los bloques.
- **Balanceo:** consiste en aplicar cada tratamiento al mismo número de unidades experimentadas con el propósito de tener la misma precisión en la estimación de las medias de todos los demás tratamientos.

## 2.7 DISEÑO EXPERIMENTAL FACTORIAL

Se usa este tipo de diseño en estudios en los cuales la cantidad de factores a estudiar es igual o mayor a dos, es decir, en experimentos en los que intervienen diversos factores que, en conjunto asociados, influyen en la respuesta del sistema.

Un estudio realizado bajo este diseño logra que sean evaluadas todas las combinaciones de factores posibles, para así apreciar los efectos de dichas combinaciones en las respuestas o salida del sistema.

Los factores se pueden definir como variables independientes, los cuales influyen en la salida del sistema. Mientras que las variables que indican la respuesta del sistema o salidas del proceso, se denominan variables dependientes.

En el diseño experimental factorial, cada combinación de factores es conocido como tratamiento. Este método se puede representar de la siguiente forma  $x^y$ , donde la “y” representa los factores involucrados en el proceso, y la “x” representa los niveles a los que son evaluados dichos factores. Por lo tanto:

$$x^y = \text{número de tratamientos posibles}$$

Hay diferentes casos particulares de esta metodología, entre ellas tenemos a los diseños experimentales  $2^2$ ,  $2^3$ ,  $3^2$ ,  $3^3$ , que son los más usados. Un ejemplo de esto es: si queremos estudiar el efecto del amperaje y voltaje de un proceso de soldadura, y los mismos los vamos a estudiar a tres niveles diferentes, o sea para el voltaje tres niveles (110,

220, 440 V) y para el amperaje (30, 45, 60 A) con estos datos tenemos un modelo factorial de  $3^2$ , en el cual el amperaje y el voltaje son los factores y los valores a los que van a ser evaluados son los niveles de cada uno, con esto nos da un total de nueve (9) tratamientos posibles y distintos.

## 2.8 ANÁLISIS DE VARIANZA

El análisis de varianza (ANOVA, Analysis of Variance) es un método estadístico que evalúa si las diferencias entre los promedios de dos o más grupos son debidos al azar, o a diferencias significativas en el tratamiento de los mismos. Casi siempre se introduce el tema del análisis de varianza como respuesta a la necesidad de utilizar una técnica de comparación de más de dos grupos; es decir, como un método para comparar más de dos tratamientos. Si disponemos de medidas cuantitativas continuas, que se pueden suponer como procedentes de una distribución de probabilidad normal, y queremos comparar dos grupos (dos tratamientos), la prueba estadística que se utiliza es un contraste de medias basado en la “t” de Student, y cuando se supone más de dos grupos, la prueba a emplear es el análisis de varianza.

Para visualizar de una mejor manera este método, supongamos que tenemos una cantidad de tratamientos ( $k$ ) aleatorios e independientes, estos tratamientos son las posibles combinaciones de parámetros para poder hacer un experimento, ejemplo de esto es una experimentación factorial  $\mathbf{x}^y$ , el cual representa el número “ $k$ ”. Para calcular la varianza de la población ( $S^2$ ) existen dos maneras:

- A) La varianza dentro de los grupos o residual (intra-grupo) comúnmente representada por el promedio al cuadrado del error conocido por sus siglas en inglés MSE (Mean Square Error) o MSW (Mean Square Within) que se calcula con las medias de las  $k$  varianzas muestrales (cada varianza muestral es un estimador centrado y más eficiente que todos ellos). MSE es un cociente: al numerador se le llama suma de cuadrados del error y se representa por SSE y al denominador grados de libertad por ser los términos independientes de la suma de los cuadrados (ya que solo contribuye a ella la varianza dentro de las muestras).

B) La varianza entre grupos (inter-grupo) o explicada (sólo contribuye a ella la varianza entre las distintas muestras) representada por MSA o MSB (Mean Square Between). Se calcula a partir de la varianza de las medias muestrales y es también un cociente; al numerador se le llama suma de cuadrados de los tratamientos (se le representada por SSA) y al denominador  $(k-1)$  grados de libertad.

Si los tratamientos tienen un efecto significativo, se espera que la varianza explicada sea grande en comparación con la varianza residual.

Definimos los siguientes términos para un número  $k$  de tratamientos,  $n(k)$  muestras por  $k$ -ésimo tratamiento y  $n$  muestras en total:

$$X_{media}^k = \sum_{i=1}^n X_i^k$$

Ec. 2.6.

Media empírica del  $k$ -ésimo tratamiento

$$V_{varianza}^k = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i^k - X_{media}^k)^2}{n - 1}$$

Ec. 2.7.

Varianza empírica del  $k$ -ésimo tratamiento

$$X = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n(k)} X_i^j$$

Ec. 2.8.

Media global de la muestra

$$V_{intra} = \sum_{h=1}^k \left[ \frac{n_h}{n} V^h \right]$$

Ec. 2.9.

Varianza Intra-Grupo o Residual

$$V_{inter} = \sum_{h=1}^k \frac{n_h (X_{media}^h - X_{media})^2}{n}$$

Ec. 2.10.

Varianza Inter-Grupo o Explicada

Donde:

$$S^2 = V_{inter} + V_{intra}$$

Ec. 2.11.

Varianza Total

Por lo general los resultados del ANOVA son representados como en la tabla 2.2.

**Tabla 2.2 Representación de los resultados de un ANOVA**

Fuente de Variación	G.L.	SS	MS	F
Entre grupos Tratamientos	k-1	SSA	SSA / (k-1)	MSA/MSE
Dentro de Grupos Error	(n <sub>(h)</sub> -1)k	SSE	SSE / k (n <sub>(k)</sub> -1)	
<b>Total</b>	K n <sub>(k)</sub> -1	SST		

La prueba del ANOVA, consiste en ensayar o rechazar la hipótesis nula (H<sub>0</sub>) la igualdad de las medias grupales (μ), esta se puede expresar de la siguiente manera:

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$$

Ec. 2.12.

El valor P es el que determina la probabilidad de que la hipótesis sea cierta. Para valores de P cercanos a uno (1), la probabilidad de que las diferencias inter-grupales sean debido al azar, es muy alta. Mientras que en el caso contrario, el valor es cercano a cero. Estas diferencias inter-grupales se deben a la aplicación de los tratamientos.

Este valor P es tomado en muchos casos de manera arbitraria, pero es fijado con anterioridad de los experimentos. Para motivos de investigación, ciencias básicas e ingeniería, los resultados son significativos para un valor aproximadamente a 0,05. Este valor puede variar dependiendo de los experimentos a realizar y del nivel de confiabilidad que se necesite para el mismo.

## **2.9 MÉTODO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA**

La Metodología de Superficies de Respuesta es un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas utilizadas para modelar y analizar problemas en los que una variable de interés es influenciada por otras. Este método es clasificado como un método simultáneo, siendo utilizado en la etapa de optimización propiamente dicha. Su aplicación permite seleccionar la combinación de niveles óptimos en la obtención de la mejor respuesta para una situación dada.

Tradicionalmente, cuando se diseña y optimiza y nuevo método de análisis, los valores óptimos para cada variable se estiman aisladamente dejando constantes las restantes, pero cuando el efecto de una variable particular no es independiente de las demás (es decir que se producen interacciones entre una o más variables), este proceso de “una variable por vez” genera conclusiones erróneas. Por esto es mejor aplicar técnicas de optimización multidimensionales que permitan la consideración simultánea de más de una variable.

Para ello serán definidos algunos términos:

- *Factores*: Son las condiciones del proceso que influyen la variable de respuesta. Estos pueden ser cuantitativos y cualitativos.
- *Respuesta*: Es una cantidad medible cuyo valor se ve afecto al cambiar los niveles de factores. El interés principal es optimizar dicho valor.

- *Función de respuesta:* Al decir que un valor de respuesta “Y” depende de los niveles  $x_1, x_2, \dots, x_k$  de  $k$  factores,  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ , estamos diciendo que existe una función matemática de  $x_1, x_2, \dots, x_k$  cuyo valor para una combinación dada de los niveles de los factores, corresponde a Y. Esto es  $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$ .
- *Función de respuesta predicha:* La función de respuesta se puede representar con una ecuación polinomial. El éxito de una investigación de superficie de respuesta depende de que la respuesta se pueda ajustar a un polinomio de primer o segundo grado. Supongamos que la función de respuesta para los niveles de dos factores se puede expresar utilizando un polinomio de primer grado:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2$$

Ec. 2.13.

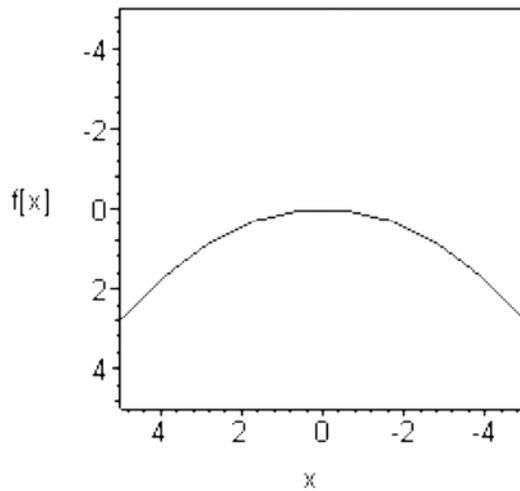
Donde  $\beta_0, \beta_1$  y  $\beta_2$  son los coeficientes de regresión a estimar, además  $x_1$  y  $x_2$  representan los niveles de  $\xi_1$  y  $\xi_2$  respectivamente. Suponiendo que se recolectan  $N \geq 3$  valores de respuesta (Y), con los estimadores  $b_0, b_1$  y  $b_2$  se obtienen  $\beta_0, \beta_1$  y  $\beta_2$  respectivamente. Al reemplazar los coeficientes de regresión por sus estimadores, obtenemos:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2$$

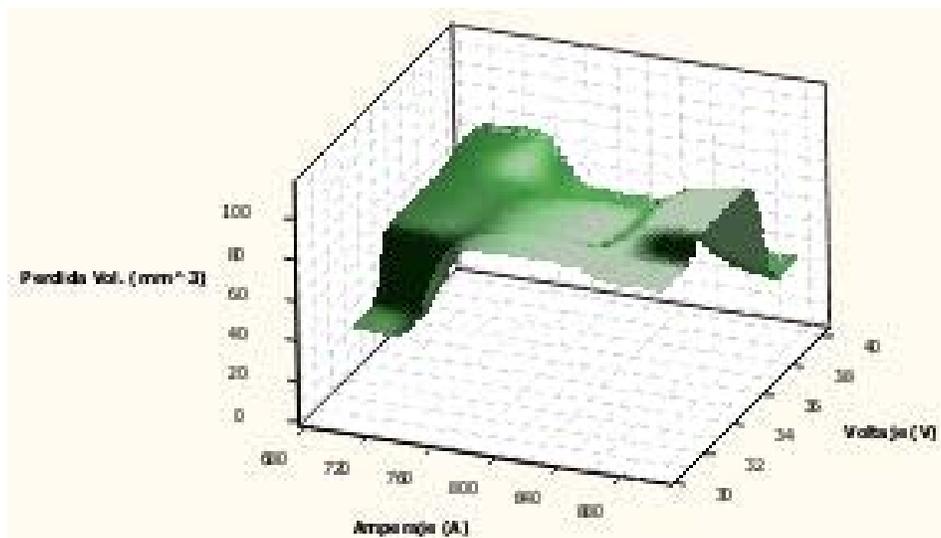
Ec. 2.14.

que representa el valor estimado de “Y” dado por  $x_1$  y  $x_2$

- *Superficie de Respuesta:* La relación  $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$  entre “Y” y los niveles de los  $k$  factores  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ , representa una superficie. Con  $k$  factores la superficie está en  $k + 1$  dimensiones. Por ejemplo, cuando se tiene  $Y = f(x_1)$  la superficie está en dos dimensiones como se muestra en la figura 2.8.



**Figura 2.8. Superficie de respuesta en dos dimensiones (*MiniTab*).**



**Figura 2.9. Superficie de respuesta (tres dimensiones)**  
(Fuente *MiniTab*)

- *Gráfica de contornos*: La gráfica de contornos facilita la visualización de la forma de la superficie de respuesta en tres dimensiones. En ésta, las curvas de los valores iguales de respuesta se grafican en un plano donde los ejes coordenados representan los niveles de los factores. Cada curva representa un valor específico de la altura de

la superficie, es decir, un valor específico de  $\hat{Y} = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2$ . Esto se demuestra en la figura 2.10, donde la gráfica contenida nos ayuda a enfocar nuestra atención en los niveles de los factores a los cuales ocurre un cambio en la altura de la superficie.

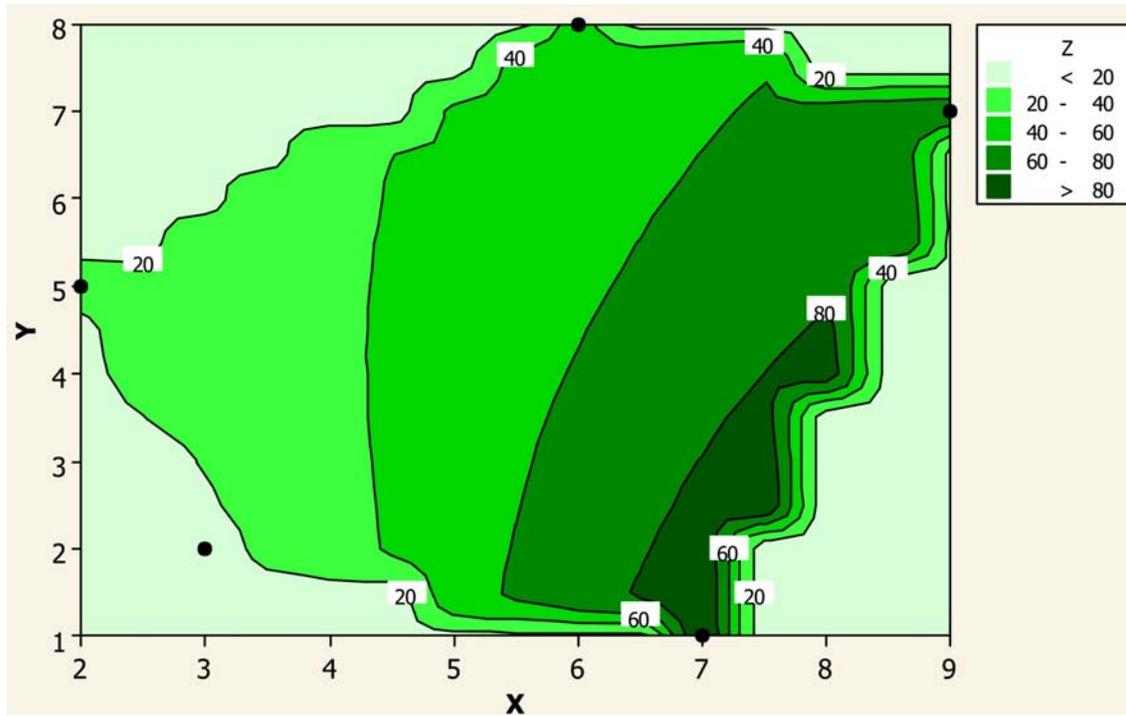


Figura 2.10. Gráfica de contornos (Fuente: MiniTab).

## CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

### 3.1 TIPOS DE INVESTIGACIÓN

#### **Por la finalidad perseguida:**

- Investigación básica.
- Investigación aplicada.

#### **3.1.1 *Investigación Aplicada***

Es llamada también con el nombre de investigación práctica o empírica. Se caracteriza porque busca la aplicación o utilización de los conocimientos que se adquieren. Este tipo de investigación depende los resultados y avances de la investigación básica debido a que toda la investigación aplicada requiere de un marco teórico. Sin embargo, lo que le interesa al investigador, primordialmente son las consecuencias prácticas.

#### **Por los medios utilizados para la obtención de datos:**

- Investigación documental.
- Investigación de campo.
- Investigación experimental

#### **3.1.2 *Investigación Documental***

Como su nombre lo indica, este tipo de investigación es la que se realiza apoyándose en fuentes de carácter documental, esto es, en documentos de cualquier especie. Como subtipos de esta investigación encontramos la investigación bibliográfica, la hemerográfica y la archivista. La primera se basa en la consulta de libros, la segunda en artículos o ensayos de revista y periódicos, y la tercera en documentos que se encuentran en los archivos, como cartas, oficios, circulares, expedientes, etcétera.

### **3.1.3 *Investigación Experimental***

Se llama así la investigación que obtiene su información de la actividad intencional realizada por el investigador y que se encuentra dirigida a modificar la realidad con el propósito de crear el fenómeno mismo que se indaga, y así poder observarlo. Se presenta mediante la manipulación de una variable experimental no comprobada, en condiciones rigurosamente controladas, con el fin de describir de qué modo o por qué causa se produce una situación o acontecimiento particular.

#### **Por el nivel de conocimientos que se adquieren:**

- Investigación exploratoria.
- Investigación descriptiva.
- Investigación explicativa.

### **3.1.4 *Investigación Exploratoria***

Adopta este nombre la investigación que se realiza con el propósito de destacar los aspectos fundamentales de una problemática determinada y encontrar los procedimientos adecuados para elaborar una investigación posterior. Es útil desarrollar este tipo de investigación porque, al contar con sus resultados, se simplifica abrir las líneas de investigación y proceder a su consecuente comprobación.

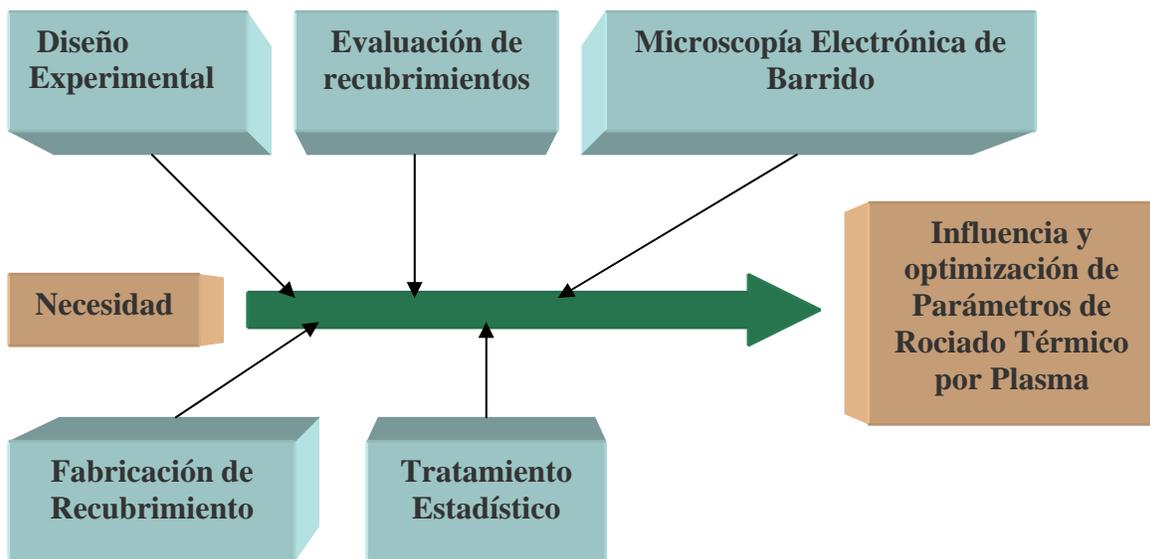
### **3.1.5 *Investigación Descriptiva***

A través de este tipo de investigación se utiliza el método de análisis, se logra caracterizar un objeto o una situación concreta y se señala sus características y propiedades. Combinada con ciertos criterios de clasificación, sirve para ordenar, agrupar y sintetizar los objetos involucrados en el trabajo indagatorio. Al igual que la investigación que hemos descrito anteriormente, puede servir de base para investigaciones que requieran un mayor nivel de profundidad.

## 3.2 PROCEDIMIENTOS Y ACTIVIDADES

1. *Revisión bibliográfica:* Realizada a través de documentos, revistas, publicaciones, libros, manuales, publicaciones de Internet, estudio de las investigaciones referente a todo lo relacionado con el compuesto  $5\text{SiO}_2 - 3\text{TiO}_2 - \text{Cr}_2\text{O}_3$ , procesos de rociado, específicamente el rociado por plasma y los parámetros a evaluar, mecanismos de desgaste, particularmente el proceso de abrasión, así como un análisis de los fundamentos de estadística requeridos para el trabajo de investigación. Para de esta manera obtener detalladamente los fundamentos teóricos de todas las actividades a realizar.
2. *Diseño de los experimentos:* Esta actividad consiste en la determinación de la cantidad de probetas necesarias para realizar la investigación según la combinación de parámetros establecida con la finalidad de realizar un estudio lo más significativo posible, con la ayuda de un diseño experimental factorial  $3^3$ .
3. *Diseño de las dimensiones de las probetas:* Las dimensiones son apegadas a las exigencias de la máquina para ensayos de abrasión y la norma ATM G-65.
4. *Adquisición de insumos:* Aquellos requeridos para la realización de los ensayos, compra de la arena para el ensayo de abrasión, el acero para las probetas, reencauchado de los discos de acero pertenecientes a la máquina de ensayos de abrasión de la escuela de ingeniería mecánica de la U.C.V.
5. *Fabricación de las probetas:* Corte de las mismas a la medida diseñada.
6. *Proceso de granallado:* El necesario previo al depósito del recubrimiento de manera que el mismo posea mejor adherencia al sustrato.
7. *Realización de recubrimientos para los ensayos preliminares:* Con los cuales se realizará la determinación de los parámetros a ser depositados a partir de los recomendados por el fabricante tomando valores por encima y por debajo de los mismos.
8. *Aplicación del recubrimiento  $5\text{SiO}_2 - 3\text{TiO}_2 - \text{Cr}_2\text{O}_3$ :* Con la utilización de la pistola de deposición fija de plasma con los parámetros establecidos en sus diferentes combinaciones.

9. *Evaluación de los recubrimientos:* Ensayo de abrasión y dureza por microindentación.
10. *Aplicación del programa de optimización y análisis de varianza:* Lo que es llamado ANOVA a través del software estadístico MiniTab.
11. *Evaluación:* A través de un estudio de la microestructura con la utilización de Microscopía Electrónica de Barrido.
12. *Evaluación de los resultados:* Acompañada de una comparación con resultados obtenidos en otras investigaciones previas.
13. *Emitir conclusiones.*
14. *Realización de visitas:* Durante la realización de la etapa de aplicación del recubrimiento fue muy importante las constantes visitas a la empresa PLASMATEC INGENIEROS encargada de realizar la deposición del material de recubrimiento.



**Figura 3.1. Diagrama de Ishikawa acerca del trabajo de investigación.**

### 3.3 DISEÑO EXPERIMENTAL APLICADO

Apoyados en bibliografía consultada y requerimientos de hallazgo de valores óptimos, nuestro diseño experimental fue un diseño factorial  $3^3$ , en el cual tenemos 3

variables a evaluar con 3 niveles de evaluación, para un total de 27 tratamientos, en donde tenemos todas las posibles combinaciones de nuestros parámetros a evaluar. Esto se observa en la tabla 3.1, donde A es el valor del amperaje, V el de voltaje y TA la tasa de alimentación de los polvos. Cabe destacar que para desarrollar nuestra matriz llamamos “min” el valor por debajo del fabricante, “o” el valor del fabricante (central) y “max” el valor por encima del fabricante. La matriz se desarrolla así:

**Tabla 3.1 Matriz de las diferentes combinaciones de parámetros para el diseño 3<sup>3</sup>.**

CONDICIÓN	COMBINACIÓN		
1	V <sub>min</sub>	A <sub>min</sub>	TA <sub>min</sub>
2	V <sub>min</sub>	A <sub>min</sub>	TA <sub>o</sub>
3	V <sub>min</sub>	A <sub>min</sub>	TA <sub>max</sub>
4	V <sub>min</sub>	A <sub>o</sub>	TA <sub>min</sub>
5	V <sub>min</sub>	A <sub>o</sub>	TA <sub>o</sub>
6	V <sub>min</sub>	A <sub>o</sub>	TA <sub>max</sub>
7	V <sub>min</sub>	A <sub>max</sub>	TA <sub>min</sub>
8	V <sub>min</sub>	A <sub>max</sub>	TA <sub>o</sub>
9	V <sub>min</sub>	A <sub>max</sub>	TA <sub>max</sub>
10	V <sub>o</sub>	A <sub>min</sub>	TA <sub>min</sub>
11	V <sub>o</sub>	A <sub>min</sub>	TA <sub>o</sub>
12	V <sub>o</sub>	A <sub>min</sub>	TA <sub>max</sub>
13	V <sub>o</sub>	A <sub>o</sub>	TA <sub>min</sub>
14	V <sub>o</sub>	A <sub>o</sub>	TA <sub>o</sub>
15	V <sub>o</sub>	A <sub>o</sub>	TA <sub>max</sub>
16	V <sub>o</sub>	A <sub>max</sub>	TA <sub>min</sub>
17	V <sub>o</sub>	A <sub>max</sub>	TA <sub>o</sub>
18	V <sub>o</sub>	A <sub>max</sub>	TA <sub>max</sub>
19	V <sub>max</sub>	A <sub>min</sub>	TA <sub>min</sub>
20	V <sub>max</sub>	A <sub>min</sub>	TA <sub>o</sub>
21	V <sub>max</sub>	A <sub>min</sub>	TA <sub>max</sub>
22	V <sub>max</sub>	A <sub>o</sub>	TA <sub>min</sub>
23	V <sub>max</sub>	A <sub>o</sub>	TA <sub>o</sub>
24	V <sub>max</sub>	A <sub>o</sub>	TA <sub>max</sub>
25	V <sub>max</sub>	A <sub>max</sub>	TA <sub>min</sub>
26	V <sub>max</sub>	A <sub>max</sub>	TA <sub>o</sub>
27	V <sub>max</sub>	A <sub>max</sub>	TA <sub>max</sub>

### 3.4 ENSAYOS PRELILMINARES

Se realizan ciertos ensayos preliminares para comenzar la evaluación de la influencia de los parámetros a manipular, cuyo propósito es ayudar a determinar cual sería la tasa de variación por encima y por debajo de los recomendados por el fabricante de la pistola. Estos ensayos contemplan lo siguiente:

De manera explícita, el fabricante proporciona el parámetro ideal de deposición, el mismo indica unos valores estimados a partir de los cuales se rociaron térmicamente la cantidad de 8 probetas con las siguientes especificaciones de parámetros en la tabla 3.2:

**Tabla 3.2. Ensayos preliminares**

Ensayo	Voltaje	Amperaje	Tasa de alimentación	RPM del motor
1	31	900	61	550
2	40	700	52	500
3	31	800	42	321
4	35	800	42	460
Fabricante	35	800	52	400

### 3.5 ESTABLECIMIENTO DE LOS VALORES DE LOS PARÁMETROS A EMPLEAR

Después de analizar en los ensayos preliminares las diferencias de variaciones de RPM del motor del alimentador de polvos para controlar la tasa de alimentación a la pistola y aplicar el recubrimiento indicado, cambiando los parámetros y consultando la bibliografía disponible en cuanto a los parámetros de operación del equipo de rociado térmico por plasma para el compuesto  $5\text{SiO}_2 - 3\text{TiO}_2 - \text{Cr}_2\text{O}_3$ , se pudo llegar a la determinación de los valores por encima o por debajo de lo recomendado por el fabricante de los polvos, necesario para la optimización.

Notamos que una pequeña variación del voltaje, afectando significativamente las RPM del equipo y, por ende, la calidad del recubrimiento recomendado por el fabricante, por lo que se acordó variar la cantidad de 5V por encima y 4V por debajo, teniendo un valor intermedio del fabricante del dado por la tabla 3.2 (35V) y quedando 40V y 31V

respectivamente. El fabricante recomienda siempre el valor de voltaje más bajo que puede dar esta pistola de plasma cuando se utiliza un amperaje de 800A. Es decir, no se puede obtener un valor más bajo de 35V con un amperaje de 800A, a menos que se disminuye consecuentemente el amperaje, como sucede en este caso. Por ello es que el amperaje se varía 100A tanto por encima como por debajo, quedando 700A y 900A respectivamente. Por otro lado, la tasa de alimentación de los polvos recomendada es de 52 g/min y se logra verificar los valores por encima y por debajo con la estabilización de la llama de la pistola y con resultados obtenidos de investigaciones anteriores (Dávila 2007 y Capote 2006), teniéndose 61 y 42 g/min respectivamente. La tabla 3.3 muestra los valores tomados de los parámetros empleados en esta investigación:

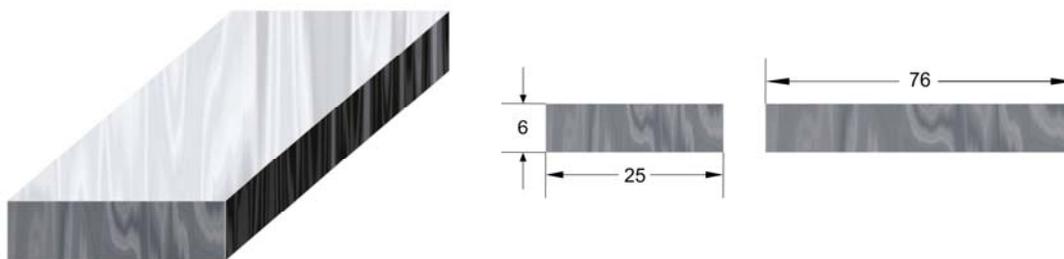
**Tabla 3.3 Ensayos preliminares**

<b>Nivel</b>	<b>Voltaje [V]</b>	<b>Amperaje [A]</b>	<b>Tasa de alimentación</b>	<b>RPM del motor</b>
<b>Por encima</b>	40	900	61	462
<b>Fabricante</b>	35	800	52	400
<b>Por debajo</b>	31	700	42	342

## **3.6 MATERIALES**

### **3.6.1 Probetas**

Se adquirió 2 barras para la obtención de las probetas de la investigación, de acero AISI 1020 de 3,5 metros cada una (7 metros por las 2) de dimensiones de perfil 25 x 6 mm (1 x ¼ pulg. Ver figura 3.2) y se cortaron, según la norma ASTM G-65, en segmentos de 76 mm (3 pulg) para que pudieran ajustarse a las exigencias de la máquina para ensayos de abrasión a utilizarse.



**Figura 3.2. Dimensiones en milímetros de la probeta de acero AISI 1020**

### 3.6.2 Composición del recubrimiento

Según datos obtenidos en PLASMATEC INGENIEROS, el código definido para el compuesto usado en el rociado térmico de nuestra investigación es METCO 136CP, que se define como polvo de grado primario compuesto  $5\text{SiO}_2 - 3\text{TiO}_2 - \text{Cr}_2\text{O}_3$ , designado para aplicar recubrimientos por plasma de alta dureza, densos y resistentes al desgaste (Ver tabla 3.5 y 3.6). Los recubrimientos con METCO 136CP muestran una gran resistencia a los deslizamientos y tienen espesores de gran capacidad. Fue desarrollado para procesos de rociado térmico por plasma (Ver tabla 3.4).

**Tabla 3.4 Aplicaciones de METCO 136CP  $5\text{SiO}_2 - 3\text{TiO}_2 - \text{Cr}_2\text{O}_3$**

*Fuente: PlasmaTec Ingenieros*

Función del recubrimiento	Aplicación Típica
Resistencia a granos abrasivos (Baja temperatura)	Pulituras de muebles o instalaciones
Resistencia a superficies duras (Baja temperatura)	Sellos para bombas, sumergibles, anillos de desgaste, alambres cabrestantes.
Resistencia a la cavitación	Ingeniería en cilindros de aviones Diesel
Resistencia a partículas erosivas (Baja temperatura)	Ventilación de escape

**Tabla 3.5. Características del Polvo METCO 136CP 5SiO<sub>2</sub> - 3TiO<sub>2</sub> - Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**

*Fuente: PlasmaTec Ingenieros*

<b>Composición Típica</b>	Dióxido de Silicio o Silicón	5 %
	Dióxido de Titanio	3 %
	Dióxido de Cromo	Balanceado
<b>Rango de Tamaño Típico</b>	-140 de malla / +15 micrones (-105 +15 micrones)	
<b>Punto de fusión</b>	4415 °F (2435 °C)	

**Tabla 3.6. Propiedades físicas del recubrimiento en Polvo METCO 136CP 5SiO<sub>2</sub> - 3TiO<sub>2</sub> - Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** *Fuente: PlasmaTec Ingenieros*

<b>Propiedades Físicas</b>	<b>Rangos</b>	
Textura rociado	350-400 Pulgadas	(9-10 Micrones)
Textura Sustrato	8-10 Pulgadas	(0,2-0,25 Micrones)
Textura traslapada	4-6 Pulgadas	(0,1-0,15 Micrones)
Densidad (g / cm <sup>3</sup> )	4,7	
Porosidad (%)	3	
Peso	0,24 lb / ft <sup>2</sup> / 0,001”	0,46 Kg / m <sup>2</sup> / 0,1mm
Energía Asociada, Acero bajo carbono	4000 psi	2760 N / cm <sup>2</sup>
Limite de espesor	0,100”	

Es primordial saber preparar la muestra antes de aplicar el rociado térmico para evitar contaminación de la misma (Ver tabla 3.7).

**Tabla 3.7. Rangos de valores durante el recubrimiento de Polvo METCO 136CP 5SiO<sub>2</sub> - 3TiO<sub>2</sub> - Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** *Fuente: PlasmaTec Ingenieros*

<b>Temperatura de Pre calentamiento del Sustrato</b>	250 – 400 °F	120-200 °C
<b>Temperatura máxima durante rociado del Sustrato</b>	600 °F	315 °C
<b>Distancia mantenida</b>	½ - 3½ “	12,7 - 39 mm

Para el rectificado se emplea una rueda de diamante 150, 0,3 micrones, con los siguientes parámetros de la siguiente tabla 3.8:

**Tabla 3.8. Parámetros de rectificado del recubrimiento de Polvo METCO 136CP  
5SiO<sub>2</sub> - 3TiO<sub>2</sub> - Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Fuente: PlasmaTec Ingenieros**

<b>Velocidad de la Rueda</b>	5500-6500 FPM	27-33 m/s
<b>Rebajada máxima por pasada</b>	0,0005 “	0,01 mm
<b>Velocidad de Trabajo Cilíndrico</b>	70-100 FPM	0,36-0,51 m/s
<b>Velocidad de Trabajo sobre probeta</b>	33-55 FPM	0,17-0,254 m/s

### 3.6.3 Distribución de las Probetas

Se totalizaron la cantidad de 81 probetas para 27 combinaciones o tratamientos, requiriendo 3 muestras por combinación o condición. Esto nos hace ver un resultado de diseño experimental de:

$$(3 \text{ niveles})^3 \text{ parámetros} = 27 \text{ condiciones. Y:}$$

$$(27 \text{ condiciones}) \times (3 \text{ muestras / condición}) = \mathbf{81 \text{ probetas}}$$

Dichas muestras serán distribuidas para los ensayos de abrasión y dureza, que determinarán los parámetros óptimos para la pistola de plasma cuando se desee aplicar recubrimientos con 5SiO<sub>2</sub> - 3TiO<sub>2</sub> - Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Los tratamientos junto con los parámetros escogidos, se pueden ver en la tabla 3.9.

**Tabla 3.9. Distribución de los tratamientos según los parámetros (*la condición resaltada, representa la del fabricante*)**

CONDICIÓN	CONBINACIÓN		
	Voltajes [V]	Amperajes [A]	Tasa de alimentación [g/min]
1	31	700	42
2	31	700	52
3	31	700	61
4	31	800	42
5	31	800	52
6	31	800	61
7	31	900	42
8	31	900	52
9	31	900	61
10	35	700	42
11	35	700	52
12	35	700	61
13	35	800	42
14	35	800	52
15	35	800	61
16	35	900	42
17	35	900	52
18	35	900	61
19	40	700	42
20	40	700	52
21	40	700	61
22	40	800	42
23	40	800	52
24	40	800	61
25	40	900	42
26	40	900	52
27	40	900	61

### 3.7 TRATAMIENTO PREVIO A LA DEPOSICIÓN DEL RECUBRIMIENTO

Para garantizar los resultados óptimos en el proceso de rociado térmico, es necesario preparar el sustrato antes de la aplicación del recubrimiento. Estos procedimientos son:

### 3.7.1 Preparación térmica

Para garantizar una superficie de las probetas libres de impurezas como grasa, aceite, polvo, etc. las mismas fueron sometidas a precalentamiento a una temperatura de aproximadamente 150 °C por un minuto.

### 3.7.2 Arenado

Este procedimiento se realizó con un equipo abrasivo por presión de aire, el cual rocía la arena abrasiva (en este caso fue Alúmina  $Al_2O_3$ ) contra el sustrato, logrando una rugosidad adecuada para que el recubrimiento pueda adherirse de manera eficiente y satisfactoria. Este proceso es realizado pocos minutos antes de la deposición para evitar oxidación y posibles contaminantes sobre el sustrato.

## 3.8 DEPOSICIÓN DEL RECUBRIMIENTO

### 3.8.1 Pistola de Plasma

El equipo de rociado térmico por plasma usado por la empresa PLASMATEC INGENIEROS C.A. se trata del modelo SG-100 PLASMA SPRAY GUN (Ver figura 3.3 y descripción del equipo en la Figura 3.4), tomando como valores variables solo el voltaje, el amperaje y la tasa de alimentación de los polvos (Ver tabla 3.10). Aquellos otros valores implicados en la operación del equipo, quedan fijos.

**Tabla 3.10. Variables a emplear en la operación del equipo**

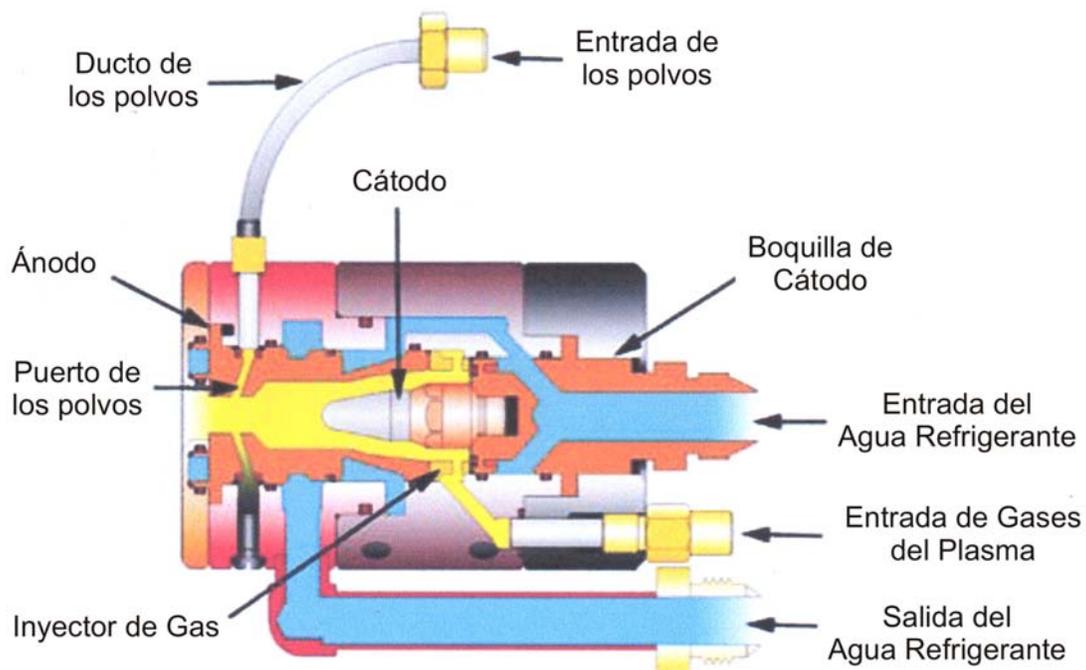
	Máximo	Fabricante	Mínimo
Voltaje (V)	40	35	31
Amperaje (A)	900	800	700
Tasa de alimentación (g/min)	61	52	42

### 3.8.2 Acabado Superficial

Después del rociado, las probetas fueron rectificadas utilizando una rectificadora marca Doall, proceso que fue realizado con el fin de garantizar una superficie con el acabado requerido para la aplicación del ensayo de desgaste abrasivo. Las probetas se rectificaron desde espesores promedios de 1mm, hasta que el recubrimiento llegara a un espesor de 300 $\mu$ m.



**Figura 3.3. a) Pistola de Plasma SG-100 con acoplamiento a servomotor.  
b) Pistola de Plasma SG-100 de uso manual, empleada para el recubrimiento de esta investigación**



**Figura 3.4. Esquema de algunas partes de la Pistola SG-100**

## **3.9 ENSAYO DE ABRASIÓN**

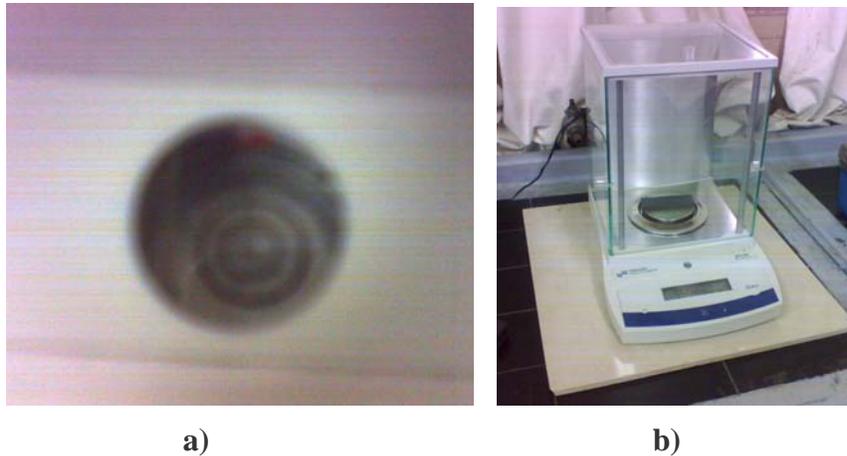
### **3.9.1 *Equipo para Ensayo de Abrasión***

Para realizar el ensayo de abrasión, el equipo a ser utilizado es el que se encuentra ubicado en el laboratorio de ensayos mecánicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica, diseñado y construido (Pinto, N., 1999), bajo la norma ASTM G-65.

Dicho equipo consiste en una rueda de goma que gira bajo carga a  $200 \pm 10$  rpm que es impulsada por un motor reductor DC de 1HP, mientras un flujo de arena abrasiva de granos de cuarzo, sílice u otro mineral requerido por la norma, cuyo tamaño AFS 50-70 se introduce entre la probeta y la rueda. La rotación de la rueda es tal que su cara de contacto se mueve tangencialmente en la dirección y sentido del flujo de la arena. La máquina está equipada con un temporizador que posee la habilidad de apagarla de manera automática después de un tiempo preseleccionado.

### **3.9.2 *Balanza de Precisión***

Es el equipo de precisión indicado para medir la masa de cada probeta antes y después del ensayo de abrasión. Esta debe poseer una apreciación de 0,0001 g según la norma. Para ello se usó la balanza Denver Instrument APX 200 de la Escuela de Metalurgia de la U.C.V. Para comprobar la precisión y confiabilidad de la balanza, la misma se calibra con una burbuja de glicerina localizada en la parte inferior del porta muestras. Dicha burbuja debe encontrarse exactamente en el centro del perímetro que encierra el líquido, cuando la balanza lea 0,0000 g (Ver figura 3.5.a)



**Figura 3.5. Balanza de precisión Denver Instrument APX 200**

### **3.9.3 Arena**

La arena utilizada fue proporcionada por la Escuela de Ingeniería Mecánica como un aporte a esta investigación. Se trata de arena de Sílice según la American Foundry Sand N° AFS-50-70. La misma debe poseer según la norma un contenido de humedad  $< 0,5 \%$  de su peso.

Como la arena se encontraba expuesta a medio ambiente, se debió verificar su humedad antes de realizar la granulometría. Luego fue realizado un tamizado a la arena para verificación de la granulometría, el cual se hizo en una tamizadora

Se procedió de la siguiente manera para realizar esta revisión:

Es tomada una muestra de 200 g, la cual fue horneada a  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  por 1 hora. La pérdida de masa debido al horneado fue de 0,35 g, siendo menor a la establecida por la norma. Luego fue realizado un tamizado a la arena para la verificación de la granulometría, con una capacidad de 1Kg por tamizado, llevado a cabo con un tambor vibratorio para tamizado marca OCTAGON (Ver figura 3.6 a) y b)), en la Escuela de Geología de la Universidad Central de Venezuela, con los tamices número 30, 40, 50, 70, 100, procedimiento mediante el cual se verificó el cumplimiento del tamaño de grano de arena según la norma y supervisado por un técnico, tomando como muestra aceptada los granos retenidos entre los tamices 50 y 70.

Es requerimiento de la norma, para la realización del ensayo de abrasión, que la rata de flujo de arena (caudal) sea de 300 a 400 g/min. Por lo que fue necesario también

realizar la comprobación. Para ello, se realizaron 3 pesos de flujo de arena vaciada en un recipiente durante un minuto. Todas las medidas estuvieron dentro del nivel requerido y se obtuvo un promedio de 302,4 g/min.



**Figura 3.6. Tambor vibratorio OCTAGON para tamizado. a) Sin tamices. b) Con tamices 30, 40, 50, 70, 100, de arriba a abajo.**

#### **3.9.4 Rueda de caucho**

Acoplada sobre un disco de acero AISI 1040, se encuentra la rueda de caucho de Clorobutilo moldeado en su periferia con 0,5 pulg de espesor (12,7 mm). La misma fue vulcanizada por la empresa GOMAINCA ubicada en Barquisimeto, Edo. Lara, y posee una composición como se indica en la tabla 3.11.

**Tabla 3.11. Composición de la rueda vulcanizada de la máquina de abrasión Fuente: Gomas Autoindustriales “GOMAINCA”**

<b>Materiales</b>	<b>Proporción</b>
Chlorobutyl N° HT 10-66	100
Agerite Staylite – S	1
HAF Black	60
Circolight Oil	5
Zinc Oxide	5
Ledate	2
Stearic Acid	1

### 3.9.5 *Parámetros del Ensayo de Abrasión*

La norma ASTM G-65 tiene diversas variantes dependiendo de la carga aplicada y el tiempo del ensayo. Para determinar el comportamiento del recubrimiento ante un medio abrasivo, se realizó el ensayo de abrasión aplicándose a la muestra una carga constante de 130 N a 4 tiempos, 30 seg, 1 min, y 5 min y calculando la cantidad de material removido en cada uno de ellos (Ver tabla 3.12).

**Tabla 3.12. Clasificación de los procedimientos para el ensayo de abrasión según la norma ASTM G-65**

<b>Procedimiento</b>	<b>Fuerza</b>	<b>Pesos contra la</b>	<b>Revoluciones</b>	<b>Tiempo de</b>
<b>A</b>	130	5,159	6000	30
<b>B</b>	130	5,159	2000	10
<b>C</b>	130	5,159	100	½
<b>D</b>	45	1,5430	6000	30
<b>E</b>	130	5,159	1000	5

### 3.9.6 *Procedimiento del Ensayo de Abrasión*

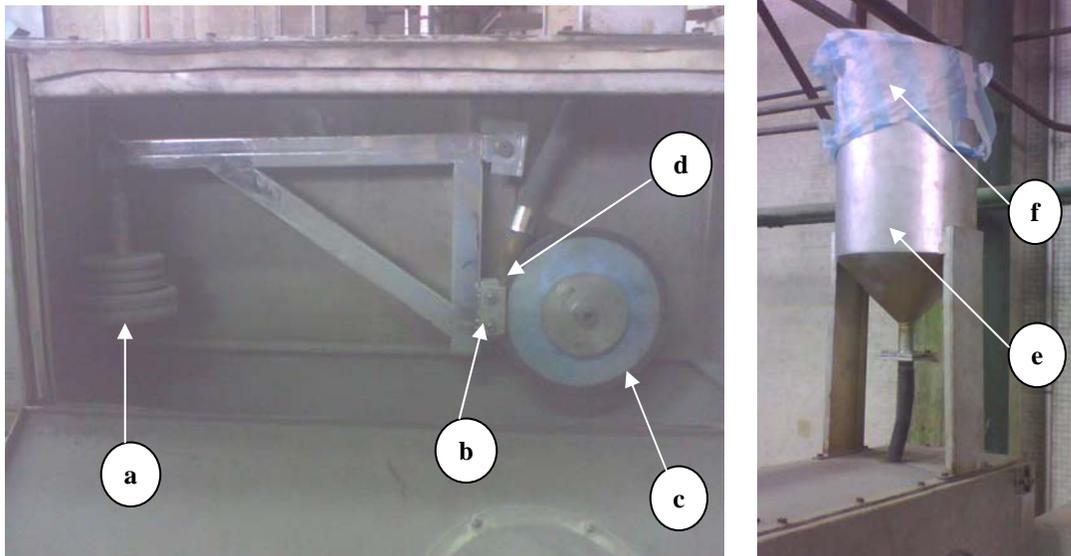
El procedimiento para la realización del ensayo de abrasión fue extraído del manual de operación realizado en el Trabajo Especial de Grado de los Brs. Pinto Nicola y

Rangel Aldrin quienes diseñaron el equipo para ensayos de abrasión que se encuentra en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela (Ver figura 3.7)



**Figura 3.7. Máquina para ensayo de abrasión**

El uso del equipo se llevó a cabo de acuerdo a la norma de abrasión ASTM G-65, en donde se especifica toda la información necesaria para el uso y operación de la máquina de ensayos de abrasión seca. En la figura 3.8 se puede observar la disposición de los elementos dentro de la máquina de ensayos de abrasión y sus componentes principales.



**Figura 3.8. Partes de la Máquina para ensayo de Abrasión a) Pesos variables para la carga, b) Porta probetas, c) Disco de Goma, d) Boquilla de alimentación de arena abrasiva, e) Tolva Surtidora de arena, f) Bolsa para protección frente a contaminación de la tolva.**

### 3.9.7 Reporte de Pérdida Volumétrica

El conjunto de resultados del ensayo de abrasión son reportados en términos de pérdida volumétrica corregida de material. Tomándose como el mejor material aquel que pierde menos volumen para las condiciones de carga y duración del ensayo establecidas.

Para el cálculo de esta pérdida de volumen la norma establece las siguientes ecuaciones:

Cálculo de la pérdida de masa en la probeta:

$$\Delta m_{corr}(gr) = \frac{\Delta m(gr) \times \phi_{rueda}(mm)}{D_{Frueda}(mm)}$$

Ec. 3.1.

Donde:

- $\Delta m_{corr}(gr)$  = Pérdida de masa corregida debido al ensayo de abrasión.
- $\Delta m (gr)$  = Pérdida de masa (masa inicial – masa final)
- $\Phi_{rueda} (mm)$  = Representa el diámetro inicial de la rueda de caucho (225,9mm)
- $D_{Frueda} (mm)$  = Diámetro de la rueda de caucho al final de la prueba de abrasión.

Cálculo de la pérdida de volumen:

$$\Delta V_{corr}(mm^3) = \frac{\Delta m_{corr}(gr)}{\rho \left( \frac{gr}{mm^3} \right)}$$

Ec. 3.2.

- $\Delta V_{corr}(mm^3)$  = Pérdida de Volumen corregida debido al ensayo de abrasión.
- $\rho (gr/mm^3)$  = Densidad del recubrimiento.

Se realizan estas correcciones, para la pérdida de masa y volumen, y obtener resultados con un mismo criterio. Es decir, sin que se vean afectadas por la variación

del disco de caucho, el cual, se va reduciendo debido al desgaste en cada uno de los ensayos.

Densidad del recubrimiento:

En esta oportunidad la densidad del recubrimiento se encuentra documentada y clasificada en *Flame Spray Equipment and Supplies METCO Inc.*, teniendo la densidad como propiedad física típica del recubrimiento codificado como 136CP = 5SiO<sub>2</sub> - 3TiO<sub>2</sub> - Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en un valor de:

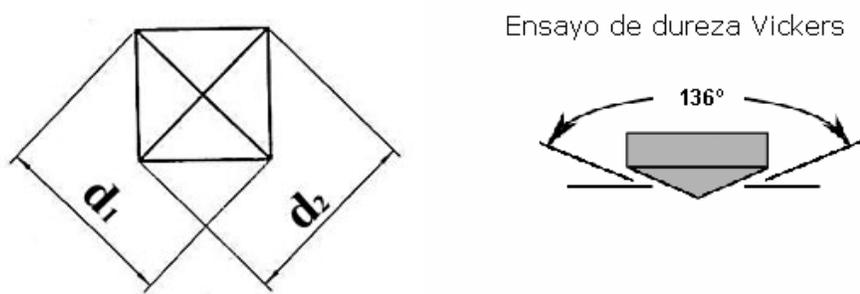
$$\rho = 4,7 \text{ g/cm}^3 = 0,0047 \text{ g/mm}^3$$

Ec. 3.3.

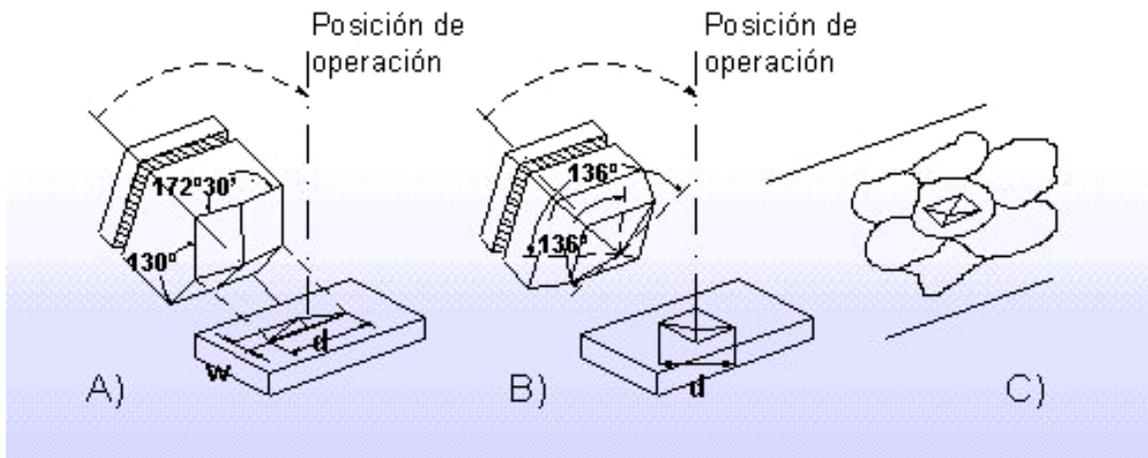
### **3.10 ENSAYO DE DUREZA POR MICROINDENTACIÓN**

El ensayo de microindentación Vickers fue realizado en el durómetro marca Leitz Wetzlar Metallux (Ver figura 3.11). Las mediciones de dureza se efectuaron acorde a la norma ASTM E, utilizando un indentador Vickers y una carga de 500g, con un tiempo de carga de 15 segundos (Ver figuras 3.9 y 3.10). Se consideró como el valor reportado de la dureza, el promedio de 5 mediciones, realizadas diagonal y escalonadamente a la sección transversal de las probetas para cada condición en estudio.

El objetivo principal de la realización de esta prueba fue el de obtener valores comparativos de dureza entre los distintos tratamientos (recubrimientos obtenidos para cada condición) más que un valor real de dureza, ya que debido a la configuración del ensayo la respuesta puede ser afectada por el sustrato.



**Figura 3.9. Geometría del indentador**



**Figura 3.10. Huella arrojada por el mismo en la muestra ensayada.**



**Figura 3.11. Durómetro Leitz Wetzlar Metallux.**

### 3.11 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

Se utilizó el Microscopio Electrónico marca Hitachi modelo S-2400 (figura 3.12) para analizar las muestras, las cuales fueron seleccionadas para la realización de la microscopía electrónica de barrido con las condiciones que presentaron mejores y peores resultados para el ensayo de desgaste abrasivo.

Previo a la microscopía, las muestras fueron cortadas utilizando un disco abrasivo que asegura mínimas deformaciones y sin aumentos significativos de temperatura de la muestra que puedan ocasionar cambios en la microestructura.



**Figura 3.12 Equipo de Microscopía Electrónica de Barrido.**

## CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1 ANALISIS DEL ENSAYO DE ABRASIÓN

#### 4.1.1 *Resultados del Ensayo de Abrasión*

Es de hacer notar que al principio de la investigación no se tenía suficiente información acerca del comportamiento frente al desgaste por abrasión de la aleación  $5\text{SiO}_2 - 3\text{TiO}_2 - \text{Cr}_2\text{O}_3$ , por lo tanto se realizaron algunas pruebas preliminares encontrándose que la muestra presentaba un deterioro considerable (inclusive del sustrato) antes de alcanzar los 5 minutos de ensayo. Por lo tanto, se comenzaron los ensayos midiendo la pérdida de peso para tiempos de 30 segundos como lo indica la Norma ASTM G65. Los resultados indicaron que 30 segundos no eran suficientes por lo tanto se ensayaron las muestras a 30, 60 y 120 segundos y se midió la pérdida de peso acumulada para cada uno de los tiempos indicados. En la tabla 4.1 se presentan la media de los valores de pérdida de peso acumulado y pérdida volumétrica acumulada a los 2 minutos de ensayo y sus respectivas desviaciones estándar en el intervalo de confianza del 95%, obtenidos para las 27 condiciones del diseño experimental evaluado. Las filas resaltadas en amarillo corresponden a las condiciones que presentaron los mejores resultados frente a la abrasión (condiciones 7, 24 y 27), la condición recomendada por el fabricante de los polvos resaltada en azul (condición 14) y finalmente la fila resaltada en rojo corresponde a la condición que obtuvo la respuesta más baja en cuanto a resistencia a la abrasión.

Se desprende de la tabla 4.1 que la condición que presentó los mejores resultados (condición 7) se comportó 8.15 veces mejor que la condición dada por el fabricante mientras que la condición que presentó los resultados más desfavorables (condición 2) resultó ser 1.37 veces menos resistente que la condición dada por el fabricante.

Comparadas las condiciones que presentaron mayor y menor resistencia frente al desgaste (7 y 2), se puede deducir que la condición 7 presentó una pérdida volumétrica de aproximadamente 95,93 % menor (11.23 veces menor) que la presentada por la condición 2. Si comparamos los valores de los parámetros de proceso utilizados para depositar el recubrimiento identificado con la condición 2 y 7, encontramos que ambas fueron depositadas utilizando un voltaje de 31 V, sin embargo la condición 2 fue depositada con

un valor de amperaje de 900 A y una tasa de alimentación de los polvos de 42 g/min mientras que la condición 7 se depositó con un amperaje de 700 A y una velocidad de alimentación de los polvos de 52 g/min.

A continuación se presenta en la tabla 4.1 y en la figura 4.1 que obtiene la media de los valores de pérdida volumétrica por abrasión, obtenidos para las 27 condiciones del diseño experimental evaluado, con sus respectivas desviaciones estándar del intervalo de confianza (95%). Y resaltado en amarillo se encuentran los valores en los que se obtiene el mejor resultado (condición 7, 24 y 27), la condición recomendada por el fabricante de los polvos (condición 14) y el valor más alto de pérdida volumétrica a los 2 min, estipulado para el ensayo de abrasión (condición 2). Dado que la mayoría llegaron a desgastar su recubrimiento a los 2 minutos, se tomó como tiempo máximo 2 minutos por cada probeta y no 5 minutos.

El amperaje está relacionado con la energía requerida para fundir las partículas y el voltaje con la energía cinética requerida para proyectar las partículas. Considerando que en la condición 2 se utilizó un bajo amperaje, comparado con la condición 7, pareciera indicar que no hubo suficiente energía calorífica para fundir las partículas lo cual pudo haber producido que las mismas llegaran poco fundidas ocasionando una pobre cohesión, lo que explicaría la baja resistencia a la abrasión. En el caso de la condición 7 un mayor amperaje y una menor tasa de alimentación produjeron que el recubrimiento presentara una mejor cohesión y por ende mejor resistencia a la abrasión. Sin embargo, no podríamos aseverar que el amperaje y la velocidad de alimentación de los polvos son los parámetros más significativos del proceso comparado con el voltaje ya que tenemos dos condiciones que presentaron una buena respuesta frente al desgaste abrasivo las cuales son las condiciones N° 24 y 27 respectivamente. Estas dos condiciones presentan unos valores de pérdida volumétrica muy similares y los valores de desviación estándar también lo son, lo cual indica que ambas condiciones presentan una resistencia a la abrasión muy similar. La condición 24 y 27 se comportaron 3,82 y 3,54 veces mejor, respectivamente, que la condición del fabricante (condición 14) y 5,26 y 4,8 veces mejor que la condición más desfavorable (condición 2). Con respecto a la condición más favorable (condición 7), la 24 y 27 presentaron una resistencia al desgaste 2,13 y 2,3 veces menor.

Las condiciones 24 y 27 fueron depositadas con el mismo valor de voltaje (40 V) y la misma tasa de alimentación de los polvos (61 g/min). La diferencia estuvo en el amperaje utilizado, el cual fue de 800A y 900A para la muestra 24 y 27 respectivamente. Nos conduciría a pensar que esa diferencia del valor de amperaje no fue significativa.

Como se puede observar, el tratamiento 7 resultó ser el que obtuvo una pérdida volumétrica menor, debido a que la media de los valores está por debajo de la del resto de los tratamientos ensayados bajo la misma condición. Este valor de pérdida volumétrica es de alrededor de un 95,93 % menor a la pérdida volumétrica de la condición más afectada (N° 2), por lo tanto, esta última se convierte en el peor tratamiento obtenido (mayor pérdida volumétrica).

El parámetro menos significativo aquí sería el combinado amperaje/tasa de alimentación. Varían en todas las condiciones consideradas en el grupo de las mejores (N° 7, 24 y 27). Le seguiría en orden de consideración el combinado tasa de alimentación/voltaje, como el más significativo, ya que varía directamente proporcional en las mejores condiciones N° 7, 24 y 27. Si enfocamos nuestro propósito en descubrir que es lo que hace más significativa la mezcla amperaje/tasa de alimentación, frente a la menos significativa, tasa de alimentación/voltaje, obtenemos el parámetro clave en la variante que es el voltaje, como el de mayor peso de significancia. Le seguiría el amperaje como significancia media, y la tasa de alimentación de los polvos como el menos significante. Y cabe destacar que los parámetros de rociado térmico están muy relacionados entre sí, por lo que esta influencia debería ser estudiada por métodos estadísticos como por ejemplo, a través de un análisis de varianza ANOVA, el cual permite estudiar la influencia de cada uno de los parámetros sobre la resistencia al desgaste para las condiciones de estudio.

También es de importancia analizar lo que sucede con la condición del fabricante (N° 14), que arroja una pérdida volumétrica considerable de 81,79882 mm<sup>3</sup> el cual representa más de 45 veces de incremento por encima del tratamiento N° 7. Esto puede ser debido a que la misma fue depositada con el valor de tasa de alimentación más alta (61g/min) y el valor más bajo de amperaje (700 A) con respecto a la condición menos afectada (N° 7). Esto implica que el calentamiento de las partículas no fue suficiente para la tasa de alimentación utilizada quedando partículas sin fundir y poco cohesionadas.

Dado que es importante analizar el comportamiento del recubrimiento sometido a abrasión en función del tiempo, se realizará un análisis del comportamiento de los diferentes tratamientos seleccionados (tratamiento 7, 24, 27, 14 y 2) cuyos resultados se encuentran en la tabla 4.1.

**Tabla 4.1. Pérdida volumétrica por abrasión para los 27 tratamientos**

Condición	Voltajes (V)	Amperaje (A)	Tasa Aliment. (g/min)	Promedio pérdida a los peso (g)	Desviación Estándar pesos	Pérdida Volumétrica (mm <sup>3</sup> )	Desviación Estándar volumen
1	31	700	42	0,3717	0,03502389	79,0780142	7,4519
2 (peor condición)	31	700	52	<b>0,5279</b>	<b>0,20899528</b>	<b>112,319149</b>	<b>44,4671</b>
3	31	700	61	0,2896	0,26898591	61,6099291	57,2310
4	31	800	42	0,1693	0,19098115	36,0141844	40,6343
5	31	800	52	0,4798	0,28056243	102,092199	59,6941
6	31	800	61	0,4755	0,11719826	101,177305	24,9358
7 (1ra mejor)	31	900	42	<b>0,0471</b>	<b>0,00849172</b>	<b>10,0283688</b>	<b>1,8067</b>
8	31	900	52	0,2688	0,0786096	57,1843972	16,7254
9	31	90	61	0,4295	0,20333781	91,3829787	43,2634
10	35	700	42	0,3101	0,16323516	65,9858156	34,7309
11	35	700	52	0,4480	<b>0,41384784</b>	95,3191489	<b>88,0527</b>
12	35	700	61	0,5179	0,0332187	110,191489	7,0678
13	35	800	42	0,4051	0,05569755	86,1843972	11,8505
14 (fabricante)	35	800	52	<b>0,3834</b>	<b>0,06904847</b>	<b>81,5815603</b>	<b>14,6912</b>
15	35	800	61	0,4705	0,04929874	100,106383	10,4891
16	35	900	42	0,3223	0,08212198	68,5815603	17,4728
17	35	900	52	0,2364	0,05498975	50,2978723	11,6999

**Tabla 4.1. Pérdida volumétrica por abrasión para los 27 tratamientos (cont.)**

Condición	Voltajes (V)	Amperaje (A)	Tasa Aliment. (g/min)	Promedio pérdida peso (g)	Desviación Estándar pesos	Pérdida Volumétrica (mm <sup>3</sup> )	Desviación Estándar volumen
18	35	900	61	0,3563	0,22317938	75,8014184	47,4850
19	40	700	42	0,2732	0,03901381	58,1205674	8,3008
20	40	700	52	0,1839	0,07398962	39,1205674	15,7425
21	40	700	61	0,3009	0,16613668	64,0283688	35,3482
22	40	800	42	0,3126	0,0912335	66,5106383	19,4114
23	40	800	52	0,2759	0,08286837	58,7021277	17,6316
<b>24 (2da mejor)</b>	<b>40</b>	<b>800</b>	<b>61</b>	<b>0,1004</b>	<b>0,07163753</b>	<b>21,3546099</b>	<b>15,2420</b>
25	40	900	42	0,5170	0,2602999	109,992908	55,3830
26	40	900	52	0,2957	0,18740626	62,9219858	39,8737
<b>27 (3ra mejor)</b>	<b>40</b>	<b>900</b>	<b>61</b>	<b>0,1084</b>	<b>0,07446712</b>	<b>23,0638298</b>	<b>15,8441</b>

Estos resultados fueron graficados y se presentan en la figura 4.2. En esta figura se puede observar que la condición que muestra mejor comportamiento parcial en el tiempo, sigue siendo la N° 7, la cual presentó en todos los tiempos parciales, el mejor comportamiento ante la abrasión y luego de 1 minuto de ensayo no experimenta un cambio de pendiente apreciable.

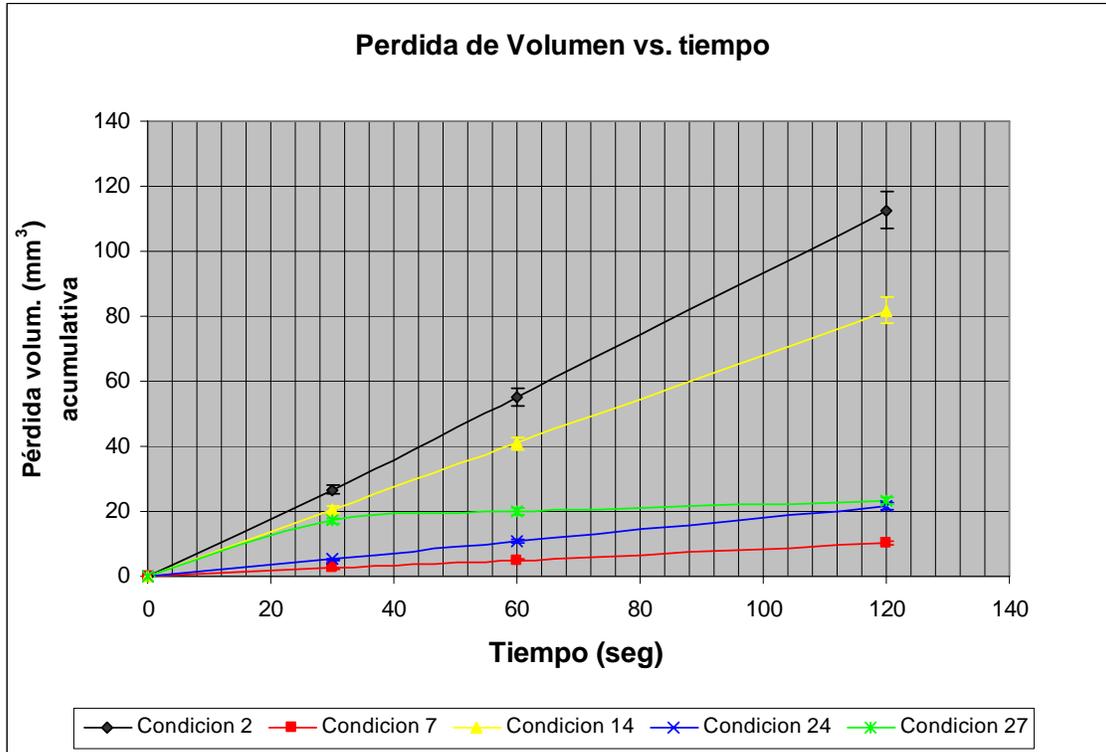
En el grupo de las mejores condiciones, la 24 y la 27 se consideran segunda y tercera respectivamente, ya que su buen comportamiento al desgaste no puede pasar desapercibido. La condición 24 es casi 12 veces la N° 7 y se acerca más a la 27 en el primer minuto, que representa casi 13 veces la misma N° 7. La condición 27 tiene un crecimiento de pendiente elevada y luego después de los 30 primeros segundos casi se hace asintótica con respecto al tiempo de ensayo. Esta tendencia de la condición 27 resulta muy interesante ya que significa que a pesar de tener inicialmente una menor resistencia a la abrasión

comparada con la muestra 2, podría ser más resistente en el tiempo. Esto podría estar relacionado con el hecho de que esta condición fue depositada con los valores más altos de los parámetros en estudio y posiblemente la formación de las primeras capas de recubrimiento tuvo un enfriamiento diferente con respecto a las exteriores.

Es importante destacar que para el voltaje aplicado de 31 V y tasa de alimentación 42 g/min, independientemente del amperaje entre 800 y 900 A, en casi un 90% resultó ser los que producen una menor remoción de material, como también en su proporcionalidad directa 40 V y 61 g/min, lo cual implica una mejor respuesta del mismo ante el proceso abrasivo y nos hace acotar que el voltaje de 40 V ofrece mejores resultados ante la abrasión. De la Figura 4.2 también se desprende que la condición del fabricante (condición 14) y la condición 2 tienen una tendencia ascendente a aumentar su deterioro en función en función del tiempo.

**Tabla 4.2. Comportamiento al desgaste por abrasión a tiempos parciales**

<b>Condición</b>	<b>Pérdida volum. (mm<sup>3</sup>) 1/2 min</b>	<b>Pérdida volum. (mm<sup>3</sup>) 1 min</b>	<b>Pérdida volum. (mm<sup>3</sup>) 2 min</b>
<b>2</b> peor	26,6114613	55,2803968	<b>112,618268</b>
<b>7</b> 1ra mejor	2,51376888	5,02753775	<b>10,0550755</b>
<b>14</b> fabricante	20,4497054	40,8994107	<b>81,7988214</b>
<b>24</b> 2da mejor	5,35286993	10,7057399	<b>21,4114797</b>
<b>27</b> 3ra mejor	17,1839391	20,0250541	<b>23,1252514</b>



**Figura 4.1. Comportamiento al desgaste por abrasión a tiempos parciales**

#### 4.1.2 ANOVA

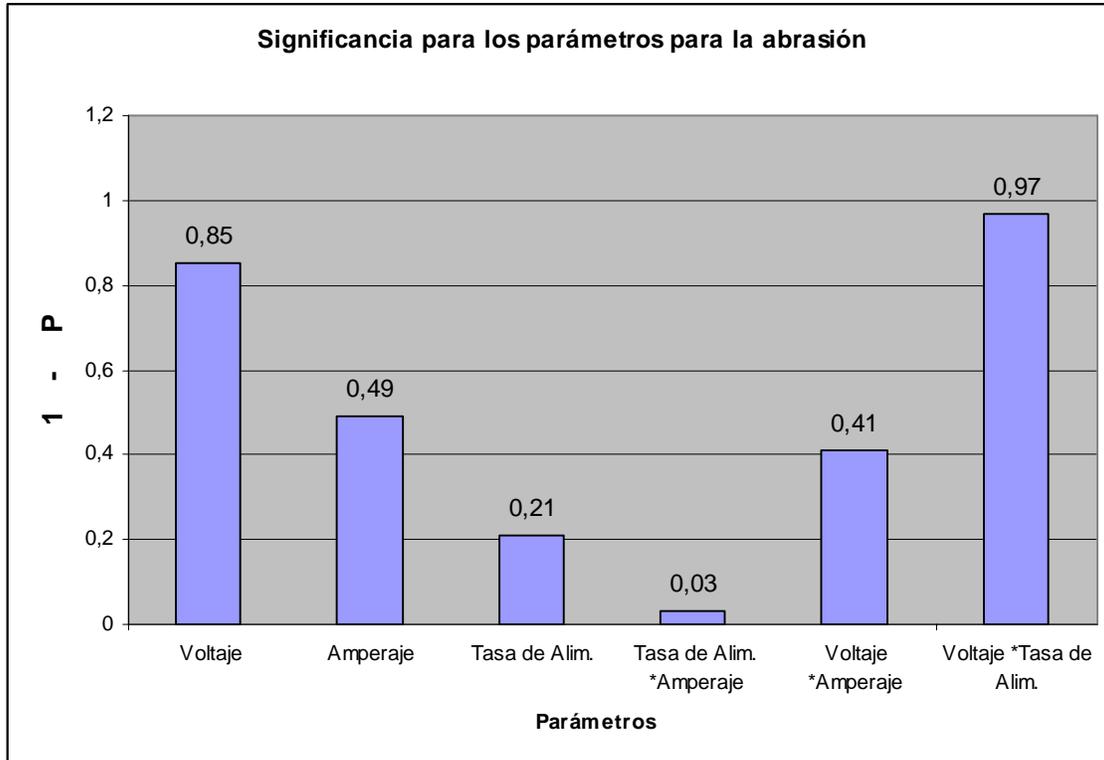
La optimización de los parámetros en estudios requiere la realización de un análisis de varianza en el cual se pueda observar la significancia de las variables seleccionadas en el diseño experimental. En este caso, la variable dependiente fue tomada como la pérdida volumétrica por abrasión. Por lo tanto, los resultados arrojados por significancia reflejan cuan influyente resulta cada uno de los parámetros independientes (Voltaje, Amperaje, Tasa de Alimentación de los polvos y sus diferentes combinaciones) con respecto a la pérdida por desgaste abrasivo. La tabla 4.3 contiene los resultados del análisis de varianza ANOVA:

**Tabla 4.3. ANOVA para los diferentes parámetros con respecto al desgaste abrasivo.**

Análisis de Varianza					
Origen	Suma de cuadrados	GL	Media de Cuadrados	Relación F	Probabilidad P
<b>Voltaje</b>	3037	2	1518	2,04	0,15
<b>Amperaje</b>	1139	2	569	0,69	0,51
<b>Tasa de Alim.</b>	410,00	2	205,00	0,24	0,79
<b>Tasa de Alim. * Amperaje</b>	509,30	4	127,33	0,12	0,97
<b>Voltaje * Amperaje</b>	2295,80	4	573,96	0,72	0,59
<b>Voltaje * Tasa de Alim.</b>	7443,30	4	1860,83	3,34	0,03

En primer lugar se puede observar que de las tres variables evaluadas, el único efecto significativo estadísticamente sobre la resistencia a la abrasión es el voltaje aplicado, ya que es el que posee un valor “p” en el ANOVA más cercano a 0,05 que los demás (0,15), considerando que combinado con la variación de la tasa de alimentación llega a 0,03 que es una probabilidad menor a 0,05. Es decir, que se espera que sea únicamente esta variable la que introduzca variaciones estadísticamente significativas sobre la resistencia al desgaste abrasivo del recubrimiento, cuando varíe en el intervalo de trabajo que se eligió en la presente investigación.

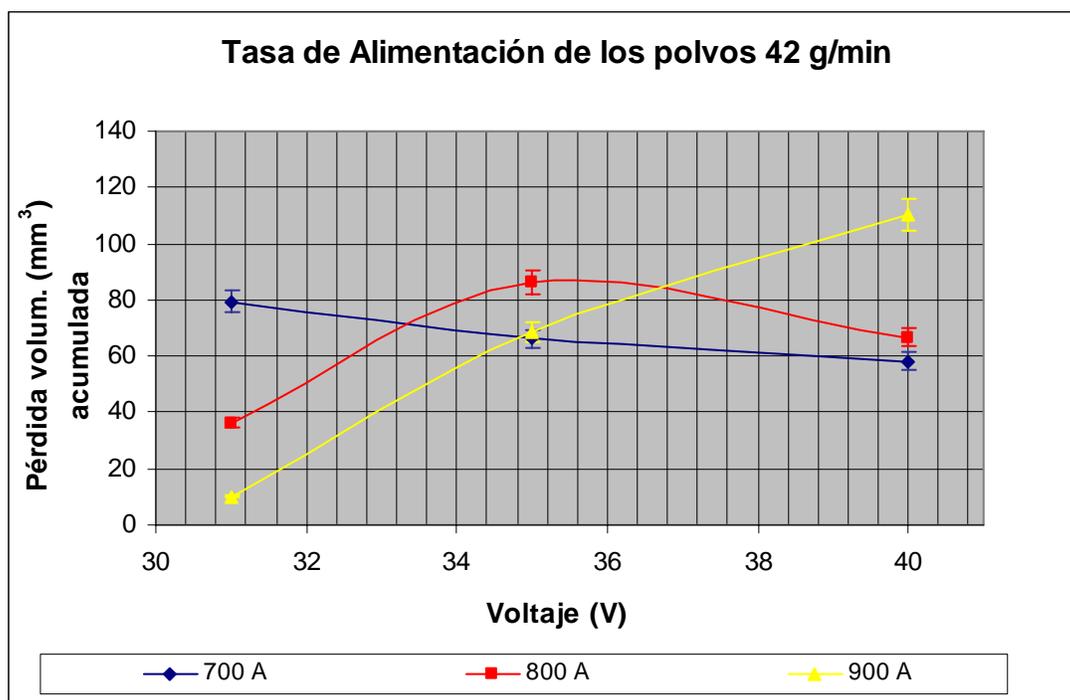
La figura 4.2 representa la significancia de cada uno de los parámetros estudiados en el ANOVA, junto con sus combinaciones, en función de  $1 - P$  (1-probabilidad), evidenciando ampliamente la influencia de cada parámetro (Voltaje, Amperaje y Tasa de Alimentación) sobre el proceso de rociado térmico por plasma con la aleación  $5\text{SiO}_2 - 3\text{TiO}_2 - \text{Cr}_2\text{O}_3$ , actuando independientemente y bajo la influencia de los otros dos. En ella se evidencia la aproximación del valor del Voltaje a 1 (0,85) y la mayor aproximación junto con la combinación Voltaje-Tasa de alimentación (0,97). Sus resultados nos muestran la baja influencia del amperaje en la abrasión y la gran significancia que tiene el voltaje en la deposición de dicha aleación en el proceso de rociado térmico por plasma.



**Figura 4.2. Significancia de los parámetros para la abrasión**

Las figuras 4.3, 4.4 y 4.5 representan la influencia del voltaje con respecto al volumen removido por abrasión, para cada tasa de alimentación de los polvos (dejamos este parámetro fijo debido a que resultó ser el de menor significancia como se desprende de la Figura 4.2). En la Figura 4.3 se aprecia que a bajos valores de tensión la pérdida volumétrica aumenta con el aumento del amperaje. A medida que el voltaje aumenta esta relación también se cumple excepto para amperajes bajos, en la cual la relación cambia a mayor voltaje menor pérdida volumétrica. Para voltajes intermedios la tendencia es directamente proporcional a amperaje alto e inversamente proporcional a voltajes intermedios y bajos. Esto significa que para valores bajos de voltaje y de amperaje la falta de aceleración de partículas y baja energía calorífica hacen que la resistencia a la abrasión sea relativamente baja. A aumentar el voltaje, la falta de energía calorífica es compensada con la mayor aceleración de la partícula y entonces la resistencia a la abrasión comienza a mejorar y esta tendencia se mantiene a medida que se aumenta el voltaje. Lo mismo sucede con los valores intermedios de voltaje, los cuales producen mayor pérdida volumétrica a bajos voltajes y esta comienza a mejorar cuando este parámetro aumenta por las mismas

razones explicadas en el caso anterior. Sin embargo, para altos valores de amperaje y altos valores de voltaje el excesivo calentamiento de las partículas puede producir que las mismas se volatilicen o que no se calienten suficientemente en la antorcha de la pistola debido a la alta velocidad que estas llevan que producen recubrimientos poco cohesionados con la consecuente baja resistencia a la abrasión.



**Figura 4.3. Pérdida volumétrica para una Tasa de Alimentación de 42 g/min y distintos niveles de voltaje**

Al aumentar la tasa de alimentación de los polvos (Ver figura 4.4) implica que un número mayor de partículas deberán ser calentadas y proyectadas de manera tal que a bajos voltajes esto no sucederá adecuadamente y por esta razón la pérdida volumétrica es mayor siendo esta falta de aceleración compensada por el altos amperajes que logra que las partículas lleguen en estado casi fundido y puedan depositarse sobre las capas de recubrimiento. Al aumentar el voltaje mejora la resistencia a la abrasión para todos los amperajes utilizados con mucho más énfasis cuando el amperaje es el mas bajo. Para valores altos de amperaje la tendencia se invierte debido a que se tiene una relativa alta velocidad y alta energía calorífica, lo cual disminuye la resistencia a la abrasión probablemente por lo explicado anteriormente.

Al incrementarse la tasa de alimentación de los polvos (ver figura 4.5) la tendencia es similar a la figura anterior solo que en este caso bajos valores de voltaje y amperaje producen las menores tasas de abrasión.

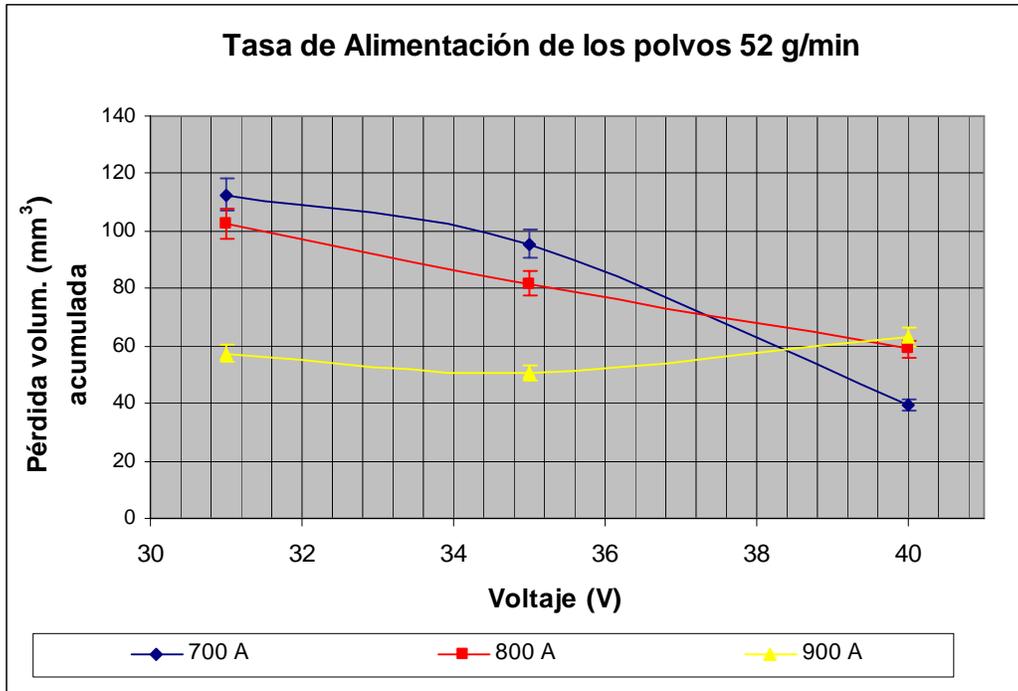
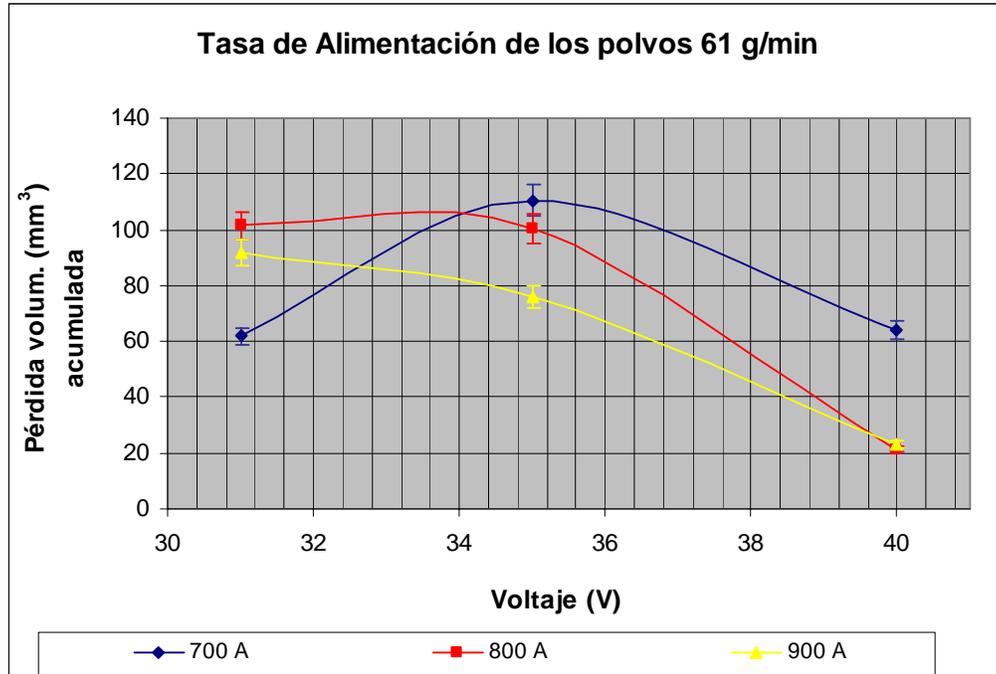


Figura 4.4. Pérdida volumétrica para una Tasa de Alimentación de 52 g/min y distintos niveles de voltaje



**Figura 4.5. Pérdida volumétrica para una Tasa de Alimentación de 61 g/min y distintos niveles de voltaje**

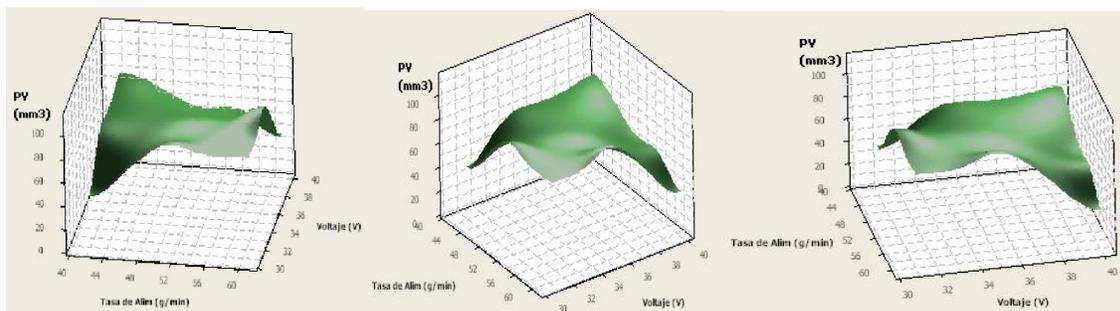
En cuanto a la tendencia observada en las tres figuras, podría decirse que en líneas generales la pérdida volumétrica tiende a decrecer con el aumento del voltaje para todas las condiciones de amperaje estudiadas excepto para las menores tasas de alimentación. Esto podría estar relacionado con el incremento de la energía cinética de las partículas, lo cual traería como consecuencia de menor porcentaje de partículas no fundidas, menor porosidad y una mejor cohesión entre las partículas de Óxido de Cromo y el aglutinante.

Podemos agregar además, que a medida que se aumenta la tasa de alimentación de los polvos se produce una menor dispersión de los resultados en cuanto a la pérdida volumétrica. Esto se puede adjudicar al hecho de que existe una mayor cantidad de material alimentado, constituyendo en conjunto con los parámetros de voltaje y amperaje un recubrimiento más uniforme, con menos pérdida de material por volatilización de las partículas en el caso de una relativamente alta energía calórica. Cuando se tiene una baja energía calórica el material no se calienta adecuadamente y puede llegar a no lograr ser depositado.

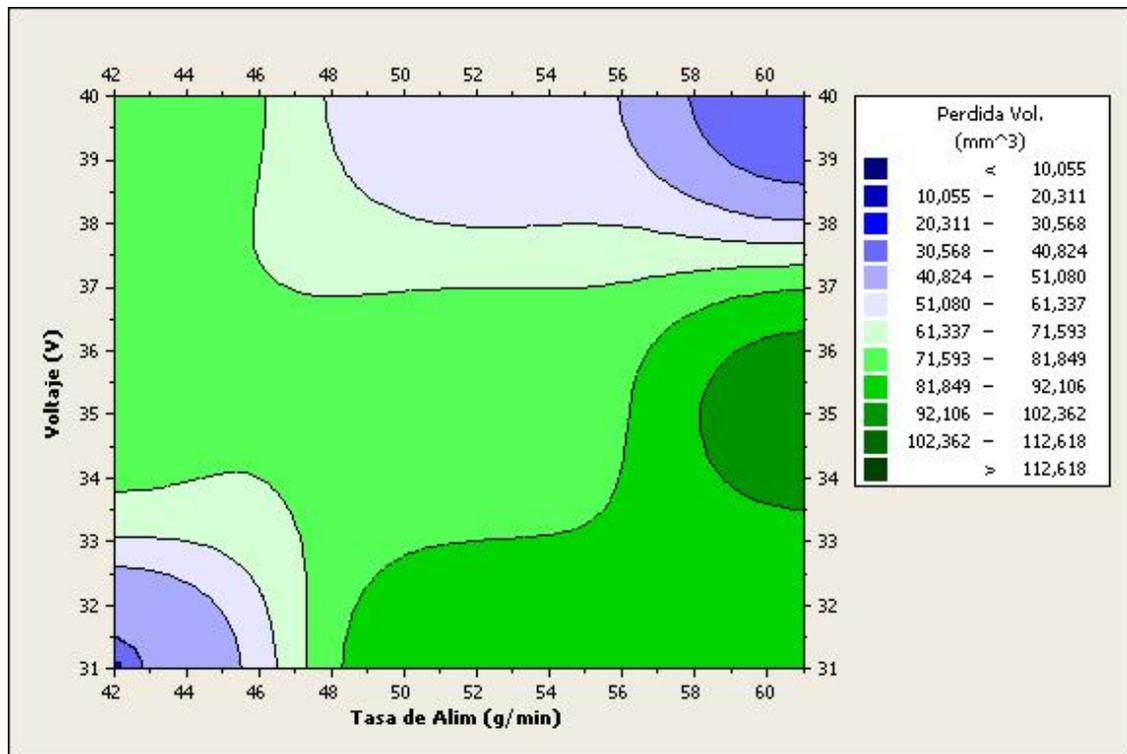
### 4.1.3 Superficie de Respuesta

Para la ubicación de un rango óptimo de los parámetros de rociado térmico en las superficies de respuesta, es necesario realizar un estudio de las curvas de nivel, por ello se procedió al análisis de regiones de las isocuantas, correspondientes a la pérdida volumétrica obtenida en el ensayo de abrasión para cada condición, comenzando el análisis desde la combinación de parámetros más influyente, hasta la menos influyente que fue determinado por el análisis de varianza.

La combinación Voltaje/Tasa de alimentación de los polvos presenta el juego de parámetros con un nivel de influencia mayor, la cual se ubicó en el rango que representa la cota mínima de voltaje y a partir de ella la que corresponde con el cruce a Tasa de alimentación de los polvos (Ver figura 4.6.a).



**Figura 4.6.a Superficie de respuesta para la combinación Voltaje/Tasa de Alimentación**



**Figura 4.6.b Curvas de nivel para la combinación Voltaje/Tasa de Alimentación**

En las figuras 4.6.a y 4.6.b observamos que la curva o isocuenta más baja es de cota considerada entre el rango 10,055 - 20,311 mm<sup>3</sup> (pérdida volumétrica según leyenda de la gráfica). En esta curva tenemos un rango de valores de voltaje que oscilan entre los 31 y los 31,2 V aproximadamente en la gráfica, y una tasa de alimentación de los polvos comprendida entre 42,0 y 42,2 g/min en la esquina inferior izquierda. La otra isocuenta, que igual representa menor pérdida aunque no tan considerable como la anterior, está en la esquina superior derecha en la cual tenemos un rango de valores de voltaje que oscilan entre los 38,6 y los 40V aproximadamente, y una tasa de alimentación de los polvos comprendida entre 58 y 61 g/min.

Los resultados anteriormente expuestos nos hacen suponer que para obtener bajas tasas de desgaste, el voltaje debe estar comprendido entre 31 y 31,2 V para una tasa de alimentación de 42 a 42,2 g/min gráfica aproximadamente, de igual forma para un rango de voltaje de 38,6 a 40V con una tasa de alimentación de 58 a 61 g/min, aunque no se obtengan tan buenos resultados con los rangos anteriores, siendo estos comparados con los rangos observados en la figura 4.6a y 4.6b.

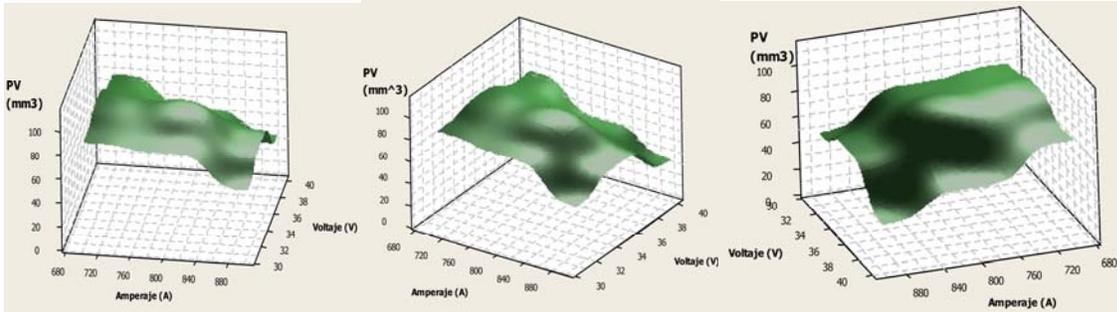


Figura 4.7.a Superficie de respuesta para la combinación Voltaje/Amperaje

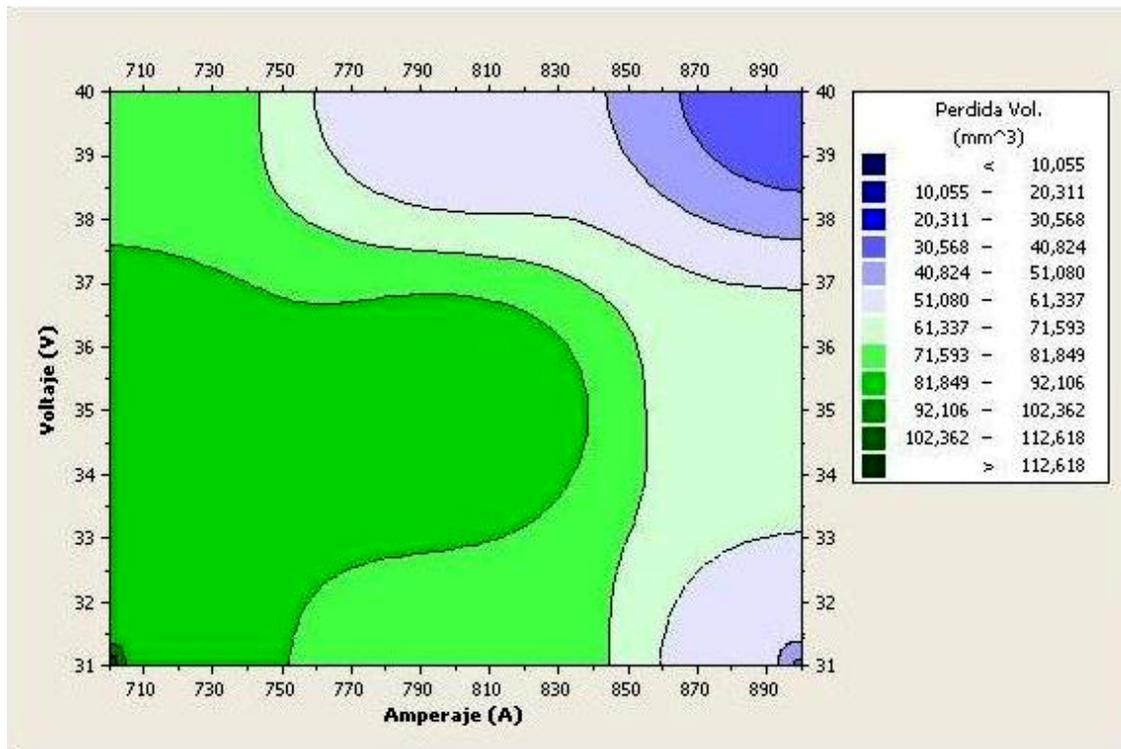
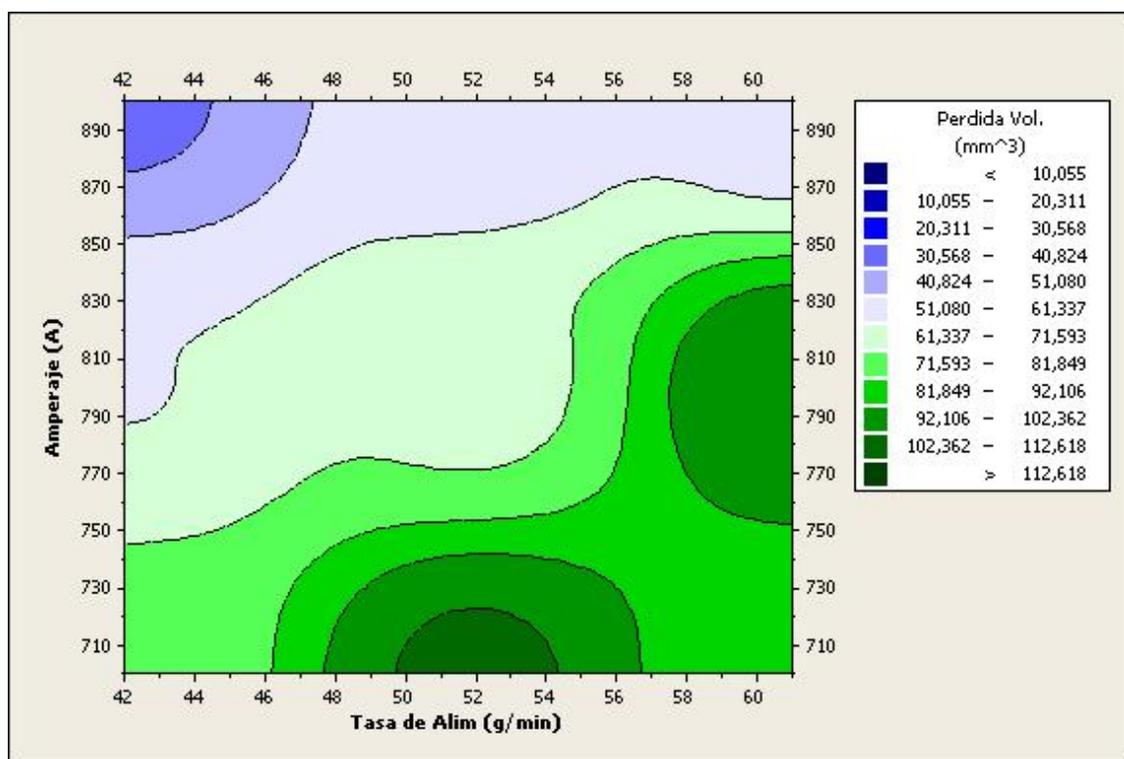


Figura 4.7.b Curvas de nivel para la combinación Voltaje/ Amperaje

Por último, con los rangos de valores obtenidos anteriormente en la gráfica Voltaje/Tasa de alimentación de los polvos, los ubicamos en las figuras 4.7.a y 4.7.b en la cual observamos que la curva o isocuanta más baja es la correspondiente a la zona con rango de cota 10,055-20,311 mm<sup>3</sup> (pérdida volumétrica según leyenda de la figura) en la esquina inferior derecha con un rango de valores de voltaje que oscilan entre los 31 y los 31,2 V y de amperaje comprendido entre 895 y 900 A. Los rangos de esta esquina

coinciden con los valores utilizados en las gráficas 4.4. Los que no coinciden son los de la esquina superior derecha con un rango de valores de voltaje que oscilan entre los 38,5 y los 40 V y de amperaje comprendido entre 865 y 900 A, aproximadamente en la gráfica.

Es importante destacar que se tomó en cuenta la superficie de respuesta en la cual se combinan las variables tasa de alimentación y amperaje, donde la superficie generada nos ayuda a confirmar los rangos 42-42,2 g/min y 895-900 A de las gráficas anteriores de superficie y de contorno, ya que se encuentran en los rangos de menor pérdida volumétrica de la siguiente figura 4.9, correspondientes a la condición N° 7. Pero, como se dijo anteriormente, la combinación Amperaje-Tasa de alimentación de los polvos no representa certeza en su significancia, dado que esta gráfica de contornos 4.9 no muestra la coincidencia de buen comportamiento de las condiciones 24 y 27 como en las otras dos gráficas de contornos anteriores, y generaliza las pérdidas volumétricas de la N° 24 y 27 en un rango de 51 – 61 g/min y el amperaje entre 870 y 900 A



**Figura 4.8. Curvas de nivel para la combinación Amperaje/Tasa de alimentación**

Como rangos óptimos para obtener la menor pérdida volumétrica en el desgaste abrasivo, se presenta la siguiente tabla 4.4 con los valores óptimos de los parámetros

estudiados, involucrados en el proceso de deposición del compuesto  $5\text{SiO}_2 - 3\text{TiO}_2 - \text{Cr}_2\text{O}_3$  por rociado térmico por plasma:

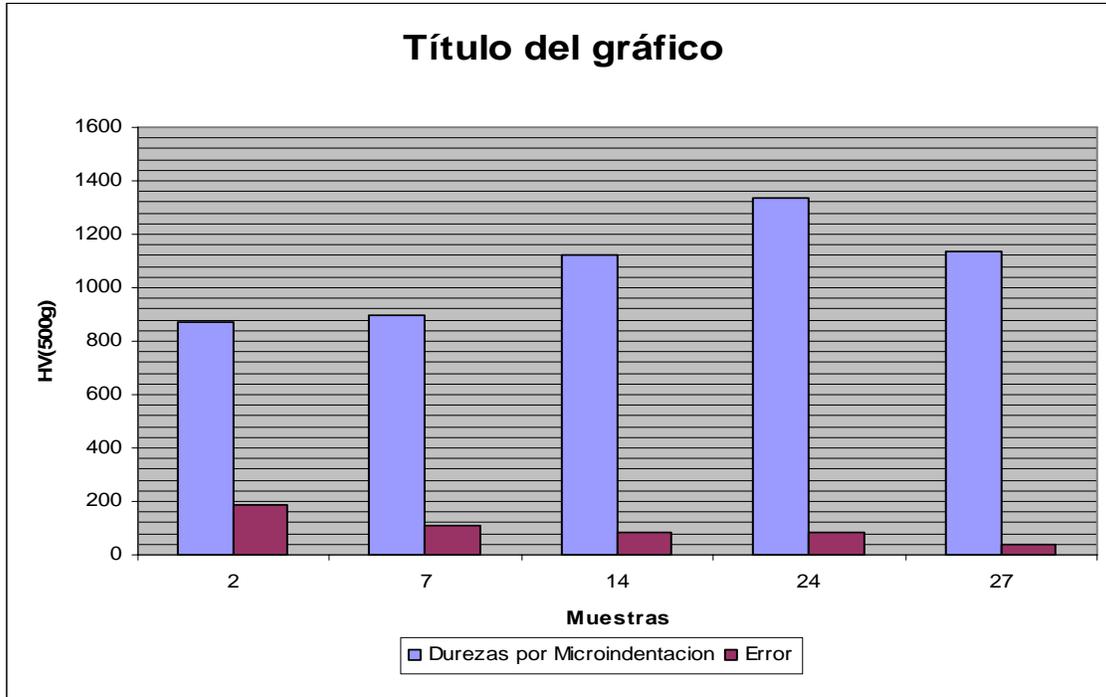
Como rangos óptimos para obtener la menor pérdida volumétrica en el desgaste abrasivo, se presenta la siguiente tabla 4.4 con los valores óptimos de los parámetros estudiados, involucrados en el proceso de deposición del compuesto  $5\text{SiO}_2 - 3\text{TiO}_2 - \text{Cr}_2\text{O}_3$  por rociado térmico por plasma:

**Tabla 4.4. Rangos óptimos para valores de parámetros para la deposición en función de la influencia a la resistencia a la abrasión.**

Parámetro	Rango Óptimo
Amperaje	865-900 A
Voltaje	38,5-40 V
Tasa de Alimentación	57,8-61 g/min

## 4.2 ANALISIS DEL ENSAYO DE DUREZA POR MICROINDENTACIÓN

En la figura 4.10 se presentan los valores promedios de dureza para cada una de las muestras analizadas, siendo éstos el promedio de 5 microindentaciones realizadas en la sección transversal de cada una de las 5 condiciones seleccionadas entre el grupo de las mejores y peores condiciones, incluyendo la del fabricante. La figura muestra los datos de dureza junto con su respectivo error de dispersión de datos.



**Figura 4.9. Promedios de dureza por microindentación para cada muestra seleccionada.**

Como se puede observar en la figura 4.9 el menor valor de dureza corresponde a la condición 2, la cual resultó ser la peor condición frente al desgaste abrasivo. Sin embargo, la condición que presentó la menor pérdida volumétrica (tratamiento 7), nos muestra un valor de dureza, que si bien se encuentra dentro de lo reportado para la aleación en estudio depositada por plasma, no presentó el mejor valor de dureza. El mayor valor de dureza por microindentación lo presentó la muestra 24, con 1336 HV<sub>500</sub>, cuyos parámetros son 61 g/min en tasa de alimentación, 40 V y 800 A. Si observamos la resistencia a la abrasión de esta misma condición, nos refleja un valor de 46,96 % más bajo con respecto a la mejor condición (Nº 7). Estos resultados concuerdan con lo reportado por otros investigadores (Conde V., 2007) quienes señalan la independencia de la microdureza con la resistencia al desgaste abrasivo.

Al analizar los resultados de dureza obtenidos para las 5 condiciones que obtuvieron los mejores y peores resultados frente al desgaste abrasivo y relacionarlos con la cantidad de material depositado, podemos observar que los mejores resultados para desarrollar el recubrimiento. Realizamos la tabla 4.6 en la cual colocamos el promedio de

las microdurezas obtenidas para cada grupo de tasa de alimentación de los polvos, en las que obtenemos el valor de tasa de alimentación de los polvos de la muestra N° 7 cuyo valor fue 42 g/min, el promedio de dureza entre las muestras N° 2 y N° 14 que pertenecen al grupo de tasa de alimentación de los polvos de 52 g/min, y el promedio de dureza entre las muestras N° 24 y N° 27 que pertenecen al grupo de tasa de alimentación de los polvos de 61 g/min.

**Tabla 4.5. Promedio de durezas por microindentación de cada grupo de tasa de alimentación de los polvos.**

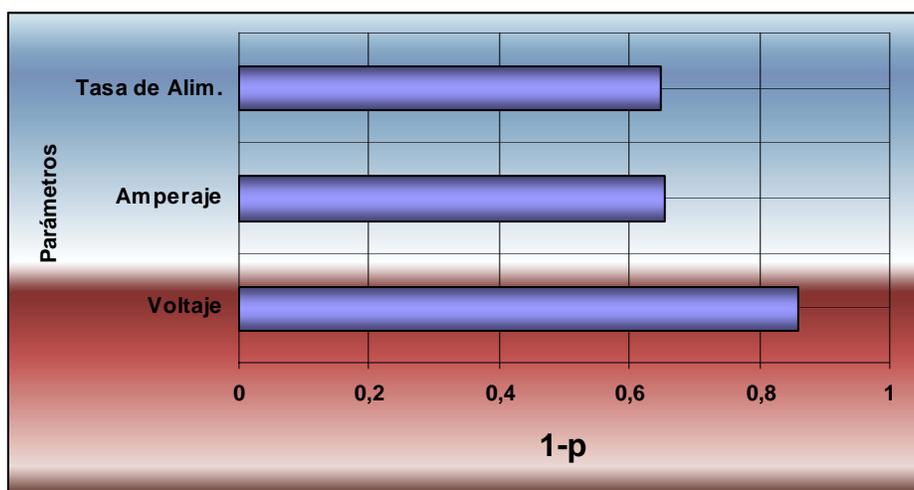
<b>Tasa de alimentación de los polvos (g/min)</b>	<b>Promedio de durezas HV<sub>500</sub></b>	<b>Desviación estándar</b>
42	896,40	139,27
52	997,70	210,26
61	1234,90	133,90

Después de analizar la tabla 4.6, destacamos el hecho de que la segunda y tercera mejor condición (N° 24 y 27 respectivamente) se encuentran en el grupo de 61 g/min donde el promedio de dureza es el más alto. Estos datos hacen declarar la recomendada tasa de alimentación que deben tener algunos recubrimientos con  $5\text{SiO}_2 - 3\text{TiO}_2 - \text{Cr}_2\text{O}_3$  por rociado térmico por plasma, para obtener grandes valores de dureza, comparados con otras muestras con distintos valores como en la presente investigación, según la necesidad industrial que requerirá la pieza recubierta.

El la tabla 4.7 se presentan los resultados del análisis de varianza ANOVA realizado entre la microdureza y los parámetros independientes (Tasa de Alimentación de los Polvos, Voltaje y Amperaje), en la cual se observa la significancia de las variables empleadas en el diseño experimental. En esta tabla se observa que el voltaje es el parámetro más significativo lo cual permitiría deducir que la velocidad de la partícula juega un papel importante en la obtención de altas durezas, sin embargo y de acuerdo a los parámetros utilizados en las muestras que obtuvieron los mejores resultados de dureza por microindentación podemos aseverar que la velocidad de alimentación de los polvos también es un parámetro a considerar.

**Tabla 4.6. ANOVA para los valores de dureza por microindentación**

Análisis de Varianza					
Origen	Suma de cuadrados	GL	Media de Cuadrados	Relación F	Probabilidad P
<b>Voltaje</b>	126156	2	63078	6,11	0,141
<b>Amperaje</b>	95985	2	47992	1,89	0,346
<b>Tasa de Alim.</b>	94949	2	47474	1,83	0,353



**Figura 4.10. Significancia de los parámetros en la dureza.**

Con estos claros resultados, junto con la significancia de la figura 4.10, podemos obtener un valor de dureza que oscila entre 1200 – 1500 **HV<sub>500</sub>** bajo la condición de 61 g/min como tasa de alimentación de los polvos, voltaje de 40 V y amperaje que oscila entre 800 y 900 A, valores de parámetros pertenecientes a los tratamientos N° 24 y N° 27.

### 4.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

A fin de analizar la influencia de la microestructura sobre el desgaste de los recubrimientos que presentaron los mejores y peores resultados frente al desgaste por abrasión se evaluaron los recubrimientos y las superficies de desgaste de las cinco condiciones seleccionadas. La figura 4.11 corresponde a una micrografía de la sección transversal de la condición 7, la cual arrojó la menor pérdida volumétrica o lo que es lo mismo, la mejor resistencia al desgaste. En esta micrografía se evidencia cierta porosidad característica de los recubrimientos obtenidos por plasma (círculos blancos). Se aprecia una interfase substrato-capo de enlace aparentemente bien adherido con algunas evidencias del proceso de preparación superficial previo a la deposición. En algunas zonas pareciera una pobre adherencia entre la capa de enlace y el recubrimiento (círculos amarillos).

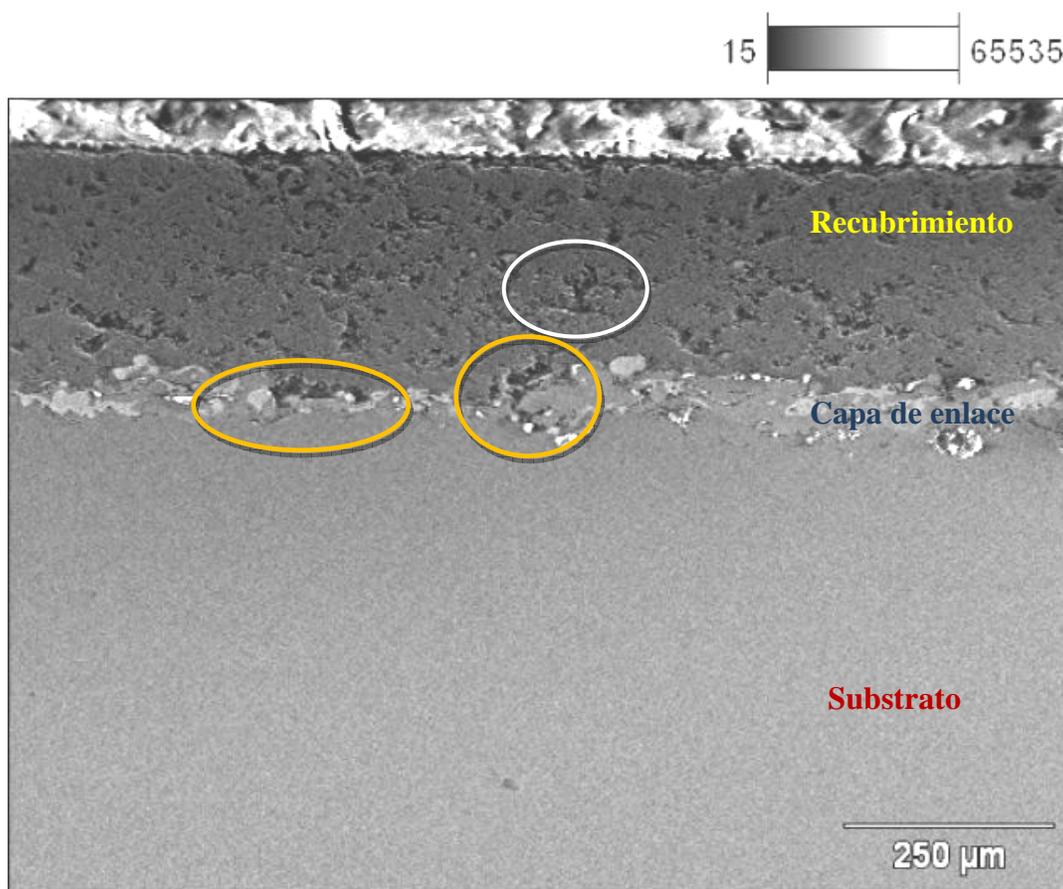
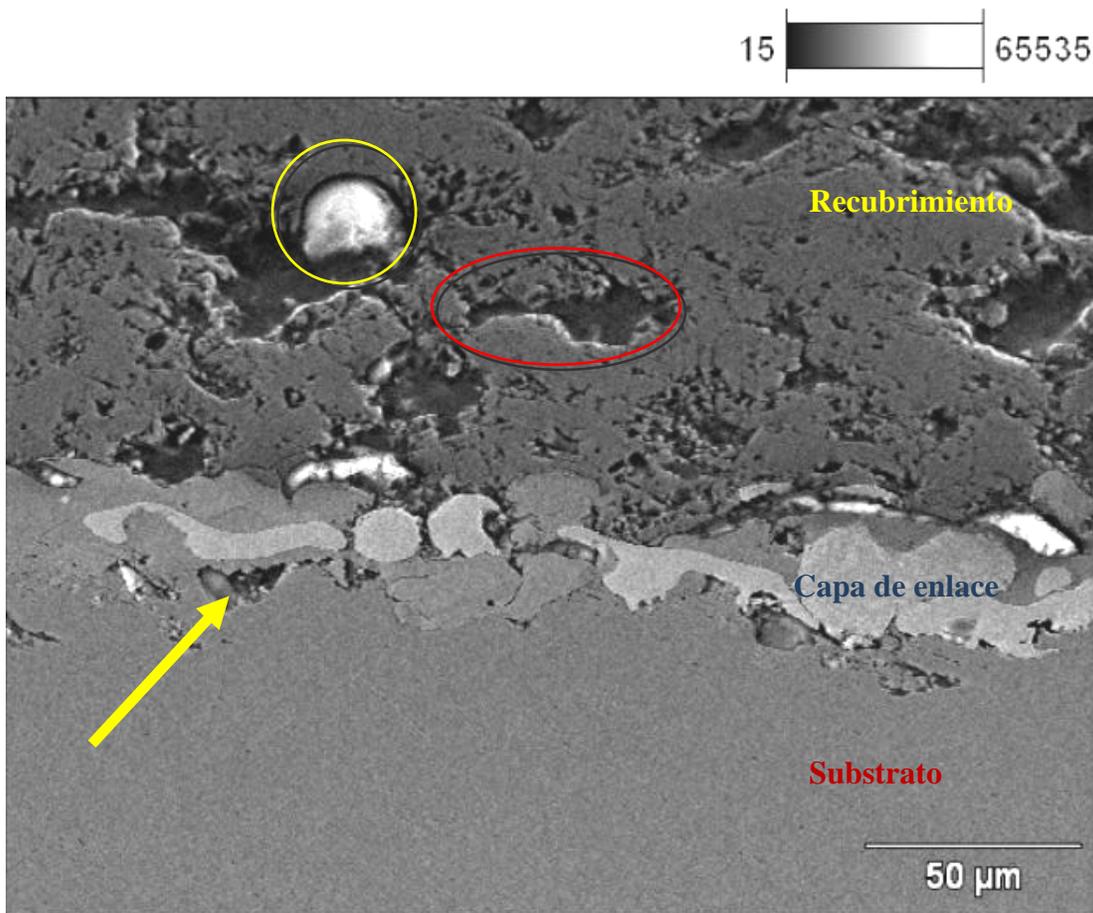


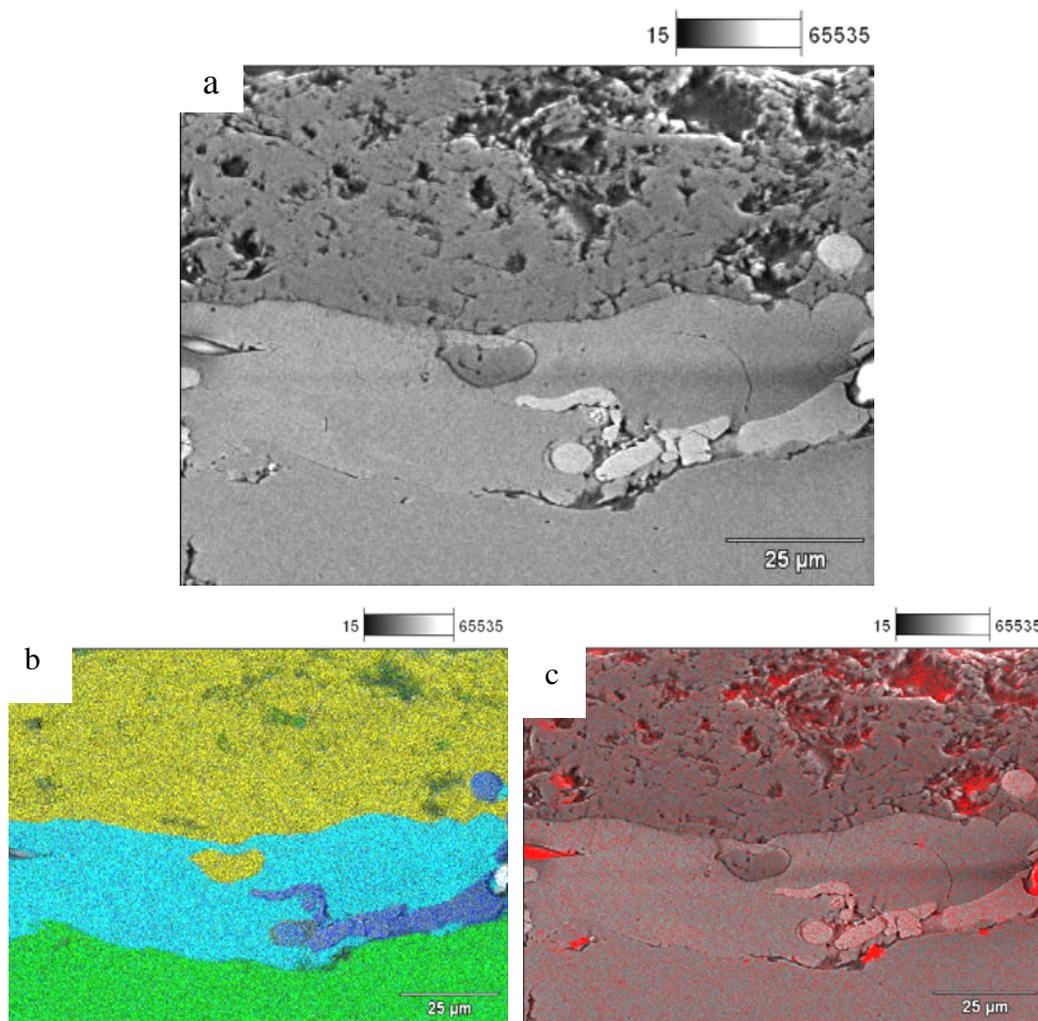
Figura 4.11 Micrografía en electrones secundarios de la sección transversal del recubrimiento para la condición N° 7, a 100X.

Una magnificación de esta vista a 500X se muestra en la figura 4.12. En ello se aprecia una interfase sustrato-capa de enlace bien delineado, lo cual podría indicar una buena adhesión. También se puede apreciar en esta figura una zona donde hay cierta porosidad producida por el proceso de arenado previo a la deposición (ver flecha en figura 4.12). La porosidad evidenciada en el recubrimiento (círculo rojo) indica que a pesar de ser esta la mejor condición frente al desgaste abrasivo, los parámetros pueden ser mejorados para disminuir estos defectos. Se aprecian también algunas partículas no fundidas, de proximadamente  $20\mu\text{m}$  (círculos amarillos). También se aprecian unas partículas brillantes en la interfase sustrato-capa de enlace, que resultaron ser de aluminio según el análisis realizado a través de EDX, que corresponden a las partículas de alúmina utilizadas en el proceso de limpieza previo.



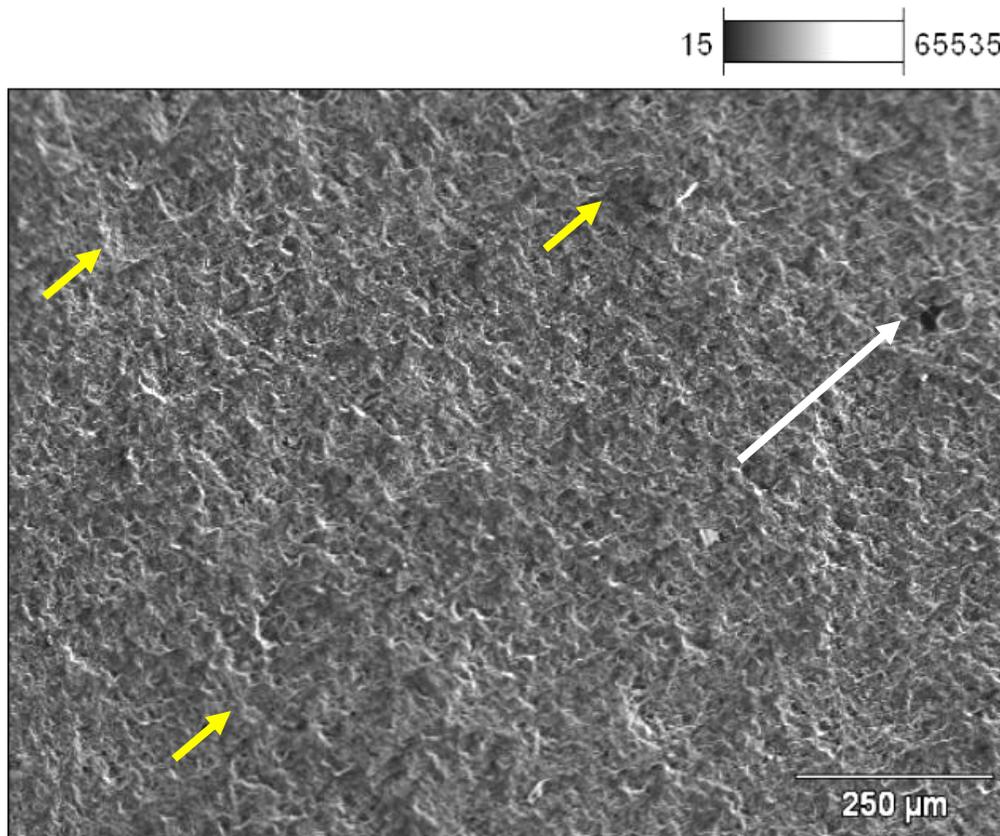
**Figura 4.12** Micrografía en electrones secundarios de la Superficie transversal del recubrimiento para la condición N° 7, a 500X.

En la Figura 4.13, la cual corresponde a un detalle de la interfase de la fig. 4.12, se puede observar el recubrimiento, la capa de enlace y sustrato. En ella se evidenció, a través de un mapeo presentado en la Figura 4.13b, la presencia de Cromo correspondiente a compuesto  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  componente mayoritario de la aleación, Níquel y Molibdeno, componentes mayoritarios de la aleación utilizada en la capa de enlace esta capa y Hierro componente mayoritario del acero correspondiente al sustrato. En la figura 4.13c se evidencia la presencia de Aluminio en forma generalizada lo cual puede ser atribuido a la alúmina utilizada para el pulido de las muestras.



**Figura 4.13 a) Micrografía en electrones secundarios de la sección transversal del recubrimiento para la condición N° 7, a 1000X. b) Mapeo de la misma sección con identificación por EDX de Cromo (Amarillo), Níquel (Azul claro), Molibdeno (Azul oscuro) y del Hierro (Verde) c) Aluminio (Rojo)**

La figura 4.14 corresponde a una imagen obtenida por microscopía electrónica de barrido (MEB) en la superficie de desgaste de la condición que obtuvo los mejores resultados de resistencia a la abrasión. Podemos ver como principal mecanismo de desgaste presente en esta condición la deformación plástica (indicadas por la flecha de color amarillo) y algunas evidencias de desprendimiento de material indicado por la flecha de color blanco).



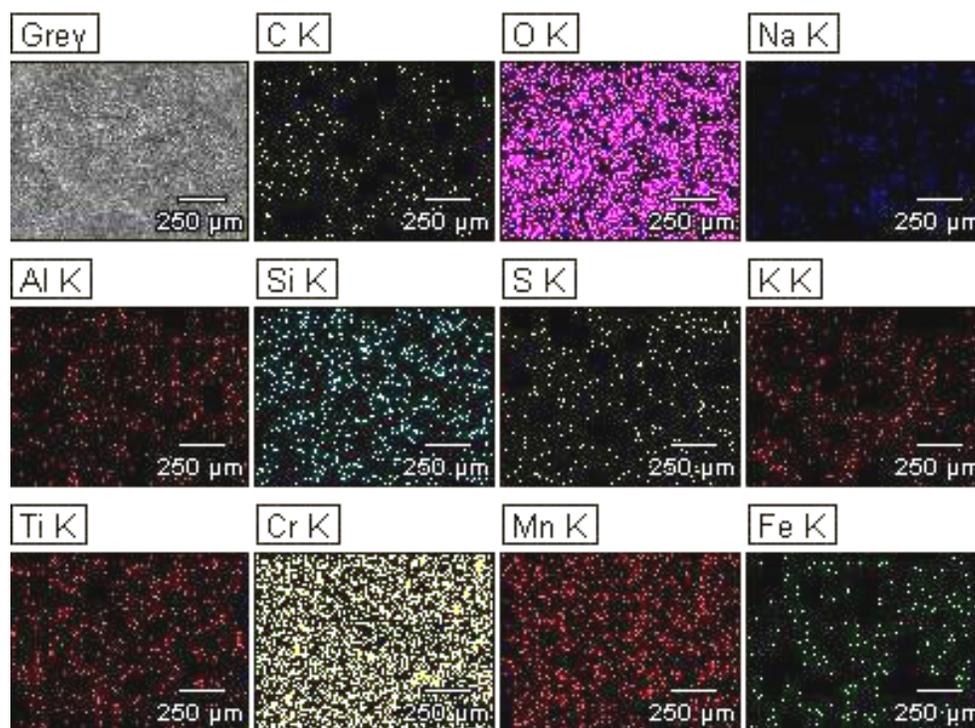
**Figura 4.14 Micrografía en electrones secundarios de la Superficie de Desgaste de la condición N° 7 a 100X**

En la Figura 4.15 se presenta un mapeo de la superficie de desgaste realizado sobre la misma zona correspondiente a la Figura 4.14., en ella se aprecia la presencia de oxígeno y cromo, lo cual era de esperarse debido a que la aleación contiene un alto porcentaje de óxido de cromo. Igualmente se evidencia la presencia de silicio y titanio, elementos presentes en la aleación. La presencia de manganeso en el recubrimiento puede ser debida a la aleación utilizada para la capa de enlace. El hierro (Fe) corresponde al acero utilizado

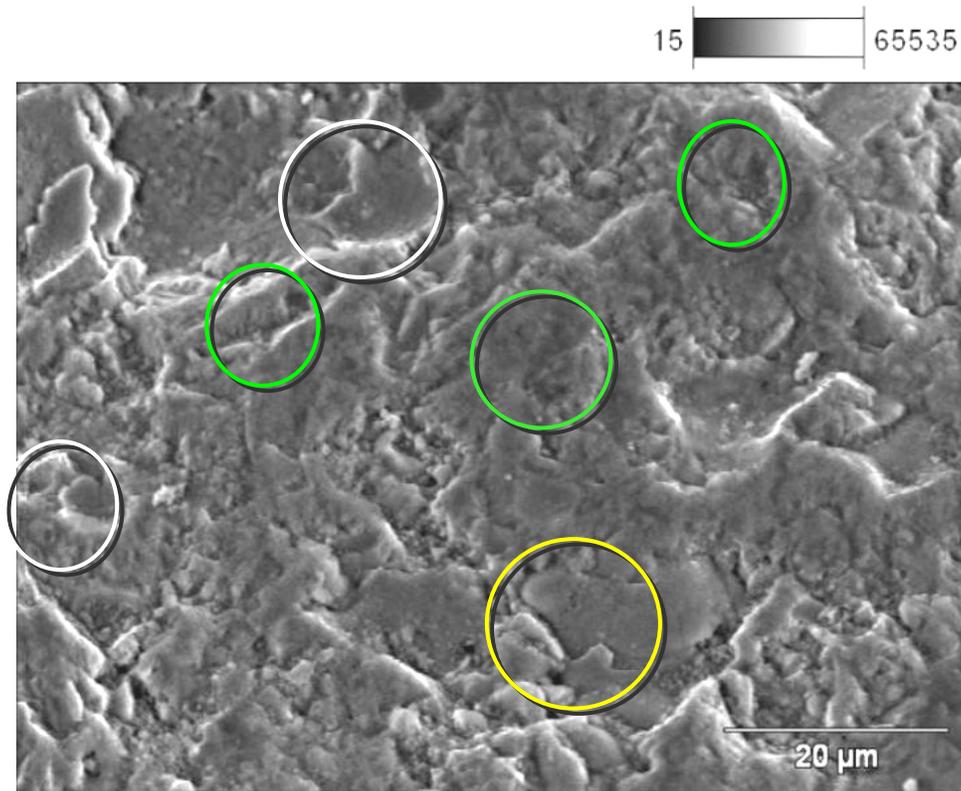
como sustrato presento una señal muy débil probablemente debido a que el proceso de abrasión no alcanzó espesores cercanos al sustrato. Estuvo también el aluminio, el sodio, el azufre y el potasio presentes en algunas zonas de la superficie desgastada. La figura 4.16 corresponde a una magnificación a 1500X de la micrografía presentada en figura 4.14. En ella se puede apreciar el mecanismo de deformación plástica encerrado en círculos blanco, desprendimiento de partículas (círculos verdes) y fractura (círculos amarillos) producto del efecto del abrasivo sobre la superficie. La figura 4.17 corresponde a un detalle de la figura 4.16 en la cual se puede apreciar con mayor claridad el mecanismo de fractura de partículas. Probablemente este sea el mecanismo predominante en la pérdida de material por abrasión.

Pareciera que a al comenzar el ensayo, las partículas abrasivas comienzan a producir deformación plástica y posteriormente las zonas deformadas plásticamente se van endureciendo y finalmente pueden llegar a fracturarse, lo que permitiría su remoción final.

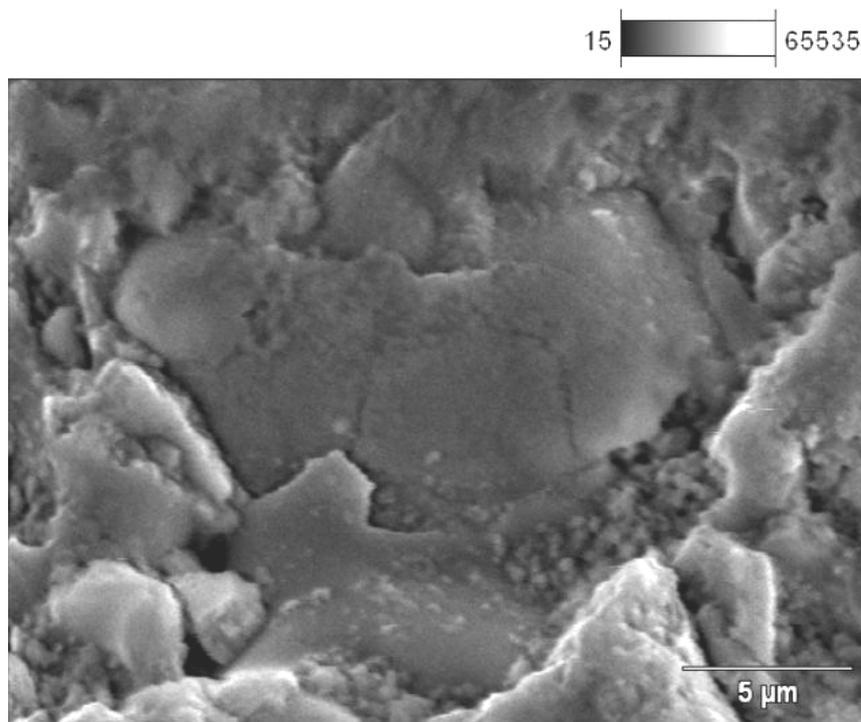
Estos parecieran ser los mecanismos predominantes para la pérdida de material por abrasión en esta condición.



**Figura 4.15 Detección de elementos a través de EDX en electrones secundarios de la Superficie de Desgaste de la condición N° 7.**

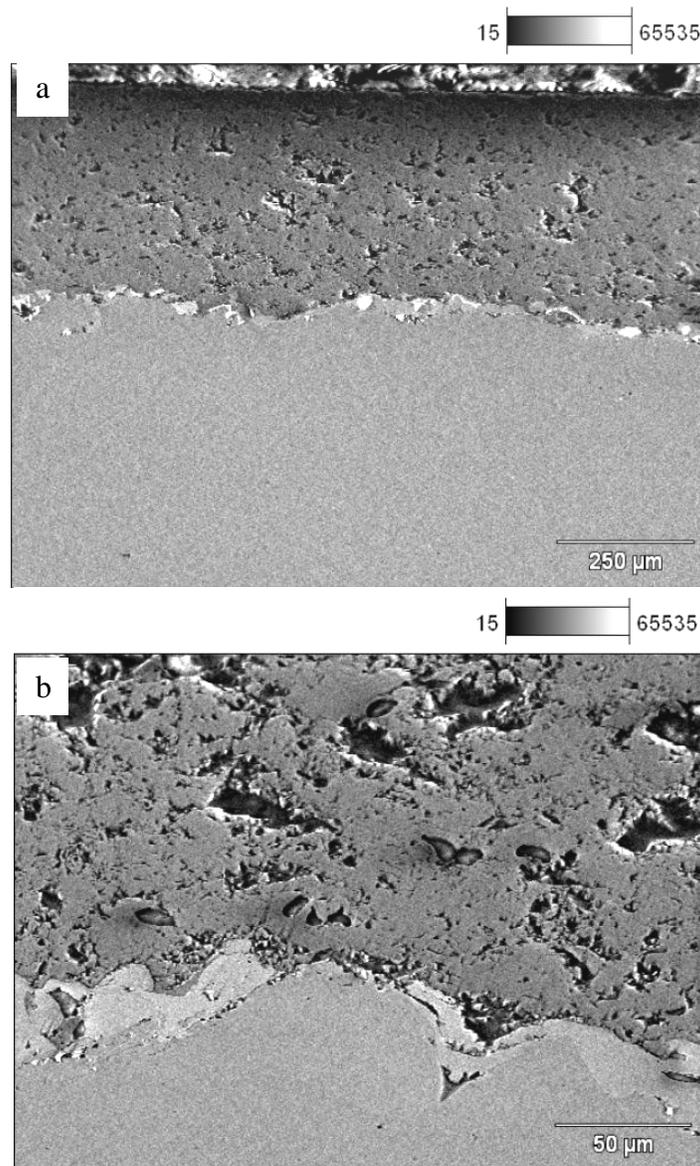


**Figura 4.16** Micrografía en electrones secundarios de la Superficie de Desgaste de la condición N° 7 a 1500X



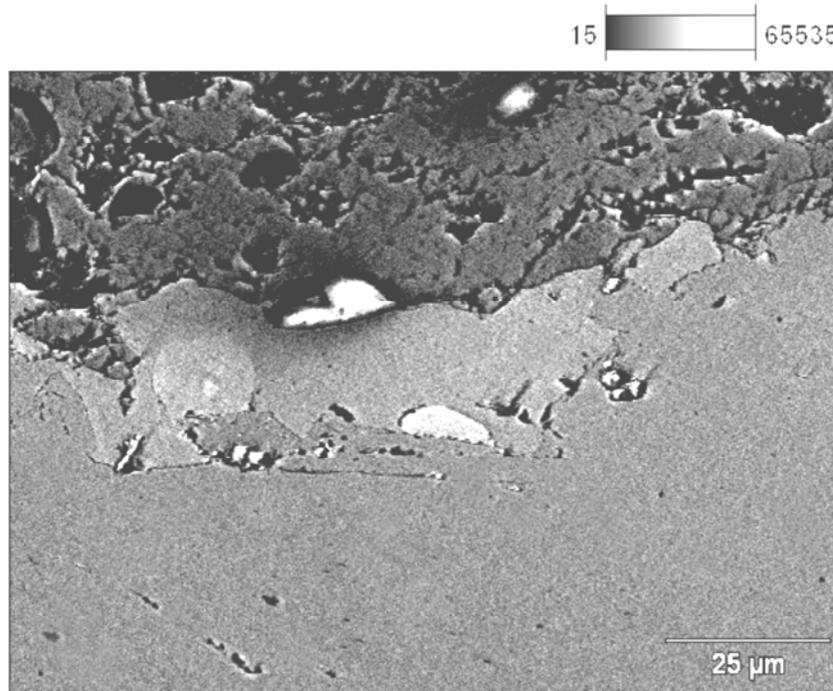
**Figura 4.17** Micrografía en electrones secundarios de la Superficie de Desgaste para la condición N° 7 a 5000X

La figura 4.18 corresponde a la micrografía realizada en la sección transversal de la muestra perteneciente a la condición N° 2 a una magnificación de 100X. En ella se puede una microestructura con numerosos poros de tamaño variado así como también la presencia de grietas. La capa de enlace se muestra muy irregular y no constante a lo largo de la la interfase substrato-recubrimiento. Un detalle de este recubrimiento se puede apreciar en la Figura 4.18b. La microestructura no luce muy diferente a la observada en la para la condición 7, sin embargo, el comportamiento de esta muestra frente al desgaste fue inferior.



**Figura 4.18** Micrografía en electrones secundarios de la Superficie transversal del recubrimiento para la condición N° 2 a) 100X y b) 500X.

En la figura 4.19 se puede apreciar que este recubrimiento posee una pobre adhesión con la capa de enlace y se observan grietas y mucha porosidad lo cual podría inducir a una baja cohesión y por ende una baja resistencia al desgaste.



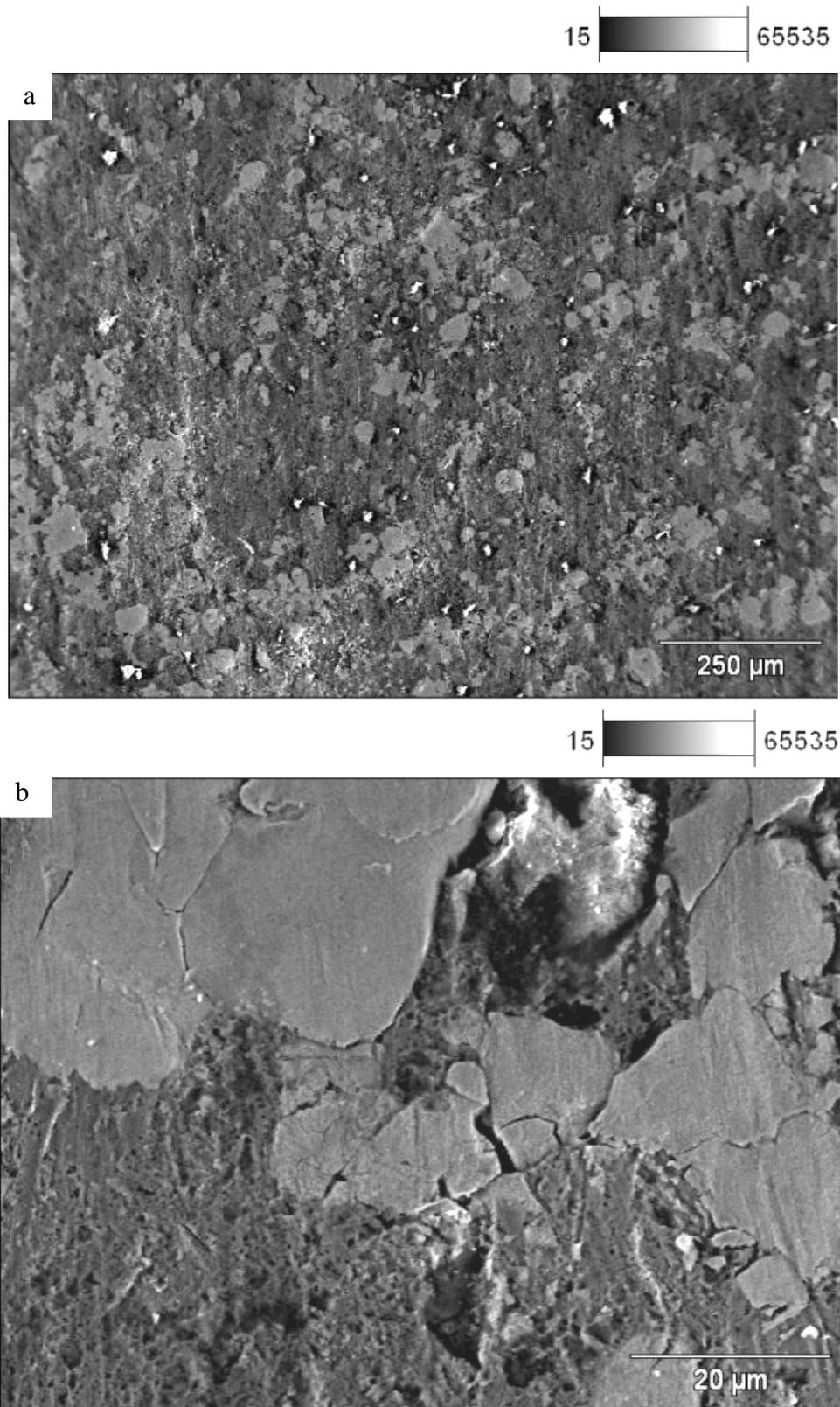
**Figura 4.19** Micrografía en electrones secundarios de la Superficie transversal del recubrimiento para la condición N° 2 a 1000X.

Es de hacer notar que el voltaje y el amperaje utilizados para depositar esta condición eran los más bajos lo cual se traduce en una insuficiente velocidad de partícula y de allí se desprendería que éstas lleguen un poco frías a la superficie lo cual impide que estas cohesionen adecuadamente y por otro lado, el bajo amperaje implica una baja energía calorífica para fundir el material de aporte adecuadamente y esto hace que las partículas no solo se proyecten con lentitud sino muchas de ellas no alcanzarían el recubrimiento, produciendo una pobre adhesión y cohesión además de una baja eficiencia del proceso.

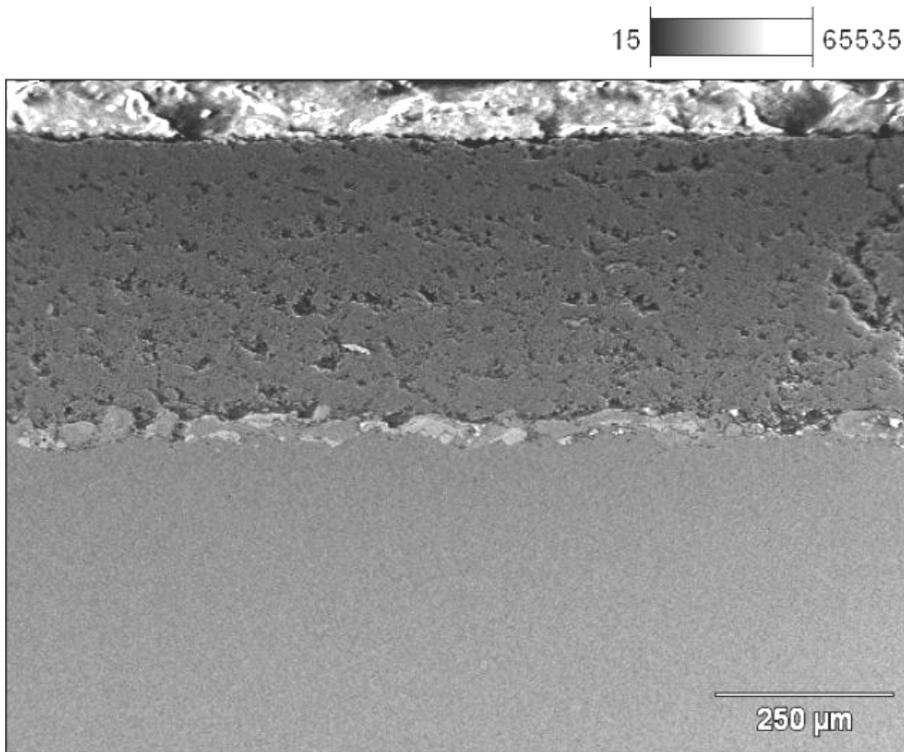
La figura 4.20a corresponde a la superficie de desgaste para la condición N° 2, la cual presentó los niveles más altos de volumen removido. A diferencia de la superficie de desgaste obtenida en la muestra 7, se observa una mayor cantidad de partículas no fundidas, una mayor heterogeneidad en el recubrimiento. Se aprecia que los mecanismos predominantes fueron deformación plástica, abrasión y desprendimiento de partículas con

fractura. Se aprecia en esta figura partículas claras, muchas de geometría esférica indicando que no llegaron a fundirse y una matriz oscura que evidentes signos de abrasión. El mecanismo de desgaste pareciera haber sido por desprendimiento de partículas poco cohesionadas y desgaste de una matriz por efecto de las partículas abrasivas. Un detalle de esta superficie es presentada en la figura 4.20b, en la cual se aprecia que las partículas claras fueron fracturadas durante el ensayo y posteriormente removidas. También se aprecian que los surcos en la matriz producidas por el proceso abrasivo. Estos serian los mecanismos más relevantes que favorecieron los niveles en el desgaste de esta condición.

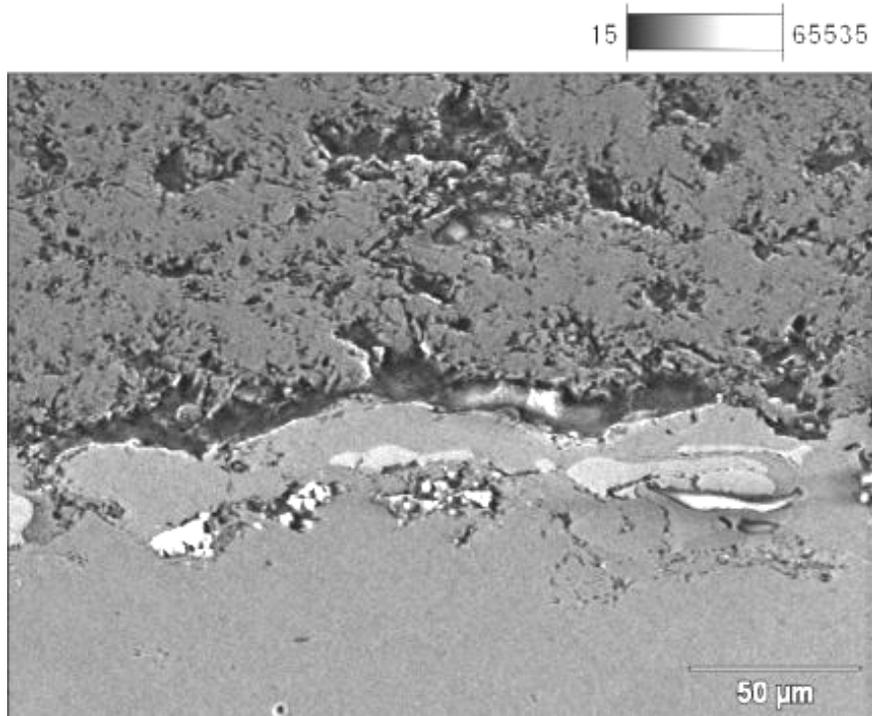
Es prudente destacar que el recubrimiento depositado con los parámetros recomendados por el fabricante de la pistola, condición 14, con un voltaje de 35 V, 800 A y una velocidad de deposición de los polvos de 52 g/min, aunque presentó una pérdida volumétrica aceptable, las condiciones N° 7, 24 y 27 presentaron un mejor comportamiento frente a la abrasión. En la figura 4.21 tenemos una micrografía de la sección transversal del recubrimiento a 100X de la condición N° 14, en la cual se aprecia un recubrimiento similar a los anteriormente analizados. Podemos observar porosidades de gran tamaño en la estructura del recubrimiento, una pobre adhesión del recubrimiento y la capa de enlace. En esta misma figura se puede observar una grieta transversal que probablemente se pudo originar debido a las condiciones de rociado o alguna entalla en producida por el proceso de rectificado que permitió que se propagara a través del recubrimiento. La figura 4.22 muestra los poros (circulo rojos) y la pobre adhesión de la interfase recubrimiento-capas de enlace. También se hace evidente en esta figura las grietas transversales, producto de una pobre cohesión entre las capas que se van depositando partículas durante el proceso de rociado.



**Figura 4.20** Micrografía en electrones secundarios de la Superficie desgastada del recubrimiento para la condición N° 2. a) 100X. b) 1500X.

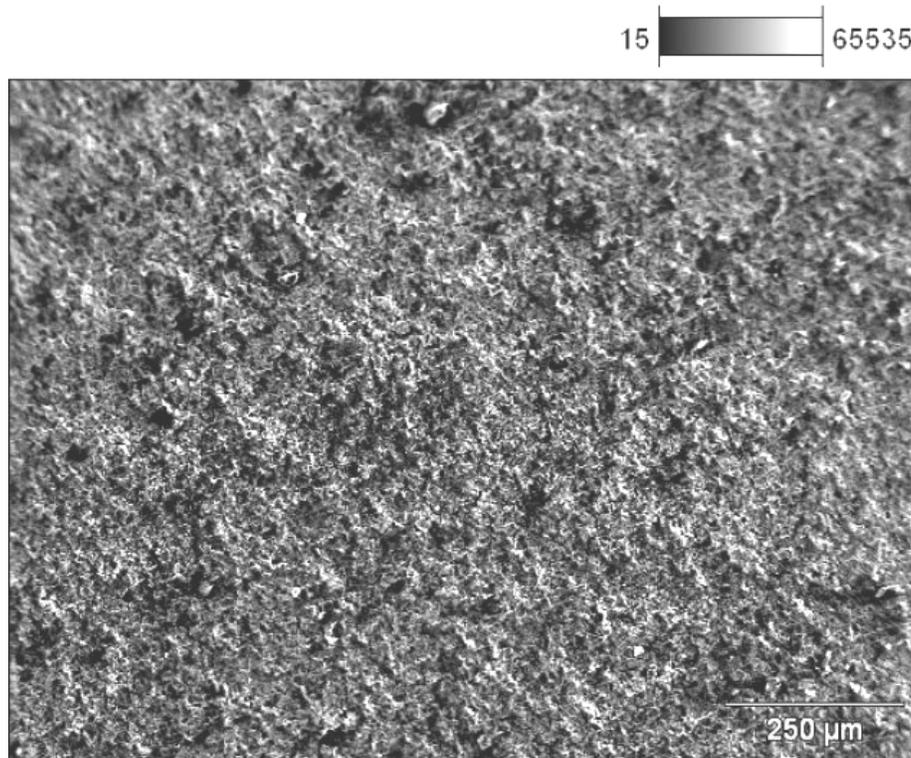


**Figura 4.21** Micrografía en electrones secundarios de la Superficie transversal del recubrimiento para la condición N° 14. 100X.



**Figura 4.22** Micrografía en electrones secundarios de la Superficie transversal del recubrimiento para la condición N° 14. 500X.

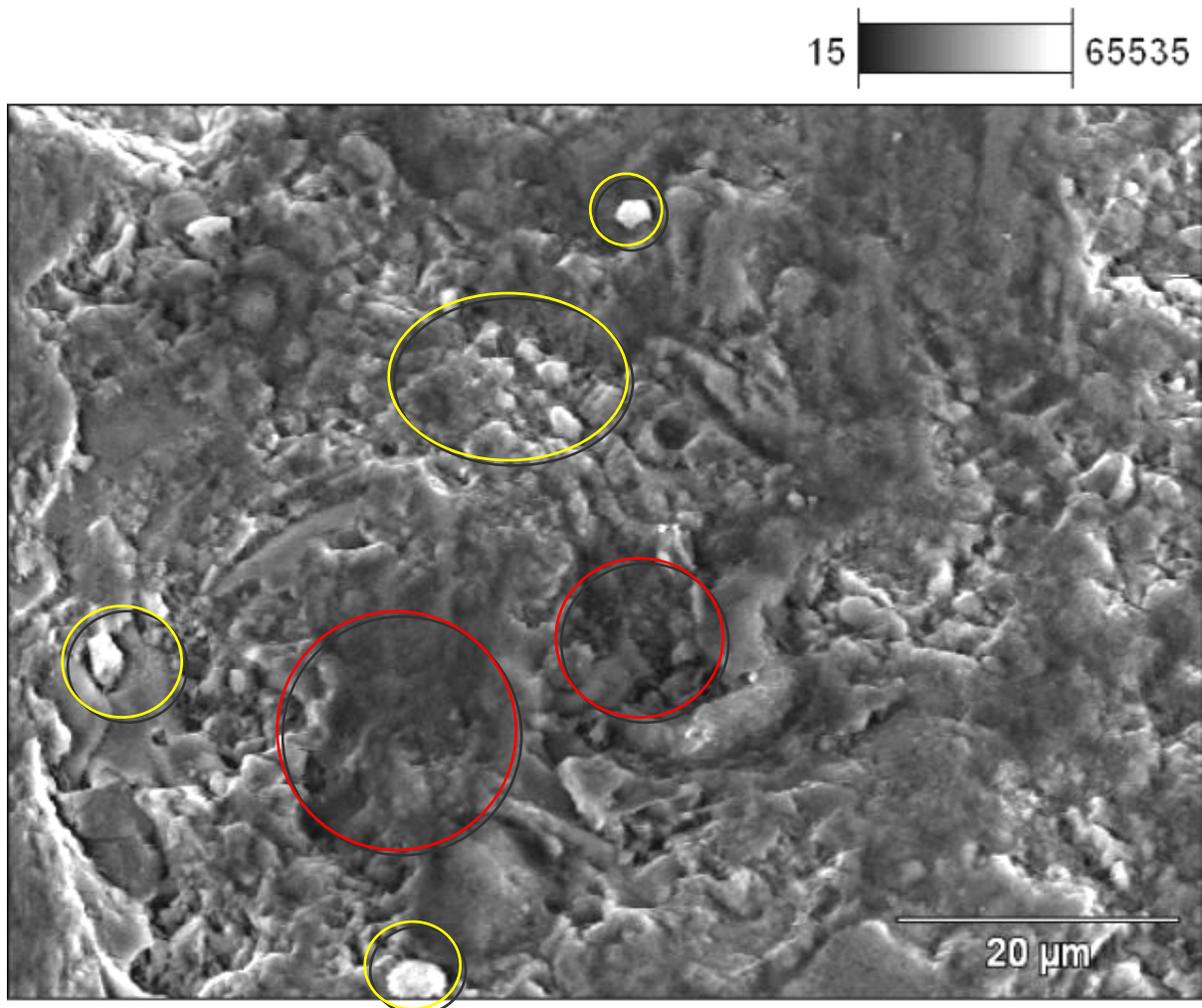
En la micrografía presentada en figura 4.23 de la condición N° 14 se aprecia un mecanismo similar a la condición 7, lo cual es corroborado con la imagen presentada en la figura 4.24 a 500X. Así como en la condición N° 2, los mecanismos de abrasión dominantes son por deformación plástica y fractura. La menor cohesión entre partículas pudo haber sido la responsable por los niveles más altos de pérdida de material comparada con la condición 7.



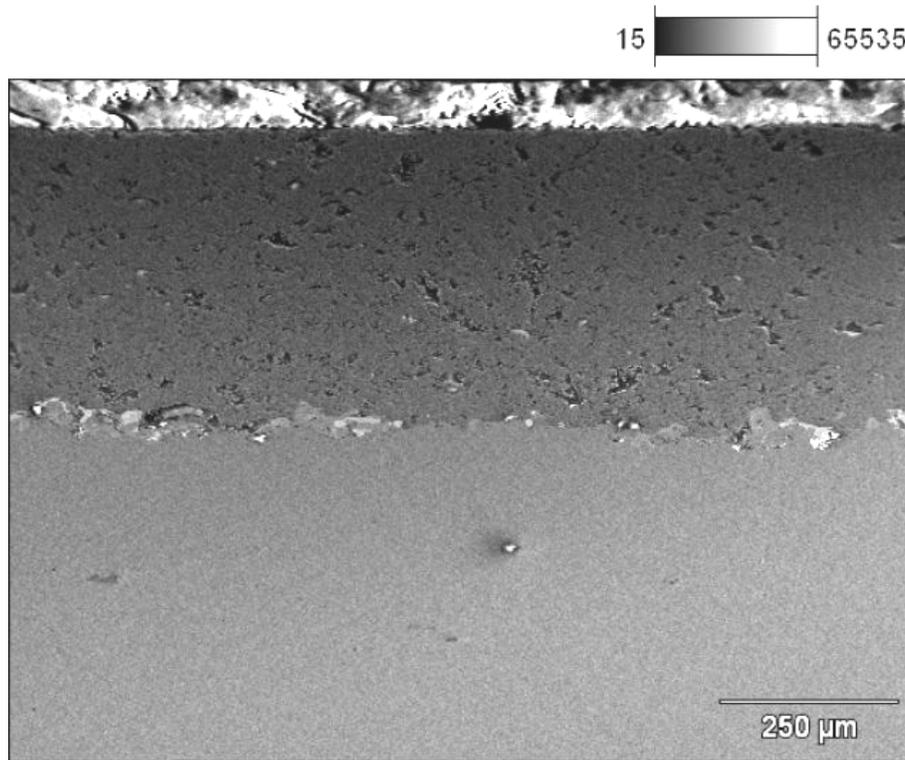
**Figura 4.23 Micrografía en electrones secundarios de la Superficie de desgaste del recubrimiento para la condición N° 14 a 100X**

La micrografía presentada en la figura 4.25 corresponde a la sección transversal de la muestra 24 a 100X, en la cual observamos un recubrimiento más homogéneo y con menor porosidad. La interfase también se aprecia más uniforme indicando que los parámetros utilizados en esta condición produjeron una mejor adhesión entre la capa de enlace y el recubrimiento. Sin embargo, se aprecia un espesor insuficiente de la misma y partículas no fundidas. El mapeo mostrado en la figura 4.26 evidencia la presencia de partículas no fundidas de Níquel, elemento presente en la capa de enlace. Las partículas no fundidas se pueden divisar en la zona roja, en la figura 4.27b, identificadas por el mapeo

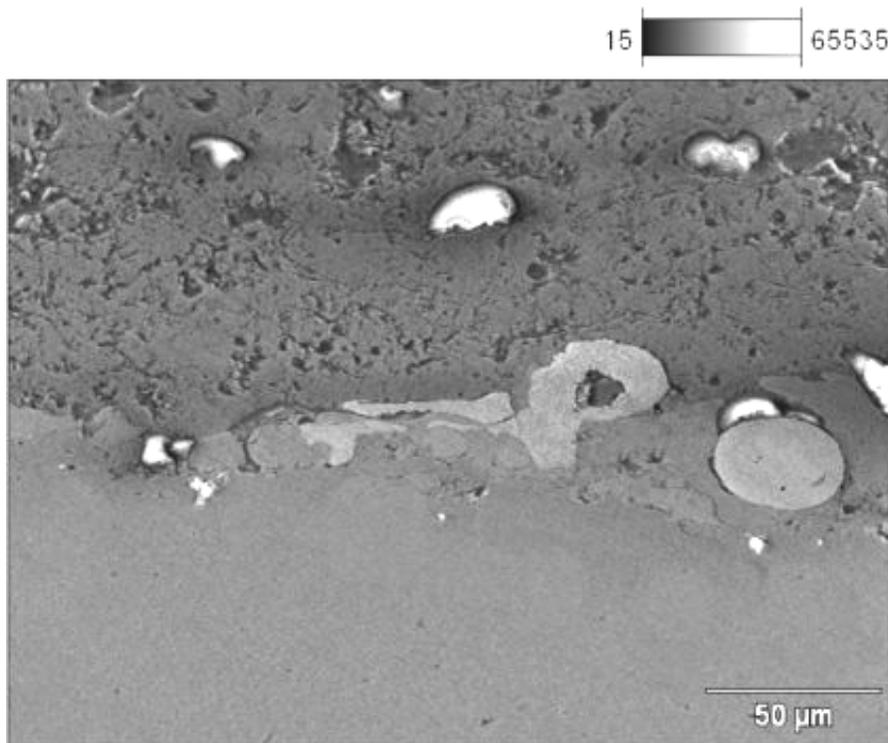
examen microscópico y que son partículas de aluminio (en el material adherente) y silicio (en el recubrimiento). El aumento a 500X nos confirma la escasa porosidad del material, observando uniformidad.



**Figura 4.24** Micrografía en electrones secundarios de la Superficie de desgaste del recubrimiento para la condición N° 14 a 500X

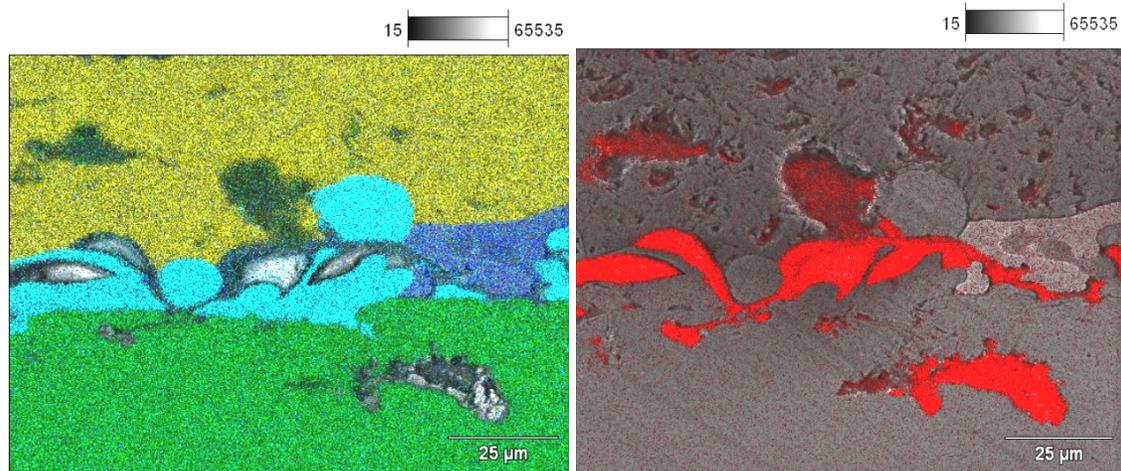


**Figura 4.25** Micrografía en electrones secundarios de la Superficie transversal del recubrimiento para la condición N° 24 a 100X



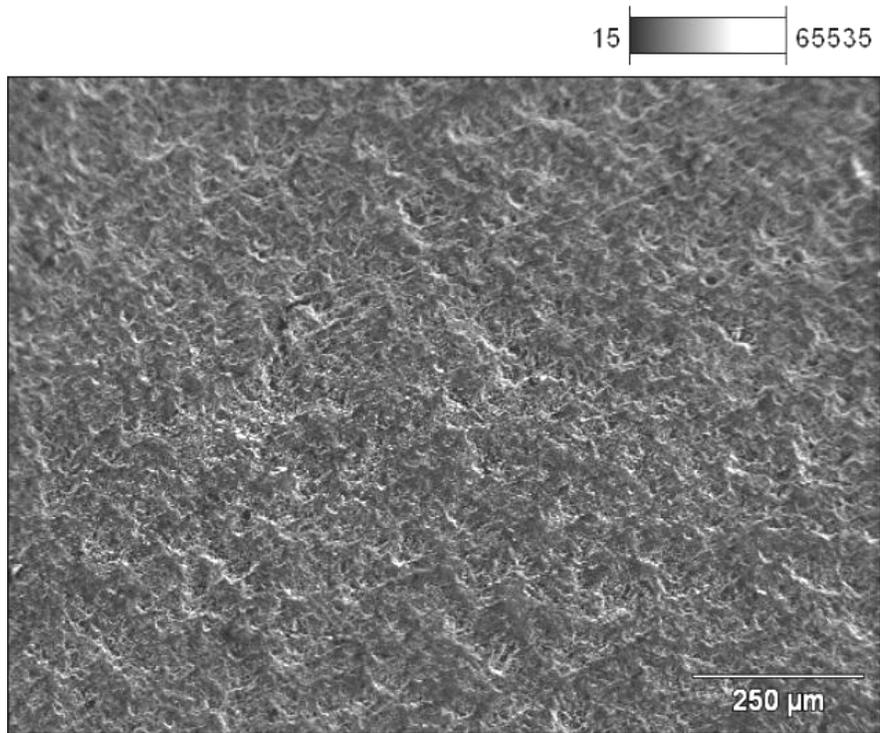
**Figura 4.26** Micrografía en electrones secundarios de la Superficie de desgaste del recubrimiento para la condición N° 24 a 500X

En la figura 4.27 se observan las inclusiones de aluminio en el recubrimiento y la base Molibdeno-Níquel-Aluminio (zona roja) posiblemente por deposición del adherente, porosidad localizada (círculos verdes), gran presencia de molibdeno en toda la interfase entre recubrimiento y sustrato (zona azul oscura), y presencia de níquel en gran proporción (zona azul clara)

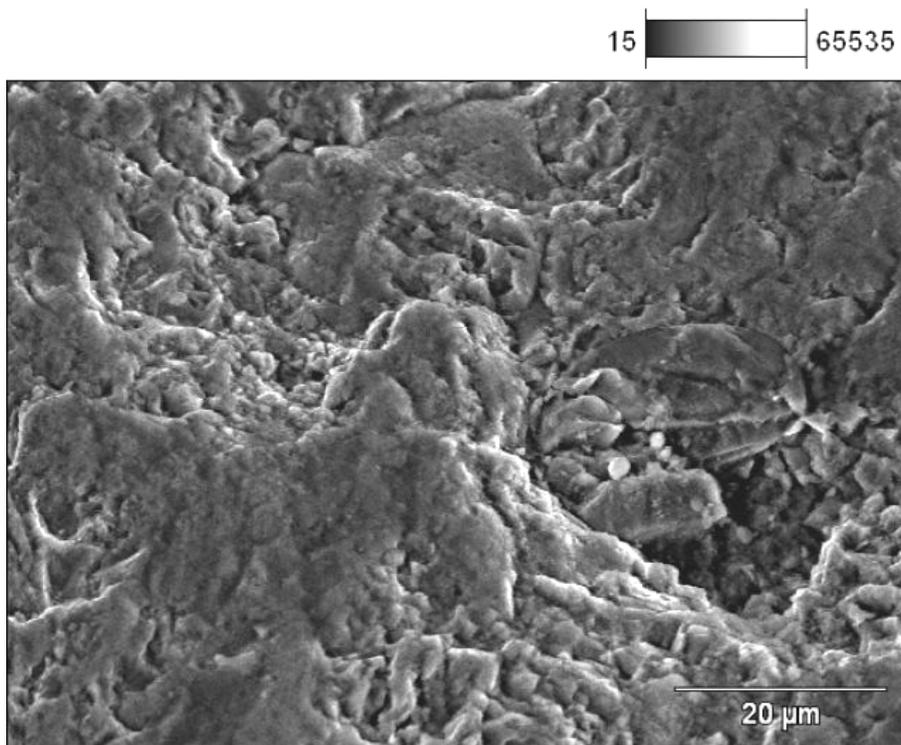


**Figura 4.27 EDX en electrones secundarios de la Superficie transversal del recubrimiento para la condición N° 24, a 1000X, con identificación del Hierro (Verde), Óxido de Cromo (Amarillo), Níquel (Azul claro), Molibdeno (Azul oscuro) y b) Aluminio (Rojo)**

La superficie del recubrimiento sometido a abrasión de la condición N° 24 muestra un desgaste muy similar al presentado por la condición 7, que presentó un mejor comportamiento frente a la abrasión (Ver figura 28). Sin embargo, si comparamos las figuras 4.16 y 4.29 observamos en esta última una menor deformación plástica y pareciera que el mecanismo de fractura es el que prevalece. Dado que esta condición se depositó con una menor energía calórica pero a una alta velocidad, probablemente produjo un depósito con algunas partículas no fundidas (ver Fig. 4.26) pero más cohesionado y con mayor dureza, pero con menor ductilidad. Por este motivo esta condición presentó mayores valores de dureza pero menor resistencia a la abrasión.

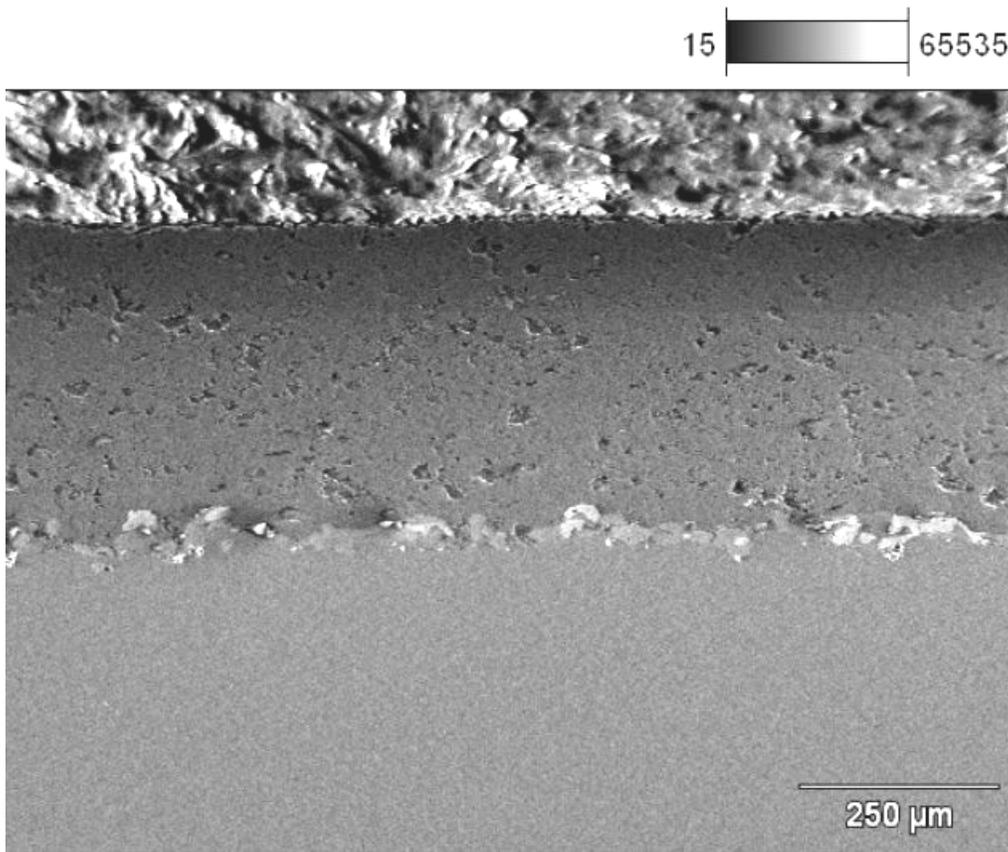


**Figura 4.28** Micrografía en electrones secundarios de la Superficie de desgaste del recubrimiento para la condición N° 24. 100X.

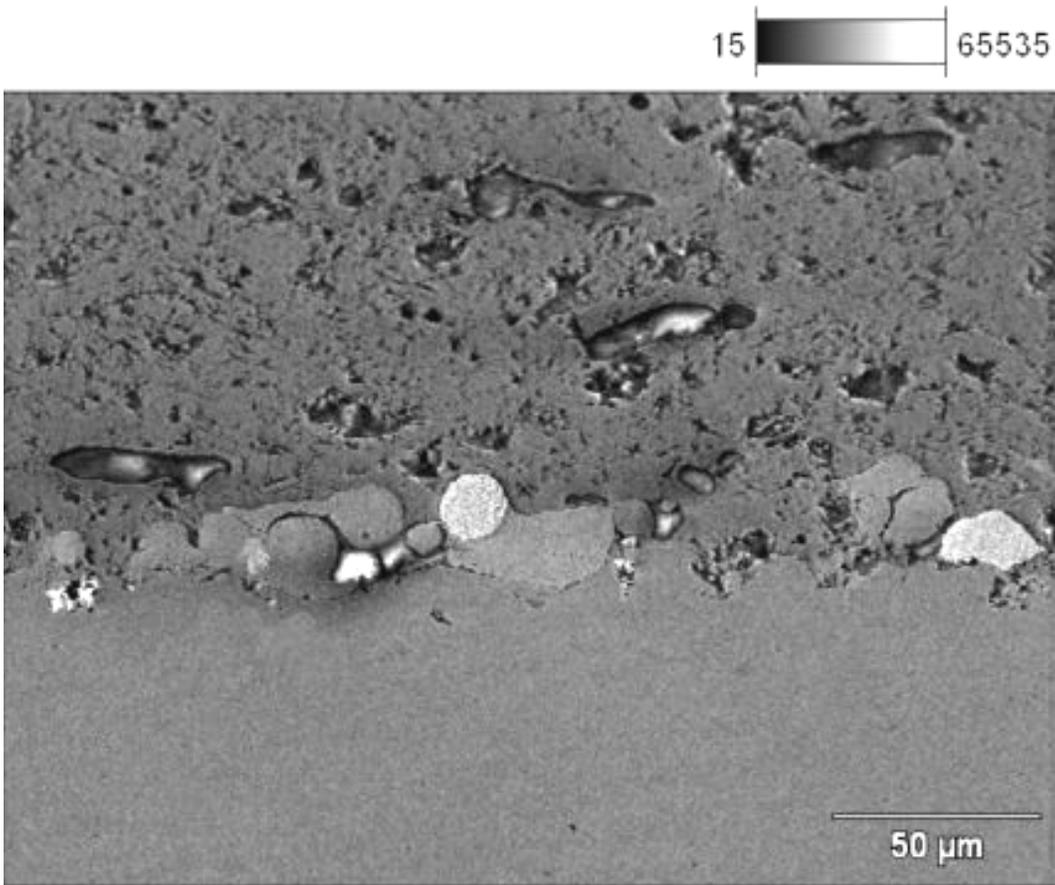


**Figura 4.29** Micrografía en electrones secundarios de la Superficie de desgaste del recubrimiento para la condición N° 24. 1500X.

En la figura 4.30, se presenta la micrografía de la sección transversal a 100X del recubrimiento correspondiente a la condición N° 27, en la cual se observa recubrimiento muy similar a la condición 24. La micrografía observada en la figura 4.31 correspondiente a la misma condición 27 pero a mayor magnificación (500X) revela una microestructura similar a la condición anterior con la presencia de poros y grietas. La capa de enlace sigue observándose con partículas no fundidas pero se aprecia una mejor adhesión en ambas capas comparada con la condición dada por el fabricante.



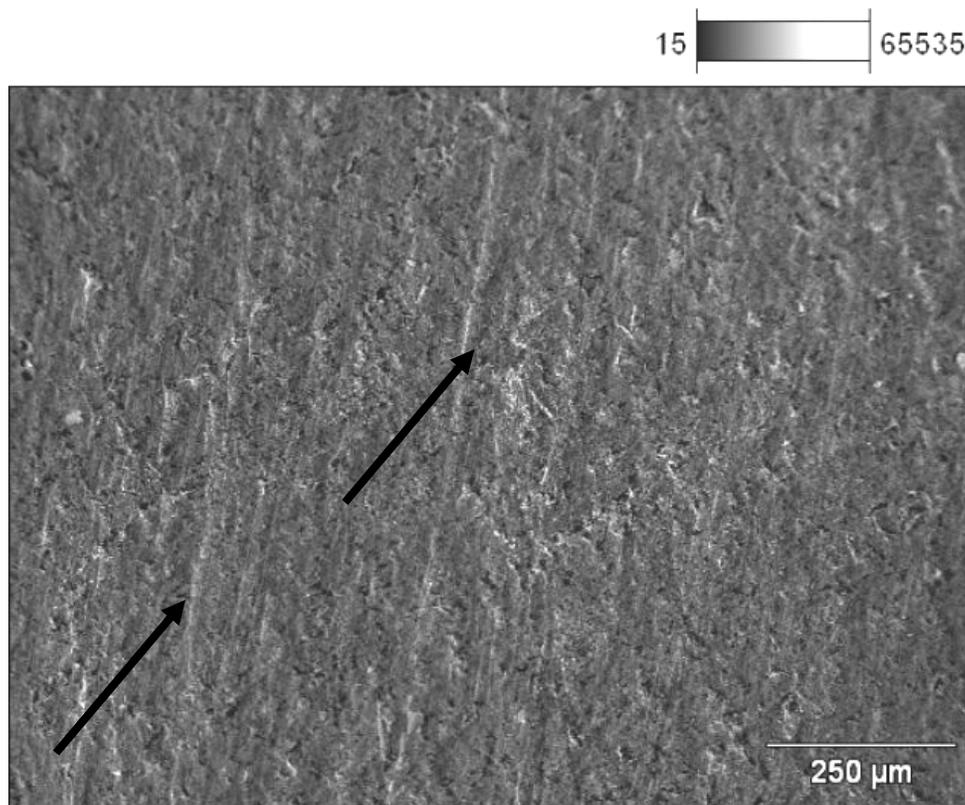
**Figura 4.30 Micrografía en electrones secundarios de la Superficie de desgaste del recubrimiento para la condición N° 27. 100X.**



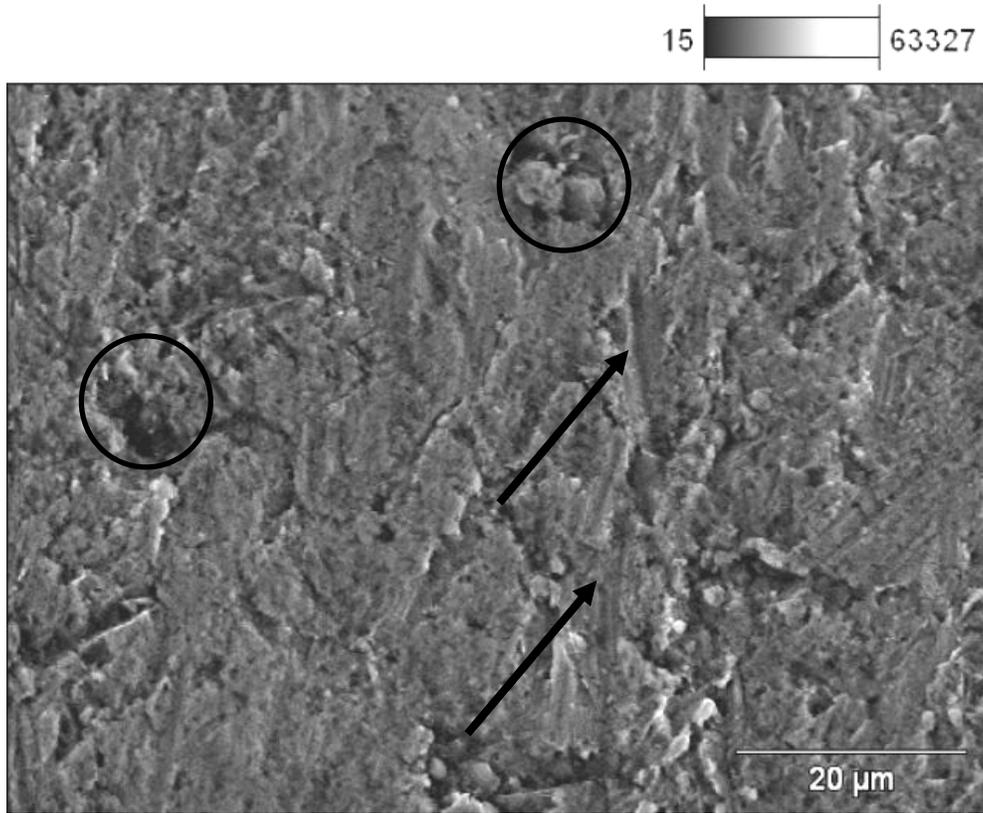
**Figura 4.31 Micrografía en electrones secundarios de la Superficie transversal del recubrimiento para la condición N° 27. 500X**

La superficie desgastada del recubrimiento de la condición N° 27 se presenta en las Micrografías de la figura 4.32, 4.33 y 4.34, donde observamos los surcos producidos por la abrasión indicando que en esta condición la matriz es mas dúctil comprada con la condición 24. En esta condición los parámetros son iguales a la 24 a excepción del amperaje que en este caso es el mayor. Esto indica que las partículas llegaron más fundidas y produjeron una mejor cohesión y menor porosidad. En la figura se evidencian los surcos de abrasión (ver flechas en figura 4.32) observándose una menor deformación plástica comparado con la condición 7. Pero menos evidencia de fractura que en la condición 24. Observamos que esta condición tiene menor dureza pero resistencia al desgaste similar a la condición 24. El mayor calentamiento de las partículas inducido por el mayor amperaje también conlleva a

un mayor gradiente de temperaturas durante el enfriamiento del recubrimiento lo cual puede ocasionar un endurecimiento de la matriz de cromo produciéndose una menor deformación plástica por el efecto abrasivo lo cual podría ser compensado por el desprendimiento de partículas (ver círculos negros en Fig.4.33) no muy evidenciadas en los casos anteriores.



**Figura 4.38** Micrografía en electrones secundarios de la Superficie de desgaste del recubrimiento para la condición N° 27. 100X



**Figura 4.39** Micrografía en electrones secundarios de la Superficie de desgaste del recubrimiento para la condición N° 27. 500X.

## CONCLUSIONES

Podemos concluir lo siguiente, basados en los resultados y análisis de resultados en el presente trabajo:

La investigación tuvo como origen de partida los parámetros de proceso recomendados por el fabricante del material de alimentación, por lo tanto los resultados obtenidos serán referidos a estos valores.

A través de los resultados obtenidos por el análisis de varianza, tanto para la pérdida volumétrica en el proceso abrasivo de cada condición como para el ensayo de dureza, podemos concluir que el parámetro de mayor influencia sobre el rociado térmico por plasma, para un recubrimiento cerámico  $5\text{SiO}_2 - 3\text{TiO}_2 - \text{Cr}_2\text{O}_3$  sobre la resistencia al desgaste abrasivo, es el Voltaje, siguiendo en orden de importancia el amperaje, y luego la tasa de alimentación de los polvos.

Se pudo determinar que la combinación de parámetros que presentó la menor pérdida volumétrica por abrasión fue el tratamiento N° 7, cuyos parámetros fueron 42 g/min para la tasa de alimentación de los polvos, 900 A y 31 V, mientras que los recomendados por el fabricante fueron 52 g/min para la tasa de alimentación de los polvos, 800 A y 35 V. Este tratamiento N° 7 presentó una pérdida volumétrica de 87,72% menor a la obtenida en la condición N° 14 (recomendada del fabricante) que tuvo una pérdida de 81,80 mm<sup>3</sup>. Sin embargo, las condiciones 24 y 27 presentaron un mejor comportamiento frente al desgaste abrasivo en el tiempo, con respecto a la pérdida volumétrica acumulada. Estas dos condiciones presentan unos valores de pérdida volumétrica muy similares y los valores de desviación estándar también lo son, lo cual indica que ambas condiciones presentan una resistencia a la abrasión muy similar. La condición 24 y 27 se comportaron 3,82 y 3,54 veces mejor, respectivamente, que la condición del fabricante (condición 14) y 5,26 y 4,8 veces mejor que la condición más desfavorable (condición 2). Con respecto a la condición más favorable (condición 7), la 24 y 27 presentaron una resistencia al desgaste 2,13 y 2,3 veces menor. La condición que presentó el peor comportamiento ante la abrasión fue la N° 2 cuyos parámetros de deposición fueron 52 g/min para la tasa de alimentación de los

polvos, 700 A y 31 V, con un 75,5% mayor a la obtenida por la condición del fabricante. Es decir, 11 veces mayor a la obtenida por la mejor condición en este estudio.

El tratamiento N° 2 tuvo la mayor pérdida volumétrica y resultó ser la que presentó una huella de desgaste más profunda en comparación con las demás, llegando al sustrato, lo cual no ocurrió con la muestra de la condición N° 25, donde hubo considerable pérdida volumétrica, en comparación con la condición N° 7, sin llegar al sustrato. Esto se debe a la cantidad de material aportado y al voltaje suministrado en esta condición N° 25, aumentando la densidad de splats del recubrimiento.

Aunque el amperaje y la tasa de alimentación de los polvos tuvieron una significancia cercana a la del voltaje para la microdureza, el único parámetro cuyo efecto resultó estadísticamente significativo en cuanto a la calidad de la microdureza y la resistencia a la abrasión del recubrimiento, fue el voltaje, debido a que una pequeña variación del mismo cambiaba por completo la calidad del recubrimiento.

Se podría decir, en función de los resultados obtenidos en esta investigación, que los valores optimizados para este proceso de rociado térmico por plasma para el amperaje son 865-900 A, para el voltaje 38,5 - 40 V y para la tasa de alimentación 57,8-61 g/min.

El voltaje resultante recomendable (38,5 - 40 V) resultó estar entre un 10,85 y 15,43 % mayor que el voltaje recomendado por el fabricante (35 V). En cuanto a la tasa de alimentación de los polvos, el valor optimizado está entre 57,8 y 61 g/min, y la misma se ubica entre un 8,27 y 19,23% mayor que la propuesta por el fabricante (52 g/min). Por último el amperaje, cuyo valor óptimo (865-900 A) se encuentra entre 7,88% y 12,5% mayor del valor aportado por el fabricante (800 A).

A partir de los resultados obtenidos en este estudio a través del análisis de varianza, pudimos determinar que no existe una correlación entre la microdureza y la respuesta al desgaste abrasivo. Los parámetros óptimos resultantes del análisis de dureza por microindentación, corresponden al tratamiento N° 27 y son para el amperaje 900 A, para el voltaje 40 V y Tasa de alimentación 61 g/min:

Por lo expuesto anteriormente, finalmente se puede decir que la condición primordial de operación, es decir, donde se presentan nuestros mejores valores de dureza por microindentación corresponden al conjunto de parámetros de la condición N° 27. Y,

aunque la condición N° 7 haya tenido la menor pérdida volumétrica en el ensayo abrasivo, los parámetros recomendados para la resistencia a la abrasión en el tiempo, corresponden al conjunto que enmarcan los parámetros de las condiciones N° 24 a la 27, siendo esta última la más recomendada.

Todos los tratamientos microestructuralmente estudiados presentaron como mecanismo de desgaste la abrasión, deformación plástica, desprendimiento de material y fractura. Estos resultados fueron atribuidos a la presencia de partículas no fundidas y un alto nivel de porosidad.

## RECOMENDACIONES

Se considera trasladar la máquina de ensayos abrasivos a un recinto donde se pueda operar sin riesgo de contaminación a otros equipos e inclusive a otros estudiantes causada por la arena abrasiva de sílice.

Dotar a la máquina de ensayos abrasivos de una válvula o pequeña compuerta que permita abrir, cerrar y controlar el flujo de arena desde la tolva hacia el interior de la máquina.

Realizar un registro de usos con fecha y todo lo necesario para las constantes limpiezas de la arena abrasiva de sílice que se encuentra en el galpón de la escuela y su constante control de calidad para futuros empleos.

Realizar un próximo Trabajo de Grado donde se deba optimizar los parámetros de rociado térmico por plasma con óxido de cromo frente a la resistencia al desgaste por deslizamientos, ya que el uso de recubrimientos últimamente con este compuesto en algunos equipos como cojinetes y cigüeñales, a presentado buenos resultados frente a deslizamientos.

Dotar al laboratorio de metalografía de la escuela con paños de pulido con alúmina de 0,05 micrones para mejorar la calidad de preparación de muestras para microscopía electrónica.

Tramitar la adquisición de un tambor vibratorio para tamizado en los laboratorios de la escuela.

La empresa debe mantener un control de limpieza de los polvos de alimentación en el equipo.

Es aconsejable realizar pruebas preliminares para tratar de ajustar los parámetros antes de hacer el diseño experimental definitivo. Se pueden hacer a través de pruebas de dureza.

Dotar de una tapa de protección para la tolva de la máquina de abrasión y una mejor fijación en la boquilla de inyección de arena de abrasión.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ageorges Hélène, Pavel Ctibor, Zouhair Medarhri, Said Touimi, Pierre Fauchaisen (2006) “Influence of the metallic matrix ratio on the wear resistance (dry and slurry abrasion) of plasma sprayed cermet (chromia/stainless steel) coatings”, University of Limoges, Limoges Cedex, France; and Institute of Plasma Physics, Praha 8, Czech Republic.

ASTM, E384-99, “Standard Test Method For Microhardness of Materials”

ASTM, G65-80, “Standard Practice for Conducting Dry Sand/Rubber Wheel”

Budinski, K., (2004). “Evaluating the abrasion resistance of coatings with abrasive finishing tape”, Surface and coatings technology, volumen 188-189, págs.539-543.

Capote D., Scarlet Y. y Perdomo P., Lenin J. (2006) “Optimización de un recubrimiento cerámico (WC-12% Co) depositado mediante el proceso de rociado térmico por Plasma”. Trabajo Especial de grado, Caracas, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica.

Cellard, A., Zenati, R., Garnier, V., Fantozzi G. y Baret, G. (2006). “Optimization of chromium oxide nanopowders dispersion for spray-drying”. INSA Lyon, GEMPPM UMR CNRS 5510, Villeurbanne 69621, and DGTec, 178 Rue Mayoussard, Moirans 38430, France.

Colmenares A. José R., (2004). “Optimización de Recubrimientos Metálicos Nanoestructurados depositados por Rociado Térmico”. Trabajo de grado, Caracas, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica.

Conde M., Victoria A. y Dávila M., Andrea E. (2007). “Optimización de la calidad de un recubrimiento base Molibdeno-Níquel depositado por la técnica de rociado térmico por plasma”. Trabajo de grado, Caracas, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica.

Eaton, H. E. y Zajchowski, P. (1999) “High temperature particulate erosion of plasma sprayed YSZ versus selected powder characteristics and plasma torch designs”. United Technologies Research Center, 411 Silver Lane, and Pratt and Whitney Aircraft, 400 Main Street, East Hartford, CT 06108, USA

Estevez D. y L. González, (2003). “Estudio de la resistencia al desgaste de recubrimientos depositados por rociado térmico de Alta Velocidad y por Electro-posición”. Trabajo de grado, Caracas, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica.

Fauchais, P., Coudert, J., Vardelle, A., Vardelle, M., Grimaud, A. y Roumilhac, P., (1987). “State of the art the understanding of physical phenomena involved in plasma spraying” at atmospheric pressure”, Thermal Spray: Advances in coatings technology, Proceedings of National Thermal Spray Conference, Orlando, USA, ASM International, págs. 11-20.

Gil, Linda. (2001) “Optimización de la Calidad de Recubrimientos Base Níquel obtenidos por Rociado Térmico HVOF” Centro de Estudios de Corrosión, UNEXPO-Puerto Ordaz. Aprobado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas (CONICIT) en su programa de Proyectos S-1.

In-Woong Lyo, Hyo-Sok Ahn, Dae-Soon Lim (2002), “Microstructure and tribological properties of plasma-sprayed chromium oxide–molybdenum oxide composite coatings”. Tribology Research Center, Korea Institute of Science and Technology, y Department of Materials Engineering, Korea University, Seoul, South Korea.

Jellad, A., Labdi, S., Malibert, C. y Renou, G. (2008). “Nanomechanical and nanowear properties of  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  thin films deposited by rf sputtering”. Laboratoire d'études des Milieux Nanométriques, Université d'Evry Val d'Essonne, bâtiment Maupertuis, bd F. Mitterrand, , and Laboratoire Structures, Propriétés et Modélisation des solides, Ecole Centrale de Paris, grande voie des vignes, 91025 Evry Cedex, France.

Kharlamov, Y. A. (1987). “Detonation spraying of protective coatings”. Voroshilougrad Machine Building Institute, Voroshilougrad, U.S.S.R.

Krepeski R. y Drossman R., 1991, "Tribolite iron thermal spray coating for control wear". Thermal Spray coatings Processes and applications, material park, OH, ASM International, págs 353-356.

Larsen, J., Basse, y Sokoloski, S. S. (1975). "Influence of atmospheric humidity on abrasive wear — II. 2-body abrasion" Department of Mechanical Engineering, University of Hawaii, Honolulu, Hawaii 96822, U.S.A.

Luo, F., Pang, X., Gao, K., Yang, H. and Wang, Y. (2007). "Role of deposition parameters on microstructure and mechanical properties of chromium oxide coatings". Department of Materials Physics and Chemistry, University of Science and Technology Beijing, Beijing, 100083, China.

Mittal, J., Monthieux, M., Allouche, H. and Stephan, O. (2001) "Room temperature filling of single-wall carbon nanotubes with chromium oxide in open air". CEMES, UPR A-8011 CNRS, B.P. 4347, 29 rue Jeanne Marvig, F-31055 Toulouse Cedex 4, France; LASEM, ENIS, Route de Soukra, 3038 Sfax, Tunisie and LPS, Université de Paris-Sud, Bât. 510, F-91405 Orsay Cedex, France.

Pang, X., Gao, K., Luo, F., Yang, H., Qiao, L., Wang, Y. y Volinsky, A. (2001) "Annealing effects on microstructure and mechanical properties of chromium oxide coatings". Department of Materials Physics and Chemistry, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; Department of Mechanical Engineering, University of South Florida, Tampa, FL 33620, USA.

Pavanati, H.C., Straffelini, G., Maliska, A.M. y A.N. Klein (2008) "Dry sliding of plasma-sintered iron—The influence of nitriding on wear resistance". LABMAT, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina - 88040-970, Florianópolis, SC, Brazil; Dipartimento di Ingegneria dei Materiali, Università di Trento, Via Mesiano 77, 38050 Trento, Italy.

Pinto, N. y Rangel, A., (1999), "Diseño, construcción y puesta a punto de una máquina para ensayo de abrasión según la norma ASTM G-65", Trabajo Especial de grado, Caracas, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica.

Capote D., Scarlet Y. y Perdomo P., Lenin J. (2004) “Optimización de un recubrimiento cerámico (WC-12% Co) depositado mediante el proceso de rociado térmico por Plasma”. Trabajo Especial de grado, Caracas, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica.

Sedricks, A. J. and Mulhearn, T. O. (1984), “The Mechanics of Cutting Semi-infinite Body by a Rigid Pyramidal Indentor” , *Wear*, 88, , pág. 195.

Seijn, R. P. (1984), “The sliding surface of polytetrafluoroethylene: an investigation with the electron microscope”. Engineering Materials Laboratory, Engineering Research Division, Engineering Department, E.I. du Pont de Nemours &Co., Inc., Wilmington, Del. 19898, U.S.A.

Shi, S. y Hwang, J., (2003), “Plasma spray fabrication of near-net-shape ceramic objects”, *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, volumen 2, N° 2, págs. 145-150.

Suzuki, M., Sodeoka, S. y Inoue, T., (2001) “Structure and properties of Plasma-Sprayed Zircon Coating”, *Thermal Spray, Surface Engineering via Applied Research, Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Thermal Spray Conference, Montreal, Canada, ASM International*, Págs. 333-339.

Tsuzuki, T. y McCormick, P. G. (2000). “Synthesis of Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles by mechanochemical processing”. Special Research Centre for Advanced Mineral and Materials Processing, The University of Western Australia, Nedlands, Perth, WA 6907, Australia.

Zhong, Z. C., Cheng, R. H., Bosley, J., Dowben, P. A. y Sellmyer, D. J. (2001). “Fabrication of chromium oxide nanoparticles by laser-induced deposition from solution”. Behlen Laboratory of Physics, Department of Physics and Astronomy and the Center for Materials Research and Analysis (CMRA), University of Nebraska, Lincoln, NE 68588-0111; Institute for Micromanufacturing and Physics Program, P.O. Box 10137, Ruston, LA 71272; and Department of Physics, Grambling State University, Grambling, LA 71245, USA.

Zhonghua Zhu, L., Yao, X., Lu G. y Yan, Z. (2008). "Synthesis and characterization of chromium oxide nanocrystals via solid thermal decomposition at low temperature". RC Centre of Excellence for Functional Nanomaterials and Division of Chemical Engineering, University of Queensland, St Lucia, Brisbane QLD 4072, Australia; State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, CNPC Key Laboratory of Catalysis, China University of Petroleum, Dongying 257061, China.

## ANEXO

Tabla 5.1 Registro detallado de cada una de las 81 probetas ensayadas en abrasión

Condición	Voltajes (V)	Amperaje (A)	Tasa Aliment. (g/min)	Nº	Peso inicial (g)	Peso 2min	Promedio peso inicial (g)	Promedio peso final (g)	Promedio pérdida (g)	Pérdida Volumétrica (mm <sup>3</sup> )	Desviación Estándar
<b>1</b>	V1	A1	TA1	1	93,6520	93,2558	93,84633	93,47467	0,37266	79,28861	7,44743
	31	700	42	2	93,0120	92,6803					
				3	94,8750	94,4879					
<b>2 (peor condición)</b>	V1	A1	TA2	1	93,5520	93,1391	94,08333	93,55543	<b>0,52931</b>	<b>112,61827</b>	<b>44,46557</b>
	31	700	52	2	94,1010	93,3325					
				3	94,5970	94,1947					
<b>3</b>	V1	A1	TA3	1	95,6340	95,4951	95,55033	95,26077	0,29034	61,77400	57,23069
	31	700	61	2	94,7950	94,6645					
				3	96,2220	95,6227					
<b>4</b>	V1	A2	TA1	1	93,2781	92,8896	93,49970	93,33043	0,16972	36,11009	40,63412
	31	800	42	2	94,3220	94,2776					
				3	92,8990	92,8241					
<b>5</b>	V1	A2	TA2	1	93,1110	92,9517	93,63633	93,15650	0,48111	102,36408	59,69321
	31	800	52	2	93,8970	93,2921					
				3	93,9010	93,2257					
<b>6</b>	V1	A2	TA3	1	95,7840	95,1780	95,08233	94,60680	0,47680	101,44675	24,93362
	31	800	61	2	94,5910	94,1508					
				3	94,8720	94,4916					
<b>7 (1ra mejor)</b>	V1	A3	TA1	1	93,5510	93,4951	93,71967	93,67253	<b>0,04726</b>	<b>10,05508</b>	<b>1,80645</b>
	31	900	42	2	92,5260	92,4870					
				3	95,0820	95,0355					
<b>8</b>	V1	A3	TA2	1	95,4750	95,1162	95,70467	95,43590	0,26948	57,33669	16,72441
	31	900	52	2	96,0620	95,8464					
				3	95,5770	95,3451					
<b>9</b>	V1	A3	TA3	1	96,2340	95,8309	95,60633	95,17683	0,43064	91,62634	43,26234
	31	900	61	2	95,4760	94,8318					
				3	95,1090	94,8678					
<b>10</b>	V2	A1	TA1	1	94,8730	94,7426	94,94933	94,63920	0,31096	66,16154	34,73022
	35	700	42	2	95,5970	95,2447					
				3	94,3780	93,9303					
<b>11</b>	V2	A1	TA2	1	95,2780	95,2778	94,90200	94,45400	0,44919	95,57299	88,05218
	35	700	52	2	93,6230	93,0924					
				3	95,8050	94,9918					

12	V2	A1	TA3	1	95,622	95,1226	95,58033	95,06243	0,51928	110,48494	7,05867
	35	700	61	2	96,0980	95,5998					
				3	95,0210	94,4649					
13	V2	A2	TA1	1	94,5880	94,1196	94,49567	94,09060	0,40615	86,41392	11,84721
	35	800	42	2	94,8880	94,5233					
				3	94,0110	93,6289					
14 (fabricante)	V2	A2	TA2	1	94,3970	94,0144	94,63533	94,25190	0,38445	81,79882	14,68875
	35	800	52	2	93,4870	93,1720					
				3	96,0220	95,5693					
15	V2	A2	TA3	1	96,5060	96,0858	95,82667	95,35617	0,47175	100,37298	10,48401
	35	800	61	2	95,8870	95,3686					
				3	95,0870	94,6141					
16	V2	A3	TA1	1	94,7990	94,5645	93,92967	93,60733	0,32319	68,76420	17,47133
	35	900	42	2	93,6010	93,2651					
				3	93,3890	92,9924					
17	V2	A3	TA2	1	95,6410	95,4678	95,25733	95,02093	0,23703	50,43182	11,69880
	35	900	52	2	95,3050	95,0404					
				3	94,8260	94,5546					
18	V2	A3	TA3	1	94,7990	94,3316	94,50533	94,14907	0,35722	76,00329	47,48433
	35	900	61	2	94,5210	94,0196					
				3	94,1960	94,0960					
19	V3	A1	TA1	1	95,302	95,0589	95,63800	95,36483	0,27389	58,27535	8,29865
	40	700	42	2	95,5010	95,2417					
				3	96,1110	95,7939					
20	V3	A1	TA2	1	95,1220	95,0215	95,65067	95,46680	0,18436	39,22475	15,74195
	40	700	52	2	95,5990	95,3887					
				3	96,2310	95,9902					
21	V3	A1	TA3	1	95,1690	95,0590	95,23433	94,93340	0,30173	64,19888	35,34761
	40	700	61	2	95,2330	94,8260					
				3	95,3010	94,9152					
22	V3	A2	TA1	1	95,3020	95,0664	94,47467	94,16207	0,31343	66,68776	19,41017
	40	800	42	2	93,5230	93,1100					
				3	94,5990	94,3098					
23	V3	A2	TA2	1	95,5870	95,2160	94,99233	94,71643	0,27663	58,85846	17,63053
	40	800	52	2	94,7020	94,4805					
				3	94,6880	94,4528					
24 (2da mejor)	V3	A2	TA3	1	94,8990	94,7615	95,08300	94,98263	0,10063	21,41148	15,24187
	40	800	61	2	95,1150	95,0970					
				3	95,2350	95,0894					

25	V3	A3	TA1	1	94,6220	94,3710	94,69933	94,18237	0,51834	110,28583	55,38180
	40	900	42	2	94,5990	94,0688					
				3	94,8770	94,1073					
26	V3	A3	TA2	1	93,7990	93,7010	94,36767	94,07193	0,29652	63,08955	39,87314
	40	900	52	2	94,7050	94,3853					
				3	94,5990	94,1295					
27 (3ra mejor)	V3	A3	TA3	1	96,1330	96,0365	95,70767	95,59927	0,10869	23,12525	15,84389
	40	900	61	2	96,3020	96,2612					
				3	94,6880	94,5001					