

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**“INFLUENCIA DE LOS PARAMETROS DE ROCIADO  
SOBRE LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE  
RECUBRIMIENTOS DEPOSITADOS POR PROYECCION  
TÉRMICA”**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
por los Bachilleres:  
**Lujan F., Eduardo E.  
Di Girolamo R., Antonio**  
Para optar por el Título de  
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2009

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**“INFLUENCIA DE LOS PARAMETROS DE ROCIADO  
SOBRE LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE  
RECUBRIMIENTOS DEPOSITADOS POR PROYECCION  
TÉRMICA”**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. María Rodríguez de Prato

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Andrea Scagni

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
por los Bachilleres:  
**Lujan F., Eduardo E.  
Di Girolamo R., Antonio**  
Para optar por el Título de  
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2009



Caracas, 12 de mayo de 2.009

## ACTA

Los abajo firmantes, miembros del jurado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los bachilleres:

**ANTONIO DI GIROLAMO y EDUARDO LUJAN**

Titulado:

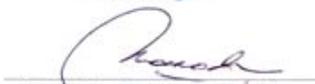
**“INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE ROCIADO SOBRE LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE RECUBRIMIENTOS DEPOSITADOS POR PROYECCION TÉRMICA”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el Plan de Estudios, conducente al Título de Ingeniero Mecánico.

  
Prof. Andrea Scagni  
Jurado



  
Prof. Crisanto Villalobos  
Jurado

  
Profa. Maria de los A. Rodriguez  
Tutora



Caracas, 12 de mayo de 2009

Ciudadano  
Prof. GERARDO RAMÍREZ  
Jefe de División de Control de Estudios

Presente.-

Quienes suscriben Miembros del Jurado Examinador, designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Mecánica, nos dirigimos a usted, con la finalidad de informarle se ha decidido otorgar a los Bachilleres:

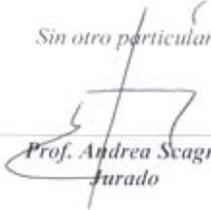
**ANTONIO DI GIROLAMO (C.I.V.-12.544.219)**  
**EDUARDO LUJAN (C.I.V.- 16.135.658)**

### **“MENCIÓN HONORÍFICA”**

Por la excelencia demostrada en la realización del Trabajo Especial de Grado titulado:

**“INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE ROCIADO SOBRE LA RESISTENCIA  
AL DESGASTE DE RECUBRIMIENTOS DEPOSITADOS POR PROYECCION  
TÉRMICA”**

Sin otro particular a que hacer referencia quedamos de usted.

  
Prof. Andrea Scagni  
Jurado



  
Profa. María de los A. Rodríguez  
Tutora

  
Prof. Crisanto Villalobos  
Jurado

“Hacia el 50º Aniversario del 21 de noviembre de 1957, Día del Estudiante”

## **DEDICATORIA**

A Dios por darme la oportunidad de vivir y ser quien soy. A mi papá y mi mamá por apoyarme en los momentos más difíciles y porque nunca me ha faltado nada gracias a ellos. A Carolina y Lucy por estar siempre pendiente e interesadas. A Antonio, David, Alejandro, Carlo, Rafael, Mariana, Alejandro, Cinthia, Raúl, Marco, Oscar, Jose Rafael, Eylliana, Andrea, Vicky y muchos otros, por ser parte de mi vida y creer en mí. A Eduardo por compartir tantas dificultades y obstáculos ya superados.

A la Universidad Central de Venezuela forjadora de conocimientos y a todas las personas que he conocido a lo largo del tiempo, que de alguna manera han dejado una enseñanza.

**Antonio Di Girolamo**

A mi familia, a mi papá y a mi mamá por apoyarme y darme siempre todo lo mejor tanto en las buenas como en las malas. A mi Tía Zulema por siempre por ser tan atenta. A mi Tata, que siempre está pendiente de mi, incluso demasiado, pero gracias jaja. A mi hermano que aunque lo veo poco siempre me desea lo mejor. A los panas! Ricardo, Choco, Ana, Libia, Jorge, Gerardo, Nathalie, Luis R, Cinthia, Albex y muchos más, que sin ellos esta experiencia no hubiese sido posible.

**Eduardo Lujan**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por habernos permitido alcanzar esta meta y porque gracias a él todo es posible.

A nuestra Alma Mater, la Universidad Central de Venezuela, por habernos acogido durante todos estos años de estudio, llenándonos de experiencias inolvidables que nos convirtieron en mejores personas y nos permitirán ser excelentes profesionales.

A nuestra tutora y amiga Angie Prato, por haber creído en nosotras y ser nuestra guía y apoyo para sacar adelante este trabajo.

Al Prof. Andrea Scagni, que con su experiencia y carisma nos ayudó en la realización de este proyecto.

A Crisanto, porque más que un profesor es un amigo, que de manera incondicional siempre nos apoyó, guió y aconsejó durante todos estos años.

A Jubenal por ayudarnos en múltiples ocasiones con los problemas eléctricos de la máquina Falex.

Al personal de Plasmatec Ingenieros, por su colaboración y espíritu de trabajo: Sr. Alejandro, Guillermo, Johan, Carmen, Yorli, Jenny y a todos los que hicieron que nuestro trabajo en la empresa fuera un tarea más sencilla.

Al personal del IUT, por la disposición y colaboración brindada en la etapa de realización de las pruebas metalográficas.

A Domingo por echarnos una mano en la fase final de proyecto.

**Di Girolamo R., Antonio, Luján F., Eduardo E.**

**“INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE ROCIADO  
SOBRE LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE  
RECUBRIMIENTOS DEPOSITADOS POR PROYECCIÓN  
TÉRMICA”**

**Tutor Académico: Prof. María Rodríguez de Prato. Tesis. Caracas, U.C.V.  
Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Año 2009.**

**Palabras Claves:** Rociado Térmico Por Plasma, Ensayo Falex Block on Ring, Recubrimiento Mo Base Hierro, Desgaste por Deslizamiento, Fricción, Diseño Experimental Factorial, Optimización.

La resistencia al desgaste de un recubrimiento depositado mediante la técnica de rociado térmico por plasma está íntimamente relacionada con la determinación de los parámetros óptimos de rociado. Este estudio tiene como objetivo analizar a través de un diseño experimental factorial  $3^3$ , como la tasa de alimentación, el voltaje y el amperaje influyen sobre la resistencia al desgaste por deslizamiento de un recubrimiento metálico (Fe-Mo) depositado por la técnica de rociado térmico por plasma. Los ensayos fueron realizados siguiendo la norma ASTM G77-83 la cual establece una configuración geométrica bloque sobre anillo (“Block on Ring”) en ausencia de lubricante. El par tribológico utilizado fueron bloques de acero AISI 1020 rociados por plasma con una aleación de acero alto carbono con molibdeno. Un acero AISI 1045 fue utilizado en la fabricación de los anillos. La carga normal aplicada fue de 4,21 MPa (17,5 lb) y la velocidad de deslizamiento fue de 0,3 m/seg. La distancia de deslizamiento se mantuvo constante en 550 m. Se realizó un análisis de varianza para medir el nivel de significación de los parámetros en estudio y obtener a través del método de superficie de respuesta y gráficas de contorno las variables más significativas. Los ensayos realizados arrojaron como resultado que una tasa de alimentación comprendida entre 6 – 6,75 lb/h, un amperaje entre 725 – 825 A y un voltaje entre 36,5 – 37 V, fueron los parámetros que produjeron los mejores resultados frente al desgaste por deslizamiento. Los análisis realizados sobre la superficie de desgaste mediante microscopía electrónica de barrido, en las condiciones que arrojaron los peores y mejores resultados, así como la recomendada por el fabricante evidenciaron que el principal mecanismo de desgaste para la mejor condición fue el mecanismo de fractura de partículas endurecidas debido a la acción de la carga y para la condición mas desfavorable fue el desprendimiento de partículas, lo cual fue atribuido a una pobre cohesión del recubrimiento.

**Di Girolamo R., Antonio, Luján F., Eduardo E.**

**“INFLUENCE OF THE DEPOSITION PARAMETAMETERS  
ON THE SLIDING WEAR RESISTANCE FOR  
PLASMA SPRAYED COATINGS”**

**Academic Tutor: Prof. María Rodríguez de Prato. Tesis. Caracas, U.C.V.  
Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Year 2009.**

**Key Words:** Plasma Sprayed Coatings, Falex Block on Ring Test, Mo coatings, Sliding Wear, Friction, Factorial Experimental Design, Optimization.

The wear resistance of a plasma sprayed coating is directly related to the finding of the proper deposition parameters. The main goal of this study is to find via a factorial design  $3^3$ , how the powder feed speed, the voltage and the amperage affect the sliding wear resistance of a metallic coating (Fe-Mo) sprayed by atmospheric plasma method. The tests were carried out following the ASTM G77 – 83 standards, in which the geometrical distribution is Block on Ring. The tests were carried out without the presence of lubricants. The Blocks were made from AISI 1020 steel and then sprayed with a plasma gun with the metallic powder last mentioned, the Rings acting as counter bodies were made of AISI 1045 steel. The normal load was 4.21 MPa (17.5 lb) and the sliding velocity was 0.3 m/s, the sliding distance of the test was 550m. An analysis of variance (ANOVA) was carried out to determine the level of significance of the parameter in study, surface plots were also used to aid in this quest. The results showed that for a powder feed speed of 6 – 6.75 lb/h, a amperage of 725 – 825 A and a voltage of 36.5 – 37 V, the wear resistance of the coatings showed the best results. An X-Ray diffraction study was carried out for the deposition conditions how showed the worst and the best results in the tests, the condition with the parameters suggested by the powder manufacturer was also analyzed with this tool. The principal wear mechanism for the best coatings were the fracture of hardened oxides, product of the high loads and temperatures. The condition with the worst deposition parameters showed that the wear mechanism was the detachment of particles how possessed bad cohesion.

# ÍNDICE GENERAL

## ÍNDICE GENERAL

<i>Índice de Figuras</i> -----	xiv
<i>Índice de Tablas</i> -----	xviii
<b>INTRODUCCIÓN</b> -----	2
<b>CAPÍTULO I. Planteamiento del Problema</b> -----	5
1.1 Motivación y Planteamiento del Problema-----	5
1.2 Objetivos-----	7
<i>1.2.1 Objetivo General</i> -----	7
<i>1.2.2 Objetivos Específicos</i> -----	7
1.3 Alcances -----	8
1.4 Tema y Antecedentes -----	9
<b>CAPÍTULO II. Marco Teórico</b> -----	14
2.1 Tribología: Fricción, Desgaste y Lubricación-----	14
2.2 Fricción-----	15
<i>2.2.1 Influencia de variables en el coeficiente de fricción</i> -----	16
2.3 Desgaste-----	18
2.4 Tipos de Desgaste-----	19
<i>2.4.1 Desgaste Adhesivo</i> -----	19
<i>2.4.2 Desgaste Corrosivo</i> -----	21
<i>2.4.3 Desgaste Erosivo</i> -----	22

---

---

2.4.4 <i>Desgaste Abrasivo</i> -----	23
2.5 <i>Lubricación</i> -----	24
2.6 <i>Lubricantes Líquidos</i> -----	25
2.7 <i>Tipos de Lubricación</i> -----	25
2.7.1 <i>Lubricación Hidrodinámica</i> -----	25
2.7.2 <i>Lubricación Hidrostática</i> -----	26
2.7.3 <i>Lubricación Elastohidrodinámica</i> -----	27
2.7.4 <i>Lubricación Límite</i> -----	28
2.8 <i>Rociado Térmico</i> -----	29
2.9 <i>Tipos de Rociado Térmico</i> -----	31
2.9.1 <i>Rociado Térmico por Llama Oxiacetilénica</i> -----	31
2.9.2 <i>Rociado Térmico por Detonación</i> -----	32
2.9.3 <i>Rociado Térmico por HVOF</i> -----	33
2.9.4 <i>Rociado Térmico por Arco Eléctrico</i> -----	34
2.10 <i>Termorociado por Plasma</i> -----	35
2.10.1 <i>Requerimientos y parámetros para el</i> ----- <i>termorociado por plasma</i>	37
2.10.2 <i>Selección del Gas de Plasma</i> -----	39
2.10.3 <i>Flujo del Gas de Plasma</i> -----	39
2.10.4 <i>Voltaje</i> -----	40
2.10.5 <i>Amperaje</i> -----	40



---

---

3.6 Ensayo de Dureza-----	66
<b>CAPÍTULO IV. Resultados y Análisis-----</b>	<b>69</b>
4.1 Ensayo de Desgaste por Deslizamiento-----	70
4.2 Anova y Método de Superficie de Respuesta-----	75
4.2.1 Pérdida Volumétrica del Bloque-----	75
4.2.2 Superficie de Respuesta para Pérdida Volumétrica del bloque-----	79
4.2.3 Superficie de Respuesta para Pérdida de peso del bloque -----	82
4.3 Dureza-----	84
4.4 Microscopía Electrónica de Barrido-----	86
4.4.1 Microestructura y Composición Química Elemental (EDS)-----	86
4.4.2 Superficie de Desgaste-----	91
<b>CONCLUSIONES-----</b>	<b>100</b>
<b>RECOMENDACIONES-----</b>	<b>103</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS-----</b>	<b>106</b>
<b>ANEXOS-----</b>	<b>112</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

**ÍNDICE DE FIGURAS**

<b>Figura 2.1</b>	Fricción Estática	16
<b>Figura 2.2</b>	Fricción Dinámica	16
<b>Figura 2.3</b>	Reducción de fricción en altas velocidades de deslizamiento en sólidos cristalinos	17
<b>Figura 2.4</b>	Influencia de la presión de contacto en el Coeficiente de Fricción	18
<b>Figura 2.5</b>	Desgaste por adhesión	20
<b>Figura 2.6</b>	Desgaste por erosión	22
<b>Figura 2.7</b>	Desgaste de dos cuerpos y desgaste de tres cuerpos	23
<b>Figura 2.8</b>	Lubricación Hidrodinámica en cuñas	26
<b>Figura 2.9</b>	Lubricación Hidrostática	27
<b>Figura 2.10</b>	Lubricación Elastohidrodinámica	28
<b>Figura 2.11</b>	Lubricación Límite	29
<b>Figura 2.12</b>	Proceso de termo-rociado	30
<b>Figura 2.13</b>	Termo-rociado por llama oxiacetilénica	32
<b>Figura 2.14</b>	Termorociado por detonación	33
<b>Figura 2.15</b>	Termorociado por HVOF	34
<b>Figura 2.16</b>	Termorociado de alambre por arco eléctrico	35
<b>Figura 2.17</b>	Termorociado eléctrico por plasma	36

<b>Figura 2.18</b>	Superficie de Respuesta y Gráfica de contornos	50
<b>Figura 3.1</b>	A) Diseño de bloques y B) Diseño de anillos en software “Solid Works”	55
<b>Figura 3.2</b>	Figura 3.2 A) Rociado por plasma y B) Fresadora	57
<b>Figura 3.3</b>	Figura 3.2 A) Rociado por plasma y B) Fresadora	58
<b>Figura 3.4</b>	Pistola de rociado por plasma Praxair	58
<b>Figura 3.5</b>	Huella Característica según norma G 77 - 88	61
<b>Figura 3.6</b>	Balanza Análítica Marca Scientech	64
<b>Figura 3.7</b>	A) Equipo de plato giratorio y B) Cortador abrasivo	65
<b>Figura 3.8</b>	Equipo de microscopía electrónica de barrido	66
<b>Figura 3.9</b>	Indentador Future-Tech Corp FV-700	67
<b>Figura 3.10</b>	Geometría del indentador y huella arrojada por el mismo	67
<b>Figura 4.1</b>	Pérdidas del bloque y del anillo	74
<b>Figura 4.2</b>	Efectos principales para Pérdida Volumétrica del bloque vs A) Tasa de alimentación B) Amperaje y C) Voltaje	78
<b>Figura 4.3</b>	Superficie de respuesta para interacción Tasa de alimentación * Amperaje	80
<b>Figura 4.4</b>	Gráfico de contorno para interacción Tasa de alimentación * Amperaje	80
<b>Figura 4.5</b>	Superficie de respuesta para interacción Voltaje*Amperaje	81
<b>Figura 4.6</b>	Gráfico de contorno para interacción Voltaje*Amperaje	81

<b>Figura 4.7</b>	Superficie de respuesta para interacción Tasa de alimentación * Amperaje	83
<b>Figura 4.8</b>	Gráfico de Durezas de las condiciones n° 14, n° 8 y n° 1	85
<b>Figura 4.9</b>	Microscopía de las condiciones A) n° 8; B) n° 14; C) n° 1 en modo de electrones retrodispersados con magnificación de 200x	88
<b>Figura 4.10</b>	Fotomicrografía de la condición n° 1, la cual muestra un análisis por EDS realizado a dos fases observadas en el recubrimiento.	89
<b>Figura 4.11</b>	Fotomicrografía de la condición N° 5 con análisis por EDS realizado a las fases observadas en este recubrimiento	90
<b>Figura 4.12</b>	Microscopía de la zona de desgaste A) n° 8; B) n° 14; C) n° 1 en modo de electrones secundarios (SE) con magnificación de 50x	91
<b>Figura 4.13</b>	Micrografía de la condición n° 1 con magnificación de 500x donde A) Análisis EDS y B) Micrografía en modalidad de electrones secundarios (SE)	93
<b>Figura 4.14</b>	Microscopía de la zona de desgaste para la condición n° 8 con magnificación de 1000x en la modalidad de A) Electrones secundarios (SE) y B) Electrones primarios (BSE).	94
<b>Figura 4.15</b>	Micrografía de la condición n° 8 con análisis EDS y magnificación de 3000x en la modalidad de electrones primarios	95
<b>Figura 4.16</b>	Micrografía de la condición n°8 con magnificación de 500x donde A) Análisis EDS y B) Micrografía en modalidad de electrones secundarios (SE)	95

<b>Figura 4.17</b>	Micrografía de la condición nº 14 con magnificación de 500x en la modalidad de A) Electrones Secundarios (SE) y B) Electrones primarios (BSE)	96
<b>Figura 4.18</b>	Micrografía de la condición nº 14 con análisis EDS y magnificación de 2000x en la forma de electrones primarios.	97

## ÍNDICE DE TABLAS

**ÍNDICE DE TABLAS**

<b>Tabla 2.1</b>	Comparación de los proceso de termo-rociado	37
<b>Tabla 2.2</b>	Cálculos necesarios para Análisis de Varianza	48
<b>Tabla 3.1</b>	Distribución para el diseño factorial $3^3$	53
<b>Tabla 3.2</b>	Tratamientos para el diseño factorial $3^3$	54
<b>Tabla 3.3</b>	Composición química del acero AISI 1045	60
<b>Tabla 3.4</b>	Parámetros Fijos para el Ensayo Bloque sobre Anillo	63
<b>Tabla 3.5</b>	Tabla de mediciones de la fuerza de roce	63
<b>Tabla 4.1</b>	Resultados del ensayo de desgaste por deslizamiento	71
<b>Tabla 4.2</b>	Resultados de la tabla ANOVA para Pérdida Volumétrica del bloque	75
<b>Tabla 4.3</b>	Valores óptimos de los parámetros evaluados para Pérdidas Volumétricas	82
<b>Tabla 4.4</b>	Valores óptimos de los parámetros evaluados para Pérdida de peso en el bloque	83
<b>Tabla 4.5</b>	Ensayos de Dureza de las condiciones n° 14, n° 8 y n° 1	84

# INTRODUCCIÓN

## INTRODUCCIÓN

Las tecnologías de recubrimiento de superficies han experimentando un crecimiento significativo durante los últimos años debido a la gran cantidad de aplicaciones que surgen cada día en todo tipo de entornos industriales (Vázquez, Damborenea, 2001). Destacan entre ellas los sistemas de proyección (rociado) térmica, las cuales se basan en la utilización de energía térmica y cinética para que ocurra la proyección y deposición de una capa de material de aporte sobre una superficie dada, mejorando sus propiedades superficiales como la resistencia al desgaste y dureza, entre otras.

Las técnicas de rociado térmico utilizan varios sistemas para brindar la energía necesaria para el proceso, pudiendo ser por combustible, plasma ó arco eléctrico. Dentro de cada uno de estos procesos existen muchas variables que afectan la calidad y el rendimiento a la hora de la deposición, por lo que sólo fijaremos nuestra atención en aquellos que utilizan plasma como fuente de energía térmica.

La técnica de rociado térmico por plasma utiliza corriente DC para producir un flujo continuo de gas de plasma ionizado el cual puede alcanzar temperaturas entre los 7.000 K y 20.000 K, muy por encima del punto de fusión de los polvos de alimentación. El arco eléctrico es producido por dos electrodos no consumibles, siendo uno de tungsteno (cátodo) y el otro de cobre (ánodo). Un suministro continuo de gas a alta velocidad pasa a través del arco eléctrico y se ioniza, es luego este gas ionizado el que suministra el calor necesario para fundir los polvos y proyectarlos a gran velocidad en la superficie. Los gases más comunes son el Argón, Helio, Nitrógeno e Hidrógeno, o la combinación de

dos o más de ellos. Los gases y sus combinaciones juegan un papel importante en variables como: la cantidad de calor que se le suministra al proceso, estabilidad del plasma y agresividad contra la boquilla de la pistola.

El rociado térmico por plasma produce recubrimientos de alta calidad por medio de una combinación de características como la capacidad de alcanzar altas temperaturas, una fuente de energía térmica elevada, la utilización de gases inertes que no alteran la composición de los polvos y la capacidad de trabajar con medias y altas velocidades de partículas, típicamente 200-300 m/seg. Todas estas características hacen que el rociado térmico por plasma se destaque entre las tecnologías de recubrimiento de superficies.

# CAPÍTULO I

## *Planteamiento del Problema*

## **1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1 Motivación y Planteamiento del Problema**

Uno de los factores que genera mayores pérdidas en la industria es el fenómeno de desgaste, aunque se invierte mucho dinero y esfuerzo en nuevas tecnologías que minimizan este fenómeno, resulta prácticamente imposible eliminarlo. Es por esto que tarde o temprano, todo elemento de máquina induce a la realización de paradas ya sea por mantenimiento o reconstrucción, lo cual trae consigo muchos gastos operativos. Lo anteriormente expuesto ha otorgado a la ingeniería de superficies un gran atractivo, ya que no sólo recupera la pieza para restaurarla a sus medidas iniciales, sino que es capaz de mejorar sus propiedades en términos de vida útil y eficiencia en el ahorro de energía.

Debido al gran crecimiento que han tenido las tecnologías de los recubrimientos, existen hoy en día una gran variedad de industrias que se dedican a la producción de sistemas de deposición por plasma y de suplir la materia prima requerida. Este método de deposición posee un gran número de parámetros que influyen significativamente sobre la calidad de los recubrimientos, entre los cuales podemos mencionar: el amperaje, el voltaje, la velocidad de alimentación de los polvos y el tipo de gas, entre otros. Existen otras variables a las que nos podemos referir que también afectan el proceso de deposición, entre las cuales están: el modelo de la pistola y sus componentes, gases disponibles y el grado de pureza, composición química de los polvos (material de aporte), preparación de la superficie, entre otras que aunque permanecen constantes en el proceso, también deben tomarse en cuenta a la hora de realizar un análisis de caracterización.

Los equipos de rociado térmico son fabricados por diversas industrias lo cual hace frecuente que, producto de aminorar costo o disponibilidad, estén compuestos por elementos de una línea, serie o incluso marcas distintas (equipos híbridos). Debido a esta diversidad de dispositivos, los recubrimientos no tienen la calidad que indican los fabricantes de los polvos cuando éstos son depositados bajo los parámetros que ellos sugieren. A fin de determinar las variables óptimas de deposición es necesario poner a punto el proceso, para lo cual se seleccionan aquellos parámetros más influyentes y luego se procede a la optimización.

Los recubrimientos base hierro-molibdeno depositados por rociado térmico por plasma, son ampliamente utilizados en la industria para recuperar piezas tales como cojinetes de deslizamiento hidrodinámicos, cigüeñales de motores de combustión interna (específicamente en motores diesel de escala industrial), entre otros, la empresa Plasmatec Ingenieros C.A. decidió optimizar las variables que influyen en la aplicación de dicho recubrimiento, para disminuir los costos de producción y al mismo tiempo aumentar la calidad de la superficie. Debido a que estos recubrimientos tienen como función principal resistir el desgaste por deslizamiento, y poseer una dureza superficial relativamente alta la optimización se realizará en base a los resultados de los ensayos respectivos tomando como estándar los parámetros recomendados por el fabricante de los polvos.

Aunque los parámetros que afectan el proceso de rociado térmico por plasma son numerosos inicialmente se deben seleccionar los más influyentes de tal forma que sean variados y optimizados, así como fijar cuales se mantendrán constantes. Una vez encontrados dichos parámetros a optimizar, pasamos a la fase de caracterización del recubrimiento por medio de herramientas

estadísticas, las cuales nos permitirán determinar cuáles son las mejores condiciones de deposición.

En Venezuela, como en cualquier país industrializado, el mantenimiento de equipos es fundamental para el desarrollo. Es por esto que las tecnologías de recubrimientos juegan un papel cada vez mas importante en la industria, brindando soluciones accesibles al problema del desgaste de partes o piezas mecánicas.

## **1.2 Objetivos**

### *1.2.1 Objetivo General*

Determinar los parámetros óptimos de rociado para la aplicación de un recubrimiento base hierro-molibdeno depositado mediante el proceso de rociado térmico por plasma.

### *1.2.2 Objetivos Específicos*

- Determinar las variables del proceso a ser optimizadas.
- Utilizar un diseño factorial  $3^3$  para determinar las condiciones experimentales de rociado
- Evaluar la resistencia al desgaste por deslizamiento.
- Determinar los valores óptimos de las variables seleccionadas para el proceso de rociado térmico por plasma en función de la resistencia al desgaste obtenidas en los recubrimientos.

- Evaluar la dureza mediante indentación Vickers en los recubrimientos que presentaron la respuesta más favorable y desfavorable en el ensayo de desgaste por deslizamiento y compararla con la obtenida en la condición dada por el fabricante de los polvos.
- Determinar los mecanismos de desgaste presentes en la superficie del material ensayado para las mejores y peores condiciones del ensayo de deslizamiento.
- 

### **1.3 Alcances**

- Estudio preliminar para determinar los parámetros de partida de las variables a optimizar.
- Utilizar un diseño experimental factorial  $3^3$  para depositar los recubrimientos, del cual resultan 27 condiciones. Por cada condición se realizarán dos ensayos o réplicas y un tercer bloque de cada condición será utilizado para la realización de los ensayos de dureza y microscopía electrónica. Esto da como resultado 81 bloques a rociar y 54 anillos
- Evaluar la resistencia al desgaste por deslizamiento a través del volumen desgastado y determinar cómo varía el coeficiente de fricción dinámico para varios valores de distancia recorrida a través de la celda de carga presente en la máquina de ensayos.
- Realizar ensayos de microindentación estática Vickers a varias cargas para evaluar la dureza del recubrimiento.
- Determinar, a través de microscopía electrónica de barrido, los mecanismos de falla por desgaste.

- Evaluar la microestructura y porosidad de los recubrimientos que hayan obtenido las condiciones más favorables y desfavorables en el ensayo de desgaste mediante técnicas de microscopía electrónica
- Determinar los parámetros óptimos de deposición del proceso utilizando un análisis de varianza (ANOVA) y un software estadístico (Minitab).

#### **1.4 Tema y Antecedentes**

Para la realización de este trabajo de investigación se ha recurrido a los resultados obtenidos en diversos proyectos de investigación, que previamente han sido estudiados y aprobados tanto nacional como internacionalmente, enfocados al estudio del comportamiento de los materiales, procedimientos realizados, experiencias y ensayos ya normalizados con tecnología de punta en condiciones controladas. Varios autores han estudiado la influencia de los parámetros de rociado en las propiedades y desempeño de los recubrimientos, con respecto a esto se cita un trabajo de investigación realizado por Colmenares (2004), en la cual realizó una optimización de los recubrimientos depositados por rociado por combustión a alta velocidad (HVOF) y otros depositados por arco eléctrico para la aleación Super High Steel 717 utilizando para ello un diseño experimental factorial  $3^2$ , ambos utilizados en aplicaciones donde se produce desgaste por abrasión. Los parámetros seleccionados fueron la velocidad de alimentación del material para el rociado por HVOF, y el amperaje y la presión de aire para el rociado por arco eléctrico. Por medio de un análisis de varianza (ANOVA) este investigador determinó aquellos parámetros que resultaron estadísticamente más significativos, Además reportó que no existe una relación entre la dureza del recubrimiento y su respuesta ante el desgaste por abrasión.

De igual manera, Capote y Perdomo (2006) se plantearon como objetivo optimizar los parámetros de aplicación de un recubrimiento de carburo de tungsteno con cobalto (WC-Co) por la técnica de rociado térmico por plasma para lo cual seleccionaron el Voltaje, Amperaje y Velocidad de Alimentación de los Polvos como los parámetros que más influencia ejercían sobre ese proceso, utilizando un diseño experimental factorial  $3^3$ . Las muestras fueron sometidas a ensayos de desgaste por abrasión y dureza obtenida por indentación Vickers. Por medio de un análisis de varianza (ANOVA) se obtuvieron los valores optimizados de los parámetros en estudio con respecto a los valores dados por el fabricante. Los recubrimientos que presentaron las respuestas más favorables y menos favorables obtenidas en el ensayo de abrasión y dureza, se caracterizaron mediante microscopía electrónica de barrido. Estos autores concluyeron que no había relación directa entre la dureza del material y su comportamiento frente al ensayo de abrasión.

En la investigación realizada por Uyulgan, Centinel, Ozdemir, Tekmen, Okumus, & Celik (2003) se analiza la resistencia al desgaste deslizante (pin on plate) de un recubrimiento base molibdeno depositado sobre fundición a través del proceso de deposición por plasma. En dicho análisis se determinó que la presencia de ácido durante el ensayo induce poca influencia sobre la resistencia al desgaste, sin embargo la variación de la carga resultó ser un parámetro de mayor importancia. En este estudio se reportó como mecanismos de desgaste principales endurecimiento por deformación, formación de grietas superficiales y líneas de arrastre, entre otras.

La influencia de la velocidad de proyección de polvos de molibdeno (Mo-13.4Si-2.6B) para el proceso de rociado térmico por plasma fue evaluada por Totemeier, Wright y Swank (2004) a través de difracción por rayos x, donde determinaron que para los valores bajos de velocidad (180m/s) se presentaba

una formación significativa de óxido, observándose la conversión de la fase T1 a una fase amorfa de sílica y  $\alpha$ -Mo. Para los valores altos de velocidad (350m/s) la fase T1 permaneció inalterada, manteniendo la composición deseada.

El equipo marca Falex para ensayos de tipo bloque sobre anillo utilizado en este trabajo de grado fue reacondicionado y utilizado a su vez por los Brs. De Santa Anna y Scagni (2007) en su trabajo de ascenso, a través del cual buscaron simular las condiciones de desgaste presentes en anillos de compresores de gas. Se llevó a cabo un análisis comparativo entre fundición gris (material original de las camisas) y un recubrimiento base molibdeno depositado por plasma, utilizando como contraparte distintos polímeros. Se determinó que los recubrimientos base Mo mejoraban en un 40% la resistencia al desgaste deslizante, siendo el Teflón la mejor contraparte. Todos los ensayos fueron realizados con la presencia de lubricantes.

En otro trabajo de investigación realizado por Conde y Dávila (2007), se determinaron las condiciones óptimas de aplicación de un recubrimiento base molibdeno-níquel depositado mediante el proceso de rociado térmico por plasma, basándose en la caracterización de los depósitos obtenidos y utilizando un diseño experimental factorial  $3^3$ , la respuesta medida fue la resistencia a la abrasión. Los polvos de alimentación fueron rociados variando tres de los parámetros operacionales del proceso como lo son el voltaje, el amperaje y la tasa de alimentación de los polvos. Se realizaron ensayos de abrasión para las distintas combinaciones de parámetros, así como ensayos de microindetación estática para evaluar la dureza promedio de los recubrimientos. Se evaluaron los depósitos y las superficies de desgaste mediante microscopía electrónica de barrido, tanto para la mejor como para la peor condición arrojadas por los ensayos de abrasión y se compararon con los recubrimientos rociados con los parámetros recomendados por el fabricante. Los parámetros optimizados

lograron disminuir un 19.9% el desgaste por abrasión comparado con el desgaste obtenido en la condición depositada con los parámetros recomendados por el fabricante.

En un estudio realizado por Karamis, Yildizli y Akirer (2004) se logra simular el comportamiento de anillos de motores dos-tiempos a través de un ensayo de desgaste por deslizamiento. Los anillos son generalmente de AISI 440, que luego son recubiertos por una aleación Al-Mo-Ni a través del proceso de deposición por plasma, siendo este el material a analizar. La contraparte utilizada es fundición gris (material original de la camisa del pistón). Los ensayos se llevaron a cabo tanto en condiciones lubricadas como secas, observándose que para la última el desgaste era casi 10 veces mayor

## CAPÍTULO II

### *Marco Teórico*

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Tribología: Fricción, Desgaste y Lubricación**

El término de tribología es relativamente nuevo y está generalmente relacionado a la fricción, desgaste y lubricación que se da entre piezas móviles mecánicas. Según (Wakelin, 1974) el nombre proviene de la raíz griega “tribos” que ajustado a su fiel traducción define tribología como el estudio del roce, pero de forma más precisa puntualiza que es “la ciencia y tecnología de superficies que interactúan en movimiento relativo y su relación con la práctica”, aunque actualmente es un tema multidisciplinario sujeto a las contribuciones de ingenieros, químicos, físicos, metalúrgicos, matemáticos y tecnologías de lubricación. Generalmente se ha tomado más en cuenta la tribología en los últimos 100 años por la revolución industrial, sin embargo el mayor interés surgió en el Reino Unido (Op. Cit.), como resultado del estudio económico en 1966 donde concluyeron que anualmente 500, 000,000 Libras Esterlinas pudieron ser ahorradas, producto del desgaste de sus piezas, si la industria Británica realizaba un correcto uso del conocimiento tribológico que existía. Así mismo en Estados Unidos en 1978, se estimó (Martínez, 2002) que el gasto de energía por fricción y desgaste equivalía a la utilizada para mantener la ciudad de New York durante un año, además aportaron que en “la industria de construcción de maquinaria se estima que, entre el desgaste y la fatiga se produce el 95 % de las causas de salida de servicio de los elementos de máquina”.

Definitivamente la tribología como tal es una ciencia nueva que actualmente cuenta con muchos ramales en varias tecnologías aplicadas y que comprende temas como la fricción el desgaste, la lubricación, diseño, mantenimiento, entre

otros, es por ello que es considerada una ciencia multidisciplinar (Tormos, 2005).

## 2.2 Fricción

También llamado rozamiento, la fricción se define como la fuerza que se opone al deslizamiento, causado por la resistencia mecánica entre los cuerpos y está relacionado en términos de un coeficiente (dinámico o estático) específico para cada material (Ludema, 1996). Remitiéndonos a la historia Leonardo Da Vinci tenía su opinión de la fricción y decía que la fuerza de fricción era proporcional al peso  $F \propto W$  (Op. Cit.). Posteriormente Amontons, un arquitecto francés graduado luego de ingeniero, logró deducir de acuerdo a los resultados de su investigación que  $F \approx W/3$  y que la fuerza era independiente de los cuerpos en movimiento. Los materiales sometidos a pruebas por Amontons fueron cobre, hierro, plomo y madera en diferentes combinaciones pero lo más importante de su investigación es que las superficies de su investigación fueron cubiertas con grasa de cerdo. Las leyes que en su momento anunció Amontons se conocen actualmente como las leyes de la fricción “seca” y de hecho, en su momento “Amontons estaba estudiando las características de fricción de superficies bajo lubricación que serían actualmente descritas como lubricación límite”.

Existen dos tipos de fricción, la fricción estática (Figura 2.1) y la fricción dinámica (Figura 2.2). La estática se refiere a la fuerza existente que se opone al inicio del movimiento de una superficie sobre la otra, y la dinámica que es una fuerza de magnitud constante que se opone al movimiento cuando ya éste empezó, es decir la fricción estática se da en cuerpos en reposo y la fricción dinámica se da en cuerpos en movimiento.

Generalmente como tipo de fricción, se entiende una clasificación del roce según la forma del movimiento o la disposición de los componentes sometidos a fricción. En base a esto generalmente se clasifica de la siguiente manera:

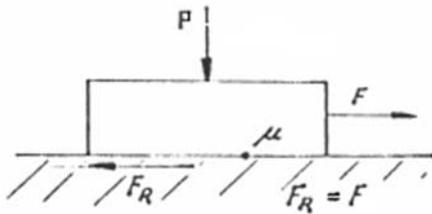


Figura 2.1

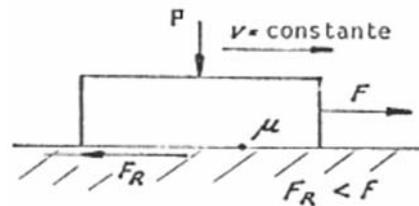


Figura 2.2

- Fricción por Deslizamiento: es la fricción dinámica existente entre cuerpos que deslizan entre sí, como por ejemplos los discos de frenos, cojinetes lisos, pistón en el cilindro, etc.
- Fricción por Rodamiento: es el roce que se da en los cuerpos que ruedan en movimiento por rotación sobre una superficie, éstos tiene teóricamente contacto en forma de punto o línea. (Contacto de punto: esfera; Contacto de línea: cilindro) Las fuerzas tangenciales producen una deformación elástica en el punto de contacto.
- Fricción Mixta: éste es un caso especial de la fricción por rodamiento donde también existe fricción por deslizamiento, se da generalmente en los rodamientos y engranajes.

### 2.2.1 Influencia de variables en el coeficiente de fricción

Debido a los diversos parámetros de operación a los cuales están sometidos los sistemas en fricción, Ludema (1996) puntualizó diversas variables y sus efectos generados:

- Velocidad de deslizamiento: el comportamiento de la mayoría de los metales y los sólidos cristalinos se representan en la Figura 2.3, cuando se tienen muy altas velocidades de deslizamiento (mayores a 2500 cm/s) se producen menores coeficientes de fricción.

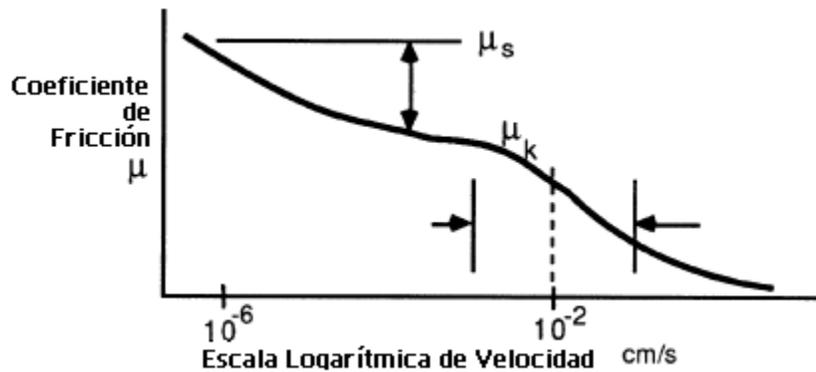


Figura 2.3 Reducción de fricción en altas velocidades de deslizamiento en sólidos cristalinos (Tomada del Friction, Wear and Lubrication)

- Temperatura: usualmente las bajas temperaturas no representan un gran efecto de variación del coeficiente de fricción del metal, hasta que estas se incrementan de forma significativa aumentando a su vez la tasa de oxidación que es la que realmente modifica el  $\mu$ . Un incremento de la temperatura disminuirá la velocidad de deslizamiento (lo cual ocasiona que las superficies se suelden) y cambia la curva de la Figura 2.3 de coeficiente de fricción versus velocidad de deslizamiento.

- Arranque Inicial: rápidos inicios del movimiento generalmente derivan en producir bajos coeficientes de fricción inicial. En muchos casos el coeficiente de fricción puede a su vez depender de los efectos dinámicos del sistema que soporta el sistema sometido a deslizamiento.

- Carga Aplicada o presión de contacto: el coeficiente de fricción se reporta como un rango producto de la carga aplicada. Existen ciertos principios tales como el mostrado en la Figura 2.4, caso “a” donde el coeficiente de fricción normalmente disminuye cuando la carga aplicada aumenta. Para superficies ideales limpias, los valores de  $\mu$  en “a” generalmente exceden de 2 y son reportados como cargas bajas que luego disminuyen hasta 0.5 en cargas mayores. En el caso “b” cuando se tienen altos promedios en la presión de contacto generalmente se tiene un  $\mu \approx \frac{1}{2}$ . Cuando la superficie se limpia de óxidos se puede exponer el substrato del material incrementando la adhesión de la superficie y a su vez el coeficiente de roce como en el caso “c”. Hay que también señalar que algunos óxidos se vuelven dúctiles sometidos a esfuerzos de compresión en la superficie de contacto entre los metales, si éstos óxidos son blandos pueden actuar a su vez como lubricantes pero si son duros lógicamente aumentan la fricción hasta en un 50 % o más.

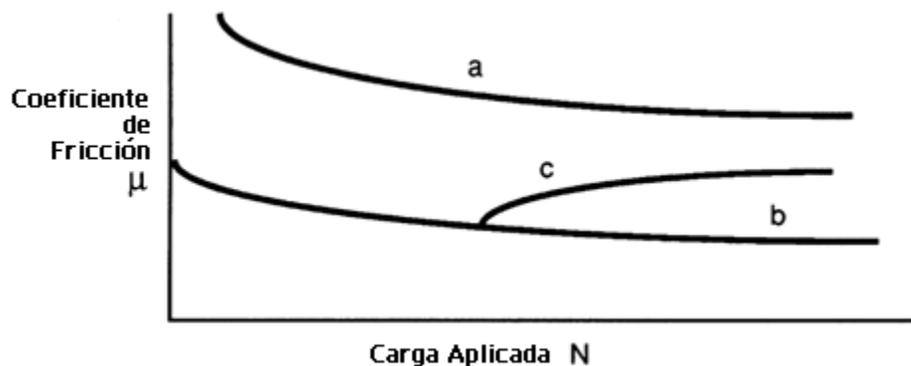


Figura 2.4 Influencia de la presión de contacto en el Coeficiente de Fricción

### 2.3 Desgaste

“El desgaste se define como el proceso desprendimiento de material de una superficie” (Holmberg et. Al., 2007), la principal diferencia con la fricción es

que no ocurre en un momento determinado, pero si en largos períodos de tiempo cuando las superficies se mantienen en contacto y en movimiento relativo. Usualmente las superficies se desgastan por uno o más procesos que ocurren simultáneamente (Ludema, 1996). El desgaste de los materiales es el resultado final que existe de procesos mecánicos, fenómenos físicos y químicos. Según Zmitrowicz (2006) aunque muchos tipos de desgaste han sido estudiados tales como abrasivo, adhesivo, fatiga, erosión, corrosión, vibración, entre otros, no se puede decir que el desgaste es un proceso mecánico ya que si fuese así, los procesos de corrosión, oxidación, fretting y otros procesos químicos serían la excepción de esta regla. Estimó que el tipo de desgaste que ocurre en mayor medida es el de abrasión 80 – 90% seguido por el de fatiga 8%, en el cual es muy pequeña la presencia de otros tipos de desgaste. Otros autores como Holmberg et. Al. (2007), consideran únicamente el desgaste por adhesión, abrasión y fatiga como determinante en su estudio. La American Society of Metals (ASM, 1992) describe una clasificación amplia de desgaste pero al fin y al cabo se pueden resumir en abrasivo, adhesivo, corrosivo, erosivo y por contacto de rodamientos que son los que ocurren más frecuentemente en elementos de máquinas.

## **2.4 Tipos de Desgaste**

### *2.4.1 Desgaste Adhesivo*

El desgaste adhesivo usualmente se le conoce como frotamiento o rayado, y se refiere al desgaste producido entre dos superficies sólidas sometidas a estrecho contacto cuando producto del deslizamiento diversos fragmentos se remueven

desde una superficie y se adhieren a la otra. Las superficies lubricadas y con capas de óxidos tienen menor tendencia a que ocurra el desgaste por adhesión.

La adhesión, como tal, se da cuando las superficies metálicas tienden a adherirse producto de las altas cargas a la que están sometidas. Luego las fuerzas de deslizamiento en los puntos de contacto producen el desprendimiento de diversos fragmentos desde un metal a otro y a su vez producen deformaciones plásticas. Así mismo, muchos físicos explican que la razón principal de este tipo de desgaste es la tendencia natural de los metales a atraerse (Lipson, 1967), pero específicamente se refiere al exceso de electrones en una superficie y la carencia de electrones en los átomos de la superficie de contacto la que propicia éste fenómeno.

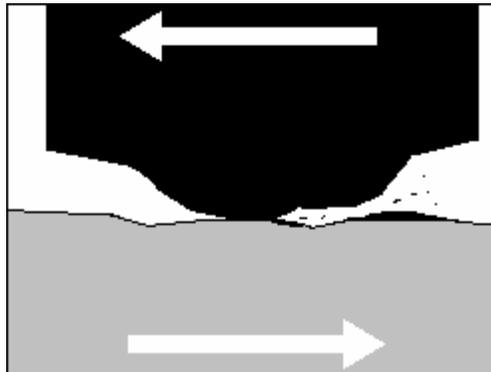


Figura 2.5 Desgaste por Adhesión

Según la ASM (1992) para prevenir el desgaste por adhesión existen ciertas recomendaciones como prevenir el uso de metales similares en contacto sometidos a deslizamiento, evitar el uso de metales de muy altas durezas contra metales durezas medianas ya que la superficie resultará dañada de forma considerable, lubricar las superficies y en algunos casos someter el sistema a

atmósferas de altas temperaturas, que provoque la formación de óxidos y actúe a su vez como antiadhesivo, aunque no en gran medida ya que produciría desgaste por corrosión.

#### *2.4.2 Desgaste Corrosivo*

El desgaste corrosivo es un proceso químico que está definido como la degradación de los materiales en la cual se dan los desgastes físicos comunes en presencia de ambientes corrosivos. La combinación de estos procesos puede resultar en grandes pérdidas de material que, en consecuencia provocarían resultados no obtenidos por un solo agente independientemente. Generalmente la corrosión es un acompañante fijo en el proceso de desgaste en todos los ambientes, salvo aquellos con atmósferas inertes o de vacío (ASM, 1992). La corrosión como tal es la reacción superficial de los electrones de la superficie de un metal con el medio que lo rodea o electrolito y su posterior formación de óxidos. Generalmente dicho deterioro de la superficie pasa a formar una capa dura, pero a su vez frágil, que puede ser removida fácilmente para luego dejar el material expuesto nuevamente al ambiente corrosivo. En algunos casos las partículas desprendidas desde la superficie pasan a formar parte del desgaste abrasivo de tres cuerpos.

El desgaste corrosivo puede minimizarse mediante el uso de materiales de operación acordes con considerables niveles de cromo y níquel, tratamientos superficiales y controlando el ph del sistema. Este tipo de desgaste es muy perjudicial para los metales ya que acelera el desgaste físico mediante procesos químicos, y está demostrado que tiene intrínseca relación con el desgaste por abrasión en medios húmedos o acuosos.

### 2.4.3 Desgaste Erosivo

El desgaste erosivo se refiere a la pérdida de material que resulta de impactos repetidos de partículas sólidas, líquidas o gaseosas contra una superficie. Cuando el ángulo de ataque es pequeño el desgaste producido tiende a ser parecido al de desgaste por abrasión, cuando el ángulo es normal a la superficie el material es deformado plásticamente o dislocado por fracturas.

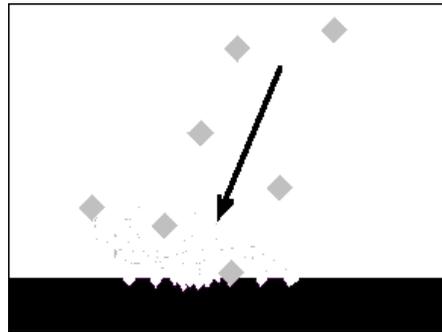


Figura 2.6 Desgaste por Erosión

La diferencia entre erosión y abrasión (ASM, 1992) se debe a que el primer fenómeno de desgaste se refiere a la fuerza ejercida de desaceleración sobre una serie de partículas que chocan y rebotan en la superficie, mientras que la abrasión es el resultado del deslizamiento de partículas abrasivas sobre una superficie por la acción de una fuerza externa aplicada generalmente constante.

El desgaste por erosión se ve principalmente afectado por el flujo de partículas, velocidad de partículas, ángulo de partículas y concentración de partículas. Las superficies sometidas a desgaste se conocen como dúctiles y frágiles (Op cit).

#### 2.4.4 Desgaste Abrasivo

El desgaste por abrasión puede ser definido como el desgaste que ocurre en temperaturas normales como resultado del contacto entre superficies metálicas producto de partículas duras o protuberancias duras abrasivas (Lipson, 1967), por lo tanto el desgaste abrasivo es definido como el daño sobre una superficie sólida que generalmente implica pérdida de material debido al movimiento relativo entre superficies sometidas a contacto.

Este es el desgaste que más se produce en el ensayo bloque sobre disco, debido a que las dos superficies se encuentran sometidas a contacto y la pérdida de material se da en ambas, aunque generalmente se tiende a decir que existe una superficie desgastada, que es la potencialmente importante, y otra superficie abrasiva.

La abrasión es típicamente segmentada dependiendo del tipo de contacto tales como el desgaste de dos cuerpos (Figura 2.7) y el desgaste de tres cuerpos, el primero se refiere a cuando dos superficies sólidas están en contacto directo y en movimiento relativo, una de mayor dureza que la otra, que cuando se aplica una carga las partículas de la superficie dura penetran en la de menor dureza produciendo deformaciones plásticas. El desgaste de tres cuerpos se refiere a cuando existen partículas duras introducidas entre las superficies deslizantes, o producto de la abrasión se desprenden o fracturan diversas partículas desde la superficie de menor dureza quedando éstas atrapadas entre ambas superficies.



Figura 2.7 Desgaste de dos cuerpos y desgaste de tres cuerpos

## 2.5 Lubricación

Según la ASM (1992) “Lubricación se define como la interposición de sustancias gaseosas, líquidas o sólidas entre dos superficies en contacto que deslizan para reducir la fricción y el desgaste, disminuir el calor generado y los restos producto del deslizamiento”. Otros autores como Linares (n.d.) consideran que el propósito de la lubricación es la separación de dos superficies con deslizamiento relativo para que no se desgasten y obtener el rozamiento más bajo posible cuando haya una película de lubricante de espesor suficiente, entre las dos superficies en contacto.

La lubricación tiene como objetivo fundamental la reducción de la fricción y el desgaste, aunque también tiene como función reducir el consumo de energía eliminando el calor generado, protegiendo las piezas contra la corrosión y neutralizando los contaminantes en aquellos elementos de máquinas donde se utilicen lubricantes, garantizando así mayor esperanza de vida útil (Tormos, 2005).

Los procesos de lubricación dependen muchos factores (ASM, 1992) tales como las geometrías de las superficies en contacto, la dureza y textura de las superficies deslizantes, la carga aplicada, la carga del contacto, la presión y temperatura, las velocidades de rodamiento y deslizamiento y de las propiedades físicas y químicas del lubricante, entre otras. La principal exigencia de la lubricación es que reduzca la fuerza necesaria, para cizallar las uniones que se forman entre las asperezas de las superficies y se consigue de dos maneras: interponiendo un material que pueda cizallarse de manera más fácil o mediante el uso de sustancias químicas que altere la resistencia al cizallamiento de las asperezas. Este material interpuesto entre las asperezas, llamado lubricante, es el que puede encontrarse de forma sólida, líquida y gaseosa,

## 2.6 Lubricantes Líquidos

La principal función de los lubricantes líquidos es controlar la fricción, desgaste y daño superficial previsto sobre sistemas que contengan elementos de máquinas como engranajes y rodamientos. La selección de un lubricante apropiado depende de las necesidades del sistema, el costo para mantenerlo en buen estado, seguridad y las condiciones ambientales una vez que el lubricante es desechado. Para un sistema dado el uso del número de lubricantes utilizados generalmente deriva en mayor facilidad de mantenimiento y previene el uso de lubricantes inadecuados.

## 2.7 Tipos de Lubricación

Cuando se tienen dos superficies en contacto, la carga aplicada es reflejada en los puntos más altos o asperezas de ambas produciendo en el deslizamiento, una fuerza tangencial que causa fricción y desgaste, dañando así las superficies. Para reducir esa fuerza de fricción y por lo tanto propiciar un deslizamiento con mayor facilidad se introduce un lubricante entre ambas superficies para separar las asperezas de forma absoluta o parcial.

### *2.7.1 Lubricación Hidrodinámica*

Es aquella donde las superficies que ruedan o deslizan están totalmente separadas por el fluido lubricante evitando así el contacto entre ambos cuerpos. Muchos autores se refieren a este tipo de lubricación a la ausencia de contacto entre metal y metal, donde sólo se requiere de la existencia de suficiente lubricante pero sin introducirlo a presión. La capa hidrodinámica puede

formarse cuando se mantiene el lubricante directamente entre el espacio generado entre dos superficies que deslizan. En casos de acción del lubricante en cuñas (wedging film action) tales como en la Figura 2.8, las velocidades que experimenta el lubricante varían, debido a que el espacio que existe entre un cojinete y la superficie que desliza es mayor en la entrada y propicia un mayor flujo de lubricante en la entrada que en la sección de salida (ASM, 1992).

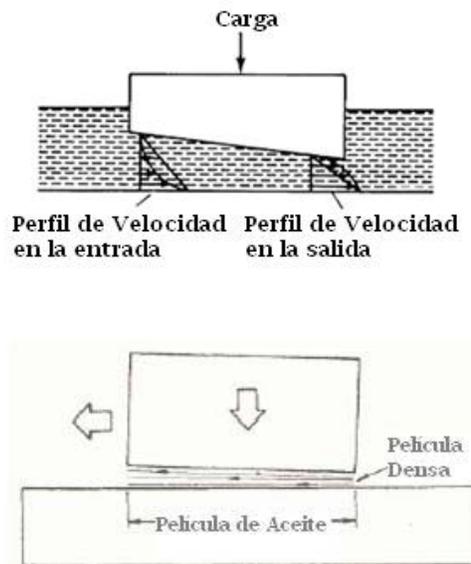


Figura 2.8 Lubricación Hidrodinámica en cuñas (wedging film action)

### 2.7.2 Lubricación Hidrostática

Es un tipo de lubricación donde se introduce a presión el lubricante para crear una película gruesa y así separar las superficies en contacto, que no se encuentran en movimiento relativo. Generalmente la lubricación hidrostática es usada en cojinetes de bajas velocidades, dispositivos de muy baja fricción y en casos de bajas viscosidades como los lubricados por agua y aire (ASM, 1992).

La Figura 2.12 muestra la configuración usual de cojinetes hidrostáticos (squeeze film action), el fluido entra a presión desde la parte superior y luego cae desde la parte central hacia la parte de afuera. La presión ejercida, el espesor de película y el flujo del lubricante dependen totalmente de la carga ejercida en el cojinete.

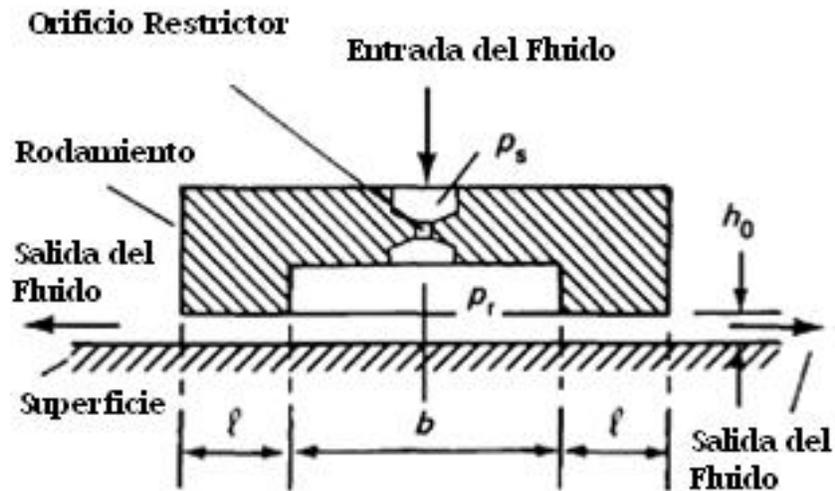


Figura 2.9 Lubricación Hidrostática

### 2.7.3 Lubricación Elastohidrodinámica

La lubricación elastohidrodinámica se refiere cuando las superficies en contacto tales como cojinetes y engranajes, se deforman plásticamente y existe una película lubricante que queda atrapada entre ambas superficies, deformándose a su vez de igual manera. Muchas veces las superficies en contacto tienen

deformaciones que son iguales o mayores que los de la película lubricante y esto puede interferir en su correcto desempeño. Así mismo se llama elastohidrodinámica debido a que se da una lubricación hidrodinámica microscópica con espesores de película muy pequeños en superficies deformadas elásticamente

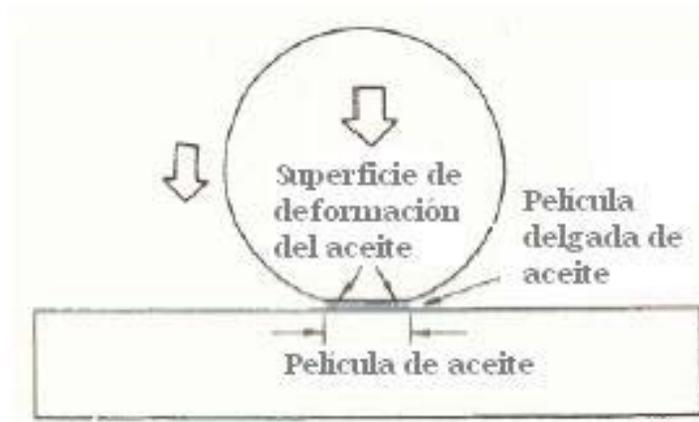


Figura 2.10 Lubricación Elastohidrodinámica

#### 2.7.4 Lubricación Límite

La lubricación límite se refiere a cuando se tiene una película lubricante tan fina que la carga es soportada por las asperezas de las superficies en contacto (ASM, 1992). La lubricación límite se refiere a aquellos casos donde se tienen bajas velocidades, baja viscosidad de lubricante y muy altas cargas. Puede pasarse de lubricación hidrodinámica a lubricación límite cuando existe disminución en las velocidades, aumento de cargas o naturalmente cuando se disminuye el flujo de lubricante. Los cojinetes hidrodinámicos en el arranque generalmente pueden trabajar bajo condiciones de lubricación límite.

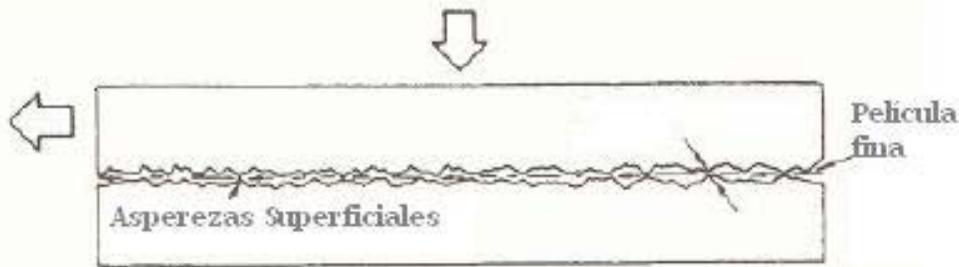


Figura 2.11 Lubricación Límite

## 2.8 Rociado Térmico

Los procesos de rociado térmico o thermalspray como es ampliamente conocido, son un grupo de procesos que consisten en rociar un material metálico o no metálico en forma de gotas o partículas, hacia una superficie para lograr así una exigencia específica. Últimamente y a través del desarrollo de las tecnologías de recubrimiento, el rociado térmico ha venido experimentando un auge debido a su sencilla aplicación y favorables resultados. El proceso de rociado térmico es generalmente descrito como la proyección de partículas o gotas previamente calentadas desde una pistola o rociador, que pasan a un estado líquido o de deformación plástica y son aceleradas hacia la superficie a recubrir, a través del flujo de un gas inerte, las partículas producto del choque, se incrustan y se fijan en las irregularidades de la superficie y entre ellas por enlaces mecánicos, formando así un recubrimiento de alta adhesión al material base, aunque generalmente con mayor dureza que la del sustrato Reveron, H. (Disponible: <http://prof.usb.ve/hreveron/Termo.htm>. *Termorociado* Consultado el 10 de Enero de 2009).

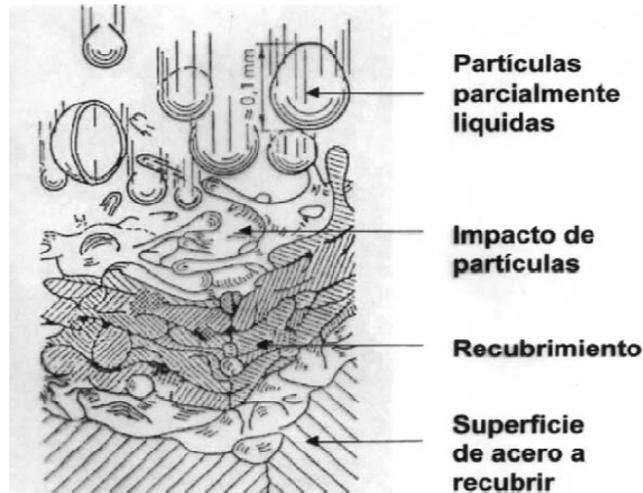


Figura 2.12 Proceso de termo-rociado (Tomada de

<http://prof.usb.ve/hreveren/Termo.htm>. Consultado el 10 de Enero de 2009).

El material de alimentación de la pistola de termorociado puede ser cualquier sustancia que pueda ser fundida, tales como compuestos metálicos, cerámicos, polímeros y combinaciones de estos. Los aspectos más importantes para llevar a cabo en el proceso de rociado térmico son en primer lugar la energía cinética que adoptan las partículas o gotas, que al final determina la velocidad con la cual chocan dichas partículas contra la superficie, y en segundo lugar la energía térmica generada en la pistola de rociado térmico a través de gases combustibles, arco eléctrico o plasma para lograr que las partículas en estado plástico formen finas placas entre ellas, conocidas como splats y a su vez se adhieran más fácilmente a la superficie preparada.

Uno de los aspectos más importantes del rociado térmico es la porosidad presente en el recubrimiento depositado, que puede variar desde un mínimo de 1% hasta 20 % (Conde y Dávila, 2007), y debido a los parámetros de rociado pueden llegar a aparecer partículas no fundidas que, no alcanzaron la temperatura de fusión y fueron añadidas al recubrimiento, éstas partículas

interrumpen de forma notable la continuidad del mismo y disminuyen su fuerza cohesiva. Finalmente en diversas ocasiones cuando se rocían metales o aleaciones pueden darse inclusiones de óxidos en el recubrimiento que a su vez, pueden generar beneficios ya que aumentan la dureza y resistencia del mismo.

A través del proceso de termorociado se pueden obtener diversas ventajas del recubrimiento tales como: resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión, aumento de dureza, resistencia a la oxidación, recuperación o restauración dimensional y resistencia a la cavitación.

## **2.9 Tipos de rociado térmico**

Los procesos de termorociado pueden clasificarse en dos tipos: los de combustión y los eléctricos. Los procesos de combustión se refieren al rociado por llama, rociado por detonación y por HVOF. Los procesos eléctricos incluyen el rociado por arco eléctrico y el rociado por proyección de plasma.

### *2.9.1 Rociado Térmico por llama Oxiacetilénica*

El termorociado por llama oxiacetilénica es la forma más antigua del termorociado, donde generalmente se utilizan diversos materiales de alimentación tales como polvos metálicos y no metálicos, alambres o barras de metal y barras de cerámica. Este proceso depende de la combustión de gases tales como acetileno y propano junto al oxígeno, que debido al aporte de las partículas a proyectar en la parte superior de la pistola hacen que sean proyectadas hacia la superficie por medio del aire comprimido que circula en el centro de la llama. El termorociado por oxiacetileno es usado en gran medida debido al bajo costo del sistema, fácil movilidad, alto grado de control de la pistola, y las temperaturas de los gases, donde la llama puede ser ajustada para

ser oxidante, neutra o reductora. Finalmente debido a sus bajas velocidades de proyección de partículas, comparados con otros procesos, se obtienen recubrimientos de baja calidad, altas porosidades y bajas fuerzas de adhesión

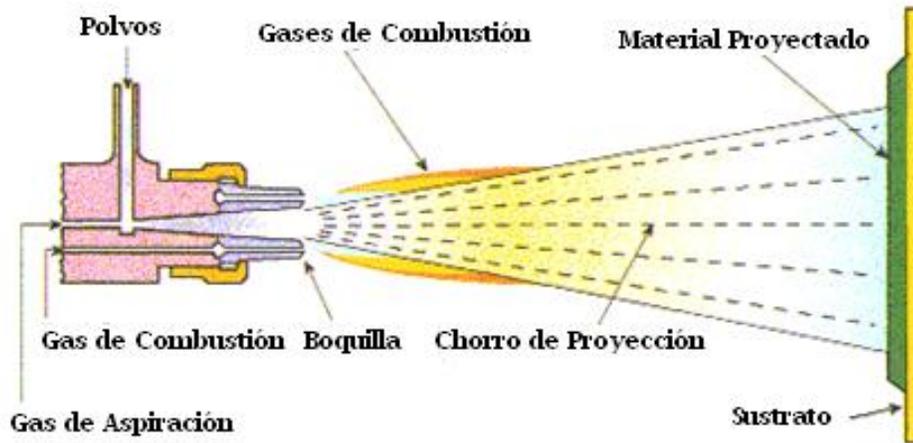


Figura 2.13 Termo-rociado por llama oxiacetilénica con alimentación en polvo.  
(Tomada de [www.airproducts.com](http://www.airproducts.com))

### *2.921 Rociado Térmico por Detonación*

El rociado por detonación se diferencia del rociado por llama ya que aunque se utiliza un proceso de combustión, este va acompañado de un proceso de explosiones internas continuas dentro de la cámara de la pistola entre el acetileno, oxígeno y los polvos de alimentación, logrando que las partículas se fundan y sean proyectadas a muy altas velocidades hacia la superficie, logrando recubrimientos espesos y con altas durezas. Los recubrimientos obtenidos con este método son de excelente calidad aunque los costos son muy elevados.

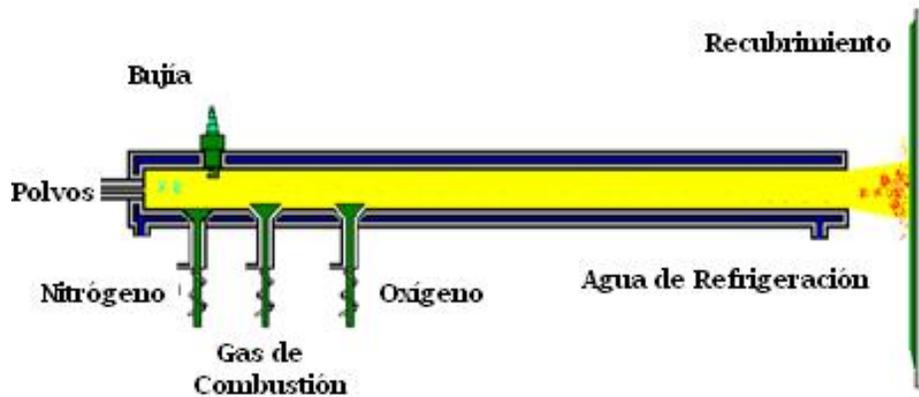


Figura 2.14 Termorociado por detonación con alimentación en polvo. (Tomada de [www.airproducts.com](http://www.airproducts.com))

### 2.9.3 Rociado Térmico por HVOF

El proceso de termorociado por alta velocidad de oxígeno combustible o HVOF (High Velocity Oxygen Fuel), utiliza oxígeno y un gas como combustible a altas presiones. Este proceso es muy parecido al rociado por llama, con la diferencia principal de que cuando se hace por llama oxiacetilénica la combustión se realiza de forma externa en el ambiente, mientras en que el HVOF la combustión se realiza en una pequeña cámara de combustión y los polvos son inyectados dentro de la llama, donde debido a las altas presiones creadas, los gases salen a velocidades supersónicas y aceleran las partículas fundidas. El proceso de HVOF va realmente relacionado con la disminución de la energía térmica y el aumento de la energía cinética para lograr recubrimientos densos, de bajas porosidades, bajos esfuerzos residuales y altas fuerzas de enlace.

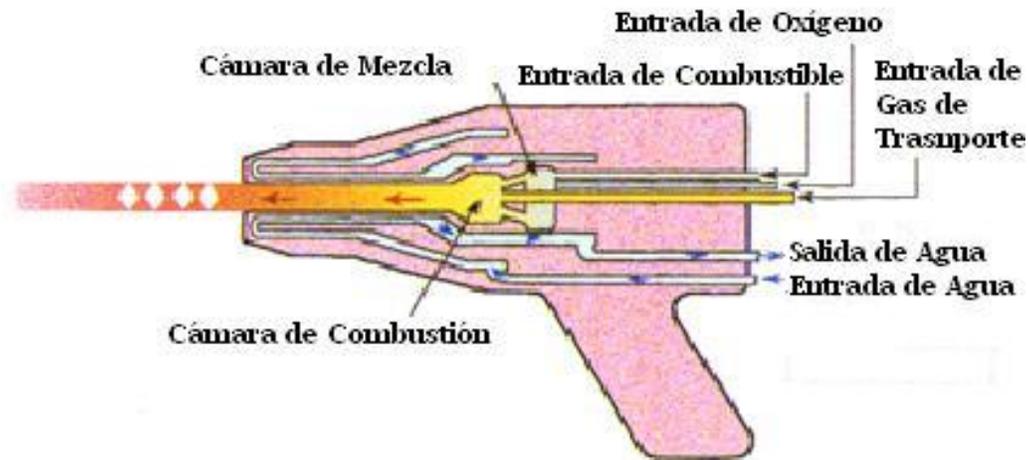


Figura 2.15 Termorociado por HVOF con alimentación en polvo. (Tomada de [www.airproducts.com](http://www.airproducts.com))

#### 2.9.4 Rociado Térmico por arco eléctrico

Entre los procesos de termorociado por electricidad, tenemos el termorociado de alambre por arco eléctrico que es además, el más económico. En este proceso se utiliza la corriente eléctrica que carga de forma negativa y positiva a dos barras de metal dispuestas de forma angular, que son las que actúan como electrodos y alimentación, para formar una energía térmica producto del arco eléctrico presente entre ellas. La diferencia de potencial entre las barras es aplicada y el calor generado funde las puntas donde el gas que circula en el centro, generalmente aire comprimido, (aunque también suele utilizarse nitrógeno o argón), proyecta las gotas hacia el sustrato. Producto de las altas temperaturas del arco y altas velocidades de las partículas, se producen recubrimientos con mayor adhesión y menores porosidades que el termorociado por llama oxiacetilénica, aunque el uso de aire comprimido como gas atomizante puede producir presencia de óxidos en el recubrimiento.

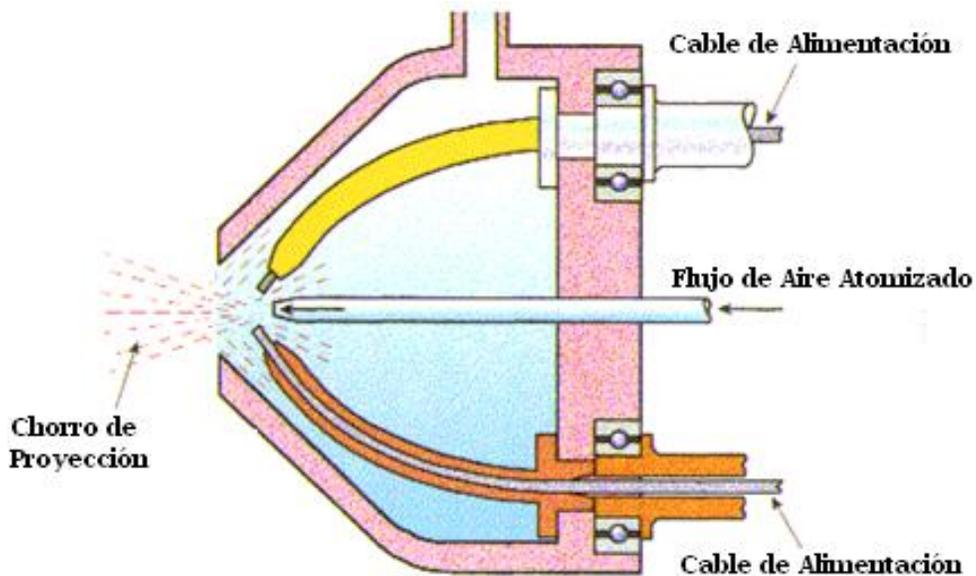


Figura 2.16 Termorociado de alambre por arco eléctrico. (Tomada de [www.airproducts.com](http://www.airproducts.com))

## 2.10 Rociado por Plasma

El termo-rociado por plasma es un proceso que “utiliza un arco eléctrico DC para generar un flujo de plasma gaseoso parcialmente ionizado a muy altas temperaturas que actúa como la fuente de calor para el rociado.” (Conde y Dávila, 2007). El arco eléctrico se forma entre dos electrodos no consumibles, el ánodo de cobre y el cátodo de tungsteno separados discretamente en la cámara de la pistola. Cuando pasa la corriente a través del cátodo se forma un arco eléctrico con el ánodo, mientras los gases circulan a través de la cámara, que ioniza los gases, transformándolos en un estado materia llamado plasma. En este proceso se libera gran cantidad de energía térmica y se alcanzan

temperaturas entre 5000 y 8000 °C (Op. Cit.), donde se inyecta el material de alimentación en forma de polvo a la cámara de gas y es proyectado a muy altas velocidades y temperaturas, a través del pequeño orificio en el extremo de la pistola junto al flujo de gas caliente. Un aspecto importante de este proceso es que a pesar de las altas temperaturas que se dan dentro de la cámara de combustión, el sustrato o superficie a proyectar sólo eleva su temperatura generalmente unos 200 °C y se obtienen recubrimientos de alta calidad.

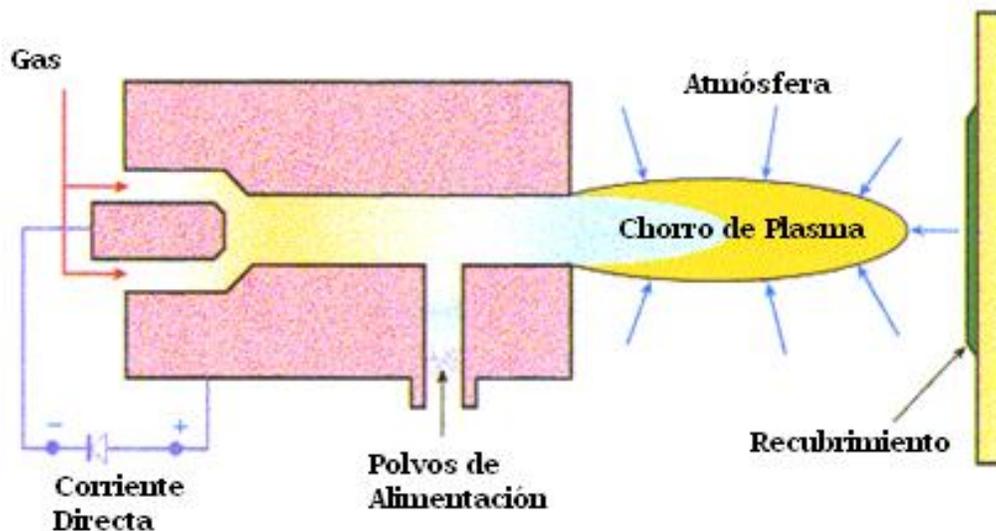


Figura 2.17 Termorociado eléctrico por plasma. (Tomada de [www.airproducts.com](http://www.airproducts.com))

Inicialmente en el rociado térmico por plasma, no se tenía suficiente información sobre la influencia de las variables involucradas en el proceso, ni de cómo éstas afectaban e incidían en la calidad final del recubrimiento, debido a que en dicho proceso se dan reacciones físicas y químicas de forma rápida,

compleja y difícil de estudiar individualmente. No obstante en la actualidad y a través de los últimos años el proceso de rociado térmico se ha convertido en una tecnología bastante utilizada, ya que se han determinado cuales son las variables que afectan en gran medida la deposición sobre una superficie establecida.

**Tabla 2.1 Comparación de los proceso de termo-rociado y características del recubrimiento**

Proceso	Velocidad Partículas (m/s)	Adhesión (MPa)	Contenido Óxido (%)	Porosidad (%)	Tasa de Deposición (kg/hr)	Espesor Depositado Típico (mm)
Llama	40	<8	10–15	10–15	1–10	0.2–10
Arco Eléctrico	100	10–30	10–20	5–10	6–60	0.2–10
Plasma	200–300	20–70	1–3	1–8	1–5	0.2–2
HVOF	600–800	>70	1–2	1–2	1–5	0.2–2

(tomado de [www.airproducts.com](http://www.airproducts.com))

### *2.10.1 Requerimientos y parámetros para el proceso de termo-rociado por plasma*

Según Satapathy (2005), existen diversos factores que afectan la calidad de un recubrimiento, entre ellos: la preparación de la superficie y los parámetros de rociado. El primer factor va relacionado con la adhesión del recubrimiento a la

superficie y el segundo va dirigido a la microestructura del recubrimiento, sus propiedades, resistencia y desempeño.

La preparación de la superficie se refiere limpieza y rugosidad necesaria para lograr una buena adhesión del recubrimiento. Las superficies rugosas que se obtienen a partir de la técnica de sandblasting o chorro de arena (explicado en el diseño experimental), que mejoran la adhesión del recubrimiento ya que funcionan como anclajes mecánicos que aumenta el área de contacto. La rugosidad obtenida va a estar determinada por los parámetros de la máquina de chorro de arena, tales como presión de aire, distancia de impacto, ángulo de impacto, material del sustrato y el tamaño de los granos. La limpieza de la superficie se refiere a la limpieza de la superficie a ser rociada que debe estar libre de polvo, óxidos, grasas o algún otro material que impida el contacto entre los splats o discos formados y el sustrato. Por lo tanto, los sustratos deben ser limpiados con preferiblemente por ultrasonido utilizando solventes antes de ser rociados.

Los parámetros de deposición del proceso de termorociado por plasma influyen directamente para la obtención de un recubrimiento óptimo (Conde y Dávila, 2007), entre estos tenemos: selección del gas primario y secundario, tipo de pistola, caudal de los gases, voltaje y amperaje; los parámetros del proceso en sí: distancia de rociado, enfriamiento de la pistola y el sustrato, velocidad de partículas proyectadas y el número de pasadas. Finalmente los parámetros que influyen en el recubrimiento obtenido: forma y tamaño de los polvos, método de fabricación y composición química de los mismos, velocidad de alimentación y flujo del gas de transporte.

### *2.10.2 Selección del Gas de Plasma*

La selección del gas utilizado en el proceso de rociado por plasma es de vital importancia ya que éste es el que aporta la energía térmica para calentar las partículas a rociar. Normalmente se utilizan gases inertes (Satapathy, 2005) que no reaccionen con el material a rociar, como el nitrógeno o argón que son combinados generalmente con hidrógeno o helio como gas plasma. El mayor constituyente de la mezcla de gases es conocido como el gas primario y el de menor cantidad es considerado como el gas secundario. Las moléculas neutrales están sujetas al bombardeo de electrones que resulta en su ionización. La temperatura y entalpía del gas se incrementa tanto como éste absorbe energía. Los gases monoatómicos como el Helio y el argón necesitan menos temperatura y, por lo tanto, menos energía para ingresar al estado de plasma que los gases diatómicos como el Nitrógeno e Hidrógeno, para que las partículas puedan ser calentadas. Esto último es sumamente importante ya que mientras más energía requiera un gas, mas voltaje se necesita para llevar a cabo el proceso.

### *2.10.3 Flujo del Gas de Plasma*

Si se aumenta el caudal de gas manteniendo el mismo amperaje y voltaje del arco eléctrico, menor es la temperatura a la salida de la pistola de rociado aunque mayor es la velocidad generada. Esto se debe a que si se aumenta el flujo de gas se incrementa a su vez el número de átomos por unidad de volumen, mientras que el arco eléctrico se mantiene constante y por lo tanto no es suficiente para ionizar de forma efectiva todo el gas.

#### *2.10.4 Voltaje*

El voltaje está determinado por la selección del gas para el proceso de rociado, mientras que la velocidad del gas determina la longitud del arco. El voltaje a su vez es el que proporciona la energía cinética a las partículas y está totalmente relacionado con el gas y la pistola de rociado aunque debe tomarse en cuenta las caídas de voltaje a lo largo del sistema (Conde y Dávila, 2007).

#### *2.10.5 Amperaje*

El amperaje es el que proporciona la energía térmica necesaria en el arco eléctrico para el calentamiento de las partículas a rociar. Dicha energía debe ser lo suficientemente capaz de fundir el material que va a formar parte del recubrimiento pero a su vez, no de gran magnitud que pueda generar la evaporación del mismo.

#### *2.10.6 Distancia de Rociado*

Esta es la distancia entre la punta de la pistola de rociado y la superficie del sustrato. Una distancia muy elevada podría resultar en el enfriamiento o solidificación de las partículas antes de que éstas alcancen la superficie a rociar, disminuyendo la calidad del recubrimiento y eficiencia del proceso ya que las partículas rebotan o se adhieren levemente al sustrato. Por el contrario una limitada distancia, no permite el tiempo necesario para que las partículas puedan fundirse, se produce pérdidas de material y un recubrimiento irregular. Según (Satapathy, 2005) está demostrado que la porosidad aumenta y el espesor del recubrimiento disminuye cuando se incrementa la distancia.

### *2.10.7 Polvos de Alimentación*

La selección y clasificación de los polvos de rociado son determinantes para la obtención de un recubrimiento de calidad con buenas características estructurales. Es importante saber que los polvos de alimentación son variables fijas que no puede ser modificadas cuando se vaya a realizar el rociado, aunque éstos deben ser poseer condiciones químicas tales “que éstos no se degraden ni reaccionen químicamente con los gases de transporte” (Conde y Dávila, 2007).

Existen otras variables sumamente importantes relacionadas con los polvos (Satapathy, 2005) que son el tamaño de grano, distribución, forma, composición química, etc. Que inciden en los resultados finales, ya que si los polvos tienen tamaños relativamente pequeños éstos pueden ser evaporados u ocasionar bajos espesores en el recubrimiento depositado, en cambio, si se tienen partículas con tamaños relativamente grandes, pueden resultar en la obtención de recubrimientos con altas porosidades, debido a la deficiencia de absorción de calor por parte de las partículas, que impide que sean fundidas substancialmente y sean depositadas. La morfología de los polvos es un factor sumamente importante y Satapathy (2005) evaluó que la configuración esférica genera recubrimientos de mayor calidad por la deposición adecuada de los splats, que aquellos con características angulares o de estructuras irregulares que además no pueden ser rociados bajo los mismos parámetros.

### *2.10.8 Tasa de Alimentación de los Polvos*

La tasa ideal de alimentación es un factor que debe determinarse para cada material a depositar, ya que afecta la calidad del recubrimiento depositado y su estructura final (Satapathy, 2005). Llevar a cabo el rociado con muy baja tasa de alimentación, manteniendo las otras condiciones constantes, puede resultar en recubrimientos deficientes por la disminución de material proyectado. Por otro lado, una muy alta tasa de alimentación origina altas porosidades en el recubrimiento, debido a la falta de fundición de partículas ya que no son calentadas adecuadamente, que quedan atrapadas en el sustrato

Así mismo, existen otras variables que influyen en la calidad del recubrimiento que fueron expuestas por Satapathy (2005) tales como el ángulo de rociado para garantizar el choque adecuado de las partículas, el enfriamiento del sustrato para impedir que la superficie rociada se deforme por la alta temperatura, precalentamiento del sustrato para eliminar la humedad y óxidos luego de la deposición y finalmente el ángulo de entrada de los polvos en la pistola de rociado, que puede ser de forma perpendicular u oblicua para determinadas aplicaciones.

La presión del gas de transporte, además de controlar el mecanismo de choque y formación de los splats, debe ser suficiente como para garantizar el paso del material por el eje central del jet de plasma. Esto permite que las partículas absorban la mayor cantidad de calor posible.

### **2.11 Material de alimentación**

Existen diversos materiales que pueden ser depositados a través de un proceso de rociado térmico por plasma como metales, cerámicos, polímeros o cualquier combinación de estos requerido para obtener las propiedades físicas y mecánicas deseadas.

El molibdeno es un metal usualmente producido mediante técnicas metalúrgicas de polvos, logrando así formas compactas y sinterizadas aproximadamente a los 2100 °C. Los polvos de aleaciones de molibdeno son materiales refractarios o capaces de soportar elevadas temperaturas que tienen alta ductilidad y dureza. El molibdeno muchas veces es mezclado con elementos como níquel y cromo, que mejoran la adhesión y del recubrimiento, para luego ser depositado y evitar la degradación de partes y estructuras debido al desgaste mecánico, mejorando el funcionamiento de elementos mecánicos tales como pistones, anillos de pistones, ejes y cigüeñales (Conde y Dávila, 2007), ya que aumentan la resistencia al desgaste, a la corrosión y a la degradación térmica. Además, el molibdeno es ampliamente utilizado en sellos y rodamientos, como un recubrimiento superficial para prevenir el desgaste de esas superficies que se encuentran en condiciones de contacto deslizante, ya que reduce el coeficiente de fricción.

El material de los polvos de alimentación a utilizar, en el rociado térmico del presente trabajo de investigación para lograr los recubrimientos es una aleación base hierro, alto contenido de carbono 2-3%, bajo contenido de Molibdeno 2-3%, llamada comercialmente por Plasmatec Ingenieros C.A. R-10,

recomendada para ser rociada mediante HVOF y plasma, con temperatura máxima de uso de 340 °C.

### **2.12 Diseño Experimental**

Los diseños experimentales son modelos estadísticos de una serie de pruebas, en las cuales se modifican considerablemente sus variables en la entrada de un proceso, de tal manera que sean determinados los factores que influyen en las repuestas de salida para determinar si influyen en la variable de interés.

Es ampliamente conocido que el diseño experimental tiene sus orígenes en los trabajos de Ronald Fisher, en los cuales se implantó el concepto de aleatorización y el análisis de varianza. La teoría del diseño de experimentos y sus aplicaciones recibieron un fuerte impulso por las contribuciones de Genichi Taguchi, un estadístico japonés ampliamente conocido que trabajaba con nuevos métodos de análisis estadísticos complejos, ineficientes y a veces, improductivos (Yacuzzi, Martín, Quiñones & Popovsky, n.d.).

Según Vilar (Disponible: [http://www.udc.es/dep/mate/estadistica2/indice\\_gral.html](http://www.udc.es/dep/mate/estadistica2/indice_gral.html). *Modelos Estadísticos Aplicados*. Consultado el 20 de Febrero de 2009.) “La metodología del diseño de experimentos se basa en la experimentación”. Además es comúnmente conocido que si se repite un experimento, en condiciones idénticas, los resultados pudieran presentar una variabilidad que puede ser grande o pequeña. En cambio si la experimentación se realiza en un laboratorio donde la mayoría de las causas de variabilidad están muy controladas, el error experimental será pequeño y habrá poca variación en los resultados del experimento.

“El objetivo del diseño de experimentos es estudiar si utilizar un determinado tratamiento produce una mejora en el proceso o no” (Op Cit) Por lo tanto la experimentación debe realizarse utilizando el tratamiento y no utilizándolo para garantizar el éxito de esta. Si la variabilidad experimental es considerable, solo se toma en cuenta el tratamiento cuando éste produzca grandes cambios en relación con el error de observación.

Un experimento se realiza por alguna de las siguientes razones:

- \* Determinar las principales causas de variación en la respuesta.
- \* Encontrar las condiciones experimentales con las que se consigue un valor extremo en la variable de interés o respuesta.
- \* Comparar las respuestas en diferentes niveles de observación de variables controladas.
- \* Obtener un modelo estadístico-matemático que permita hacer predicciones de respuestas futuras.

### **2.13 Diseño Experimental Factorial**

Actualmente para optimizar los procesos de fabricación y métodos de análisis, es necesario conocer qué variables influyen significativamente en el sistema y cómo afectan la variable de interés. A menudo esta información no está disponible y se genera experimentando u obteniendo dichos factores a partir de ensayos previos y se toman en cuenta las variables que podrían influir en la respuesta. A partir de esto, se fijan las variables que no interesa modificar, se anotan las que no se pueden controlar, y se varían las restantes. Finalmente, se

obtiene la información comparando la variación de la respuesta entre experimentos.

Generalmente las limitaciones de tiempo y el elevado coste de la experimentación obligan a ejecutar sólo los experimentos imprescindibles, y se hace notar que el método tradicional de variar un factor no suele ser la mejor opción ya que puede implicar más experimentos de los necesarios y, peor aún, proporcionar sólo información parcial.

“Por diseño factorial se entiende aquel en el que se investigan todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores en cada ensayo completo o réplica del experimento” (Conde y Dávila, 2007). Este tipo de diseño experimental es utilizado 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 múltiples factores del sistema, en conjunto o vinculados entre ellos, logrando que sean evaluadas todas las combinaciones de factores posibles, que influyen en la respuesta o salida del sistema.

Las variables que indican la respuesta del sistema o salidas del proceso, se denominan variables dependientes mientras que los factores se pueden definir como variables independientes y también influyen en la salida del sistema (Op. Cit.). En el diseño experimental factorial cada combinación de factores es conocido como tratamientos. Este método se puede representar de la forma  $x^y$ , donde la “y” se refiere los factores involucrados en el proceso y la “x” representa los niveles a los que son evaluados dichos factores, donde  $x^y$  es igual al número de tratamientos posibles. Existen diferentes casos de diseños experimentales tales como  $2^2$ ,  $2^3$ ,  $3^2$ ,  $3^3$  que son los frecuentemente más utilizados.

### 2.14 Análisis de Varianza

El análisis de la varianza o ANOVA (Analysis of Variance), es un procedimiento estadístico que nos permite dividir la variabilidad observada en componentes independientes que pueden atribuirse a diferentes causas de interés, y es herramienta fundamental para comparar si los valores de un conjunto de datos numéricos son significativamente distintos a los valores de otro o más conjuntos de datos. Generalmente, el análisis de varianza “es utilizado para relacionar una probabilidad a la conclusión de que la media de un grupo de puntuaciones es distinta de la media de otro grupo de puntuaciones” (Conde y Dávila, 2007).

El diseño más simple del análisis de varianza plantea una variable numérica cuantitativa conocida como resultado y se desea determinar en qué medida se puede atribuir la variabilidad de ésta a otra variable cualitativa nominal, que vamos a denominar *factor*. En este caso el análisis de varianza sería para un solo factor, aunque éste puede tener dos o más categorías o niveles.

El método de análisis de varianza está compuesto por un valor  $k$  que representa las muestras aleatorias independientes, de tamaño  $n$ , extraídas de una única población normal (Op. Cit). A partir de ellas existen maneras independientes de estimar la varianza de la población ( $S^2$ ).

La Tabla 2.2 refleja los cálculos necesarios para la prueba de igualdad de las medias poblacionales que utilizan el análisis de varianza o ANOVA, y contiene columnas con las fuentes de variación, las sumas de cuadrados, los grados de libertad, estimaciones de la varianza y el valor  $F$  para el análisis de varianza.

Tabla 2.2 Cálculos necesarios para Análisis de Varianza

Fuente de variación	G.L.	SS	MS	F
Entre grupos Tratamientos	$k-1$	SSA	$SSA / (k-1)$	MSA /MSE
Dentro de grupos Error	$(n_{(h)}-1)k$	SSE	$SSE / k(n_{(k)}-1)$	
Total	$Kn_{(k)}-1$	SST		

Existe un valor que nos sirve de referencia a la hora de aceptar o rechazar la hipótesis nula es el nivel de significación. Si este nivel es mayor que 0,05, aceptaremos la hipótesis nula de independencia entre las variables. Aunque si dicho nivel de significación es menor que 0,05 se rechaza la hipótesis nula y aceptaremos la hipótesis alternativa, concluyendo que existe una relación de dependencia entre las variables, y se puede decir que los distintos niveles influyen en los valores de la variable.

### 2.15 Metodología de Superficie de Respuesta

La Metodología de Superficies de Respuesta MSR o RSM (response surface methodology) 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. El objetivo principal de la metodología de superficie de respuesta es optimizar la variable de interés. Esto se logra al determinar las condiciones óptimas de operación del sistema.

Los factores son las condiciones cuantitativas o cualitativas, que tienen influencia en el proceso y la respuesta es una cantidad medible que es la que interesa optimizar, que se ve afectada al cambiar los niveles de los factores.

Cuando se dice que un valor de respuesta  $y$  depende de los niveles  $x_1, x_2, \dots, x_k$  de  $k$  factores  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ , significa 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  $y$ , donde  $\varepsilon$  representa el ruido o error observado en la respuesta (Conde y Dávila, 2007). Si la respuesta esperada se denota por  $E(y) = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$ , entonces la superficie representada por se denomina superficie de respuesta:

$$E(y) = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$$

La superficie de respuesta es generalmente representada por la función  $E(y)$  respecto a los niveles de  $x_1, x_2$  por ejemplo, donde la respuesta es representada como una superficie sólida en un área tridimensional. Usualmente para visualizar mejor la forma de una superficie de respuesta, a menudo se grafican los contornos de dicha superficie en dos dimensiones, donde las curvas de los valores iguales de respuesta se grafican en un plano donde los ejes coordenados  $x_1$  y  $x_2$  representan los niveles de los factores. “Cada contorno corresponde a una altura específica de la superficie de respuesta, es decir un valor específico de  $y$ ” (Op. cit.). La gráfica de contornos es de vital importancia para estudiar los niveles de  $x_1$  y  $x_2$  que representan los cambios en la forma o altura de la superficie de respuesta.

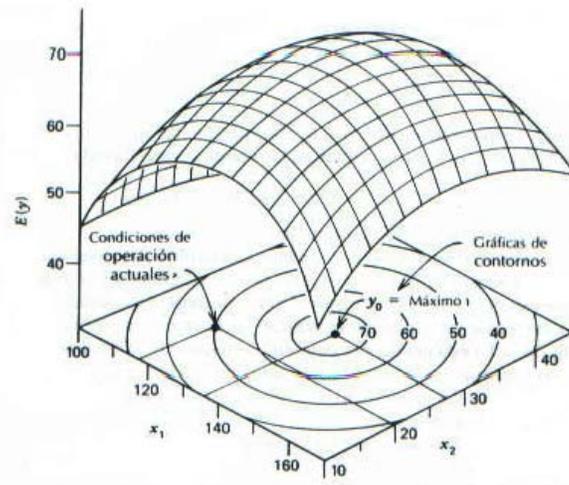


Figura 2.18 Superficie de Respuesta y Gráfica de contornos

En la metodología de superficie de respuesta no existe una relación de funciones entre  $y$  y el conjunto de variables independientes, aunque comúnmente se utiliza un polinomio de bajo orden sobre la región de las variables independientes. Cuando existen curvaturas en la superficie debe utilizarse un polinomio de mayor grado o modelo de segundo orden. La Metodología de Superficie de respuesta utiliza uno o ambos polinomios de aproximación, obviamente es poco probable que una región dada esté totalmente representada por dichas funciones debido al amplio dominio de las variables independientes, sin embargo, funcionan muy bien en aquellas regiones relativamente pequeñas. El polinomio de primer grado es apropiado cuando existen bajas curvaturas en la superficie, mientras que el de segundo grado es utilizado cuando las curvaturas son mayores, para realizar el análisis respectivo y obtener las condiciones de operación óptimas para un sistema o al fin y al cabo, determinar la región o espacio que satisfagan las condiciones de operación (Conde y Dávila, 2007).

## CAPÍTULO III

### *Metodología Experimental*

### **3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

#### **3.1 Diseño experimental**

Con el objetivo de encontrar la influencia de los parámetros del proceso de rociado térmico por plasma, utilizando una aleación de acero alto carbono con molibdeno como material de alimentación, es necesario realizar un estudio experimental que nos permita analizarlos tanto en conjunto, como de forma separada, para poder entender cuáles son las variables más influyentes y cómo interactúan entre sí. Es por esto que se toma la decisión de utilizar un diseño experimental factorial, combinado con análisis estadísticos.

Los parámetros más importantes en el proceso de rociado térmico por plasma son: Voltaje, Amperaje, Tasa de Alimentación de los Polvos y Distancia de Rociado. Estos fueron escogidos tomando en cuenta lo señalado en la literatura disponible. Debido a que la distancia de rociado ha sido suficientemente investigada para este proceso, se seleccionan los otros tres parámetros para realizar un diseño experimental factorial  $3^3$ , en el cual se varían tres parámetros a tres niveles diferentes. El número total de condiciones es 27, para cada condición se realizaron 3 replicas para un total de 81 bloques.

Inicialmente esta investigación tenía como objetivo analizar el par tribológico constituido por bloques de acero, posteriormente rociados con plasma con una aleación Fe-Mo versus anillos rociados por arco eléctrico con una aleación denominada comercialmente como Babbit. Una vez llevados a cabo 7 ensayos preliminares se determinó que dicho par tribológico no permitía obtener una muesca apreciable en el bloque producto del desgaste, sino que más bien se desgastaba el anillo. Como resultado se opta por cambiar el material de los

anillos, modificando así el par tribológico. Los detalles de dichos ensayos y las razones del cambio de material se pueden ver en el ANEXO B.

Finalmente con el nuevo par tribológico constituido por los bloques iniciales recubiertos con la aleación Fe-Mo vs anillos de acero AISI 1045.

Para la optimización de los parámetros se seleccionó el ensayo de desgaste por deslizamiento, ya que estos materiales son utilizados en aquellas aplicaciones que requieren resistencia a este tipo de desgaste. Las mejores, peores condiciones evaluadas con este ensayo fueron serán sometidas a ensayos de dureza.

Los parámetros de rociado fueron escogidos basándonos en las recomendaciones del fabricante de los polvos de alimentación y la experiencia industrial de Plasmatec Ingenieros C.A. Por lo tanto, quedan establecidos los siguientes parámetros de partida: Tasa de alimentación: 6 lb/h; Voltaje: 36,5 V; Amperaje: 750 Amp.

**Tabla 3.1 Distribución para el diseño factorial 3<sup>3</sup>**

Parámetros Niveles	Tasa de Alimentación de los Polvos [gr/min]	Voltaje [V]	Amperaje [A]
1	v <sup>+</sup>	V <sup>+</sup>	A <sup>+</sup>
2	v	V	A
3	v <sup>-</sup>	V <sup>-</sup>	A <sup>-</sup>

Conociendo estos parámetros de partida se procese a variarlos con valores por encima y valores por debajo como se puede ver en la Tabla 3.1 respecto a los parámetros de los fabricantes de polvos, dando como resultado las 27

Tabla 3.2 Tratamientos para el diseño factorial  $3^3$ 

Tratamiento	Tasa de deposición [lb/h]	Voltaje [V]	Amperaje [A]	
1			650	
2			36	750
3				800
4				650
5	5	36,5	750	
6			800	
7			650	
8			37	750
9			800	
10			650	
11			36	750
12				800
13				650
14	6	36,5	750	
15			800	
16			650	
17			37	750
18			800	
19			650	
20			36	750
21				800
22				650
23	7	36,5	750	
24			800	
25			650	
26			37	750
27			800	

condiciones del diseño factorial  $3^3$ . Los parámetros de rociado de los bloques se pueden visualizar en la Tabla 3.2.

### 3.2 Materiales y Métodos

Los bloques y los anillos se fabricaron de acuerdo a las dimensiones especificadas en la norma G 77 – 83. Con el fin de que los bloques tuvieran la altura requerida, éstos fueron cortados con una diferencia de 0,3 mm la cual sería obtenida luego de rociado el recubrimiento.

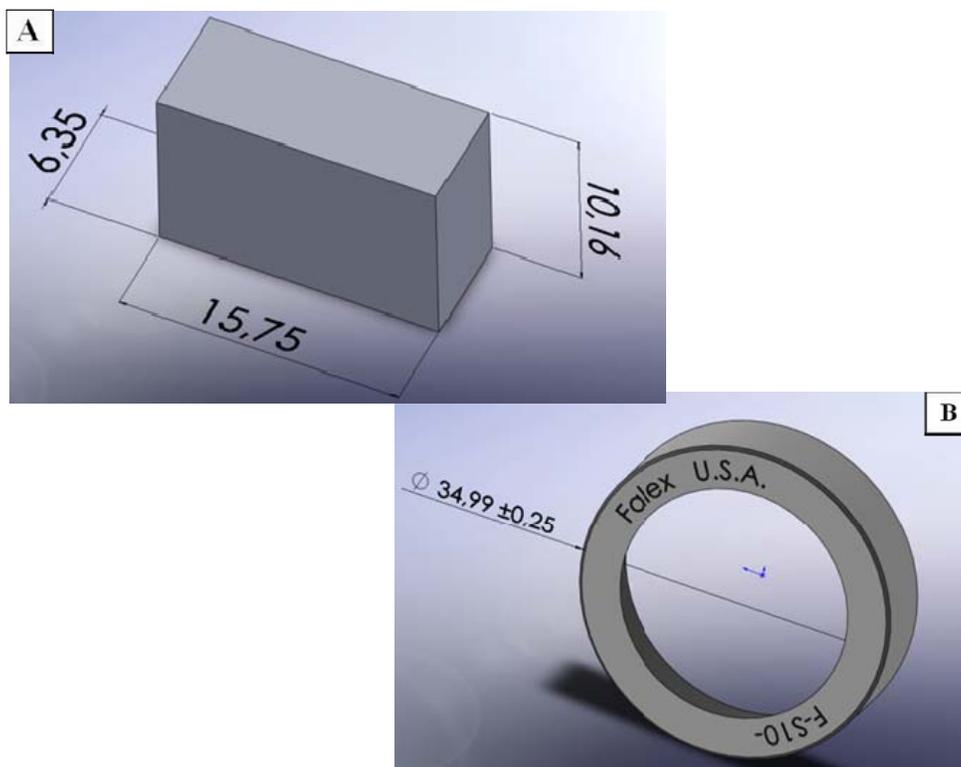


Figura 3.1 A) Diseño de bloques y B) Diseño de anillos en software “Solid Works”

### 3.2.1 Bloques:

El material seleccionado para la fabricación de los bloques fue un acero AISI 1020 laminado. Este material presenta una alta maquinabilidad, bajo costo y la rigidez necesaria para soportar las cargas que implican este ensayo, por lo que su aplicación resulta ideal.

Para el recubrimiento del bloque se utilizó una aleación de alto carbono con molibdeno, fabricada por Praxair y Metco bajo el código 448. Debido a que los nombres de los polvos están sujetos al criterio del fabricante y no hay una norma en particular para esta aleación. La composición química del polvo Fe-Mo es: 2 – 3% Carbono, 2 – 3 % Molibdeno, 94 – 96 % Hierro.

#### 3.2.1.1 Fresado

Los bloques fueron maquinados con una fresadora de torreta convencional marca Tos Kurim (Figura 3.2B), empleando cuchillas de acero rápido de diámetro 16 mm. La velocidad de giro fue de 1500 rpm con un avance de 160 mm/min, siendo ésta una velocidad media de avance, para así garantizar que el material no sufriese endurecimiento localizado por calentamiento excesivo de la pieza.

El proceso de fresado se realizó en varias pasadas con una velocidad en el torno moderada y sin demasiada penetración para evitar cualquier cambio brusco en la temperatura del acero que pudiera afectar la composición interna del material.

Para proceder a la deposición de los recubrimientos los bloques fueron sujetos por un punto de soldadura TIG en su parte lateral de forma de que no se deformase térmicamente la zona a ser ensayada.



Figura 3.2 A) Rociado por plasma y B) Fresadora.

Los bloques fueron desengrasados con un producto industrial a fin de eliminarles las impurezas superficiales presentes. Posteriormente fueron sometidos a un proceso de secado con llama propano-oxígeno y finalmente sometidas a un proceso de limpieza mecánica (arenado), el cual consiste en rociar abrasivo con alta presión para obtener una superficie con mayor rugosidad y, por lo tanto, propiciar una mayor adhesión del recubrimiento al sustrato. Partículas de alúmina electro-fundida con un diámetro de partícula comprendido entre 0,3-1 mm fueron utilizadas como abrasivo.

### 3.2.1.2 Rociado por Plasma con inyección externa (R-10)

El equipo de plasma utilizado es marca Metco, tipo 7MC Plasma Flame Spray Control Unit. (Figura 3.3A), con una pistola Thermach Inc. SG-100 con

inyección externa (Figura 3.4). El alimentador de los polvos es marca Powder Feed Dynamics, Inc. Cleveland Ohio, modelo Mark XV. (Figuras 3.3B)

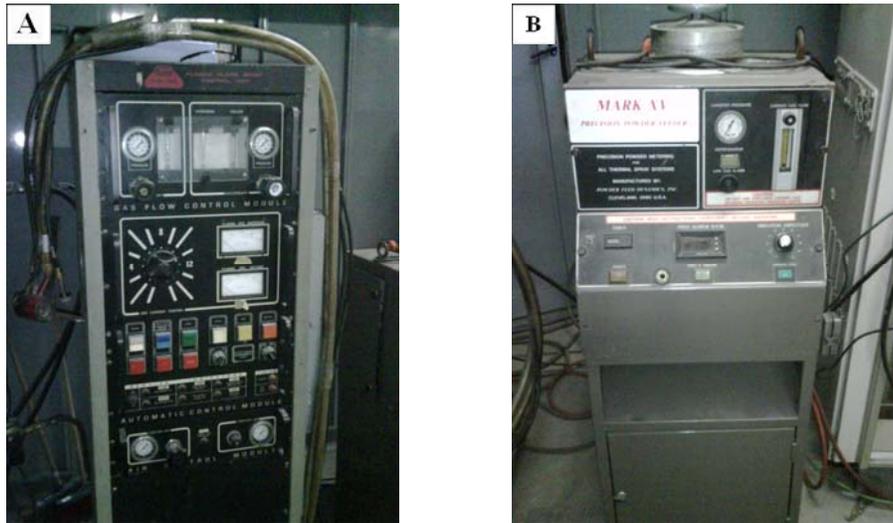


Figura 3.3 A) Equipo de plasma y B) Alimentador de polvos



Figura 3.4 Pistola de rociado por plasma Praxair

La presión del gas primario (Argón) fue de 80 psi, la presión del gas secundario (Helio) fue de 60 psi respectivamente, la distancia de rociado fue de 80 – 100 mm y el precalentamiento del sustrato fue de 80 °C.

### 3.2.1.3 Maquinado y pulido.

Luego de que los bloques fueron rociados, era necesario mecanizarlas para alcanzar la medida especificada por la norma ASTM G 77- 83, la cual es de  $10,16 \pm 0.013$  mm. ( $0,40000 \pm 0,0005$  pulg) (Figura 3.11).

El rectificado fue realizado en las instalaciones de la UCV en una rectificadora horizontal marca Berco, italiana, tipo RSC950 N° 4948, con una precisión de 0.01 mm utilizando 8 piedras de alúmina de grano fino. Dicha máquina se encontraba fuera de servicio y nuevamente con la ayuda de empresa Plasmatec Ingenieros C.A. fue reacondicionada y puesta en marcha. También se construyó una prensa para sujetar los bloques evitando el desprendimiento del recubrimiento. Los detalles de las reparaciones pueden ser encontradas en el ANEXO C.

Gracias a la puesta en marcha de esta rectificadora ahora se han realizado numerosos trabajos reacondicionando otros equipos que necesitaban mantenimiento. Siendo uno de ellos la máquina de embutir que más adelante utilizaríamos.

### 3.2.2 Anillos

El material seleccionado para los anillos fue un acero AISI 1045. La selección de este material se debe a que los recubrimientos con aleaciones de molibdeno son muy resistentes al desgaste, por lo tanto se requería un material que tuviese una alta dureza y resistencia al desgaste, de forma de que no se deformase frente a las cargas necesarias para producir un desgaste significativo en el bloque, y así poder cuantificar la eficiencia del mismo. La composición química del acero AISI 1045 se presentan en la tabla 3.3:

Tabla 3.3 Composición química del acero AISI 1045

C	Carbono	0,43-0,5 %
Mn	Manganeso	0,6-0,9 %
P	Fosforo	0,04 % max
S	Azufre	0,05 % max
Fe	Hierro	resto

Los anillos fueron torneados utilizando un torno paralelo CNC convencional marca Fulland (Taiwanés, 1995), empleando cuchillas de carburo de tungsteno. La velocidad de giro fue de 1500 rpm con un paso de 0.08 mm/rpm, siendo esta una velocidad media de avance, para así garantizar que el material no sufriese endurecimiento localizado por calentamiento excesivo de la pieza. Posterior al torneado los anillos fueron pulidos con una lija fina para lograr un acabado homogéneo y garantizar que todas tuviesen la misma rugosidad superficial.

### 3.3 Procedimiento del Ensayo Bloque sobre Anillo

Debido a que para el ensayo de desgaste el equipo debe ser calibrado, se realizó una prueba de calibración. Dicha prueba arrojó resultados satisfactorios, dejando claro que la máquina se encontraba en óptimas condiciones. Los detalles de dicho ensayo se pueden encontrar en el **ANEXO D**

#### 3.3.1 Ensayo Bloque sobre Anillo

En esta sección se discutirá sobre cómo se obtuvieron los parámetros de los ensayos para el par tribológico de R-10 vs Acero AISI 1045.

Basándonos en la publicación de Uyulgan, Centinel, Ozdemir, Tekmen, Okumus, & Celik (2003) donde se analiza un recubrimiento de base Mo sobre sustrato de fundición bajo condiciones no lubricadas, los ensayos se realizan con cargas de 49; 89 y 129 N, lo cual equivale a esfuerzos de 2,06; 3,75 y 5,43 MPa respectivamente. Tomando un valor medio se escoge la carga de 100N, lo que equivale a 4,21 MPa.

Para lograr este nivel de esfuerzo en nuestro ensayo hay que asumir una superficie de desgaste, ya que ésta varía en el tiempo, para así poder determinar la carga que debe ir en la máquina. Asumiendo una huella de 3 mm, lo cual es lo normal para este tipo de ensayos, se logra calcular la carga que se debe aplicar para la geometría dada en la Figura 3.5:

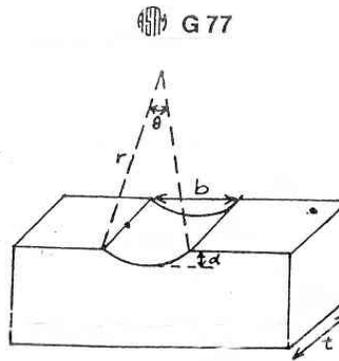


Figura 3.5 Huella Característica según norma G 77 – 88

Asumiendo que la superficie de contacto es un cuadrado, tenemos un esfuerzo aplicado de 4,21 Mpa, una supuesta huella de 3 mm y un espesor de bloque de 6,35 mm.

$$A = b * t = 3\text{mm} * 6,35 = 19,05\text{mm}^2$$

$$\text{Carga normal aplicada} = \sigma * A = 4,21 * 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} * 19,05\text{mm}^2 * \left(\frac{1\text{m}}{10^3\text{mm}}\right)^2 = 80,20\text{N}$$

$$\text{Carga normal aplicada} = 80,20\text{N} * \left(\frac{1\text{Lbf}}{4,44822\text{N}}\right) = 18,03\text{Lbf}$$

Como el brazo de la máquina hace que la magnitud de la carga se multiplique por 10:

$$\text{Peso muerto} = 1,803 \text{ Lb}$$

Debido a que los pesos vienen en medidas exactas en libras, el peso a utilizar es:

$$\text{Peso muerto} = 1,75 \text{ Lb} = 1 \frac{3}{4} \text{ Lb}$$

La distancia seleccionada para este ensayo fue de 550 m.

Las cargas y velocidades utilizadas fueron de: 44,5; 89; 178 y 167 N y 0,1; 0,2; 0,4 y 0,5 m/s. (Op. Cit) Es por esto que como se seleccionó el valor de carga 100N, el valor de velocidad seleccionado fue de 0.3 m/s.

Tomando en cuenta la geometría del sistema:

$$d = 35 \text{ mm}$$

$$V = 0,3 \text{ m/seg}$$

$$l = \pi d = \pi * 35 \text{ mm} = 109,96 \text{ mm} = 0,10996 \text{ m}$$

$$\text{RPM} = 0,3 \frac{\text{m}}{\text{seg}} * \left( \frac{60 \text{ seg}}{1 \text{ min}} \right) * \left( \frac{1 \text{ rev}}{0,10996 \text{ m}} \right) = 163 \frac{\text{rev}}{\text{min}}$$

Teniendo todos los parámetros anteriores definidos, el valor del número de ciclos y duración de la prueba son:

$$\text{Duracion de la Prueba} = \frac{550 \text{ m}}{0,3 \text{ m/seg}} = 30,55 \text{ min} = 30'33'' = 30 \text{ minutos}$$

$$\text{Número de ciclos} = 163 \frac{\text{rev}}{\text{min}} * 30 \text{ min} = 4890 \text{ rev}$$

Tabla 3.4 Parámetros Fijos para el Ensayo Bloque sobre Anillo

Carga Aplicada (lb)	1,75
Distancia de Deslizamiento (mts)	550
Revoluciones por minuto (rpm)	163
Duración de la prueba (min)	30

Se decidió realizar 11 mediciones en cada prueba, para determinar la fuerza de roce respecto a los ciclos. Las mediciones tienen el modelo de la Tabla 3.4

Tabla 3.5 Tabla de mediciones de la fuerza de roce

Medición	Ciclos	Duración	Fuerza de Roce Fr [Lbs]
1	81,5	30"	
2	163	1'	
3	244,5	1'30'	
4	326	2'	
5	489	3'	
6	652	4'	
7	978	6'	
8	1630	10'	
9	2445	15'	
10	3260	20'	
11	4890	30'	

### 3.3.2. Pesaje de las probetas

Para el procedimiento de pesaje, inicialmente se calibró la balanza analítica marca Scientech, modelo SA 310, la cual posee una precisión de 0,0001 gr (Figura 3.6). Este tipo de balanza aísla la muestra al momento de ser pesada para evitar que alguna corriente de aire altere los resultados de las muestras.



Figura 3.6 Balanza Analítica Marca Scientech

### 3.4 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

Previo a los estudios de microscopía, las muestras fueron cortadas utilizando una máquina marca Buehler de corte abrasivo, y preparadas metalográficamente en el Laboratorio de Metalografía de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UCV, utilizando para esto un equipo marca Struers, modelo DAP-U (Figura 3.7). Para el desbaste se utilizaron papeles de carburo de silicio de granulometría 100, 380, 600 y 1200 marca 3M progresivamente y para el

pulido se utilizaron paños de fieltro con una suspensión compuesta por alpha alúmina de 0.3 micrones y agua como solvente.

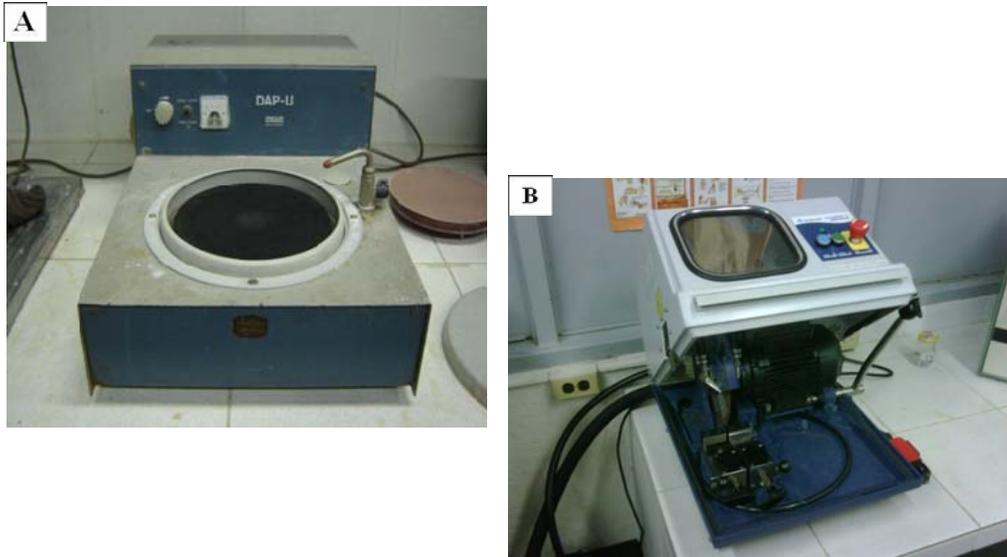


Figura 3.7 A) Equipo de plato giratorio y B) Cortador abrasivo.

La microestructura, superficie de desgaste, composición y porosidad del recubrimiento fueron evaluadas mediante un microscopio electrónico de barrido marca Philips, modelo XL 30, con capacidad para ampliaciones de hasta 30000x y acoplado a un equipo de espectroscopía por dispersión de energía de rayos X (Figura 3.8).

Las muestras seleccionadas para la realización de la microscopía electrónica de barrido fueron las condiciones que presentaron los mejores y peores resultados para el ensayo de desgaste abrasivo, además de la condición del proveedor.

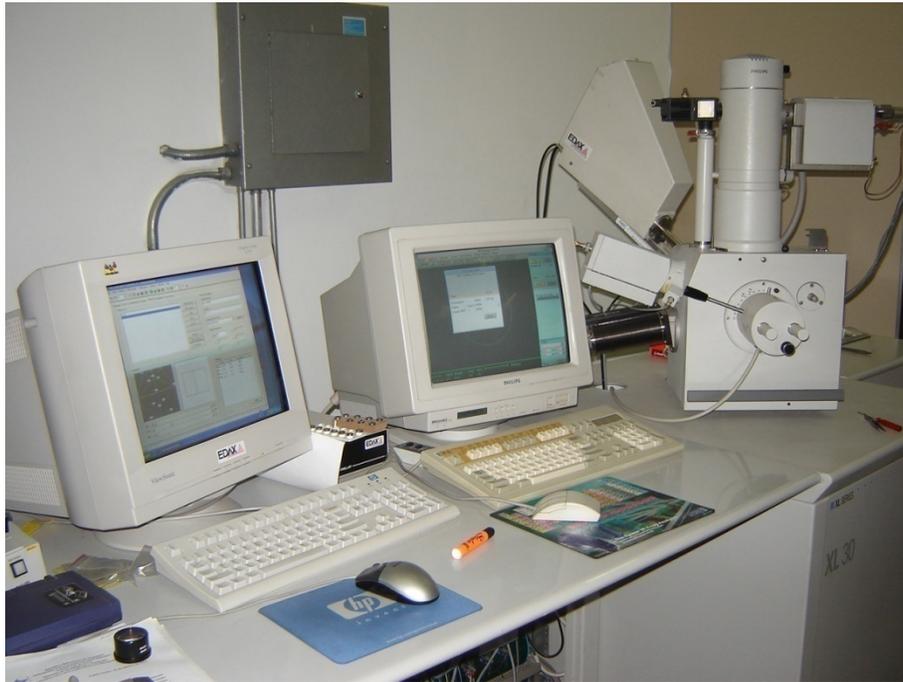


Figura 3.8 Equipo de microscopía electrónica de barrido

### 3.5 Ensayo de Dureza

El ensayo de dureza Vickers fue realizado en las instalaciones de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela, específicamente en el laboratorio de metalografía, donde las muestras fueron preparadas metalográficamente para poder realizar dicho ensayo. Las mediciones de dureza fueron tomadas de tres condiciones: la mejor, la peor y la recomendada por el fabricante, utilizando un durómetro marca Future Tech Corp FV-700, equipado con un penetrador Vickers (Figura 3.9) y con carga de 2Kgf, por un tiempo de 10 segundos. Los resultados se expresaron en función del promedio de seis indentaciones realizadas en la sección transversal del recubrimiento.



Figura 3.9 Identador Future-Tech Corp FV-700

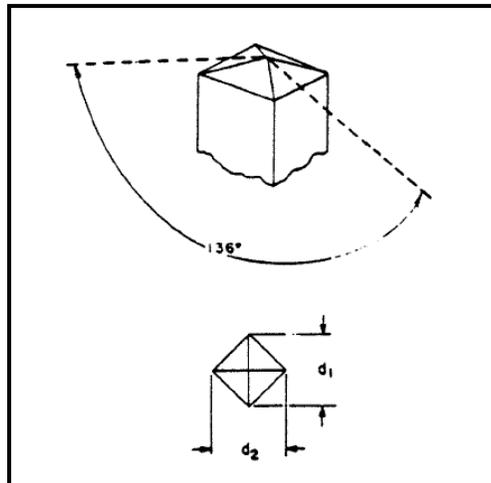


Figura 3.10 Geometría del indentador y huella arrojada por el mismo.

CAPÍTULO IV  
*Resultados y Análisis*

#### 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Con el objetivo de encontrar cuales son los parámetros óptimos para la deposición térmica por plasma, se realizará un análisis tomando en cuenta varios indicadores o criterios:

1. Pérdida de peso del anillo: nos da una idea de cómo se comporta la contraparte al elemento a analizar. Por lo general busca simular el comportamiento del cojinete, lo que resulta importante ya que éste también puede producir una falla crítica del sistema. También nos da una idea de si hubo transferencia de material.
2. Pérdida de peso del bloque: este factor y la huella son los criterios más importantes. Da una idea sobre la cantidad de material que fue perdido o ganado durante el ensayo. Este criterio es afectado por los fenómenos de diferencia de densidad, transferencia de material, creación de películas de óxido y penetración del lubricante en el material. (**NORMA G 77 – 83, Punto 10.1.3**)
3. Huella o pérdida volumétrica: nos permite determinar como la geometría de la pieza cambió después del ensayo. Este parámetro es de suma importancia ya que nos da una visión casi libre de errores sobre la capacidad del material de mantener su forma original. La pérdida volumétrica es calculada a través de la medición de la huella de desgaste y con la utilización de una formula encontrada en la **NORMA G 77 – 83 (fig. 5)** destinada para el cálculo de dicho valor.
4. Dureza Vickers: nos permite analizar la dureza del recubrimiento así como la del sustrato en la zona de adhesión. Solo se le realizará este análisis a tres condiciones de recubrimiento: la mejor, la peor y la recomendada por el fabricante

5. Microscopia Electrónica de Barrido: este método de análisis nos permite identificar cuáles fueron los mecanismos de desgaste que tomaron lugar en el punto de contacto. Solo se le realizará este análisis a tres condiciones de recubrimiento: la mejor, la peor y la recomendada por el fabricante.

Dichos criterios serán analizados con diferentes herramientas dependiendo de su grado de importancia, siendo una de ellas análisis estadísticos ANOVA, así como también superficie de respuesta.

#### **4.1 Ensayo de Desgaste por Deslizamiento**

En la tabla 4.1 podemos observar los resultados del ensayo de desgaste por deslizamiento. En esta tabla se pueden apreciar tres criterios de análisis, con sus respectivas desviaciones estándares para las 27 condiciones. Prestando atención a los criterios de pérdida volumétrica y pérdida de peso en el anillo se puede ver que la mejor condición es la n° 14, siendo esta la condición del fabricante, aunque para el criterio de pérdida de peso en el bloque la mejor condición es la n° 8. Éste último resultado es un poco contradictorio, ya que teóricamente la probeta que tiende a cambiar mas su geometría y tener mayor huella debería a su vez, perder más peso, es por ello que se debe tomar en cuenta que pudo haber ocurrido transferencia de material del anillo hacia el bloque. La evidencia de este fenómeno se hace mucho más clara cuando se verifica que para la condición n° 8, la pérdida de peso en el anillo fue elevada respecto a la pérdida de peso en el bloque, posicionándose como la décima mejor condición.

Resulta curioso que tanto la mejor como la peor condición se encuentren en el lote con la menor tasa de alimentación. Se podría decir que como los valores de voltaje y amperaje fueron los menores para la condición n°1, no hubo suficiente

Tabla 4.1 Resultados del ensayo de desgaste por deslizamiento.

	Tasa de alim [lb/h]	Voltaje [V]	Amperaje [A]	Pérdida de peso del anillo [gr]	Desviación estándar	Pérdida de peso del bloque [gr]	Desviación estándar	Pérdida Volumétrica [mm <sup>3</sup> ]	Desviación estándar
1	5	36	650	0,08875	0,00055	0,02035	0,00015	3,061	0,198
2			750	0,04515	0,00475	0,00510	0,00260	0,719	0,274
3			800	0,03485	0,00345	0,00290	0,00010	0,381	0,012
4		36,5	650	0,04610	0,00810	0,00305	0,00075	0,675	0,143
5			750	0,04710	0,00370	0,00580	0,00030	0,975	0,115
6			800	0,04890	0,01870	0,00655	0,00415	0,795	0,450
7		37	650	0,04745	0,00215	0,00465	0,00015	0,733	0,170
8			750	0,03360	0,00050	0,00165	0,00055	0,330	0,088
9			800	0,03600	0,00990	0,00340	0,00140	0,710	0,237
10	6	36	650	0,04485	0,00285	0,00355	0,00135	0,406	0,126
11			750	0,02680	0,00140	0,00320	0,00020	0,382	0,037
12			800	0,02645	0,00055	0,00290	0,00000	0,340	0,079
13		36,5	650	0,03220	0,00470	0,00310	0,00030	0,454	0,109
14			750	0,02590	0,00110	0,00230	0,00010	0,291	0,010
15			800	0,03375	0,00335	0,00215	0,00055	0,393	0,025
16		37	650	0,03180	0,00280	0,00315	0,00095	0,373	0,072
17			750	0,02975	0,00125	0,00215	0,00045	0,322	0,000
18			800	0,02785	0,00045	0,00285	0,00005	0,432	0,013
19	7	36	650	0,03380	0,00840	0,00280	0,00190	0,422	0,142
20			750	0,03630	0,00150	0,00270	0,00010	0,432	0,013
21			800	0,03430	0,00000	0,00205	0,00065	0,345	0,023
22		36,5	650	0,03150	0,00010	0,00260	0,00010	0,313	0,106
23			750	0,03160	0,00770	0,00180	0,00000	0,313	0,032
24			800	0,04630	0,00420	0,00445	0,00005	0,651	0,088
25		37	650	0,03875	0,00255	0,00320	0,00140	0,560	0,141
26			750	0,03810	0,00020	0,00335	0,00095	0,330	0,088
27			800	0,03460	0,00380	0,00180	0,00020	0,335	0,034

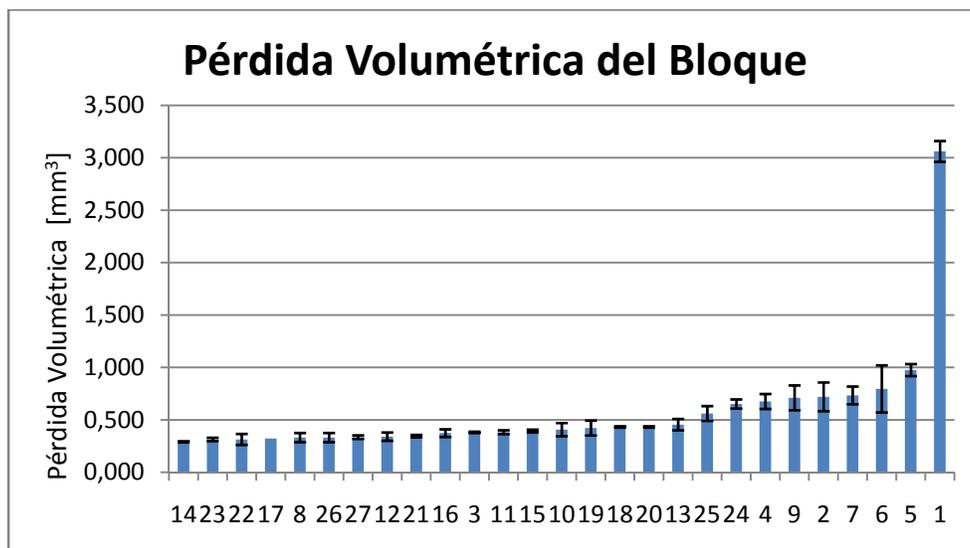
energía para que las partículas alcanzaran su temperatura de fusión, producto del bajo amperaje, y además llegasen a las velocidades necesarias, producto del bajo voltaje. Estas condiciones tenderían a producir depósitos con elevado número de partículas no fundidas, con un bajo nivel de cohesión, lo que podríamos corroborar con en el análisis de microscopía electrónica de barrido. Sin embargo, la condición n° 8 a pesar de haber sido depositada con bajos valores de tasa de alimentación, la deposición con valores medios de voltaje y amperaje proporcionarían el calor y la velocidad necesaria

El lote de las 9 condiciones rociadas con la menor tasa de alimentación (condición 1 a la 9) presenta los valores más altos de pérdida volumétrica, estando el 78 % de éstas entre los resultados más desfavorables, así como también 56 % de este lote reportaron los valores más bajos en cuanto a pérdida de peso en el bloque. La condición que arrojó los peores resultados para los tres criterios fue la n° 1. Incluso se podría pensar que se cometió algún error durante la prueba, pero la desviación entandar resultó ser bastante baja, también hay que tomar en consideración que solo se realizaron dos repicas por condición. Sin embargo, hay que tener presente que la condición n° 8 pertenece a este grupo y fue la que arrojó los mejores resultados para pérdida de peso en el bloque, por lo que le prestaremos especial atención en los análisis posteriores. Tanto la condición n° 8 como la n° 14 (recomendada por el fabricante) presentan valores de pérdida volumétrica un 90% menores a los de la condición n° 1.

Otro aspecto que nos permite visualizar la figura 4.1 es la desviación estándar, la cual se encuentra en la parte superior de cada barra para cada condición. Se puede apreciar que para las peores condiciones, para los tres criterios, la desviación estándar es mayor que para aquellas condiciones más favorables. Sin embargo, los valores para la desviación estándar se encontraban dentro de los rangos aceptables, por lo que se puede decir que los resultados son confiables.

Es importante resaltar que la probeta n° 6 (5lb/h;36,5V;850A) sufrió desprendimiento del recubrimiento, lo cual ocurrió después del proceso de rociado térmico durante el desmontaje del riel al cual había sido soldada. Dicho procedimiento se llevó a cabo tomando especial cuidado en no ejercer cargas sobre el recubrimiento, sin embargo, se produjo el desprendimiento del mismo. Probablemente esta muestra no tuvo una adecuada preparación previa al rociado o simplemente sufrió un impacto durante su manipulación. Debido a que fue un suceso aislado y no se observó desprendimiento del recubrimiento en ningún otro caso durante los procesos de rectificado, corte, y preparación metalográfica, no le daremos mucha relevancia a este suceso.

La Figura 4.1 no nos permite inferir sobre la influencia del voltaje y del amperaje sobre la resistencia al desgaste de las condiciones estudiadas, por lo tanto estos parámetros serán analizados utilizando otra metodología.



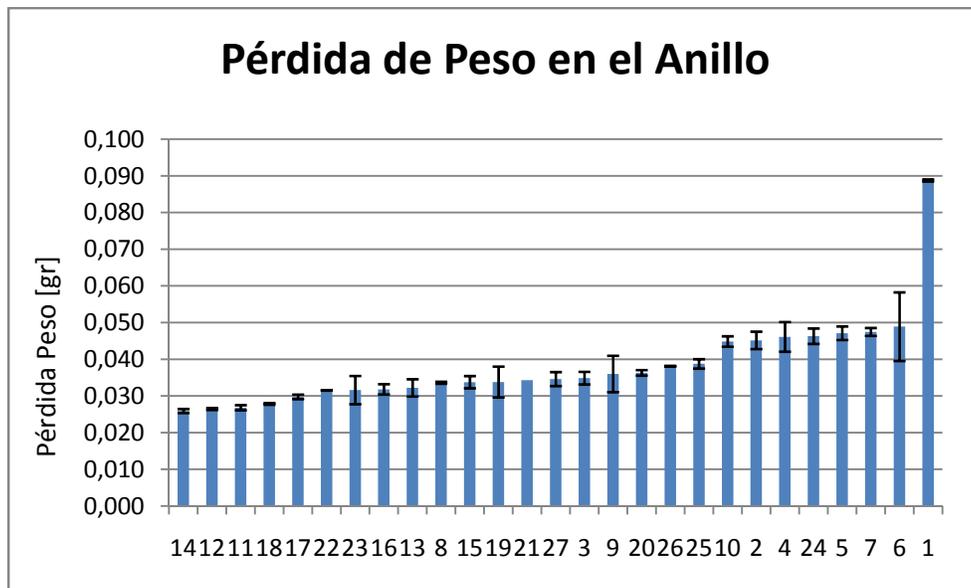
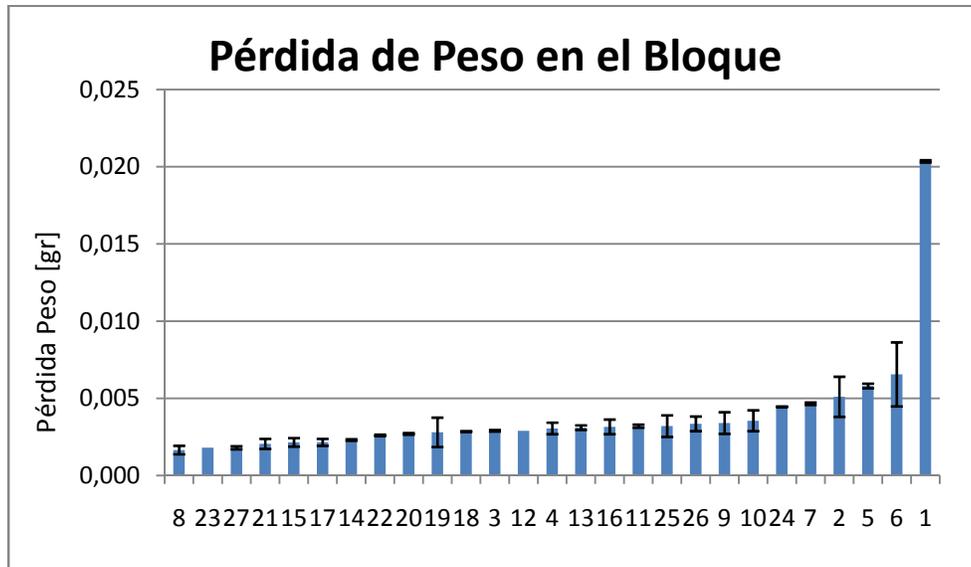


Figura 4.1 Pérdidas del bloque y del anillo

## 4.2 Anova y Método de Superficie de Respuesta

### 4.2.1 Pérdida volumétrica del bloque

Los parámetros del proceso de rociado térmico están muy relacionados entre sí por lo tanto, sus influencias sobre la resistencia al desgaste deben ser estudiados a través de métodos estadísticos ya que no se puede afirmar sobre la mayor o menor influencia de cierto parámetro sobre la variable de respuesta. Para determinar la variabilidad de la resistencia al desgaste (relacionado con la pérdida volumétrica del material) se utiliza el análisis de varianza respecto a los factores en estudio (tasa de alimentación, voltaje y amperaje).

En la Tabla 4.2 se presentan los valores obtenidos por el programa ANOVA, donde se aprecian diferentes datos tales como las fuentes de variación, suma de cuadrados, promedio de cuadrados, el valor F y el valor de significación p.

Tabla 4.2 Resultados de la tabla ANOVA para Pérdida Volumétrica del bloque

Análisis de Varianza				
Fuentes de Variación	Suma de Cuadrados	Promedio de Cuadrados	F	Valor p
Tasa de Alimentación [lb/h]	3,47023	1,73511	42,23	0
Voltaje [V]	0,64921	0,3246	7,9	0,002
Amperaje [A]	1,13773	0,56886	13,85	0
Tasa [lb/h]*Voltaje [V]	1,37317	0,34329	8,36	0
Tasa [lb/h]*Amperaje [A]	1,7239	0,43097	10,49	0
Voltaje [V]*Amperaje [A]	2,13629	0,53407	13	0
Tasa [lb/h]*Voltaje [V] *Amperaje [A]	4,09284	0,51161	12,45	0
Error	1,10928	0,04108		

El valor más importante para determinar si existen efectos diferenciales entre los diversos tratamientos es el valor de significación  $p$ . Si este valor es mayor que 0,05 se establecerá que no existen dichos efectos diferenciales, sin embargo, si el nivel de significación es menor que 0,05 se establece que existen relaciones de dependencia entre las variables y se puede decir que tales niveles de factor o factores influyen significativamente sobre el valor de la respuesta obtenida.

A partir de los resultados de ANOVA presentados en la tabla 4.2 se puede observar que existen varios factores con valores de significación menores a 0,05, entre ellos la tasa de alimentación, el amperaje y en último lugar el voltaje. Así mismo, tomando en cuenta que el valor de significación de la tasa de alimentación es de 0,000 y el amperaje es de 0,000 se puede decir que éstos valores ejercen una influencia significativa sobre las variables de respuesta, el voltaje también posee un valor menor a 0,05 sin embargo, es mayor a los obtenidos para los otros dos parámetros, siendo de 0,002. El programa utilizado (Minitab 15) posee una apreciación de tres decimales ya que lo importante es conocer si el valor de “ $p$ ” es mayor o menor a 0.05.

Este tipo de análisis estadístico nos permite saber si la combinación de diversos parámetros también influye de forma significativa sobre la variable de respuesta. Ya que todos los parámetros resultaron ser significativos, es de esperarse que la combinación de ellos también lo sea, donde todas las posibles combinaciones dan valores de “ $p$ ” por debajo a 0,05. Cabe destacar que el único parámetro que resultó distinto de 0,000 es el del voltaje.

La Figura 4.2 nos permite analizar la influencia de los parámetros de rociado de forma independiente y en ella se puede ver que el parámetro “tasa de alimentación” es el que produce mayores cambios en la variable de respuesta, con variaciones de  $0,5 \text{ mm}^3$  en la pérdida volumétrica. Se puede decir que en líneas generales los valores más altos de desgaste se presentan cuando se utiliza el valor más bajo de tasa de alimentación (5 lb/h). Sin embargo, la resistencia al desgaste mejora significativamente cuando se utilizan las tasas de alimentación de 6 lb/h, y 7 lb/h, respectivamente. A través de estas gráficas se puede visualizar con mayor claridad, lo mencionado anteriormente sobre los efectos que produce la baja tasa de alimentación sobre la resistencia al desgaste. Este comportamiento puede ser atribuido a que a bajas tasas de alimentación la menor cantidad de polvo absorbe una mayor cantidad de energía, lo cual se traduce en un calentamiento excesivo. A medida que la tasa de alimentación aumenta, los polvos se calientan apropiadamente llegando a un punto óptimo que les permite cohesionarse entre sí, evitando el deterioro del recubrimiento cuando éste es sometido a desgaste por deslizamiento.

El efecto de la variación del amperaje se presenta en la Figuras 4.2B y en ella se puede apreciar un comportamiento similar a la variación de la tasa de alimentación en la cual los valores intermedios del parámetro en estudio producen la menor tasa de desgaste aumentando ligeramente cuando se utiliza el valor más alto.

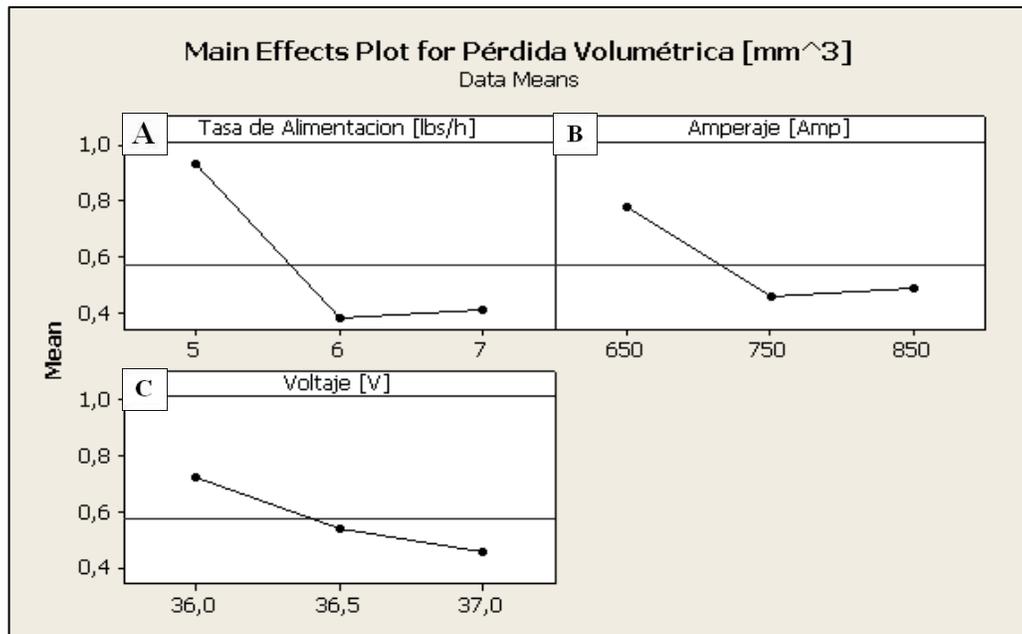


Figura 4.2 Efectos principales para Pérdida Volumétrica del bloque vs A) Tasa de alimentación B) Amperaje y C) Voltaje

El efecto del voltaje (ver Fig.4.2C) es diferente ya que se aprecia una tendencia más lineal en la cual para valores bajos de voltaje el desgaste es mayor y a medida que aumenta dicho parámetro el desgaste disminuye. Se observa que esta tendencia disminuye a medida que se aumenta el voltaje, haciéndose cada vez más horizontal. De estas figuras se puede deducir que para los valores estudiados el parámetro más significativo es la tasa de alimentación de los polvos.

A partir de las gráficas de efectos principales, podría establecerse una aproximación respecto a los parámetros óptimos de rociado, que vendrían dados por una tasa de alimentación de 6 (lb/h), un amperaje de 750 A y un voltaje de 37 V, que son los valores que presentan menores pérdidas volumétricas y por lo tanto menores tasas de desgaste. Dicho resultado concuerda con lo observado en el punto 4.1, en el cual se indicó que la condición N° 14 es la que arroja menor desgaste, con parámetros de rociado de tasa de alimentación de 6 (lb/h), amperaje de 750 A y voltaje de 36,5 V. De la misma forma, la peor condición fue la N° 1 con tasa de alimentación de 5 (lb/h), amperaje de 650 A y voltaje de 36 V, corroborando lo antes dicho.

#### *4.2.2 Superficie de Respuesta para Pérdida Volumétrica del bloque*

El método de superficie de respuesta nos permite analizar las variables de salida para determinar una región o zona que arroje los mejores valores de desgaste, y de esta forma conocer cuáles son los parámetros óptimos para la deposición. Es importante señalar que a través del análisis de varianza realizado para la pérdida volumétrica del bloque y la pérdida de peso del bloque, se puede decir que la tasa de alimentación y el amperaje son los factores que más influyen en la respuesta obtenida para el proceso de rociado térmico y, por lo tanto, el método de superficie de respuesta se va a enfocar en dichos parámetros

En las Figuras 4.3 y 4.4 se pueden observar la superficie de respuesta y el gráfico de contorno para la pérdida volumétrica del bloque, en la cual la interacción tasa de alimentación\*amperaje representa el mayor nivel de significación.

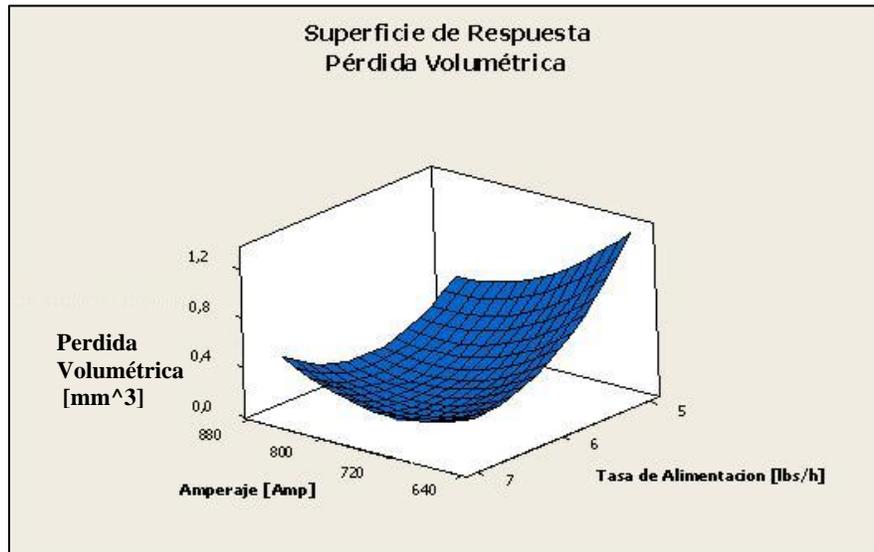


Figura 4.3 Superficie de respuesta para interacción Tasa de alimentación\*Amperaje

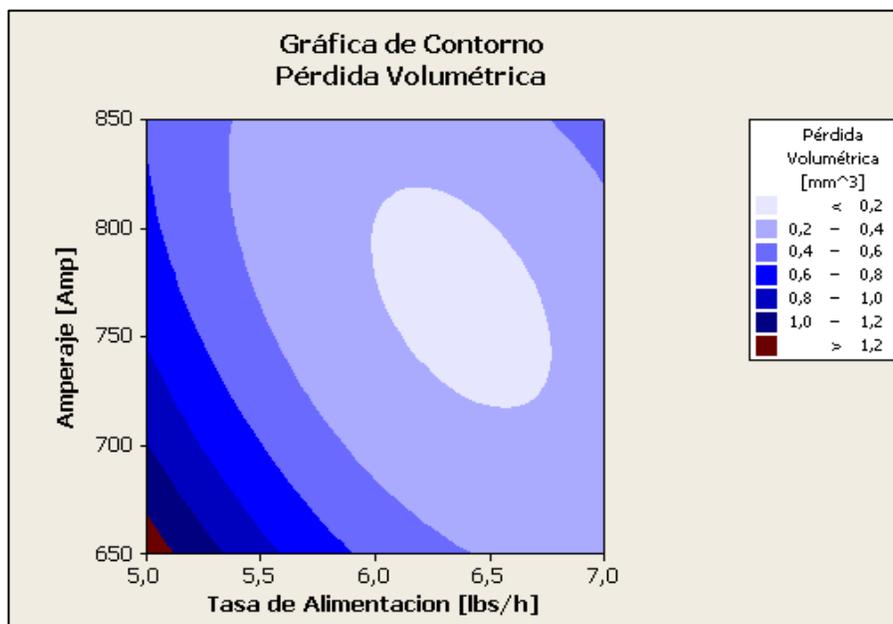


Figura 4.4 Gráfico de contorno para interacción Tasa de alimentación\*Amperaje

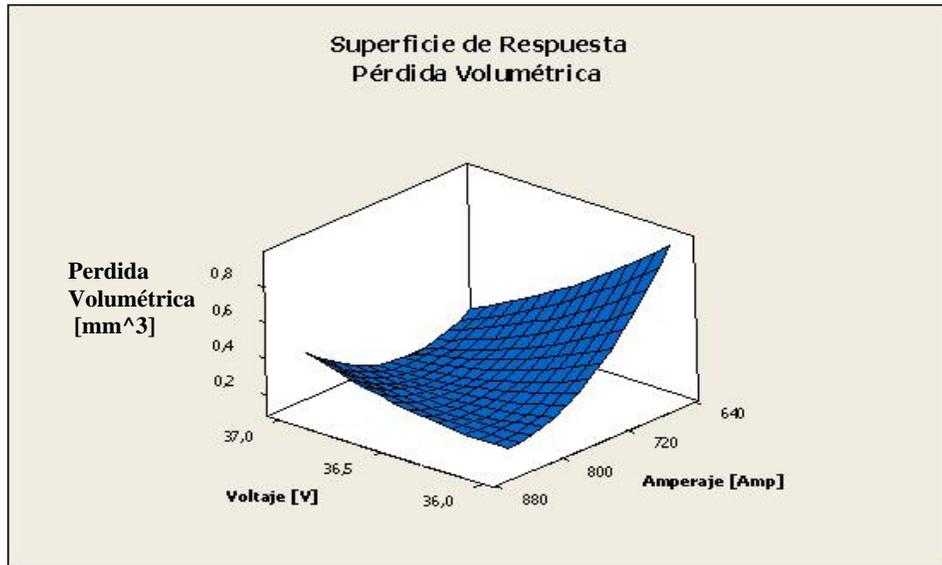


Figura 4.5 Superficie de respuesta para interacción Voltaje\*Amperaje

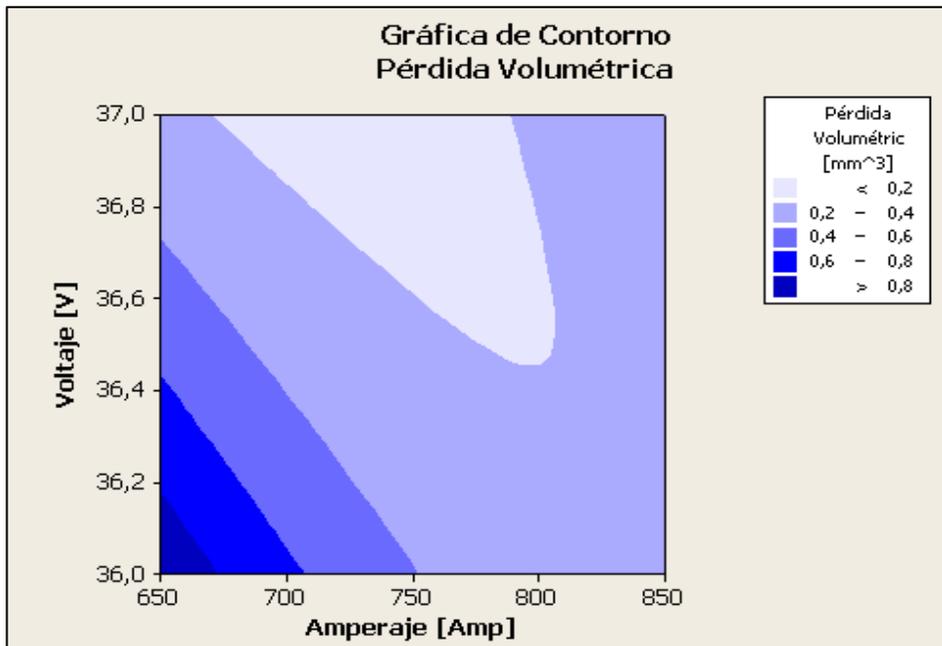


Figura 4.6 Gráfico de contorno para interacción Voltaje\*Amperaje

En la Figura 4.4 se puede ubicar la región en la cual la pérdida volumétrica obtenida presenta la menor cota. Ésta región está comprendida entre un amperaje de 725 – 825 A y una tasa de alimentación de 6 – 6,75 lb/h.

A partir de las Figura 4.6 se obtiene el rango óptimo de voltaje, el cual es de 36,5 – 37 V. En la Tabla 4.4 se pueden observar los valores óptimos para los parámetros de rociado térmico basándonos en el criterio de pérdida volumétrica, los cuales coinciden con lo obtenido a través de las graficas de los efecto principales que establece una tasa de alimentación de 6 (lb/h), amperaje de 750 A y un voltaje de 37 V.

Tabla 4.3 Valores óptimos de los parámetros evaluados para Pérdidas Volumétricas

Parámetro	Rango Óptimo
Tasa de alimentación de los Polvos	6 – 6,75 lb/h
Amperaje	725 – 825 A
Voltaje	36,5 – 37 V

#### 4.2.3 Superficie de Respuesta para Pérdida de peso del bloque

Se llevó a cabo un análisis similar al realizado para la pérdida volumétrica enfocado en la pérdida de peso en el bloque, pero debido a que dichos resultados fueron prácticamente los mismos, solo colocaremos la tabla final en la cual se observan los intervalos para los cuales los parámetros de rociado son óptimos, así como la gráfica de superficie de respuesta relacionada con la pérdida de peso en el bloque.

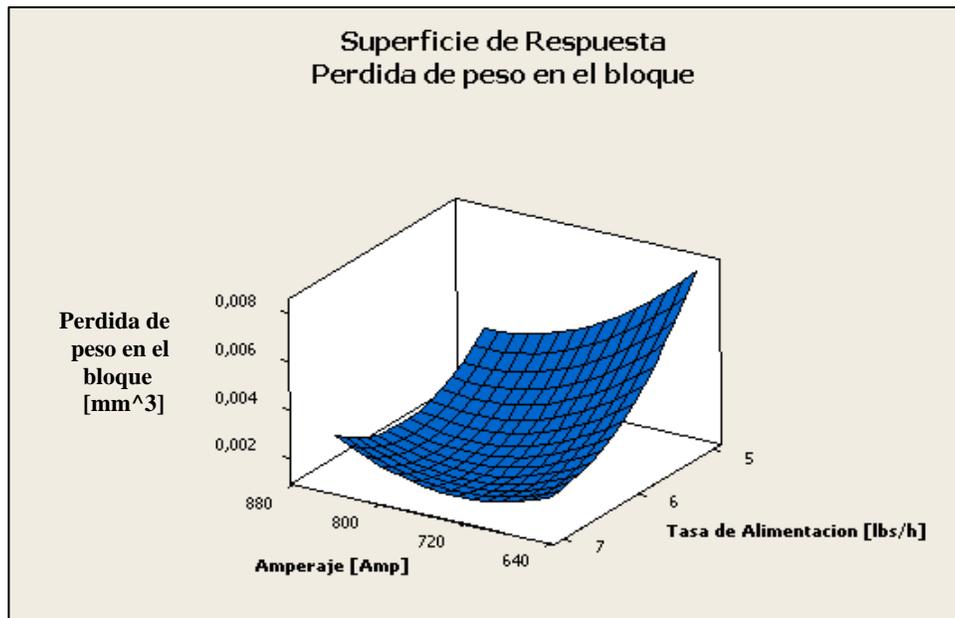


Figura 4.7 Superficie de respuesta para interacción Tasa de alimentación\* Amperaje

Tabla 4.4 Valores óptimos de los parámetros evaluados para Pérdida de peso en el bloque

<b>Parámetro</b>	<b>Rango Óptimo</b>
Tasa de alimentación de los Polvos	6 – 7 lb/h
Amperaje	700 – 850 A
Voltaje	36,2 – 37 V

### 4.3 Dureza

En base a los análisis anteriores sobre la resistencia al desgaste podemos decir que la condición nº 1 fue la que arrojó los valores más bajos de resistencia al desgaste, y que las condiciones nº 8 y nº 14 son las que presentan el mejor comportamiento, sin embargo, es importante realizar un análisis de dureza que nos permita determinar si ésta tiene un comportamiento similar a la variación de parámetros. Como se dijo anteriormente la determinación de la dureza se realizará sólo a las condiciones que presentaron los valores más bajos y más altos de resistencia al desgaste y los mismos se compararán con los resultados obtenidos para la condición dada por el fabricante de los polvos de alimentación. Eso significa que analizaremos las condiciones nº 1, nº 8 y nº 14.

#### 4.5 Ensayos de Dureza de las condiciones nº 14, nº 8 y nº 1

Tabla 4.5 Ensayos de Dureza de las condiciones nº 14, nº 8 y nº 1

Condición	Durezas HV [Kg/mm <sup>2</sup> ]		
	1	8	14
Medición 1	471,4	437	609,6
Medición 2	418	439,6	560,4
Medición 3	340,6	584,6	503,4
Medición 4	348,2	691,2	783,5
Medición 5	386,6	539	506,7
Medición 6	463	562,5	557,6
Promedio de dureza	404,5	542,3	586,9
Desviación Estándar	51,1	87,6	95
Desviación Estándar porcentual	12,64%	16,15%	16,18%

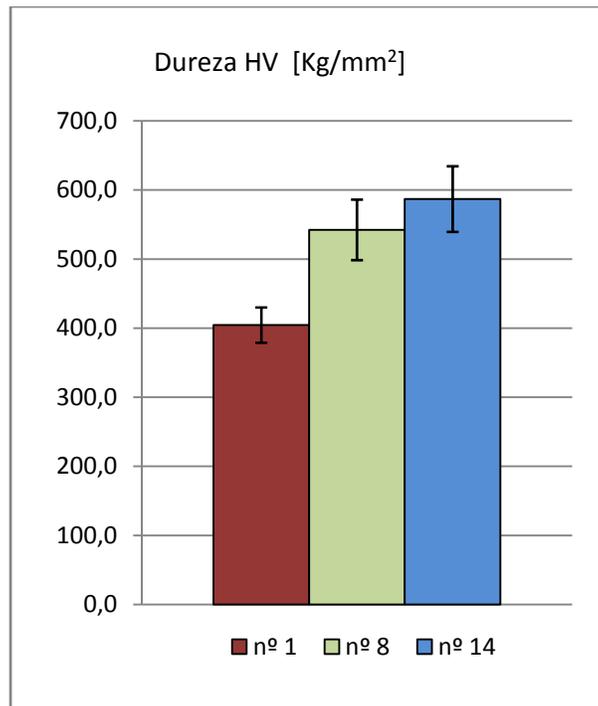


Figura 4.8 Gráfico de Durezas de las condiciones nº 14, nº 8 y nº 1

La Tabla 4.8 presenta los valores de dureza para estas tres condiciones. Estas durezas fueron obtenidas en base al promedio de 6 indentaciones realizadas sobre la sección transversal del recubrimiento, siempre en la mitad del espesor del mismo. La carga utilizada fue 2 Kg durante un tiempo de 10 seg.

En esta tabla se pueden observar valores similares de dureza para la condición nº 14 y la nº 8, ya que viendo las desviaciones estándares, sería incorrecto decir que la condición nº 14 presenta mayor dureza que la nº 8. Lo cual significa que

estos valores están en concordancia con los obtenidos en el ensayo de desgaste por deslizamiento.

Es importante conocer el valor de dureza HV para el acero AISI 1045, el cual es de 205 Kg/mm<sup>2</sup>. Se puede ver claramente que para cualquier condición de rociado los valores de dureza de los recubrimientos son mayores que los de los anillos, por lo que se espera que ocurra un mayor desgaste en ellos.

#### **4.4 Microscopía Electrónica de Barrido**

Como se mencionó anteriormente este estudio solo se realizó a tres condiciones, la que obtuvo la mejor respuesta ante el desgaste por deslizamiento, la peor y la recomendada por el fabricante.

##### *4.4.1 Microestructura y Composición Química Elemental (EDS)*

Con la finalidad de analizar la influencia de la microestructura sobre la resistencia al desgaste de los recubrimientos, se realizó una micrografía en la sección transversal de las condiciones antes mencionadas. Una magnificación de esta sección transversal a una magnificación de 200X es mostrada en las Figuras 4.9A, 4.9B y 4.9C para las condiciones n° 8, n° 14 y n° 1, respectivamente. En la modalidad de electrones retrodispersados (BSE) se puede observar que el espesor del recubrimiento de la condición n° 1 es casi un tercio del de las condiciones n° 8 y n° 14. Esto puede ser producto de un error en el proceso de rectificado, ya que las probetas fueron rociadas hasta alcanzar un espesor de 1 mm y luego rectificadas.

En líneas generales se puede decir que tanto la condición n° 8 como la n° 14 (Figura 4.9 A y B) presentan una estructura lamelar característica de los recubrimientos depositados por rociado térmico sin embargo, es de hacer notar que ambos recubrimientos presentan una interface limpia lo cual podría traducirse en una buena adhesión substrato-recubrimiento. Así mismo se observa una microestructura con poca presencia de poros y grietas y ausencia de gotas no fundidas, lo cual se traduce en una buena calidad de recubrimiento. Es importante destacar que los recubrimientos depositados por plasma presentan generalmente una microestructura con mayor contenido de óxidos, poros y grietas (Babu et. al., 1996), lo cual no se observa en estas dos condiciones indicando que se han obtenido recubrimientos de buena calidad. En la interface de ambas microestructuras están presentes partículas de color oscuro (probablemente de alúmina) producto de la limpieza previa las cuales quedaron atrapadas en la interface debido a la gran fuerza con la que fueron proyectadas estas partículas durante el proceso de granallado. Estas inclusiones generalmente no generan grandes problemas de nucleación de grietas y desprendimiento del recubrimiento

La figura 4.9C corresponde a la muestra que obtuvo los resultados más bajos de resistencia al desgaste y es notoria la diferencia en cuanto la calidad del recubrimiento observándose gotas no fundidas (ver óvalo verde en la fotomicrografía), grietas (ver círculo rojo) y pobre cohesión de las partículas (ver círculo amarillo). Un análisis químico elemental (EDS) indicó que la partícula no fundida era rica en hierro.

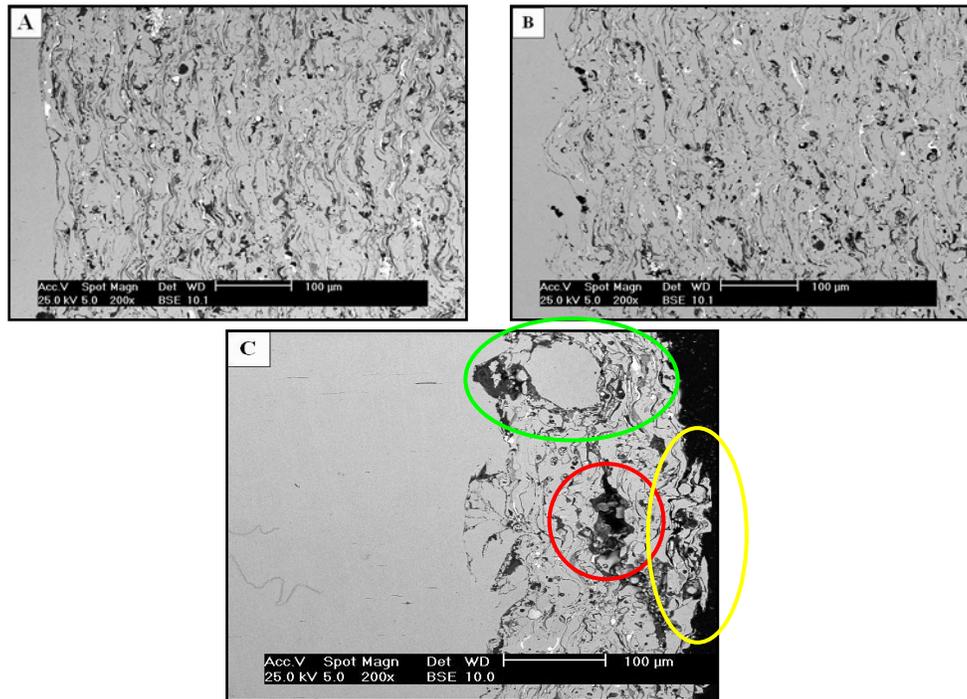


Figura 4.9 Microscopía de las condiciones A) n° 8; B) n° 14; C) n° 1 en modo de electrones retrodispersados con magnificación de 200x

Es de hacer notar que las condiciones n° 8 y n° 14 poseen los mismos valores de amperaje y casi los mismos de voltaje (37 y 36,5 V, respectivamente) sin embargo, los niveles de tasa de alimentación son diferentes para estas dos condiciones (5 lb/h y 6 lb/h). Probablemente la menor resistencia al desgaste de la condición n° 8 es debida a que al ser rociadas con una menor tasa de alimentación, las partículas absorben más energía, ya que se encuentran en menor cantidad, tornándose muy plásticas durante el vuelo lo que las hace propensas a oxidarse. Por el contrario la condición n° 1 posee los menores niveles para cada parámetro de deposición, por lo que se piensa que es el caso inverso, donde la energía así como la velocidad no son suficientes, creando un recubrimiento con partículas no fundidas y baja cohesión entre lamelas.

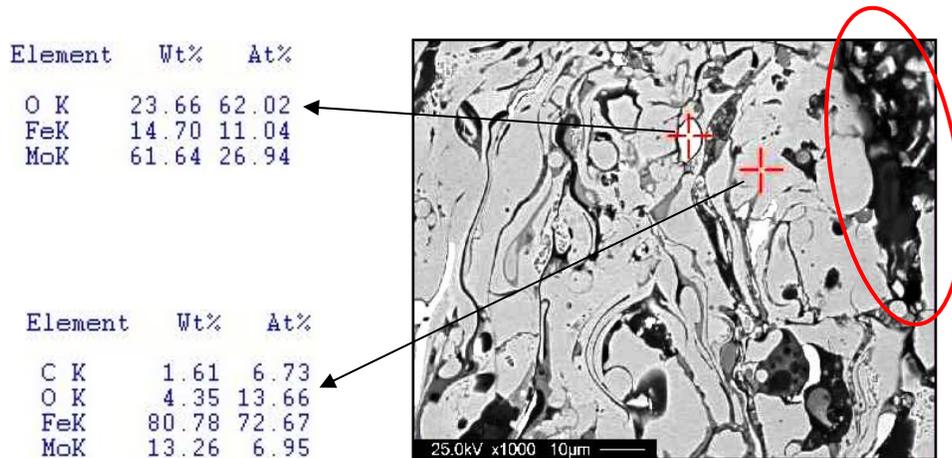


Figura 4.10 Fotomicrografía de la condición n° 1, la cual muestra un análisis por EDS realizado a dos fases observadas en el recubrimiento.

La Figura 4.11 muestra el análisis químico semi-cuantitativo realizado a dos de las fases observadas en este recubrimiento n° 1, una blanca y otra fase gris, indicando que la fase gris está formada mayoritariamente por hierro y la fase blanca por un alto porcentaje de molibdeno. Este alto contenido de Mo en esta partícula podría indicar que se trata de una partícula no fundida de Mo. Es de hacer notar que el análisis realizado a ambas fases indica la presencia de oxígeno, lo que evidencia la alta afinidad de los polvos de alimentación con este elemento. De acuerdo con un estudio realizado por Ozdemir y Celik (2003) sobre el comportamiento de recubrimientos de Mo bajo ciclos térmicos, se reveló que a temperaturas de 500°C la formación de óxido de Mo (MoO) ocurría con gran facilidad. Estos óxidos resultan ser muy duros, y frágiles pero actúan como lubricantes cuando el recubrimiento es expuesto a desgaste por deslizamiento y es por esta razón que estos materiales se utilizan en aplicaciones en la cual esta propiedad es requerida. Sin embargo, la baja

cohesión entre lamelas (ver círculo rojo) de este recubrimiento y la presencia de gotas no fundidas impiden un buen desempeño de este recubrimiento.

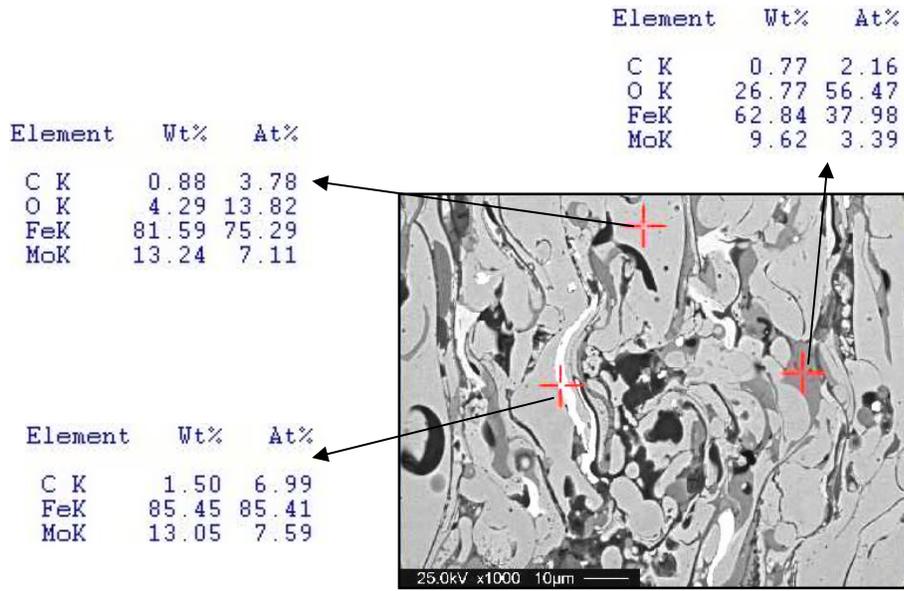


Figura 4.11 Fotomicrografía de la condición N° 5 con análisis por EDS realizado a las fases observadas en este recubrimiento

La Figura 4.11 corresponde a una micrografía en modo de electrones primarios a una magnificación de 1000X de la condición n° 8 en la cual se observan diferentes fases. Un análisis EDS realizado sobre estas fases evidenció que la fase blanca y gris clara presentan la misma concentración de molibdeno, con la diferencia de que la gris clara presenta niveles bajos de oxígeno; por otro lado podemos ver una fase gris oscura rica en hierro, la cual reporta altos niveles de oxígeno, lo que nos lleva a pensar que se trata de óxido de hierro. También se reporta la presencia de carbono, siendo la zona blanca la que arroja mayor concentración, que junto con el alto porcentaje de hierro dan como resultado un acero de alto carbono con molibdeno como aleante. Es este tipo de zona o

composición la que más adelante analizaremos en búsqueda de los mecanismos de desgaste.

#### 4.4.2 Superficie de desgaste

Las fotomicrografías mostradas en la Figura 4.12 fueron tomadas en modo de electrones secundarios sobre la superficie de desgaste de las condiciones que sufrieron el mayor (condición 1) y menor (condición 8) desgaste y se compararon con la condición depositada con los parámetros dados por el fabricante de los polvos (condición n° 14).

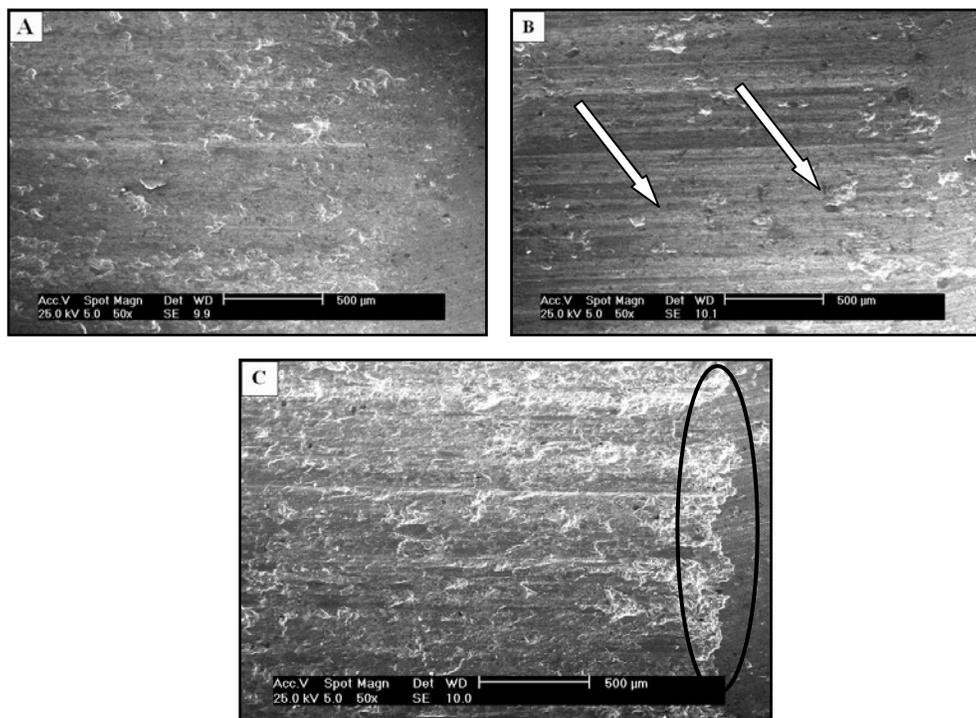


Figura 4.12 Microscopía de la zona de desgaste A) n° 8; B) n° 14; C) n° 1 en modo de electrones secundarios (SE) con magnificación de 50x

La condición nº 1 (Figura 4.12C) es sin lugar a dudas la peor de las tres, pudiéndose ver claramente la línea donde ocurre el contacto con el anillo (ver óvalo negro en esta figura), caracterizada por grandes desniveles producto del constante desprendimiento de material que ocurrió durante el ensayo de desgaste. La condición nº 8 (Figura 4.12 B) es un caso intermedio entre la nº 14 y la nº 1, donde se observan muchas irregularidades en la superficie. La superficie de desgaste de la condición nº 14 se nota con ciertas diferencias con respecto a las dos anteriores y podría decirse que en esta condición predominó el desgaste de tipo abrasivo dado los surcos que se aprecian en las mismas (ver flechas en Figura 4.12B) y además se observa desprendimiento de partículas.

Ahora analizaremos la peor condición (nº 1) a través de dos micrografías de la misma sección tomadas con una magnificación de 500x, una en la modalidad de electrones primarios (Figura 4.13A) y otra con electrones secundarios (Figura 4.13B). Se puede observar que ha ocurrido un proceso de desprendimiento de partículas (ver flecha blanca en Figura 4.13B) lo cual probablemente ocurre como consecuencia de una pobre cohesión entre lamelas, que luego de ser sometidas al ensayo de desgaste son fácilmente desprendidas del recubrimiento. También se observan en esta superficie algunas zonas que bajo el efecto de la carga han sufrido deformación plástica (ver flecha negra en Figura 4.13B). Un análisis EDS realizado sobre esta zona (Figura 4.13A) indica la presencia de oxígeno y hierro lo cual evidencia que se trata de un óxido de hierro. También se observa la presencia de manganeso, elemento que no se encuentra en los polvos de alimentación, lo que nos indica que hubo transferencia de material del anillo al bloque ya que la composición química del acero AISI 1045 posee un 0,6 - 0,9 % de manganeso. La presencia de molibdeno es muy pequeña, casi imperceptible. Lo anteriormente expuesto pareciera indicar que durante el

ensayo el anillo sufrió un proceso de desgaste y remoción y estas partículas desprendidas debido a las altas temperaturas a las cuales están sometidas durante el ensayo se oxidan y quedan depositadas sobre el bloque. Por efecto de la carga estos óxidos se deforman plásticamente y posteriormente se endurecen por deformación hasta que finalmente se fracturan. La adhesión y fractura de óxidos serían los mecanismos primarios de desgaste para esta condición.

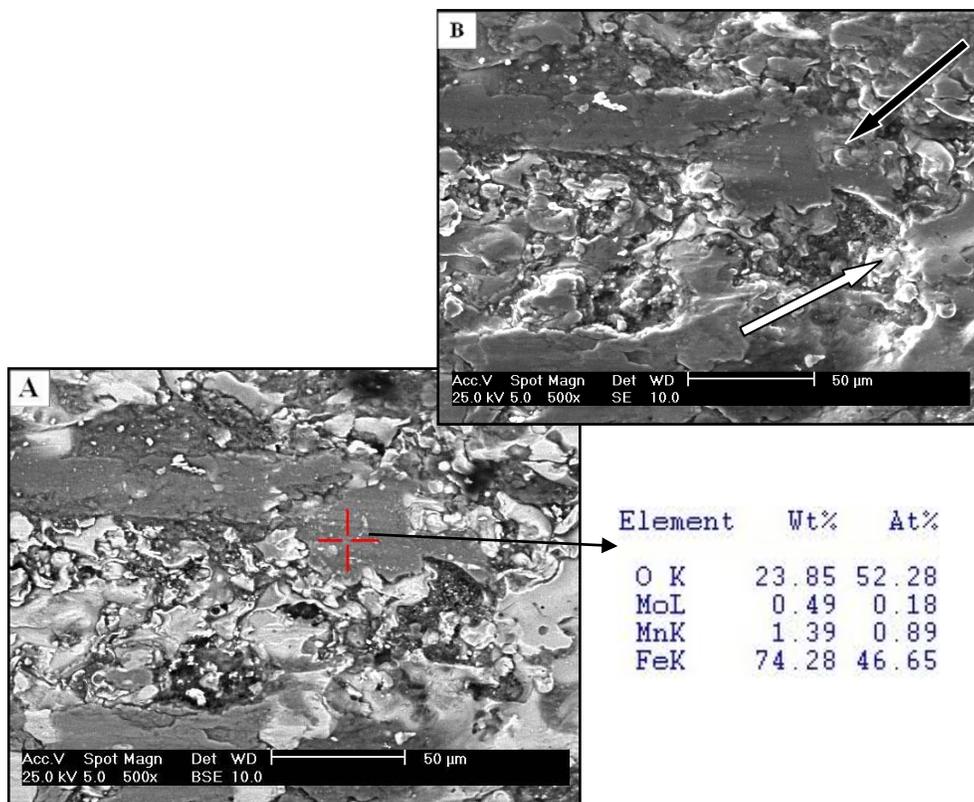


Figura 4.13 Micrografía de la condición nº 1 con magnificación de 500x donde A) Análisis EDS y B) Micrografía en modalidad de electrones secundarios (SE).

En la Figura 4.14B correspondiente a la superficie de desgaste de la condición n° 8 también se aprecia el mecanismo de remoción de material pero en este caso se observa que el mecanismo es diferente. La fase blanca, cuya composición química obtenida a través de un análisis EDS (ver figura), pareciera indicar que se trata de una partícula proveniente del recubrimiento con cierto contenido de oxígeno probablemente debido a las altas temperaturas producidas durante el ensayo, las cuales fueron sometidas a un proceso de deformación y posterior endurecimiento por deformación que las hace susceptibles a la fractura y finalmente se produce su desprendimiento (ver óvalo rojo en figura). También se aprecia desgaste por abrasión mediante el mecanismo de tres cuerpos debido a que estas partículas que se han fracturado quedan atrapadas entre el bloque y el anillo produciendo arrastre de material lo que se evidencia por la presencia de surcos (ver flecha negra en figura).

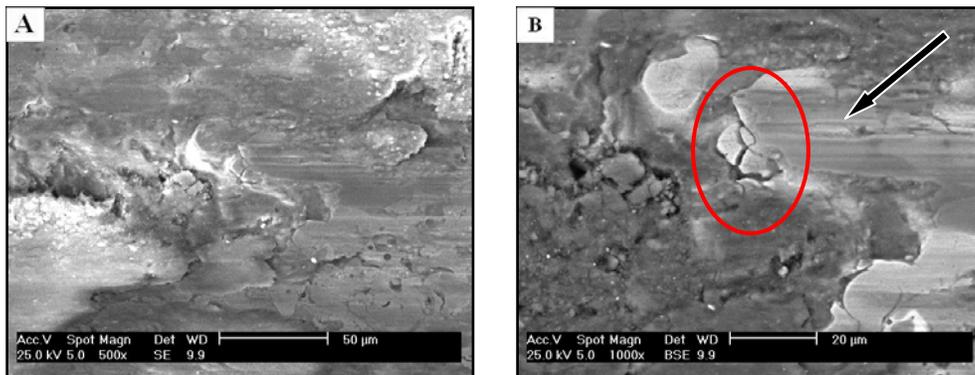


Figura 4.14 Microscopía de la zona de desgaste para la condición n° 8 con magnificación de 1000x en la modalidad de A) Electrones secundarios (SE) y B) Electrones primarios (BSE).

Se puede observar en la Figura 4.17 A la cual es tomada en la modalidad SE, como la zona blanca sobresale del relieve formando crestas, las cuales actúan como herramientas de corte sobre la superficie del anillo ya que este posee una

dureza menor. Esto puede explicar el porqué la condición n° 8 arroja tan buenos valores para pérdida de peso en el bloque pero no para pérdida de peso en el anillo.

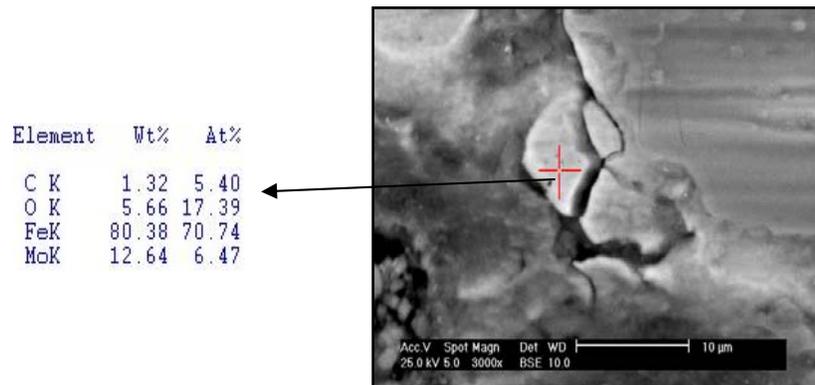


Figura 4.15 Micrografías de la condición n° 8 con análisis EDS y magnificación de 3000x en la modalidad de electrones primarios

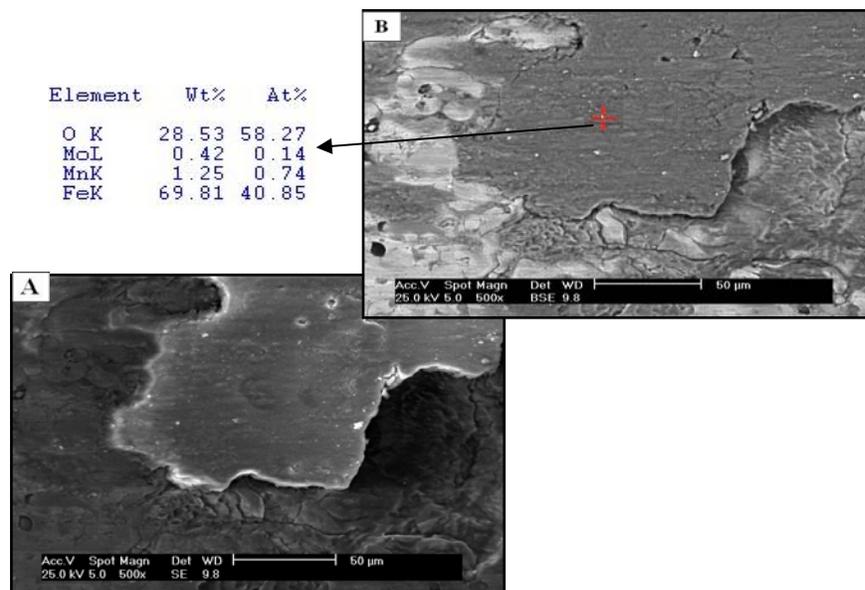


Figura 4.16 Micrografías de la condición n°8 con magnificación de 500x donde A) Análisis EDS y B) Micrografía en modalidad de electrones secundarios (SE)

Un análisis EDS realizado sobre la fase gris presente en la superficie de desgaste de la condición n° 8 (ver Figura 4.16A) indica la presencia de hierro y oxígeno lo cual podría evidenciar que se trata de un óxido de hierro. De nuevo vemos la presencia de manganeso lo que evidencia que sí ocurrió transferencia de material, confirmando así el fenómeno expuesto anteriormente. Ahora enfocando nuestra atención a la Figura 4.16B (modo SE), podemos ver como estos óxidos toman una forma laminar de gran tamaño que sobresale del relieve. Estas se encuentran en contacto con el anillo pero debido a su baja dureza y cohesión no absorben mucha carga. Lo anteriormente expuesto pareciera indicar que los mecanismos de desgaste presentes en esta condición son fractura, adhesión y abrasión de tres cuerpos.

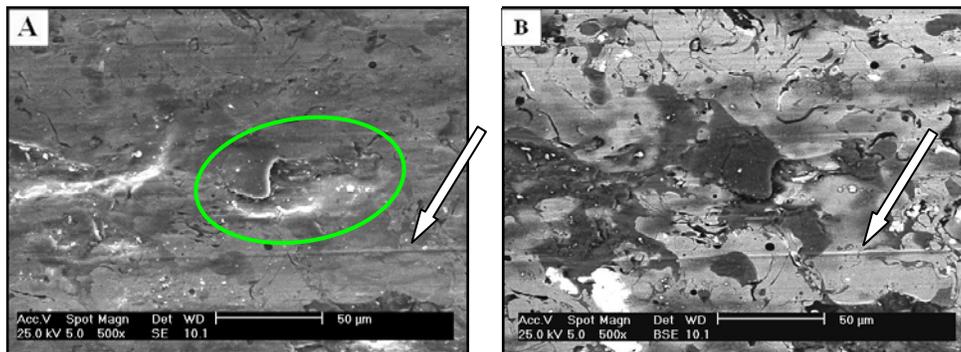


Figura 4.17 Micrografías de la condición n° 14 con magnificación de 500x en la modalidad de A) Electrones Secundarios (SE) y B) Electrones primarios (BSE)

Ahora vamos a analizar a través de la Figura 4.20A y 4.20B la superficie de desgaste de la condición recomendada por el fabricante (n° 14). En la Figura 4.20 B (modo BSE) se pueden observar algunas fases de color gris oscuro cuyo análisis EDS presentado en la Figura 4.18 revela la presencia de hierro oxígeno

y molibdeno lo que implica que este óxido proviene del mismo recubrimiento y no del anillo. Tomando en cuenta la alta reactividad de este recubrimiento con el oxígeno y las altas temperaturas durante el ensayo, se generan estas estructuras de óxido de hierro a partir de las fases blancas. Finalmente producto del endurecimiento por deformación se fracturan y desprenden, generando desgaste de tres cuerpos, explicando los surcos observados en las Figuras 4.17 A y B, denotado por las flechas blancas. Se podría decir entonces que los mecanismos de desgaste que prevalecen en este condición fue el de fractura y abrasión por tres cuerpos en menor grado.

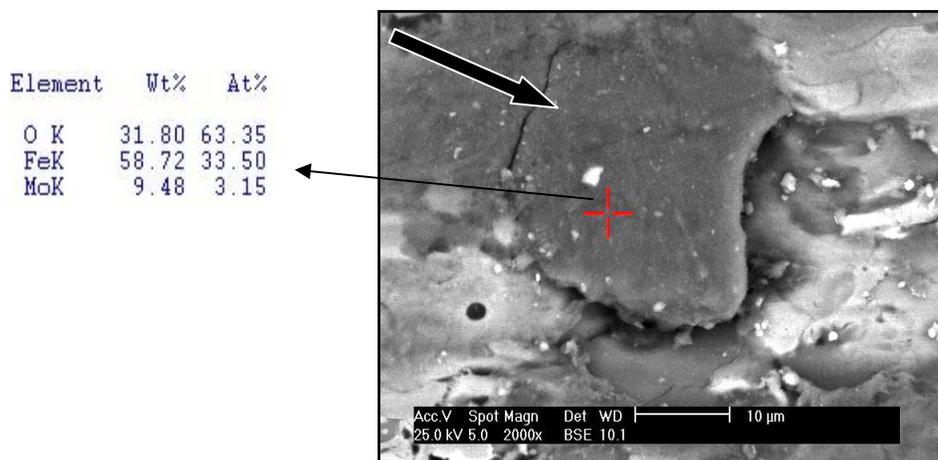


Figura 4.18 Micrografía de la condición n° 14 con análisis EDS y magnificación de 2000x en la forma de electrones primarios.

Comparando las Figuras 4.14 A (n° 8) y 4.17 A (n° 14), ambas en modo SE y con una magnificación de 500x se puede apreciar como la condición n° 14 presenta menor daño de la superficie lo cual puede ser atribuido a que los óxidos formados proviene de la oxidación del recubrimiento durante el ensayo, los cuales actuarían como lubricante) y no producto de adhesión y oxidación de

la contraparte como sucede en la condición n° 8, y esto podría explicar la mayor resistencia al desgaste de este recubrimiento. También podemos concluir que en la condición n° 8 hubo desgaste por adhesión y abrasión por tres cuerpos debido a la fractura de óxidos, mecanismo que no se presentó en la condición n° 14 lo cual podría explicar el mejor comportamiento de este recubrimiento frente al desgaste.

Ya conociendo los mecanismos de desgaste podemos decir con certeza que la condición n° 14 es la que presenta mejor comportamiento frente al desgaste por deslizamiento, seguida por la condición n° 8.

## CONCLUSIONES

## CONCLUSIONES

- El parámetro que produce mayores cambios sobre la resistencia al desgaste por deslizamiento de los recubrimientos evaluados en el presente trabajo es la tasa de alimentación de los polvos. Para valores intermedios se garantizan los mejores comportamientos respecto a la resistencia al desgaste.
- Mediante el análisis de varianza se determinó que las tres variables independientes analizadas (tasa de alimentación, voltaje y amperaje), introducen variaciones estadísticamente significativas sobre la resistencia al desgaste del recubrimiento.
- Los valores de los parámetros optimizados a través de la metodología de superficie de respuesta para la resistencia al desgaste son:

Parámetro	Rango Óptimo
Tasa de alimentación de los Polvos	6 – 6,75 lb/h
Amperaje	725 – 825 A
Voltaje	36,5 – 37 V

- De acuerdo a lo observado en los estudios de microscopía electrónica de barrido, una tasa de alimentación baja produce recubrimientos porosos y con una pobre cohesión, por lo que se recomiendan valores medios para lograr una mayor densificación. La cantidad de energía aportada es también importante, se recomiendan valores medios de amperaje.

- Se encontró una relación entre la dureza y la resistencia al desgaste, en la cual a mayor dureza mayor resistencia al desgaste.
- Se observó que las fases ricas en Mo presentan una gran dureza, y son ellas las que mejoran la resistencia al desgaste por deslizamiento, debido a sus propiedades antidesgaste y gran cohesión.
- Los resultados obtenidos en este estudio indican que en la condición dada por el fabricante, la oxidación del recubrimiento durante el ensayo de desgaste induce a una menor tasa de desgaste debido a que el óxido formado actúa como lubricante mientras que, en la condición n°8, los óxidos producidos, si bien actúan como lubricantes, se endurecen y fracturan debido a la acción de la carga y por lo tanto producen un mayor desgaste. El mecanismo predominante que actúa en la condición n° 1 fue el de desprendimiento de partículas poco cohesionadas y de allí la menor resistencia al desgaste que presentó este recubrimiento.
- El uso de diseños experimentales factoriales en conjunto con modelos estadísticos como el análisis de varianza y el método de superficie de respuesta constituyen una herramienta simple, efectiva y eficiente para optimizar los parámetros de deposición envueltos en el proceso de rociado térmico por plasma, gracias a que permiten predecir la relación entre una respuesta determinada (en nuestro caso la resistencia al desgaste por deslizamiento) y las variables de diseño (parámetros de deposición).

# RECOMENDACIONES

## RECOMENDACIONES

- Informarse sobre el funcionamiento y operación de la máquina de ensayos Falex Block on Ring (Bloque sobre anillo).
- Realizar mantenimiento preventivo a los rodamientos, correas y ejes, antes de la utilización de la máquina de ensayos Falex Block on Ring (Bloque sobre anillo).
- Realizar un análisis químico del polvo base hierro molibdeno utilizado en el rociado térmico, para tener un mayor control en las variables de entrada del proceso.
- Utilizar el software Minitab en investigaciones similares, ya que está enfocado hacia el diseño de experimentos, análisis de varianza, método de superficie de respuesta y gráfico de contorno.
- Diseñar experimentos factoriales con menos niveles hasta conseguir un diseño óptimo general.
- Incluir el número de pasadas del proceso de rociado térmico entre los criterios de optimización.
- Se deben ensayar al menos, tres réplicas por condición para disminuir la desviación estándar.

- Con el objetivo de lograr un desgaste apreciable en el material que se quiere analizar, se recomienda hacer un estudio previo de los posibles materiales que conformarán la contraparte del par tribológico.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society of Metals (1992). *Friction, lubrication and wear technology. ASM Handbook*, Vol. 18. ASM International. Estados Unidos de América.
- Air Products, “Thermal Spray Basics”. Disponible en: [http://www.airproducts.com/Products/CylinderGases/MAXX/ThermalSpraying/thermalspraying\\_techpaper.htm](http://www.airproducts.com/Products/CylinderGases/MAXX/ThermalSpraying/thermalspraying_techpaper.htm). [Consulta: 2007, Septiembre 02].
- Askeland, Donald R. (1987). *La ciencia e ingeniería de los materiales*. Mexico, D.F. Editorial: Ibero America.
  
- Cadenas, P., Rodríguez (n.d.) Efectos del tratamiento térmico posterior sobre la resistencia al desgaste por deslizamiento de un recubrimiento base níquel depositado por HVOF. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
  
- Capote, S. y Perdomo L. (2006). Optimización de un Recubrimiento Cerámico Depositado Mediante el Proceso de Rociado Térmico por Plasma. Tesos de grado no publicada, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
  
- Carrasquero, Edwin. (1999). Caracterización microestructural y tribológica de un revestimiento industrial de WC-CO obtenida por deposición vía HVOF. Tesis de grado no publicada, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Caubet J.J. (1971). *Teoría y práctica industrial del rozamiento*. Bilbao, España. Editorial: Ediciones Urmo C.A.

- Colmenares, J. (2004). Optimización de Recubrimientos Metálicos Nanoestructurados Depositados por Rociado térmico. Tesis de grado no publicada, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
  
- Conde, V. y Dávila, A. (2007). *Optimización de la Calidad de un Recubrimiento Base Molibdeno-Níquel Depositado por la Técnica de Rociado Térmico por Plasma*. Tesis de grado no publicada, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
  
- De Santa Anna, A. y Scagni C. (2007). *Evaluación de Recubrimientos Depositados por Tecnología Plasma-Spray en Cilindros de Compresores de Gas Natural Utilizados en la Industria Petrolera*. Tesis de grado no publicada, Universidad Metropolitana, Caracas.
  
- Fernandez, P. (n.d.). *Mecánica de Fluidos*. Capítulo 1 Introducción a los fluidos. Universidad de Cantabria, España.
  
- Groover, Mikell, P (1997). *Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, procesos y sistemas*. Editorial: McGraw Hill.
  
- Holmberg, K., Ronkainen, H., Laukkanen, A. & Wallin, K. (2007). *Friction and wear of coated surfaces — scales, modelling and simulation of tribomechanisms*. Surface & Coatings Technology, 202 (2007), pp. 1034–1049.
- Karamis, M., Yildizli, K. & Cakirer H. (2004). *Wear behaviour of Al–Mo–Ni composite coating at elevated temperature*. Wear, 258 (2005), pp. 744–751.

- Linares, O. (n.d.). *Generalidades de la Tribología, Fundamentos de la Lubricación, Fricción y el Desgaste*. Widman International S.R.L, Santa Cruz, Bolivia.
  
- Lipson, C. (1967). *Wear Consideration in design*. Universidad de Michigan, Estados Unidos de América, Michigan.
  
- Ludema, K.C. (1996). *Friction, Wear, Lubrication: a Textbook in Tribology*. Universidad de Michigan. Estados Unidos de América, Michigan: Editorial CRC Press, Inc.
  
- Martínez, F. (2002). *La Tribología: Ciencia y técnica para el mantenimiento*. La Habana, Cuba: Editorial Limusa.
  
- Neville, A. & Kollia-Rafailidi, V. (2001). *A Comparison of Boundary Wear Film Formation on Steel and a Thermal Sprayed Co/Cr/Mo Coating Under Sliding Conditions*. *Wear*, 252 (2002), pp. 227–239.
  
- Pelayo, C. & Ramírez L. (n.d.). *Máquina Tribológica de Perno sobre disco*. Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, México.
  
- Reveron, H (n.d). *Termorociado* [Página Web en línea] Disponible: <http://prof.usb.ve/hreveren/Termo.htm>. Consultado el 10 de Enero de 2009.

- Satapathy, A. (2005). *Thermal Spray Coating of Red Mud on Metals*. Departamento de Ingeniería Mecánica Nacional, Instituto de Tecnología. Rourkela, India.
  
- Tormos, B. (2005). *Diagnóstico de motores diesel mediante el análisis del aceite usado*. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España: Editorial Reverté. pp. 43-45.
  
- Totemeier, T., Wright, R., Swank, R. (2004). *FeAl and Mo-Si-B Intermetallic Coatings Prepared by Thermal Spraying*. Idaho Laboratorio Nacional de Ingeniería y Ambiente. Idaho Falls, Estados Unidos.
  
- Usmani, S. & Sampath, S.. (1999). *Time-dependent friction response of plasmasprayed molybdenum*. *Wear* 229 (1999) pp. 1131–1140.
  
- Uyulgan, B., Centinel H., Ozdemir, I., Tekmen, C., Okumus, S. & Celik, E. (2003) *Friction and wear properties of Mo coatings on cast-iron substrates*. *Surface and Coatings Technology*, 174 –175 (2003), pp. 1082–1088.
  
- Vazquez, A.J., Damborenea, J.J. (2001). *Ciencia e Ingeniería de la Superficie de los Materiales Metálicos*. Editorial: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
  
- Vazquez, Juan Carlos (1985). *Resistencia al desgaste deslizante seco de los aceros AISI 1045, 1060, 4140 y 4340, y los efectos de la dureza y de la carga normal aplicada*. Tesis de grado no publicada, Universidad Central de Venezuela. Caracas.

- Vilar Fernández, J. (2006). *Modelos Estadísticos Aplicados*. [Página Web en línea] Disponible: [http://www.udc.es/dep/mate/estadistica2/indice\\_gral.html](http://www.udc.es/dep/mate/estadistica2/indice_gral.html). Consultado el 20 de Febrero de 2009.
  
- Wakelin, R.J (1974). *TRIBOLOGY: The friction, lubrication, and wear of moving parts*. Universidad de Leeds. Unidad Industrial de Tribología, Reino Unido.
  
- Xie, L., Ma, X., M., Ozturkc, A., Jordan, E., Pature, N., Cetegen, B., Xiao, D., Gella, M. (2004). *Processing parameter effects on solution precursor plasma spray process spray patterns*. *Surface & Coatings Technology*, 183 (2004), pp. 51–61.
  
- Yacuzzi, E., Martín, F., Quiñones, H. & Popovsky, M. (n.d). *El Diseño Experimental y los Métodos de Taguchi: Conceptos y Aplicaciones en la Industria Farmacéutica*. Universidad del CEMA. Buenos Aires, Argentina.
  
- Zmitrowicz, A. (2006). *Wear Patterns and laws of Wear – A review*. *Journal of the Theoretical and Applied Mechanics*, 44, 2, pp. 219-253.