

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE
DEPOSICIÓN DE UN SISTEMA DE PROYECCIÓN HIPERSÓNICA
(HVOF) PARA RECUBRIMIENTOS CROMO-MOLIBDENO**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs.: López B., Lemir J.
Santaella H., Osvil A.
Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2009

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE
DEPOSICIÓN DE UN SISTEMA DE PROYECCIÓN HIPERSÓNICA
(HVOF) PARA RECUBRIMIENTOS CROMO-MOLIBDENO**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. María Rodríguez de Prato.

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Andrea Scagni.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs.: López B., Lemir J.
Santaella H., Osvil A.
Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2009



Caracas, 11 de noviembre de 2.009

ACTA

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los bachilleres:

LEMIR LÓPEZ y OSVIL SANTAELLA

Titulado:

“DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE DEPOSICIÓN DE UN SISTEMA DE PROYECCIÓN HIPERSÓNICA (HVOF) PARA RECUBRIMIENTOS CROMO-MOLIBDENO”

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

Prof. Juan Carlos Vázquez
Jurado



Prof. Alberto Pertuz
Jurado

Prof. María de los A. Rodríguez
Tutora

Dedicatoria

Dedico este trabajo de grado a mis padres Belkis y Rafael, mis eternos puntos de apoyo. A mi hermana Alejandra, A mis abuelos, que hicieron la persona que soy hoy, a Gaby, por su paciencia y apoyo incondicional y a todos mis familiares y amigos que de una manera u otra siempre estuvieron a mi lado durante toda la carrera.

Gracias...Totales.

Dedicatoria

Dedico este trabajo de grado a mis padres Cosme y Mirna, los que han hecho todo esto posible, a mis hermanos Katherine y Samir, a mi novia Yunel, a mis suegros, mis cuñados y a todos los familiares y amigos que siempre estuvieron a mi lado dándome cariño, paciencia, estímulo y apoyo incondicional para la culminación de mis estudios.

A todos Gracias.

Agradecimientos

A la Universidad Central de Venezuela, por abrirnos sus puertas y permitir que en sus aulas nos formarnos como Ingenieros

Al profesor Andrea Scagni por haber facilitado las instalaciones de su empresa Plasmatec Ingenieros S.A. para la realización de la etapa principal de la investigación, el termo-rociado y sobre todo por el tiempo dedicado a nuestro proyecto.

Al personal de Plasmatec por su inmensa colaboración en la realización de este proyecto investigativo en su fase más crítica.

Al Centro de Microscopia Electrónica de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Central de Venezuela, Técnico Samuel García, Ing. Gelin Mejías e Ing. Flor Leiba, su paciencia y oportunos consejos fueron invaluable.

A nuestra tutora, Ing. María Rodríguez de Prato, por aceptar ser nuestra guía, y por sus críticas constructivas.

A la empresa Metalpres Asociados 3000 C.A. y al Ing. Oscar Guimaray padre e hijo, cuya experiencia en el área metalmecánica fue de gran ayuda en la realización de nuestro proyecto.

López B., Lemir J. Y Santaella H., Osvil A.

**DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS
DE DEPOSICIÓN DE UN SISTEMA DE PROYECCIÓN
HIPERSÓNICA (HVOF) PARA RECUBRIMIENTOS
CROMO-MOLIBDENO**

**Tutor Académico: Prof. María Rodríguez De Prato. Tutor Industrial:
Ing. Andrea Scagni. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería.
Escuela de Ingeniería Mecánica. 2009. 103 Pág.**

Palabras Clave: Termo-rociado. HVOF. Optimización. Desgaste. Factorial.

El objetivo del presente trabajo fue el de determinar los parámetros óptimos de aplicación para la aleación Diamalloy 1008 de Cromo-Molibdeno en base hierro, depositada utilizando rociado térmico por HVOF. Para alcanzar el objetivo planteado se utilizó un diseño experimental factorial 3^2 . Los parámetros operacionales variados fueron la velocidad de alimentación de material y el flujo de combustible, usando para la deposición una pistola Tafa JP-5000. Se realizaron ensayos de desgaste por deslizamiento del tipo Bloque sobre anillo y Dureza por Microindentación a las distintas condiciones, según las normas ASTM G77 y ASTM E384. Las microestructuras, y superficies desgastadas fueron evaluadas mediante MEB y espectroscopia por dispersión en energía de rayos X. Los parámetros óptimos se calcularon mediante el método de superficie de respuesta, y la significancia de los mismos se evaluó mediante un análisis de varianza (ANOVA). Se determinó que: un flujo de combustible entre 21,95 - 22,73 L/h y la velocidad de alimentación de los polvos entre 72,83 - 78,47 gr/min son los parámetros óptimos, y que no hay una relación entre la resistencia al desgaste por deslizamiento y la dureza del recubrimiento.

López. L, Santaella. O

**PARAMETERS OPTIMIZATION FOR
HIPERSONICALLY SPRAYED Cr-Mo HVOF COATINGS.**

**Guides: Prof. Eng. María Rodríguez De Prato. Eng. Andrea Scagni.
Thesis. Caracas, Universidad Central de Venezuela. Engineering
Faculty. School of Mechanical Engineering. 2009. 103 pp.**

Keywords: HVOF thermal spraying. Optimization. Wear. Factorial Design.

The aim of this work is to determinate the optimum deposition parameters for the iron-based Cr-Mo alloy powder known as Diamalloy®1008, thermally sprayed using High Velocity Oxy-Fuel (HVOF). In order to achieve the planned objective, an experimental design known as factorial design 3^2 was used, with two parameters and three levels of test. The operational values varied were the powder feed rates and the fuel flow, using a TAFA JP-5000 gun with kerosene as fuel. Block on Ring sliding wear and micro indentation DPN tests were made to the different conditions, according with the ASTM G-77 and E384 standards. Coating microstructure and worn surfaces were evaluated using Scanning Electron Microscopy (SEM) and energy dispersive x-ray spectroscopy (EDS). The optimum parameters were calculated using the surface response method, and the significance of those was evaluated by an analysis of variance ANOVA. Was determined that a fuel flow between 21.95 and 22.73 L/h (5.8-6 gallons per hour) and a powder feed rate between 72.83 and 78.47 grams/min are the optimum parameters, and there is not a direct correlation between sliding wear resistance and coating hardness.

ÍNDICE

Introducción	1
CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	
Justificación del Problema	3
Objetivo General	5
Objetivos Específicos.....	5
Antecedentes	6
CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	
2.1. Inicios del Rociado Térmico	9
2.2. Procesos de Rociado Térmico	11
2.2.1. Clasificación General	11
2.2.2. Proceso de Rociado Hipersónico (HVOF).....	11
2.3. Materiales de Aplicación.....	13
2.4. Comparación entre Procesos de Rociado Térmico	14
2.5. Propiedades y Aplicaciones de los Recubrimientos por HVOF	17
2.5.1. Restauración de Piezas Desgastadas	17
2.5.2. Protección Contra la Corrosión.....	18
2.5.3. Incremento de la Resistencia al Desgaste	19
2.6. Variables que Afectan el Proceso de Deposición	20
2.6.1 Relación Oxígeno/Combustible	20
2.6.2. Tasas de Alimentación de los Polvos.....	22
2.6.3. Distancia de Rociado.....	23
2.6.4. Presión en la Cámara de Combustión	24
2.7. Tipos de Desgaste	25
2.7.1. Desgaste Abrasivo.....	26
2.7.2. Desgaste Adhesivo	28
2.7.3. Desgaste por Fatiga Superficial	31

2.7.4. Desgaste Erosivo	32
2.7.5. Desgaste por Corrosión	33
2.8. Diseño Experimental Factorial.....	34
2.9. Análisis de Varianza ANOVA	35
2.10. Metodología de Superficie de Respuesta (MSR)	37
2.10.1. Superficie de Respuesta	38
2.10.2. Gráfica de Contornos	39
2.10.3. Polinomios de Primer y Segundo Orden.....	40

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1. Diseño Experimental.....	42
3.2. Materiales	45
3.3. Manufactura de las Probetas	46
3.4. Preparación Superficial de las Probetas	49
3.5. Proceso de Rociado	52
3.6. Rectificado	55
3.7. Ensayo de Desgaste por Deslizamiento	57
3.7.1. Elección de los Parámetros del Ensayo.....	57
3.7.2. Procedimiento del Ensayo.....	58
3.7.3. Cálculos.....	60
3.8. Ensayo de Dureza por Microindentación.....	61
3.9. Microscopia Electrónica de Barrido (MEB).....	62

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1. Ensayo de Desgaste por Deslizamiento	64
4.1.1. Evaluación de la Tasa de Desgaste	64
4.1.2. Evaluación del Coeficiente de Fricción	67
4.1.3. Análisis de desgaste de los anillos	69
4.1.4. ANOVA	72
4.1.5. Metodología de Superficie de Respuesta	74

4.2. Microindentación Estática.....	77
4.3. Microscopia Electrónica de Barrido.....	75
4.3.1. Análisis de la Microestructura	78
4.3.2. Superficie de Desgaste	86
Conclusiones	95
Recomendaciones.....	97
Referencias Bibliográficas	98
Anexos	104

LISTA DE TABLAS

TABLA	pp.
1 Características Químico – Mecánicas de los materiales depositables por HVOF	14
2 Características de los Procesos de Rociado Térmico y los Recubrimientos	16
3 Materiales como Materia Prima en Polvos y Alambres.....	17
4 Resumen de análisis de varianza.....	36
5 Parámetros de deposición seleccionados	44
6 Condiciones a evaluar en el diseño factorial 3^2	44
7 Composición base para la aleación 1008	45
8 Principales aplicaciones industriales del polvo 1008.....	46
9 Resumen de parámetros de deposición	52
10 Tasas de desgaste para las 9 condiciones de deposición.....	65
11 Valores de λ para los distintos flujos de combustible.....	66
12 Valores de desgaste para los anillos del par tribológico	70
13 Análisis de varianza ANOVA para tasa de desgaste	72
14 Valores optimizados para la deposición de la aleación base Hierro Cromo-Molibdeno.....	76
15 Resultados de los Ensayos por Microindentación.....	77
16 Porcentajes en peso en EDS para puntos seleccionados en la Figura 4-14	83
17 Porcentajes en peso atómico en EDS para puntos seleccionados en la Figura 4-14.....	84
18 Anchos de huella para las condiciones evaluadas.....	87
19 Porcentajes en peso en EDS para puntos seleccionados en la Figura 4-18	87

20 Porcentajes en peso atómico en EDS para puntos seleccionados en la Figura 4-18.....	90
21 Porcentajes en peso en EDS para puntos seleccionados en la Figura 4-19	92
22 Porcentajes en peso atómico en EDS para puntos seleccionados en la Figura 4-19.....	92
23 Porcentajes en peso en EDS para puntos seleccionados en la Figura 4-20	92
24 Porcentajes en peso atómico en EDS para puntos seleccionados en la Figura 4-20.....	92

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	pp.
2-1 Representación del proceso de proyección (rociado) térmica y formación del recubrimiento	10
2-2 Diagrama esquemático del proceso de rociado Hipersónico (HVOF) ..	13
2-3 Temperatura de llama adiabática Vs. λ Para varios combustibles	22
2-4 Presión en la cámara de combustión Vs. temperatura de llama para el kerosén	24
2-5 Desgaste de tipo abrasivo entre una superficie A y un substrato B.....	26
2-6 Fases del desgaste abrasivo	27
2-7 Desgaste adhesivo entre dos superficies.....	28
2-8 Mecanismo de fractura de las partículas sometidas a deslizamiento y adhesión	29
2-9 Representación esquemática del proceso de desgaste en materiales insolubles	31
2-10 Propagación de grietas por fatiga de contacto rodante Subsuperficial	32
2-11 Ilustración de los cuatro casos hipotéticos de corrosión con contacto deslizante.....	34
2-12 Superficie de respuesta en dos dimensiones	39
2-13 Ejemplo de superficie de respuesta tridimensional.....	39
2-14 Gráfica de contornos.....	40
3-1 Anillo en isometría y Sección transversal según ASTM G77	47
3-2 Bloque.....	47
3-3 Fresadora Toz Kurim.....	48
3-4 Centro de Mecanizado Fulland.....	48
3-5 Bloques montados en los soportes de acero.....	49
3-6 Detalle de la limpieza con Thinner	50

3-7. Precalentamiento de las muestras	50
3-8 Detalle de los bloques Antes y Después del Blasting.....	51
3-9 Detalle de la Pistola JP-5000	53
3-10 Equipo HVOF	54
3-11 Rociado	54
3-12 Detalle del proceso de rociado.....	55
3-13 Medición de la temperatura de los bloques entre pasadas.....	55
3-14 Disco de Diamantes y Rectificadora Tangencial.....	56
3-15 Balanza Electrónica	56
3-16 Cargas de prueba 55,6 N; 89 N y 150 N.....	57
3-17 Acople Bloque-Anillo y centro de Control de la Máquina Falex	59
3-18 Microdurómetro	61
3-19 Esquema del Proceso de Microindentación.....	62
3-20 Microscopio Electrónico de Barrido marca Hitachi S-2400.....	63
4-1 Tasas de desgaste para las condiciones de deposición de la aleación ...	65
4-2 Comparación entre los coeficientes de fricción de la condición de menor desgaste, el fabricante de los polvos y la de mayor desgaste.....	67
4-3 Tasas de desgaste para los anillos del par tribológico correspondientes a cada grupo de bloques.....	70
4-4. Desgaste en los anillos.....	71
4-5 Efectos principales del flujo de combustible	73
4-6 Superficie de respuesta tridimensional	76
4-7 Gráfica de contornos para distintas tasas de desgaste.....	77
4-8 Imagen a 150X de la condición con la peor resistencia al desgaste	78
4-9. Micrografía a 600X de la condición con la peor resistencia al desgaste	79
4-10 Imagen a 150X de la condición recomendada por el fabricante de los polvos	80
4-11 Micrografía a 600X de la condición del fabricante de los polvos	80
4-12 Imagen a 150X de la condición con la mejor resistencia al desgaste ..	81

4-13. Micrografía a 600X de la condición con mejor resistencia al desgaste...	82
4-14 Imagen a 600X de la condición con mejor resistencia al desgaste con puntos de referencia para EDS.....	83
4-15 Contenido de hierro. Mejor resistencia al desgaste	84
4-16 Contenido de hierro. Condición del fabricante.....	84
4-17 Contenido de hierro. Peor resistencia al desgaste.....	85
4-18 Micrografía a 20X para la huella de desgaste de la mejor condición con puntos para EDS.....	87
4-19 Micrografía a 20X para la huella de desgaste de la condición del fabricante con puntos para EDS.....	87
4-20 Micrografía a 20X para la huella de desgaste de la peor condición con puntos para EDS.....	88
4-21 Micrografía a 100X para la superficie de desgaste de la mejor condición.....	89
4-22 Micrografía a 600X para la superficie de desgaste de la mejor condición.....	89
4-23 Micrografía a 100X para la superficie de desgaste de la condición del fabricante de los polvos.....	91
4-24 Micrografía a 600X para la superficie de desgaste de la condición del fabricante de los polvos.....	91
4-25 Micrografía a 100X para la superficie de desgaste de la peor condición.....	93
4-26 Detalle a 800X de partículas de segunda fase desprendidas.....	93

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de nuevos materiales y tecnologías derivadas de estos, sigue el ritmo de una industria cada vez más demandante, que ha incrementado la productividad de sus elementos claves, tomando en cuenta su estatus como modificadores del estándar de vida.

Pasando por la masiva aceleración del aparato productivo durante la Segunda Guerra Mundial, el rol tradicional de “creación-aplicación” anclado a la mayoría de los descubrimientos de finales del siglo XIX y la primera mitad del siglo XX, fue tajantemente sustituido por el de “aplicación-optimización”, donde las tecnologías no provienen de descubrimientos aislados en busca de aplicación, sino donde los sistemas requieren mejora continua, siendo la unión industria/ciencia el eje de esta corriente.

Las investigaciones en nuevos materiales tomaron direcciones diferentes; por una parte los no metálicos se diversificaron exponencialmente producto de los grandes avances en química, petroquímica y sintetización de polímeros, mientras que los avances en manufactura y estudio del comportamiento mecánico de las aleaciones metálicas, tanto ferrosas como no ferrosas, han llevado a nuevas fronteras. Una de estas fronteras investigativas dio origen a los recubrimientos.

En líneas generales los recubrimientos cubren tres necesidades elementales: 1) Resistencia al desgaste 2) Protección contra la corrosión, y 3) Mejora de las propiedades mecánicas superficiales. Mientras la mayoría de los recubrimientos depositan los materiales mediante procesos químicos o físicos que garantizan la adherencia o penetración en el sustrato, los procesos de Rociado Térmico (RT) usan la proyección de partículas mediante fenómenos físicos para transportarlas hacia el material base (sustrato).

Los procesos de RT son altamente dependientes de las variables inherentes al proceso, por lo cual es necesario controlar los parámetros que controlan la deposición, tomando en cuenta el tipo de proceso de rociado, los equipos de trabajo, la naturaleza del recubrimiento y los requerimientos de diseño de la(s) pieza(s).

En la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela (EIM-UCV) un número importante de trabajos de investigación han estudiado en detalle la influencia de los parámetros de rociado sobre el proceso en sí, además de experimentar con numerosos materiales de deposición y sus respectivas aplicaciones.

El objetivo de este trabajo de investigación es, principalmente, optimizar los valores de deposición en el caso particular de una aleación Cromo-Molibdeno en base Hierro conocida comercialmente como Diamalloy 1008; depositado mediante un sistema de proyección hipersónica HVOF (High Velocity Oxy-Fuel).

Generalmente los fabricantes de estas aleaciones establecen los parámetros para la deposición de las mismas, pero en la industria la variedad de componentes, así como las diferentes características requeridas del recubrimiento hacen necesarios estudios como éste, que permitan optimizar la calidad de los mismos y reducir los costos de producción.

El estudio de la variación e influencia de estos parámetros será modelado con un diseño experimental factorial, el cual relaciona variables en niveles de prueba; evaluando posteriormente para las distintas condiciones la resistencia al desgaste por deslizamiento, la dureza por microindentación, la microestructura y los mecanismos de desgaste propios de cada una. El análisis de varianza ANOVA expresa la significación estadística de los parámetros seleccionados, y el programa MINITAB permitirá seleccionar los parámetros más óptimos para el proceso agrupando los resultados obtenidos mediante los ensayos en un conjunto de datos expresado gráficamente como una superficie polinómica tridimensional.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Justificación del Problema

Con la evolución constante de la tecnología y el desarrollo en los últimos años, las exigencias en las diferentes ramas de la industria se han incrementado debido al aumento en la producción y extracción de materia prima para la elaboración de productos finales de consumo masivo. Esto ha llevado a desarrollar e implementar técnicas para mejorar las condiciones de trabajo y elevar la eficiencia de las piezas y componentes mecánicos, para así reducir los costos de mantenimiento y aumentar los tiempos de operación.

Los recubrimientos surgen como agentes modificadores de las propiedades superficiales de los materiales, con una amplia variedad de materiales a depositar y métodos para realizarlo, que tienen como fin incrementar la resistencia al desgaste, a la corrosión y la oxidación y la dureza superficial en componentes mecánicos y máquinas herramientas. Además los recubrimientos también se utilizan en la recuperación de piezas que presentan algún grado de deterioro.

Las piezas recubiertas superficialmente abren todo un nuevo campo de innovación y aplicación en la corriente de la ciencia de materiales, permitiendo que una creciente cantidad de industrias, como la aeronáutica, automotriz, petroquímica, del papel y metalmecánica se beneficien de las técnicas de recubrimiento en el desarrollo de piezas más durables, sin contar que los productos terminados que se someten a estos procedimientos llevan

las especificaciones de diseño muy por encima de límites difícilmente superables hasta hace unos pocos años.

Una de las técnicas desarrolladas en las últimas dos décadas, usada actualmente para obtener un recubrimiento de características predeterminadas y prediseñadas es un proceso conocido como proyección térmica hipersónica por combustión (HVOF), que debido a las temperaturas de llama inferiores a procesos como el plasma, dificulta la deposición de materiales cerámicos y refractarios, que poseen altas temperaturas de fusión.

Las altas velocidades de proyección de material en el proceso HVOF lo hacen más que idóneo para depositar todo tipo de aleaciones metálicas con base hierro o acero, metales refractarios (W, Mo, Nb) e incluso algunos tipos de cermets, puesto que las partículas fundidas o parcialmente fundidas presentan mayor fuerza cohesiva del recubrimiento contra el sustrato.

Plasmatec Ingenieros, C.A. fue una de las empresas pioneras en el país en la aplicación de recubrimientos depositados por rociado hipersónico, dedicándose en la actualidad a la reconstrucción y mejoramiento superficial de piezas nuevas o usadas. Ya que en la actualidad los altos costos de adquisición de equipos han hecho difícil su posesión, Plasmatec ha ido comprando los distintos componentes del equipo de RT HVOF.

Sin embargo, en la búsqueda de un proceso productivo que pueda arrojar recubrimientos de excepcional calidad y reducción de costos derivados de horas/hombre e insumos, se generó la necesidad de optimizar el proceso a fin de concordar las especificaciones dadas por los fabricantes de la aleación con los requerimientos de la empresa, generando un importante ahorro no sólo para la misma, sino para el país.

En la actualidad Plasmatec desarrolla recubrimientos base Cromo-Molibdeno mediante el proceso de rociado térmico HVOF, ya que estos procesos presentan grandes resistencias al desgaste, especialmente en aplicaciones donde los elementos de máquinas están sometidos a deslizamiento entre superficies, como anillos de pistones, pistones,

cigüeñas y cojinetes, por lo que un estudio detallado del proceso y su ejecución en este tipo de recubrimientos permitirá optimizar el proceso.

Para hacer tangible esta optimización, este proyecto de investigación aplicará métodos estadísticos para analizar la deposición de la aleación mediante el estudio de dos de los parámetros inherentes al proceso y controlar el desgaste del recubrimiento, y determinar su influencia en las propiedades a obtener.

Objetivo General

Determinar las condiciones óptimas de aplicación de recubrimientos base Hierro-Cromo-Molibdeno depositado mediante el proceso de rociado térmico por proyección hipersónica (HVOF), basándose en la caracterización de los depósitos obtenidos.

Objetivos Específicos

- Determinar las variables a ser optimizadas.
- Determinar los valores óptimos para la deposición del recubrimiento base Hierro-Cromo-Molibdeno mediante el proceso de rociado térmico por proyección hipersónica (HVOF), en función de la resistencia al desgaste y microestructura desarrollados en el recubrimiento.
- Evaluar la resistencia al desgaste por deslizamiento del recubrimiento sin presencia de lubricante, a través de un ensayo con arreglo Bloque sobre Anillo.
- Determinar el modo de desgaste para la mejor y peor condición obtenida en el ensayo de Bloque sobre Anillo.

Antecedentes

Los procesos de rociado térmico mediante la técnica de alta velocidad oxígeno combustible, están compuestos de múltiples variables cuyas combinaciones afectan significativamente el recubrimiento. La morfología y composición de los polvos, distancia de rociado, relación oxígeno/combustible (λ), tasa de alimentación de los polvos e incluso la geometría de la superficie a rociar pueden afectar significativamente la calidad del recubrimiento. Al respecto, no pocas investigaciones han profundizado en el estudio de la influencia de estos parámetros, así como en su optimización.

Para reducir al mínimo la variabilidad del proceso y producir recubrimientos con microestructuras controladas, es necesario hacer un estudio completo que involucre no sólo los parámetros de estudios más comunes y sus efectos, sino investigaciones detalladas de la interacción gas/partícula. En este sentido, Li, Shi y Christofides (2003) estudiaron el efecto del tamaño de partícula, relación combustible/oxígeno ($1/\lambda$) y grado de fusión en la velocidad de proyección de la misma, asumiendo ciertas condiciones prácticas, como el equilibrio químico a la entrada de la cámara de combustión y un flujo de combustible estable. El modelado matemático del comportamiento de la partícula, llegó a las siguientes conclusiones: a) La velocidad de las partículas, temperatura y grado de fusión son fuertemente dependientes del tamaño de la misma y de la relación oxígeno/combustible y b) la velocidad de proyección es consecuencia directa de la presión en la cámara de combustión.

La distancia de rociado, ha sido suficientemente investigada en cuanto a su efecto en la optimización de procesos por HVOF, sin embargo, Al Fadhli (2003) evaluó la calidad de un recubrimiento en base Níquel

conocido comercialmente como Diamalloy 1005, cuyas propiedades son similares a las del Inconel 625. La aleación se depositó a dos condiciones de alimentación de polvos, 5lb/h y 20 lb/h (37,83 y 151 gr/min) y dos distancias de rociado, 9 y 12 pulgadas (229 y 305 mm). Entre sus observaciones más importantes luego de someter las muestras a ensayos de desgaste por erosión, caracterización de microestructura, dureza por microindentación y adhesión del recubrimiento, están que las altas tasas de alimentación de polvos están asociadas con una mayor porosidad, menor dureza del recubrimiento y resistencias a la adhesión al sustrato. Además, el incremento en la distancia de rociado para una tasa de alimentación de polvos dada incrementa la oxidación del recubrimiento, debido a que las partículas se depositan al sustrato a una menor temperatura.

La sustitución de ciertos tratamientos superficiales en piezas por recubrimientos rociados por sistemas hipersónicos, por razones ambientales, reducción de costos o mejora de las propiedades mecánicas también implica el estudio de la influencia de parámetros en la calidad del recubrimiento. Sartwell y Legg (2004) descubrieron al evaluar recubrimientos HVOF como opción para sustituir el cromo hexavalente electro depositado en las palas de hélice de los aviones C-130. Estos estudios involucraron estudios de desgaste en un cilindro (ASTM G 83, desgaste por deslizamiento bloque sobre anillo y pruebas de vuelo reales con las hélices) de una aleación WC-Co, la cual obtuvo resistencias al desgaste y a la fatiga superiores al Cr, sin embargo demostraron que para geometrías complicadas, o con cavidades internas, el termo-rociado HVOF no es posible.

El diagnóstico del HVOF, complemento de la optimización, generalmente involucra el estudio de los procesos físicos-químicos presentes en la mezcla de gases, en la combustión, fusión y proyección de los polvos hacia el sustrato. Turunen (2005) realizó una investigación de las variables y su efecto en los procesos HVOF en términos de calidad del recubrimiento, usando aleaciones de Al-Cu-Fe y Al-Cu-Fe-Cr depositados

por HVOF, variando parámetros como el flujo de combustible (Propileno e Hidrógeno) y la distancia de rociado, asociando cortas distancias de rociado y altas temperaturas de las partículas con las mayores velocidades de proyección.

Por último, Colmenares (2004) realizó un trabajo de investigación que tuvo como objetivo encontrar los parámetros óptimos de aplicación para la aleación Super High Steel (SHS) 717 de base hierro-cromo depositada utilizando rociado térmico por HVOF y arco eléctrico. Los parámetros operacionales variados fueron la relación oxígeno/combustible (λ) y la velocidad de alimentación del material para el rociado por HVOF el cual aplicaron utilizando una pistola TAFSA JP-5000. Los parámetros óptimos se obtuvieron mediante el método de la superficie de respuesta, y el significado de los mismos se evaluó mediante un análisis de varianza (ANOVA). Determinaron que los únicos parámetros con efectos comprobados en la calidad del recubrimiento son la relación oxígeno/combustible (λ) para el caso del recubrimiento depositado por HVOF y el amperaje para el caso del recubrimiento proyectado por arco eléctrico.

CAPITULO II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Inicios del Rociado Térmico

Durante los últimos años debido a la gran cantidad de aplicaciones que surgen cada día en todo tipo de entornos industriales, las tecnologías de recubrimiento de superficies están experimentando un crecimiento espectacular.

Destacan entre ellas los sistemas de proyección (rociado) térmico. Estos sistemas consisten básicamente en el rociado térmico de una amplia gama de materiales (metálicos, cerámicos, combinaciones de ellos e incluso algunos polímeros, en forma de polvo o alambre), en forma fundida o semifundida, a través de una pistola (rociador) que aporta energía cinética y térmica al material por medio de una corriente de gas o aire comprimido, para poder ser impulsado a velocidades superiores a la del sonido, con una temperatura determinada, hacia una superficie (sustrato) y entre ellas mismas.

Formando finas placas en forma de hojuelas que se adhieren a las irregularidades de la superficie, que previamente debe ser preparada de una manera apropiada para formar así un recubrimiento fuertemente adherido al material base y con una dureza generalmente mayor al mismo material base (figura 1). Las técnicas de RT utilizan sistemas de combustión por combustible, plasma o un arco eléctrico. Los recubrimientos pueden aplicarse bajo condiciones atmosféricas normales o en atmósferas especiales. Estas técnicas pueden aplicarse, además, en forma manual o automática.

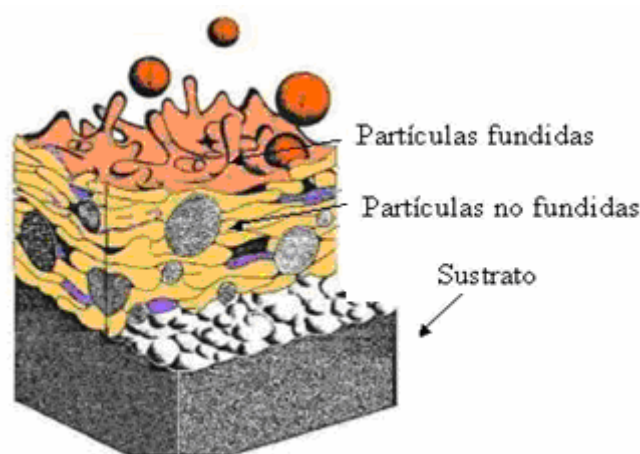


Figura 2-1. Representación del proceso de proyección (rociado) térmica y formación del recubrimiento.

El Rociado Térmico fue descubierto y usado por primera vez a principios del siglo XX y la investigación progresó desde entonces en este campo. La proyección térmica por llama fue inventada por el ingeniero suizo, Max Ulrich Schoop en 1911, proyectando una aleación de plomo y estaño sobre un sustrato metálico.

Otros principales procesos de Rociado Térmico (RT) incluidos el rociado por alambre y la deposición por pistola de detonación (inventado por R. M. Poorman, H. P. Sargent, y H Lamprey y patentado en 1955), el rociado por plasma (inventado por R. M. Gage, O. H. Nestor, y D. M. Yenni y patentado en 1962), y el rociado de alta velocidad por oxígeno/combustible (inventado por G. H. Smit, J. F. Pelton, y R. C. Eschenbach y patentado en 1958).

En función del material rociado, del sistema de RT elegido y de los parámetros del proceso, se obtendrá una superficie con características específicas de porosidad, dureza, rugosidad, resistencia al desgaste o a la corrosión. Es conveniente pensar en estas técnicas ante requerimientos de resistencia al desgaste, la corrosión, a las altas temperaturas o bien para recuperar piezas que presentan algún grado de deterioro, entre otras

posibilidades. Las aplicaciones de piezas rociadas térmicamente son numerosas en industrias, tales como la automotriz, la aeronáutica, la del papel, la industria química o la electrónica.

2.2. Procesos de Rociado Térmico

2.2.1. Clasificación General

Los procesos de Termorociado pueden ser de dos tipos, procesos de combustión y eléctricos, los cuales a su vez tienen otras subdivisiones:

➤ *Procesos de Combustión*

Rociado por Llama.

Rociado por Detonación.

Rociado en Frío.

Rociado Hipersónico (HVOF).

➤ *Procesos Eléctricos*

Rociado por Arco Eléctrico.

Rociado por Plasma.

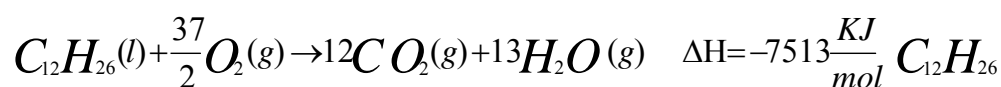
2.2.2. Proceso de Rociado Hipersónico (HVOF)

Es uno de los métodos más nuevos de Termorociado, comparado con los otros procesos de RT, es básicamente el mismo sistema de rociado por llama de polvos, excepto que este proceso ha sido desarrollado para producir rociados de alta velocidad. Se asemeja a un motor de propulsión, utiliza oxígeno y un gas como combustible (propano, queroseno, acetileno, propileno e hidrógeno) a altas presiones, esta mezcla de gases es introducida

en la cámara de combustión donde se produce una llama de alta presión, la cuál es forzada a través de un inyector incrementando su velocidad.

El material de alimentación en forma de polvo es inyectado en el flujo de gas de alta energía, donde la expansión del gas fuerza a las partículas a través de una boquilla a velocidad supersónica. La velocidad del gas ha sido medida en el rango de 1.500 a 2.000 m/s, alrededor de cinco veces la velocidad del sonido (Al Fadhli, 2003).

La temperatura de la llama es relativamente baja, alrededor de 3000°C, lo que hace difícil rociar cerámicas y metales refractarios, debido a que el polvo permanece en la llama por un corto tiempo, y la transferencia de calor para grandes partículas no es suficiente. Se requiere un tamaño de partículas de polvos más finas y compactas que el tamaño de las partículas de los otros procesos de rociado. La ecuación Estequiométrica ideal de combustión para el queroseno es:



El aire comprimido presiona y acelera la llama, actuando a la vez como un refrigerante para la pistola de rociado hipersónico (HVOF). El proceso minimiza la entrada térmica y maximiza la energía cinética para producir recubrimientos realmente densos, con baja porosidad y alta fuerza de enlace, muestran baja tensión residual a la tracción o en algunos casos a la tensión de compresión, permitiendo aplicar capas más gruesas en comparación con los otros procesos.

Debido a la alta energía cinética con la que salen proyectadas las partículas -aunque estas no alcanzan la velocidad de salida de los gases- no requieren que las partículas estén completamente fundidas al chocar contra la superficie del sustrato, para formar recubrimientos de muy buena calidad. Esto es indudablemente una ventaja para los recubrimientos de tipo carburo y es donde este proceso se destaca realmente. Los materiales depositados

por HVOF son usados ampliamente en aplicaciones que requieren la más alta densidad y resistencia al desgaste.

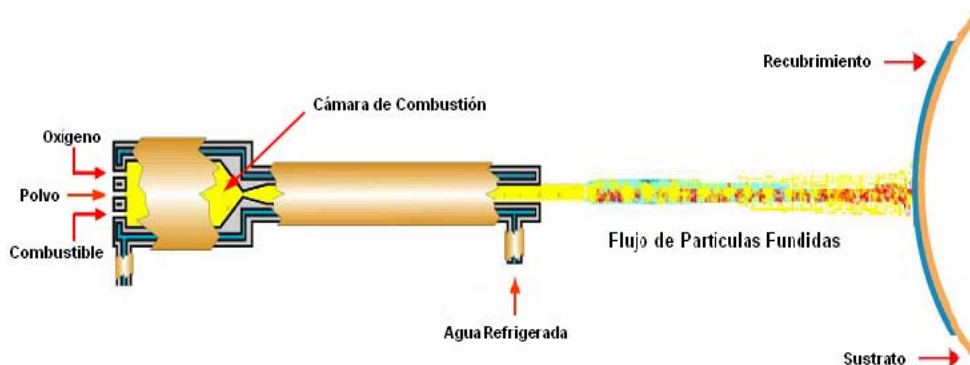


Figura 2-2. Diagrama esquemático del proceso de rociado Hipersónico (HVOF).

2.3. Materiales de Aplicación

El material de alimentación puede ser cualquier sustancia que pueda ser fundida incluyendo metales como aceros al carbono, aceros inoxidable, aluminio, zinc, etc., compuestos metálicos, cerments (cerámicos), óxidos, vidrios y polímeros, en general materiales puros y aleaciones, de acuerdo a la necesidad y a los parámetros de diseño requeridos.

Las durezas varían de HRh-46 para el Zinc, HRc-54 para Acero al Carbono hasta RHc-70 en Cerámicos.

El material se puede rociar en forma de:

- Polvos: por medio de una tolva.
- Alambres y Varillas cerámicas: a través del uso de rodillos.

Tabla 1. Características Químico – Mecánicas de los materiales depositables por HVOF

	Tracción	Corrosión Ácida	Corrosión Alcalina	Fricción	Abrasión
Aceros Inoxidables	****	**	****	***	***
Acero al Carbono	****	*	**	****	****
Carburos de Tungsteno	*****	*	*	*****	*****
Cerámicos	****	*****	*****	*****	****
Aluminio	**	*	****	*	*
Zinc	**	*	****	*	*
Bronce	****	*	****	**	*
Babbit	****	*	*	**	*

**** Resistencia Excelente

* Resistencia Baja

2.4. Comparación entre Procesos de Rociado Térmico

Los procesos de rociado térmico descritos anteriormente tienen características particulares, entre ellas están la temperatura de calefacción, velocidad de las partículas, densidad del recubrimiento, distancia de rociado, tasa de alimentación de los polvos, fuerza adhesiva y resistencia al desgaste, algunas de estas se muestran en el Cuadro N° 2. Estas características afectan las propiedades del recubrimiento cuando se realizan uno o varios ajustes en los parámetros de rociado.

Los procesos de rociado por llama, tanto con polvo o alambre son las formas más antigua de RT, son muy versátiles ya que se puede usar una gran variedad de materiales de alimentación, el equipo es fácil de trasladar, el ruido operacional es relativamente bajo, la instalación y operación es muy simple, lo que hace a estos procesos de rociado los mas económicos.

En este proceso la temperatura de proyección de las partículas es relativamente baja, por lo que son los de menor calidad debido a la baja velocidad de rociado y tasa de alimentación del material, haciendo que las capas de los recubrimientos presenten alta porosidad y bajas fuerza de adherencia.

Los procesos de rociado Hipersónico y por Detonación se caracterizan por producir recubrimientos que presentan capas mucho más densas, con mayor resistencia a la abrasión y alta fuerza de adherencia que cualquier otro recubrimiento producido por otro proceso de RT, debido a que al introducir el material de alimentación en la llama deposita las partículas a velocidades supersónicas.

Cabe señalar que estos procesos presentan algunas desventajas, por ejemplo en el rociado hipersónico el ruido elevado generado por la combustión de alta presión, la alta pérdida del depósito por la evaporación de las partículas y su dispersión en el aire y a los altos costos de operación debido al alto flujo de gas requerido. En el caso del rociado por Detonación el nivel de ruido alcanzado excede los 140 decibeles (dB) por lo que debe realizarse en habitaciones a prueba de sonidos y de explosiones, los recubrimientos obtenidos presentan un costo elevado y es considerado el proceso más complejo operacionalmente hablando.

Los procesos eléctricos son caracterizados por generar las más altas temperaturas en el rociado de las partículas. El material es depositado a velocidades relativamente altas produciendo recubrimientos con porosidad relativamente baja y con mayor fuerza de adherencia que los procesos de rociado por llama, presentan alta tasa de rociado y eficiencia energética.

El rociado por arco eléctrico es mucho más económico ya que no requiere el uso de oxígeno y/o gas combustible, es mucho menos complejo que el rociado por plasma y es fácil de trasladar, entre sus desventajas tiene que solamente pueden ser rociados alambres conductores de electricidad y si se requiere precalentar el sustrato se necesita una fuente de calefacción

independiente. En cambio con el rociado por plasma es posible rociar materiales con punto de fusión más alto cerámicas (zirconio) y materiales refractarios (tungsteno), este proceso es probablemente el más versátil, algunas de sus desventajas son el relativo costo elevado y la complejidad del proceso.

Tabla 2. Características de los Procesos de Rociado Térmico y los Recubrimientos

Proceso de Rociado	Temperatura (°C)	Velocidad (m/s)	Adhesión (Mpa)	Porosidad (%)
Rociado por Llama (con Polvo)	~2200	30-70	6-15	7-12
Rociado por Llama (con Alambre)	~2800	160-220	10-20	~10
Rociado por Arco Eléctrico	< 6000	150-300	15-30	5-15
Rociado por Plasma	~15000	150-600	20-70	3-8
Rociado por Detonación	>4000	600-800	~60	< 2
Rociado Hipersónico (HVOF)	~3000	600-1200	50-80	1-2

En la tabla N° 3 se pueden observar algunos de los materiales disponibles comercialmente como materia prima para el rociado con polvos y alambres. Materiales basados en níquel, cromo y molibdeno incluyendo el Diamalloy 1008 que es de interés primordial en este estudio, que produce recubrimientos que son generalmente duros y resistentes a la oxidación.

Tabla 3. Materiales como Materia Prima en Polvos y Alambres

Tipo de Polvos y Alambres	Tipos de Materiales					
	Base Cobalto		Base Níquel			
Polvos Auto-Fundentes						
Polvos Abrasivos	Base Aluminio	Base Cobalto	Base Cobre		Base Níquel	
Polvos Cerámicos	Oxido de Aluminio	Oxido de Cromo	Oxido de Titanio		Oxido de Zirconio	
Polvos de Metales Aleados	Base Aluminio	Base Cobalto	Base Cobre	Base Hierro*	Base Molibdeno	Base Níquel
Polvos de Carburos	Carburo de Cromo		Carburo de Tungsteno			
Alambres de Arco	Metales Puros	Base Aluminio	Base Cobre	Base Hierro	Base Níquel	Base Titanio
Alambres de Combustión	Metales Puros	Base Aluminio	Base Cobre	Base Hierro	Base Níquel	Base Titanio

*Incluye el Diamalloy 1008

2.5. Propiedades y Aplicaciones de los Recubrimientos por HVOF

2.5.1. Restauración de Piezas Desgastadas

Durante la introducción del HVOF como proceso productivo en la década de los 80, la reconstrucción de elementos desgastados llevándolos a sus dimensiones originales fue una de las primeras aplicaciones en las que se les dio perspectivas sobre otros métodos como la soldadura.

Contra la limitada variedad de elementos de deposición en el proceso de reconstrucción por soldadura, el HVOF provee una gran cantidad de aleaciones de diseño con características y aplicaciones específicas. Además,

reduce al mínimo los esfuerzos residuales y la distorsión microestructural y de propiedades mecánicas que se generan en las zonas afectadas por el calor (ZAC) propias de los procesos por soldadura. Las características a tomar en cuenta son: La penetración en espacios pequeños o con formas geométricas complicadas, la adherencia del recubrimiento al material base, requerimientos de acabado para la pieza y la capacidad de generar capas delgadas.

2.5.2. Protección Contra la Corrosión

La capacidad de depositar o formar capas de óxido con baja inalterabilidad frente a variados estímulos externos, así como una marcada baja reactividad; hacen de estos recubrimientos alternativas válidas y en algunos casos sustitutivas de técnicas como el cromado o la electrodeposición de Níquel, por razones de seguridad, eficiencia de costos o regulaciones ambientales.

La resistencia a la corrosión frecuentemente se considera dependiente de la estabilidad química del recubrimiento y las propiedades de la barrera difusiva formada en la superficie exterior, lo cual está ligado a la densidad atómica y la fortaleza de los enlaces atómicos (Neuville y Matthews, 2007). Los carburos contenidos en el recubrimiento son típicamente inertes desde el punto de vista químico, lo cual previene a los elementos o fluidos corrosivos de llegar al sustrato.

La significativamente menor degradación de carburos derivada de la baja temperatura de aplicación en la llama HVOF, incrementa la eficiencia contra la corrosión frente a RT aplicados por plasma, destacándose en este apartado las aleaciones combinadas de alúmina, como el $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ (ambientes alcalinos y ácidos) y las Inconel 625 e Inconel 718 (aleaciones base Níquel) (Guía de materiales Sulzer Metco, 2006).

2.5.3. Incremento de la Resistencia al Desgaste

El desgaste agrupa una amplia serie de fenómenos de interacción entre elementos, así como entre estos y su medio circundante, describiendo la manera en la que la superficie en contacto de un elemento reacciona frente a estímulos externos. Aunque los Termo-rociados presentan importantes mejoras en la resistencia al desgaste corrosivo, abrasivo, erosivo y por impacto, uno de los objetivos de este trabajo es evaluar el comportamiento de un Termo-rociado HVOF frente al desgaste adhesivo, el cual es el tipo de desgaste que se produce por la interacción de dos elementos en contacto deslizante y, por ende, en movimiento relativo.

La transferencia de partículas en los procesos de desgaste por deslizamiento, ya sea por soldadura en frío o por desprendimiento de partículas en forma de viruta o rebaba se ve significativamente reducida por la naturaleza del proceso, y más específicamente, por el proceso de deposición hipersónico. Las partículas que se mezclan con los gases de combustión en una pequeña cámara, son proyectadas a muy altas velocidades sobre el material base en estado fundido o semifundido, lo que ocasiona que éstas se estrellen contra la superficie aplastándose en capas compactas laminares con enfriamientos rápidos, lo que se conoce como estructura lamelar. El incremento en la dureza superficial resultante evita que la superficie en contacto sufra desprendimientos de material producto de los esfuerzos localizados.

2.6. Variables que Afectan el Proceso de Deposición

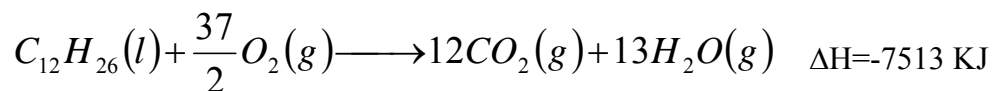
2.6.1. Relación Oxígeno/Combustible

La relación oxígeno/combustible (λ), es el cociente entre la relación real oxígeno/combustible y su valor estequiométrico. Es una de las variables operacionales más importantes en el proceso de Rociado Térmico (RT), y afecta la velocidad y la temperatura de la partícula (Sobulev, 1994).

En el proceso pueden usarse una cierta variedad de combustibles, dependiendo del grado de temperatura de flama deseado, la naturaleza del material a rociar e incluso el tipo o generación de pistola a usar. Las combinaciones de Hidrógeno, Propano y Etileno proporcionan una amplia variedad de valores de selección para los componentes de primera y segunda generación HVOF, mientras que los de tercera generación usan combustible para cohetes (ver Figura 2-3).

En la practica, (λ) viene dado por la relación de flujos entre el oxígeno y el combustible que entra en la cámara de combustión de la pistola; por lo que al momento de hacer cualquier variación en este parámetro es muy más cómodo fijar uno de los flujos y variar el otro. Frecuentemente se fija el flujo de oxígeno como gas de combustión debido a la compleja química de los gases, variando el flujo de combustible que se este usando (kerosén, propano y etileno).

El sistema objeto de esta investigación es un componente de tercera generación Tafa JP-5000, el cual usa una variación de combustible para cohete, conocido por su forma más común de Kerosén, el cual se quema con el oxígeno mediante la siguiente relación estequiométrica:



Una mezcla ideal, que representa la combustión completa desde el punto de vista estequiométrico, involucra 18.5 partes de Oxígeno por cada parte de kerosén, Por lo que una mezcla rica ($\lambda < 1$) producirá valores pico de temperatura de llama, con partículas siendo proyectadas completamente fundidas, lo que incrementa en gran cantidad la adherencia de la capa principal al sustrato y condiciona la adherencia intercapas o cohesión entre partículas.

Como se observa en la Figura 2-3, una mezcla pobre ($\lambda > 1$) se quema con temperaturas de llama ligeramente más bajas (alrededor de los 2700 °C) lo que garantiza una combustión completa, pero el oxígeno restante, que no participa en la reacción química se comporta como un “gas de lastre” al igual que lo haría el N_2 si la combustión se produjese con aire; tomando la forma de potencial oxidante de las partículas que salen proyectadas hacia el sustrato, todo lo cual se traduce en degradación de los carburos presentes en los polvos, menor dureza del recubrimiento y mayor porosidad del mismo (Klassen, 2008).

La mayor cantidad de oxidación de las partículas ocurre en el choque con el sustrato (Voggenreiter, 1995), por consiguiente la temperatura y velocidad de partícula no influyen tanto como la temperatura del sustrato en la oxidación del recubrimiento (esta es una de las causas por las cuales se acostumbra a precalentar el sustrato para la aplicación del rociado).

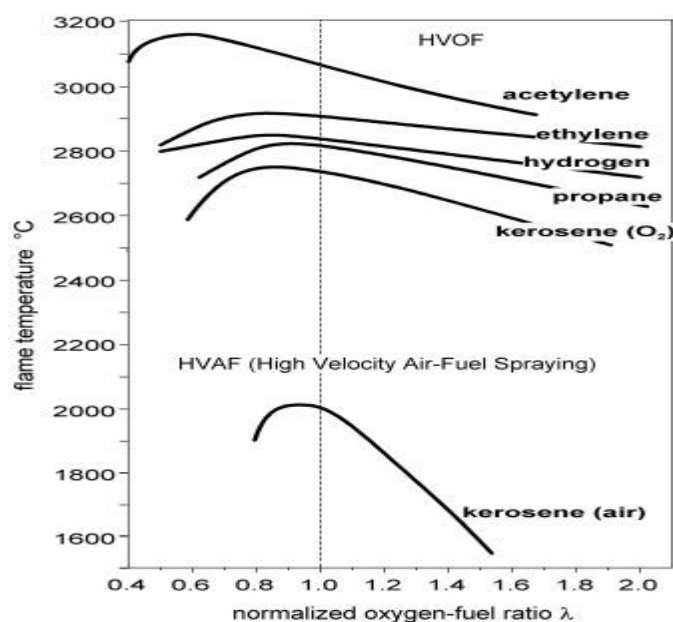


Figura 2-3. Temperatura de llama adiabática Vs. λ Para varios combustibles.

2.6.2. Tasa de alimentación de los polvos

La velocidad a la que se surten los polvos en el sistema, hacia la cámara de combustión, determina la cantidad de partículas que son proyectadas a través de la boquilla de la pistola directamente hacia la superficie del material base. Una tasa muy alta generará cantidades significativas de partículas sin fundir, haciendo que la capa lamelar de partículas aplastadas característica de los recubrimientos presente un aspecto más globular, indicando menor adhesión y resistencia al desgaste del RT. En el lado opuesto, una tasa muy baja hace que se disminuya significativamente la deposición, y con ella la eficiencia del proceso puesto que se requieren más pasadas para generar un espesor de recubrimiento aceptable.

2.6.3. Distancia de Rociado

La distancia de rociado posee la particularidad de ser la única variable no directamente condicionada por el restante grupo de parámetros, sin embargo, la variación de la longitud entre la boquilla de la pistola y la superficie del sustrato condiciona las propiedades del recubrimiento. Para la mayoría de las aleaciones o polvos de rociado, los fabricantes recomiendan una distancia de rociado, según el tipo de equipo a usar, por lo que se analizarán los efectos de sobrepasar o acortar esta distancia recomendada.

Al alargar esta distancia, se experimenta una caída en la velocidad de la partícula, y por ende, en la energía cinética, mientras que la disminución de la temperatura es poco significativa (Turunen, 2005), lo que conlleva a un incremento en la porosidad del recubrimiento (Maranho y Rodrigues, 2007). La adherencia entre las capas no es la propiedad más afectada, puesto que la menor energía cinética hace que el tiempo de permanencia de las partículas en el cono de la llama sea mayor, asegurando una cantidad superior de partículas fundidas siendo proyectadas. Sin embargo, la mayor distancia crea un patrón más abierto de rociado; disminuyendo la eficiencia del proceso al incrementar la cantidad de pases necesarios para generar una capa determinada.

Al disminuir la distancia, sí se afecta tanto la dureza del recubrimiento como la integridad de las capas que lo forman, puesto que las partículas semifundidas golpean el sustrato a altas velocidades pero sin suficiente tiempo para fundirse a través del cono de llama de la pistola. Un probable sobrecalentamiento del sustrato por la cercanía conduce a una potencial reacción de oxidación.

2.6.4. Presión en la Cámara de Combustión

La presión en la cámara de combustión se relaciona directamente con la relación oxígeno/combustible (λ), puesto que si se supone una dimensión constante para la cámara, la calidad de la mezcla aumenta o disminuye la cantidad de calor que se libera en la reacción química, siendo combustión completa o no. Altas presiones generan altas velocidades y temperaturas de llama, mientras que bajas presiones producen menores aceleraciones de partículas a través de la tobera hacia la boquilla, las cuales se depondrán a velocidades de menor magnitud comparadas con valores más altos de presión en la cámara de combustión (P_C) (ver Figura 2-4).

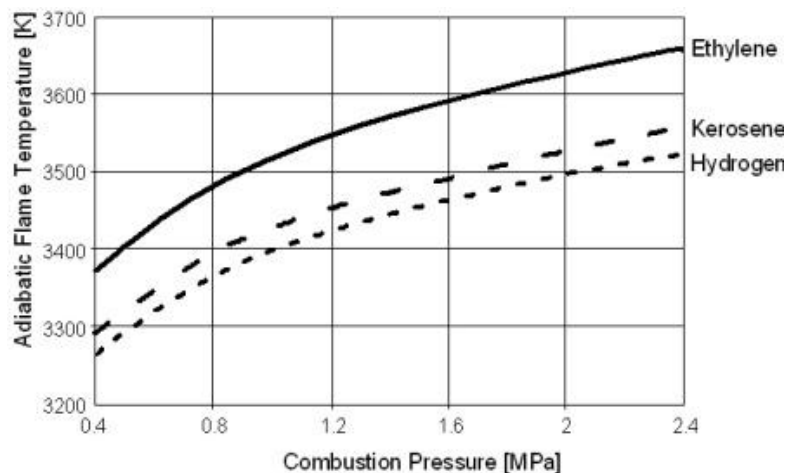


Figura 2-4. Presión en la cámara de combustión Vs. temperatura de llama para el kerosén.

2.7. Tipos de Desgaste

El desgaste, en una definición amplia, es un grupo de fenómenos que tienen en común la remoción de material sólido entre dos superficies en movimiento relativo con fricción entre ellas. La naturaleza del medio circundante (sólido, líquido o gaseoso), el tipo de cargas presentes en la interacción (deslizamiento en una dirección, alternativas, de impacto, contacto rodante) y el mecanismo que se establece en esta interacción, ya sea mecánico o químico, permiten clasificar el desgaste en varios subtipos.

Rabinowicz (1995) establece 4 tipos principales de desgaste: Abrasivo, Adhesivo, Corrosivo y Fatiga Superficial. Sin embargo, Bhushan (1999) extiende esta clasificación a 5 clases:

- a) Abrasivo
- b) Adhesivo
- c) Fatiga Superficial
- d) Erosivo
- e) Corrosivo(Químico)

Otro mecanismo de desgaste documentado en período reciente es el Fretting, o remoción de material entre dos superficies en roce cíclico sobre un período de tiempo que produzca la remoción de dicho material (por ej. Rodamientos). Sin embargo, este subtipo puede ser explicado como una combinación de corrosión, abrasión y adhesión.

Aunque muchos autores difieren en la cifra, se estima que dos tercios de las situaciones de desgaste en el ámbito industrial se deben a la adhesión y la abrasión, ocurriendo todos estos casos de manera gradual (excepto en la fatiga superficial).

2.7.1. Desgaste Abrasivo

El desgaste por abrasión, como se conoce comúnmente, es la acción de corte y deformación plástica de un material rugoso y duro sobre uno más suave. La ASTM lo define como la pérdida de material debida a partículas o protuberancias de gran dureza que son forzadas a moverse a lo largo de una superficie sólida.

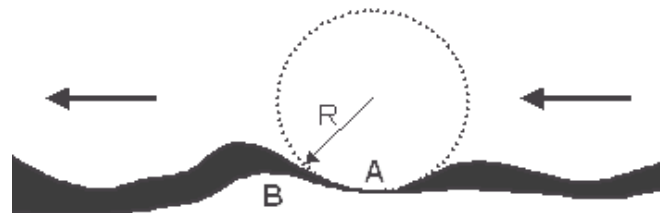


Figura 2-5. Desgaste de tipo abrasivo entre una superficie A y un substrato B.

La dureza superficial del material antagonista es significativamente mayor que la del substrato, o material que se desgasta, y aunque los mecanismos básicos son la deformación plástica y el arranque de viruta, el comportamiento de estas partículas define claramente dos subtipos de desgaste: En el primer caso, las partículas que se desprenden se adhieren fuertemente a la superficie en contacto, provocando mayor rugosidad y rayaduras en la superficie. En el segundo caso, las partículas desprendidas son libres de moverse a lo largo de las superficies en contacto.

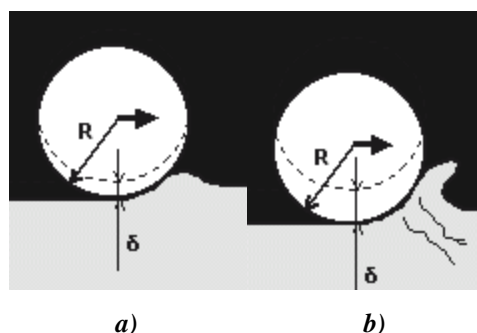


Figura 2-6. Fases del desgaste abrasivo a) Deformación b) “Corte” por endurecimiento por deformación y propagación de grietas.

Existen 3 mecanismos usados para explicar el fenómeno del desgaste abrasivo: En dos superficies de rugosidad cualquiera un material “A” hace contacto con un sustrato “B” de menor dureza superficial (ver Figura 2-5). El sustrato se deforma plásticamente formando protuberancias (Plowing) (ver Figura 2-6a). Estas protuberancias pueden ser eliminadas con el subsecuente paso de partículas abrasivas.

Seguidamente, el material desgastado presenta endurecimiento por deformación, con la propagación de grietas que crea una fractura localizada y desprendimiento primario de microvirutas (Cutting) (ver figura 2-6b).

Finalmente, las grietas se propagan libremente a lo largo de la superficie y la acción de las partículas abrasivas genera desprendimiento de material adicional en forma de partículas mucho más pequeñas (Fragmentation). La deformación y remoción de material se asemejan vagamente a los procesos de mecanizado por arranque de viruta, con la diferencia que el desgaste de una superficie será inversamente proporcional a la dureza superficial de la misma para este fenómeno en estudio.

2.7.2. Desgaste Adhesivo

El término adhesión está referido a la habilidad de las estructuras atómicas de mantenerse juntas y formar vínculos con otros átomos o superficies con los cuales están en contacto íntimo. Teóricamente ningún esfuerzo normal es requerido para establecer un lazo así entre dos elementos de similar estructura cristalina, sin embargo, en la práctica muchos factores interfieren con esto, en particular la contaminación de las superficies. Es debido a esto que sólo se puede hablar de una adhesión cuantificable cuando las dos superficies se encuentran sometidas a carga y con un movimiento relativo entre las mismas, de manera que se rompen estas capas de contaminantes.



Figura 2-7. Desgaste adhesivo entre dos superficies: a) Deslizamiento simple b) Superficies fracturadas con interacción directa entre materiales.

Archard (1953) sugirió que una fractura por cizallamiento ocurre en la región más débil de alguno de los dos cuerpos; y en la mayoría de los casos la resistencia a la adhesión intercara es pequeña comparada con la resistencia a la fractura de las zonas circundantes.

El desgaste por deslizamiento involucra la creación de vínculos entre las superficies en interacción, los cuales dependen en gran medida de la naturaleza físico-química de las superficies en contacto. Este proceso está constituido por una serie de pasos bien definidos:

- a) Deformación de las irregularidades en contacto
- b) Remoción de las capas de óxido

- c) Formación de Soldadura en fase sólida
- d) Falla de la capa soldada y transferencia de material
- e) Modificación de los fragmentos transferidos
- f) Remoción de fragmentos transferidos y creación de partículas sueltas.

La acción combinada de la adhesión y el movimiento relativo causa una severa deformación plástica de las irregularidades presentes en la superficie, las cuales se fracturan por cizallamiento para formar partículas que se transfieren, de acuerdo con el siguiente esquema ilustrado:

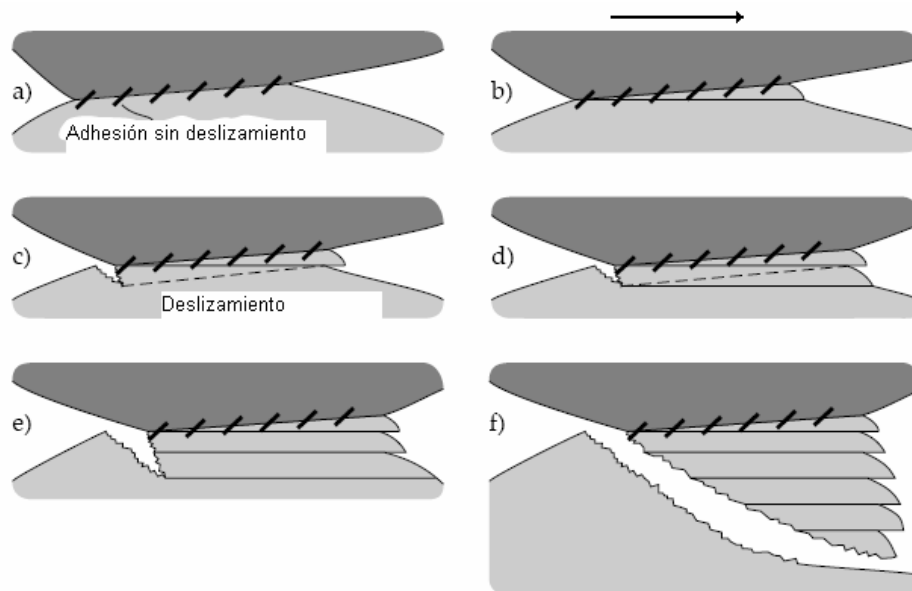


Figura 2-8. Mecanismo de fractura de las partículas sometidas a deslizamiento y adhesión.

El material con menor dureza superficial se deforma en una serie de “bandas”, y cuando la banda alcanza cierto límite se inicia una nueva grieta o se propaga una existente hasta fracturar por completo la irregularidad y formar la partícula transferida (No hay deslizamiento en la línea de contacto entre las superficies).

Experimentos conducidos bajo condiciones controladas entre contactos metal-metal han revelado que materiales más duros tienden a

romper las irregularidades de sus superficies limpiamente, con poca deformación y producir menor cantidad de partículas de desgaste comparados con materiales dúctiles, lo que puede interpretarse como que la ductilidad tiene el indeseable efecto de acentuar el desgaste adhesivo (Archard y Hirst, 1956).

La formación y posterior ruptura de la capa de material soldado en fase sólida, conlleva a la creación de una delgada capa de transferencia de material, lo que distingue a los procesos de desgaste adhesivos de los demás mecanismos. Sin embargo, las características de los metales involucrados condicionan la transformación y posterior formación de microvirutas de desgaste.

Cuando el par tribológico es soluble entre sí (similar radio atómico, igual estructura cristalina, similar electronegatividad y valencia), una capa del material más dúctil se transfiere al de mayor dureza, formando una capa de material transferido que se endurece por deformación y luego se libera como partículas sueltas, lo cual ocurre de manera cíclica.

Por otro lado, cuando el par tribológico está compuesto de materiales insolubles, una forma de aleación mecánica ocurre y la capa consiste en lamelas de ambos metales (Stachowiak, 2000). Al principio partículas de transferencia acumulan material de ambas superficies en pequeñas cantidades (Figura 2-9a). A medida que esta acumulación crece se deforma y estira entre ambas superficies (Figura 2-9b y 2-9c), formando una estructura lamelar (Figura 2-9d).

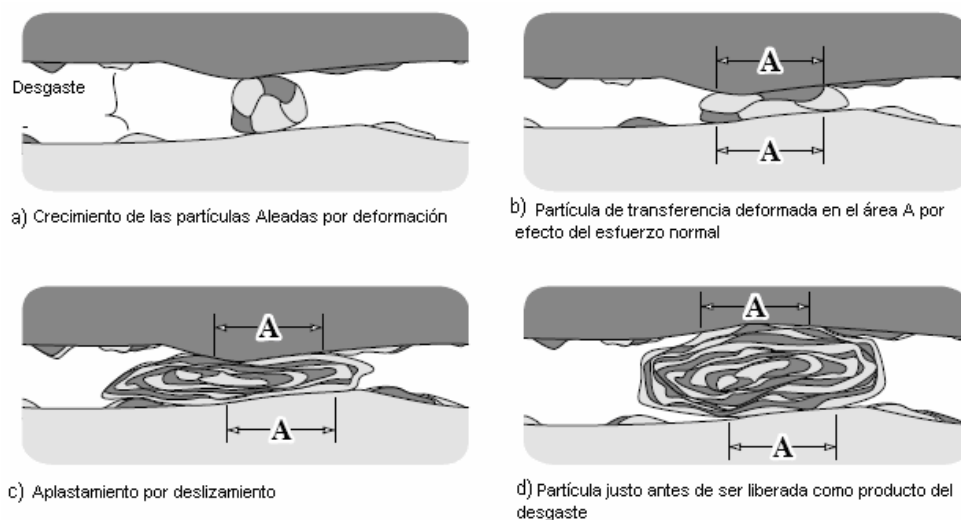


Figura 2-9. Representación esquemática del proceso de desgaste en materiales insolubles.

2.7.3. Desgaste por Fatiga Superficial

Incluso en contactos entre piezas bajo lubricación adecuada donde la adhesión puede ser considerada despreciable, el desgaste está presente por efecto de la deformación plástica producto del contacto entre las irregularidades de ambas superficies, que llevan a la formación de micropartículas de desgaste.

A pesar de aparentar ser un mecanismo similar al desgaste adhesivo, quizá por la manifestación física del mismo, bajo la forma de picaduras (Pitting) el desgaste por fatiga superficial es un fenómeno prolongado en el tiempo, no instantáneo, y producto de la continua deformación plástica e intensos esfuerzos localizados en contactos rodantes o puntuales de elementos de máquinas, como dientes de engranajes, rodamientos o levas; por lo que su efectiva consecución depende de la naturaleza cíclica de estas cargas además de la nucleación y propagación de grietas en el material desgastado.

El proceso descrito anteriormente corresponde al primer mecanismo de desgaste por fatiga superficial, en el cual las grietas se propagan desde la superficie hasta formar partículas sueltas. Un segundo mecanismo, también conocido como fatiga por contacto subsuperficial explica la nucleación de grietas alrededor de defectos o inclusiones con propagación producto de esfuerzos localizados hasta la superficie, donde se produce la fractura y posterior desprendimiento (ver Figura 2-10) (Stachowiak y Batchelor, 2000).



Figura 2-10. *Propagación de grietas por fatiga de contacto rodante Subsuperficial.*

2.7.4. Desgaste Erosivo

El desgaste erosivo agrupa dos tipos análogos de daño a causa del impacto de fluidos a altas velocidades: Erosión por partículas de líquido y daño por cavitación. El primer caso es típico en turbinas de vapor, donde pequeñas gotas de agua impactan por cortos períodos de tiempo las superficies de los álabes, creando intensos pulsos de compresión que generan grietas o pequeñas deformaciones plásticas en la zona de impacto y daños por cizallamiento en las zonas circundantes.

Por su parte, en el daño por cavitación el colapso de burbujas de vapor o gas (si está presente en disolución) crea ondas de presión que impactan repetidamente el metal en contacto con el fluido de trabajo, por lo

que factores como la tensión superficial y la presión de vapor del fluido de trabajo son de vital importancia para la prevención del daño acumulado.

2.7.5. Desgaste por Corrosión

El desgaste por corrosión o por oxidación o curren en una amplia variedad de situaciones, tanto bajo como sin lubricación. El principio fundamental de este mecanismo de desgaste es la reacción química entre el material atacado y un medio corrosivo, el cual puede ser un lubricante reactivo, un agente químico o el aire (Smith, 2004).

El término desgaste por corrosión es un término general relativo a cualquier proceso dependiente de una reacción corrosiva, mientras que el término por oxidación abarca el daño causado por el oxígeno atmosférico (Stachowiak, 2000). Ambos procesos comparten una característica en común: el aumento de la tasa de desgaste va acompañado de una rápida disminución del coeficiente de fricción.

Las reacciones químicas superficiales efectivas en la prevención del desgaste adhesivo pueden llevar en casos extremos a la considerable pérdida de material subyacente. Si un metal se corroe creando una capa en su superficie mientras se somete a contacto deslizante, hipotéticamente pueden suceder cuatro procesos (Figura 2-11) (Buckley, 1981).

- a) Se forma una capa de lubricante perdurable que inhibe ambos, desgaste y corrosión.
- b) Una capa de lubricante no perdurable en el tiempo produce una alta tasa de desgaste debido a la constante destrucción y formación de la primera, el cual es uno de los casos más comunes.

- c) La capa protectora se destruye y se forma un par galvánico entre el sustrato y el medio corrosivo, dando origen a una intensa corrosión por efecto de disolución anódica.
- d) El desgaste adhesivo y la corrosión actúan independientemente, siendo el resultado la suma de ambos procesos.

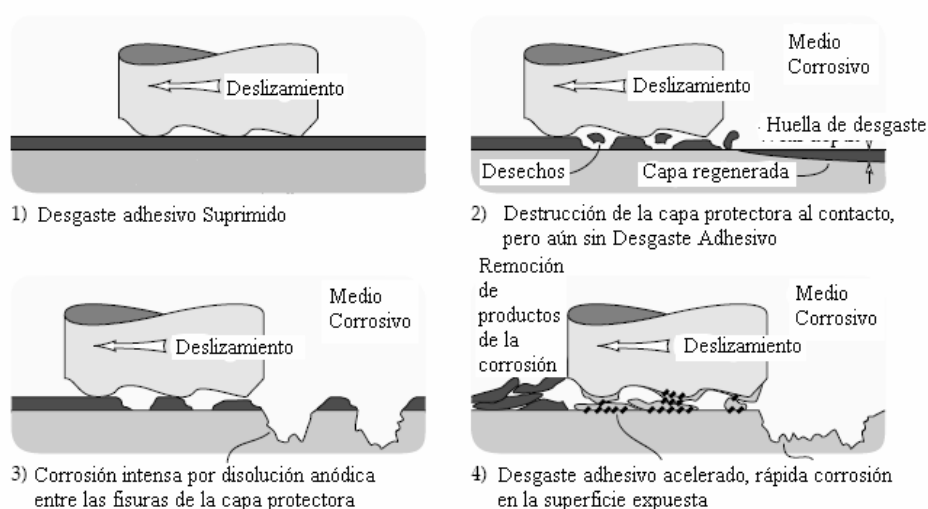


Figura 2-11. Ilustración de los cuatro casos hipotéticos de corrosión con contacto deslizante.

2.8. Diseño Experimental Factorial

Los Diseños Factoriales son metodologías experimentales que se utilizan cuando se estudian diversas variables y se desea conocer el efecto de la interacción entre ellas.

Fueron creados para generar procesos de calidad, lo que los convierte en métodos más prácticos que estadísticos, teniendo en cuenta el ahorro de costos y optimización de procesos. Genichi Taguchi desde 1950 los desarrolló como una aproximación al diseño de experimentos con el

objetivo de reducir los costos y los tiempos emanados de la experimentación.

En el modelo básico de un diseño experimental factorial (X^Y), la base (X) es un número entero ≥ 2 que representa los niveles o valores que toman las variables, y el exponente (Y) es un número entero o fraccionario, en algunos casos, también ≥ 2 que significa el número de variables a evaluar. Cada ensayo involucra un mínimo de 3 replicas para garantizar significancia estadística. Así, un diseño 2^2 involucra 2 variables en 2 niveles cada una, lo que equivale a 12 ensayos y 4 condiciones de prueba. Un diseño 3^2 , por su parte, es el equivalente a 2 variables con 3 niveles de prueba cada una, lo que serían 27 ensayos y 9 condiciones de prueba.

Los diseños más comunes son los que involucran menos corridas o ensayos, como 2^2 , 2^3 y 3^2 e incluso 3^3 . Para un mayor número de variables y niveles de prueba, el número de corridas hace que el estudio sea significativamente prohibitivo en términos de tiempo y costos.

2.9. Análisis de Varianza ANOVA

El análisis de la varianza (ANOVA) es una herramienta estadística, de gran utilidad tanto en la industria, para el control de procesos, como en el laboratorio de análisis, para el control de métodos analíticos. Los ejemplos de aplicación son múltiples, pudiéndose agrupar en dos clases, según el objetivo que persiguen: la comparación de múltiples columnas de datos y la estimación de los componentes de variación de un proceso.

Se descompone la variabilidad total de los datos en dos fuentes de variación: la debida a los grupos de datos y la debida a la precisión dentro de cada grupo de datos. Matemáticamente, la suma de cuadrados total, SS_T , puede descomponerse como el total de dos sumas de cuadrados:

$$SS_T = SS_R + SS_E \quad (\text{Ec. 2.1})$$

La suma de cuadrados debido a la regresión, SS_R , mide la variación entre los resultados individuales y la media de cada grupo de resultados, siendo su fórmula (Ecuación 2.2):

$$\sum_{u=1}^N (\hat{Y}_u - \bar{Y})^2 \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Siendo Y_u el valor observado en la u -ésima corrida.

SS_E , o suma de cuadrados residual, mide las desviaciones entre la media de cada grupo de datos y el resultado medio global.

$$\sum_{u=1}^N (Y_u - \bar{Y}_u)^2 \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Los análisis de varianza se expresan en tablas que permiten resumir los datos obtenidos y las distintas varianzas calculadas:

Tabla 4. Resumen de análisis de varianza

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Varianza
Residuo	SS_E	$N-k$	$SS_E/(N-k)$
Regresión	SS_R	$k-1$	$SS_R/(k-1)$
Total	SS_T	$N-1$	$SS_T/(N-1)$

La varianza de residuo se conoce como MSW, o Mean Square Within, y viene dada por el cociente entre SS_R y los correspondientes grados de libertad, donde k es el número de grupos de valores y N el número total de muestras. La varianza de regresión se denomina MSB, o Mean Square Between.

Como se asume antes de generar un análisis de varianza que: a) Cada conjunto de datos es independiente del resto y b) Los resultados para cada conjunto deben seguir una distribución normal, la ecuación de regresión ajustada se prueba usando el valor F como valor estadístico de prueba, el cual corresponde a la relación entre las medias de cuadrados:

$$F = \frac{MSB}{MSW} \quad (\text{Ec 2.4})$$

Este valor se compara, usando una distribución normal de probabilidades con un criterio de dos colas y un intervalo de confianza predefinido, lo que permite aceptar ó rechazar la hipótesis si el valor obtenido está fuera ó dentro de los límites de la distribución.

2.10. Metodología de Superficie de Respuesta (MSR)

La Metodología de Superficies de Respuesta es un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas utilizadas para modelar y analizar problemas en los que una variable de interés es influenciada por otras. El objetivo es optimizar la variable de interés.

Esto se logra al determinar las condiciones óptimas de operación del sistema. La respuesta es una cantidad cuantificable cuyo valor se ve afectado al cambiar los niveles de los factores. El interés principal es optimizar dicho valor.

Al decir que un valor de respuesta Y depende de los niveles x_1, x_2, \dots, x_k de $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_k$ factores, estamos diciendo que existe una función matemática de x_1, x_2, \dots, x_k cuyo valor para una combinación dada de los niveles de los factores corresponde a Y , esto es $Y=f(x_1, x_2, \dots, x_k)$.

La función de respuesta se puede representar con una ecuación polinomial. El éxito en una investigación de una superficie de respuesta depende de que la respuesta se pueda ajustar a un polinomio de primer ó segundo grado.

Suponiendo que la función de respuesta para los niveles de dos factores se puede expresar utilizando un polinomio de primer grado:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \quad (\text{Ec 2.5})$$

Donde β_0 , β_1 , β_2 son los coeficientes de regresión a estimar, X_1 y X_2 representan los niveles de ζ_1 y ζ_2 , respectivamente. Suponiendo que se recolectan $N \geq 3$ valores de respuesta (Y), con los estimadores b_0 , b_1 y b_2 se obtienen β_0 , β_1 y β_2 respectivamente. Al remplazar los coeficientes de regresión por sus estimadores obtenemos:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 \quad (\text{Ec 2.6})$$

Donde \hat{Y} denota el valor estimado de Y dado por x_1 y x_2 .

2.10.1. Superficie de Respuesta

La relación $Y=f(x_1, x_2, \dots, x_k)$ entre Y y los niveles de los k factores x_1, x_2, \dots, x_k representa una superficie. Con k factores la superficie está en $k+1$ dimensiones. Por ejemplo, cuando se tiene $Y=f(x_1)$ la superficie esta en dos dimensiones como se muestra en la figura 2-12, mientras que si tenemos $Y=f(x_1, x_2)$ la superficie está en tres dimensiones, esto se observa en la figura 2-13.

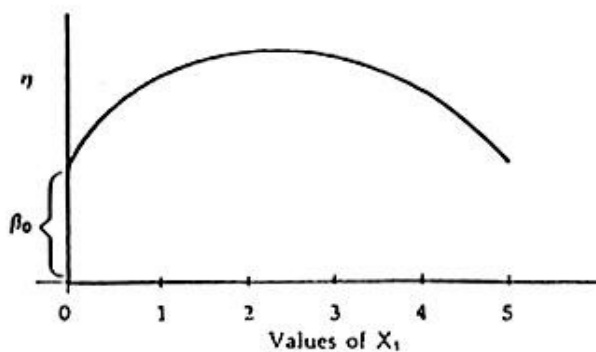


Figura 2-12. Superficie de respuesta en dos dimensiones.

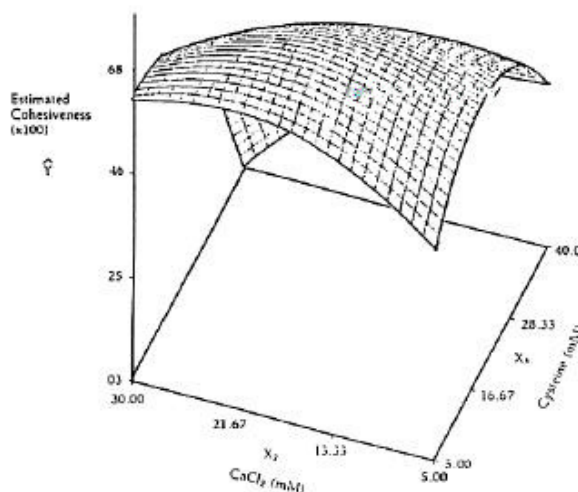


Figura 2-13. Ejemplo de superficie de respuesta tridimensional.

2.10.2. Gráfica de Contornos

La gráfica de contornos facilita la visualización de la forma de una superficie de respuesta en tres dimensiones. En ésta las curvas de los valores iguales de respuesta se grafican en un plano donde los ejes coordenados representan los niveles de los factores.

Cada curva representa un valor específico de la altura de la superficie, es decir un valor específico de \hat{Y} . Esto se muestra en la figura 2-14. Esta gráfica nos ayuda a enfocar nuestra atención en los niveles de los factores a los cuales ocurre un cambio en la altura de la superficie.

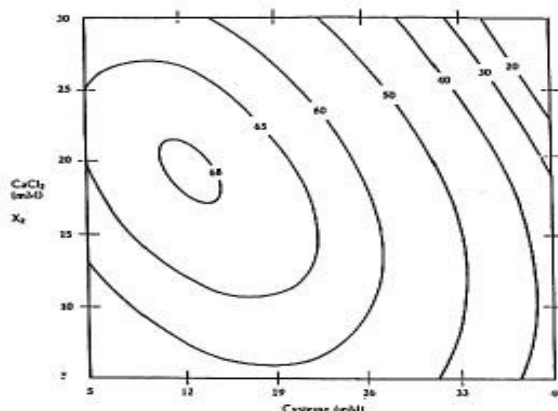


Figura 2-14. Gráfica de contornos.

La región experimental especifica la región de valores para los niveles de los factores. Esto se puede hacer empleando los niveles actuales de operación para cada factor; si se desea explorar los alrededores se incrementa y decrementa el valor del nivel en una cantidad determinada.

2.10.3. Polinomios de Primer y Segundo Orden

Generalmente se desconoce la relación entre la respuesta y las variables independientes, por ello requerimos un modelo que aproxime la relación funcional entre Y y las variables independientes. Este modelo provee las bases para un nuevo experimento que nos lleva hacia un nuevo modelo y el ciclo se repite. Si la respuesta se describe adecuadamente por una función lineal de las variables independientes se utiliza el modelo de primer orden.

$$Y = \beta_o + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon \quad (\text{Ec 2.6})$$

Los parámetros del modelo se estiman mediante el método de mínimos cuadrados, y evaluando la significancia de la curvatura con el análisis de varianza, se decide si para el ajuste de la respuesta basta un polinomio de primer orden:

$$\hat{Y} = b_o + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k \quad (\text{Ec 2.7})$$

O, por el contrario, un ajuste de segundo orden:

$$Y = \beta_o + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i<j}^k \sum_{i<j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (\text{Ec 2.8})$$

Suponiendo que se desea maximizar la respuesta, el máximo (si es que existe), será el conjunto x_1, x_2, \dots, x_k , tal que las derivadas parciales

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_1} = \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_2} = \dots = \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_k} = 0 \quad (\text{Ec 2.8})$$

Dicho punto se denomina punto estacionario, el cual puede ser un punto de respuesta máxima, un punto de respuesta mínima ó un punto silla.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1. Diseño Experimental

La deposición de aleaciones mediante el proceso de Rociado Térmico Hipersónico por Combustión (HVOF) presenta un número limitado pero muy influyente de parámetros a evaluar al momento de realizar un estudio de optimización. Distancia de rociado, relación oxígeno/combustible (λ), presión en la cámara de combustión y tasa de alimentación de los polvos se encuentran entre los parámetros más comúnmente estudiados.

La distancia de rociado ha sido suficientemente estudiada debido a su elevada influencia en la calidad de los recubrimientos, por lo que en este trabajo no formará parte de los parámetros a elegir. En segundo lugar dentro del conjunto de variables típicas de estudio en los procesos por HVOF, se encuentra la tasa de alimentación de los polvos.

El efecto de la velocidad de alimentación de los polvos ha sido el menos documentado de todas las variables que afectan el Rociado Térmico (RT) (Gil, 2002). Sin embargo, existe suficiente información para concluir que afecta principalmente la densidad del recubrimiento (Ingham, 1995). Si la velocidad de alimentación es demasiado alta, el material no puede absorber todo el calor suministrado por la llama afectando la calidad del recubrimiento. Este efecto se manifiesta en la proyección de una gran cantidad de partículas que no han alcanzado su punto de fusión, lo que se traduce en una baja adhesión. En cambio, si es demasiado baja, la

productividad del proceso disminuye, requiriendo un número mayor de pasadas para alcanzar espesores de recubrimientos deseables.

La presión en la cámara de combustión engloba otras variables directamente dependientes de ella como la relación oxígeno/combustible (Sinatora, 2007).

La relación oxígeno/combustible es el cociente estequiométrico entre la relación oxígeno/combustible real y su equivalente teórico. El denominador de esta relación viene dado por la ecuación de combustión del kerosén, que, suponiendo combustión completa, corresponde a una relación de 18,5:1 (partes oxígeno/parte combustible), mientras que el numerador viene condicionado por la diferencia de flujos en el proceso real.

Uno de los objetivos planteados en esta investigación era la variación de la relación oxígeno/combustible. Sin embargo, debido a que en el momento de realizar el proceso de termo-rociado en el equipo en servicio en Plasmatec Ingenieros S.A no se disponía de un flujómetro de oxígeno, que permitiera regular la cantidad del mismo de manera precisa, se tomó la decisión de fijar el caudal del oxígeno, y variar el flujo de combustible.

Con el fin de optimizar las condiciones de deposición de un polvo en particular, rociado con las condiciones y equipo existentes en las instalaciones de la empresa, se usaron como referencia los valores de flujos usados actualmente en la línea de producción.

Durante el proceso el flujo de oxígeno permanecería fijo a un valor de 10,19 m³/h (360 scfh-pies cúbicos por hora en condiciones estándar) y el flujo de combustible sufriría las variaciones, entre los 20,82-24,61 litros/h (5,5 y 6,5 GPH).

Los parámetros seleccionados, tasa de alimentación de los polvos y flujo de combustible, se evaluarán en 3 niveles cada uno, tomando como referencia el valor sugerido por el fabricante (ver tabla 5).

Tabla 5. Parámetros de deposición seleccionados

Nivel	Flujo de Combustible (L/h)	Alimentación de polvos(gr/min)
1	20,82	64
2	22,71	76
3	24,61	88

Los valores sugeridos por el fabricante de los polvos para la deposición de esta aleación son de 22,71 L/h (6 GPH) de combustible y 76 gr/min de alimentación de polvos (tabla 5, Nivel 2).

En pruebas preliminares al proceso de rociado térmico, se evaluó la calidad del recubrimiento y el color de la llama de combustible ajustando los parámetros seleccionados para optimización anteriormente. Por recomendación del Ing. jefe de termo-rociado de la empresa, se eligieron variaciones de aproximadamente 9% por encima y por debajo de los valores de deposición recomendados por el fabricante de los polvos.

Los parámetros a optimizar se organizaron en un diseño factorial 3^2 , es decir, de 2 parámetros y 3 niveles, con 9 condiciones de prueba y 3 muestras para cada nivel (ver Tabla 6).

Tabla 6. Condiciones a evaluar en el diseño factorial 3^2

Condiciones	Alimentación de los polvos (gr/min)	Flujo de combustible (L/h)
1	64	20,82
2	64	22,71
3	64	24,61
4	76	20,82
5	76	22,71
6	76	24,61
7	88	20,82
8	88	22,71
9	88	24,61

3.2. Materiales

El material seleccionado para rociar en las probetas es una aleación en base hierro desarrollado para aplicaciones que requieren protección contra el desgaste corrosivo a bajas temperaturas, así como una gran resistencia al desgaste por deslizamiento; se le conoce comercialmente con el nombre de Diamalloy 1008 y es adecuado para ser rociado con equipos HVOF.

El polvo Cr-Mo seleccionado posee distintos elementos que permiten mejorar la resistencia al desgaste por deslizamiento, a la corrosión, el acabado superficial, así como la cohesión entre partículas (Manual del fabricante de los polvos).

Tabla 7. Composición base para la aleación 1008

Elemento	% en peso del total
Hierro	Balance
Cromo	17
Molibdeno	11
Níquel	3
Silicio	3
Carbono	0.4
Cobre	3
Boro	4

Según el manual suministrado por el fabricante de los polvos, esta aleación tiene una resistencia a la corrosión superior a la de un acero inoxidable tipo austenítico (316), con las propiedades de resistencia al desgaste de un acero inoxidable tipo martensítico. La adhesión al sustrato es típicamente del orden de las 62,05 MPa (9000 Psi) (sustrato acero al carbono con acabado superficial blasteado por alúmina). La densidad, y la

baja porosidad (inferior al 2%) permiten una gran resistencia a la acción de ambientes alcalinos y algunos medios ácidos, para temperaturas de servicio inferiores a los 343 °C (650°F). Como se puede observar en la Tabla 8, esta aleación se sugiere mayoritariamente para aplicaciones de servicio pesado donde esté presente contacto deslizante.

Tabla 8. Principales aplicaciones industriales del polvo 1008

Función principal	Aplicación Típica
Superficies con fricción	Chumaceras, Rotores de bombas de combustible, anillos de pistón, recubrimiento interno de cilindros de motor, Cigüeñales de servicio pesado
Partículas abrasivas (A bajas temperaturas)	Pistones, Bombas de desplazamiento positivo, Muñequillas de cigüeñal, Bombas de ariete
Desgaste por contacto rodante (Fretting) con movimiento relativo entre partes	Anillos de desgaste
Fretting (sin movimiento relativo y a bajas temperaturas de servicio)	asientos de rodamientos
Erosión (bajas temperaturas de servicio)	Ventiladores, válvulas hidroeléctricas
Reconstrucción de piezas de acero al carbono	Partes mal maquinadas y desgastadas
Reconstrucción de piezas de aceros aleados resistentes a la corrosión	Partes mal maquinadas y desgastadas

3.3. Manufactura de las Probetas

Las probetas fueron dimensionadas siguiendo las indicaciones de la Norma ASTM G-77 que corresponden a las especificaciones para el Ensayo de Desgaste por deslizamiento con arreglo bloque sobre anillo (Figuras 3-1 y 3-2).

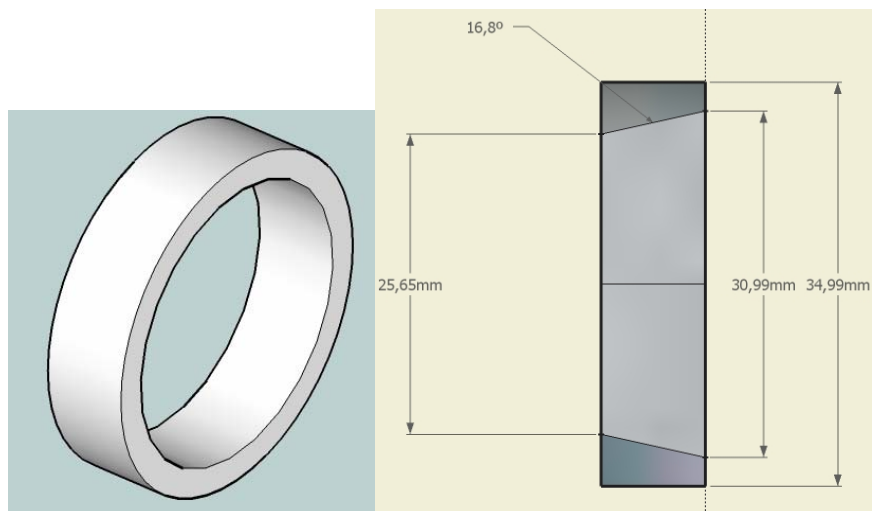


Figura 3-1. Anillo en isometría y Sección transversal según ASTM G77.

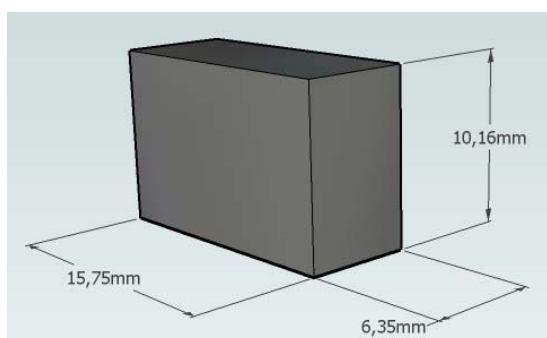


Figura 3-2. Bloque.

Los bloques, siguiendo las especificaciones relativas al ensayo de desgaste por deslizamiento, fueron manufacturados usando acero 1045, usando una Fresadora Toz Kurim (Figura 3-3) cuya precisión es de 0,05 mm. La norma exige que la altura final de los bloques sea de 10,16 mm, como se aprecia en la Figura 3-2, por lo que debieron ser fabricados descontando 0,5 mm de su altura total para permitir que el recubrimiento fuera depositado en su cara superior.



Figura 3-3.Fresadora Toz Kurim.

Siguiendo las especificaciones exigidas por la norma ASTM G77, los anillos fueron fabricados usando acero 1045 en un Centro de Maquinado Fulland (figura 3-4), que posee una precisión de 0,01 mm.



Figura 3-4.Centro de Mecanizado Fulland.

3.4. Preparación Superficial de las Probetas

Previo al proceso de termo-rociado, se deben seguir una serie de pasos para asegurar que la deposición del material sobre el sustrato sea exitosa.

En primer lugar, las probetas fueron fijadas usando puntos de soldadura a una pletina de acero soldada a una tubería de 2,54 cm (1 in), con el fin de darles una adecuada sujeción durante el proceso de termo-rociado, como se muestra en la Figura 3-5.



Figura 3-5. Bloques montados en los soportes de acero.

Para evitar todo rastro de grasas, aceites o suciedad presentes en la superficie de los bloques, se limpiaron usando un solvente industrial rociado a presión sobre los mismos (ver Figura 3-6).



Figura 3-6. Detalle de la limpieza con Thinner.

Luego de un corto período de tiempo, se procede a precalentar las muestras, esto con el fin de eliminar el solvente remanente y prevenir la formación de esfuerzos residuales por choque térmico en el momento de la deposición, la cual sucede a altas temperaturas (ver Figura 3-7).



Figura 3-7. Precalentamiento de las muestras.

Finalmente, después del precalentamiento, el arenado es el último paso de la preparación superficial de las probetas y que se realiza justo antes del termo-rociado, para prevenir la oxidación por la atmósfera circundante (ver Figura 3-8a y 3-8b).

El fabricante de los polvos recomienda valores de rugosidad superficial de entre 6,25-8,75 μm Ra, por lo que los bloques fueron desbastados usando alúmina de 1-3 mm proyectada con una presión de 345-414 KPa (50-60 Psi).

El termo-rociado en general es un proceso de proyección de partículas fundidas o semifundidas hacia un sustrato, lo que crea sucesivas capas de partículas aplastadas por el impacto en una estructura compuesta por capas. Puesto que la interfase sustrato/recubrimiento es vital en la adecuada adhesión del mismo, la superficie del sustrato debe tener un grado de rugosidad tal que, al proyectar las partículas, estas se anclen mecánicamente.

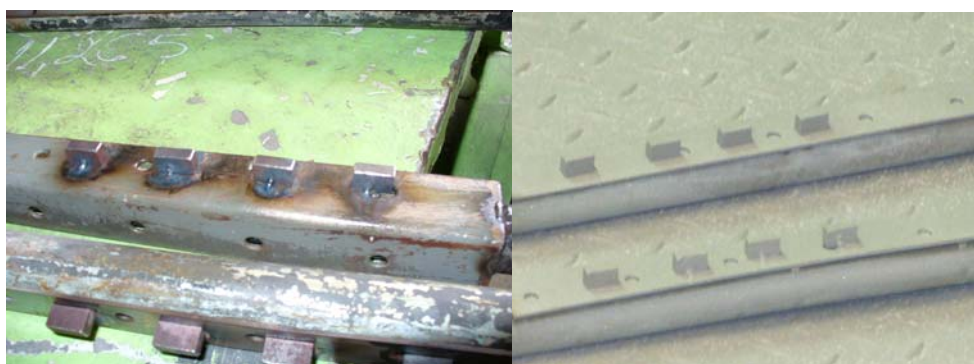


Figura 3-8. Detalle de los bloques a) Antes del Blasting b) Después del Blasting.

3.5. Proceso de Rociado

La deposición de la aleación en los 27 bloques se realizó con los siguientes parámetros:

Tabla 9. Resumen de parámetros de deposición

Parámetros	Condición	Valores
Alimentación de Polvos	Variable	64 gr/min
		76 gr/min
		88 gr/min
Flujo de Combustible	Variable	20,82 L/h
		22,71 L/h
		24,61 L/h
Presión en la cámara de combustión	Variable	0,72 MPa
		0,74 MPa
		0,76 MPa
Presión de Combustible	Variable	0,73 MPa
		0,79 MPa
		0,83 MPa
Distancia de rociado	Constante	34 cm
Flujo de Oxígeno	Constante	10,19 m ³ /h
Presión de salida del Oxígeno	Constante	1,93 MPa

El equipo de termo-rociado HVOF presente en Plasmatec Ingenieros (Figura 3-10) consta de un alimentador de polvos de tipo tornillo que no posee un indicador digital ó analógico que indique cuanto material entra a la pistola, por lo que el procedimiento para ajustar la tasa de alimentación fue el siguiente:

- Se ajustaron las rpm del tornillo a un valor predeterminado (290 rpm).
- Se retiró la conexión de la manguera de la alimentación hacia la pistola y se vació material en un envase limpio por un período cronometrado de 30 seg.
- Tomando el peso del envase como tara, se midió la cantidad de material aportado en una balanza electrónica con apreciación de 0,01 gr.
- Se repitió el procedimiento ajustando las rpm hasta obtener la tasa de alimentación deseada.

La pistola es un equipo de tercera generación, Tafa JP-5000, refrigerada por agua, diferenciable de los equipos de primera y segunda generación por el combustible usado (kerosén), como se aprecia en la Figura 3-9.



Figura 3-9. Detalle de la Pistola JP-5000.



Figura 3-10. Equipo HVOF. De izquierda a derecha en sentido de las agujas del reloj: Alimentador de polvos, control de flujo de combustible y agua, control de la pistola y medidores de flujo de O₂ y kerosén.

Una vez controlados los parámetros deseados, se encendió la pistola y se inició el rociado sobre las muestras (Figura 3-11 y 3-12), controlando entre pasadas la temperatura (Figura 3-13) y la uniformidad del espesor de la capa depositada usando un tornillo micrométrico.

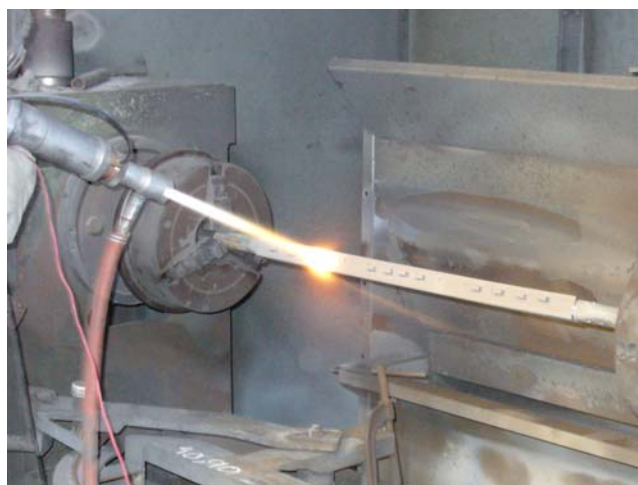


Figura 3-11. Rociado.

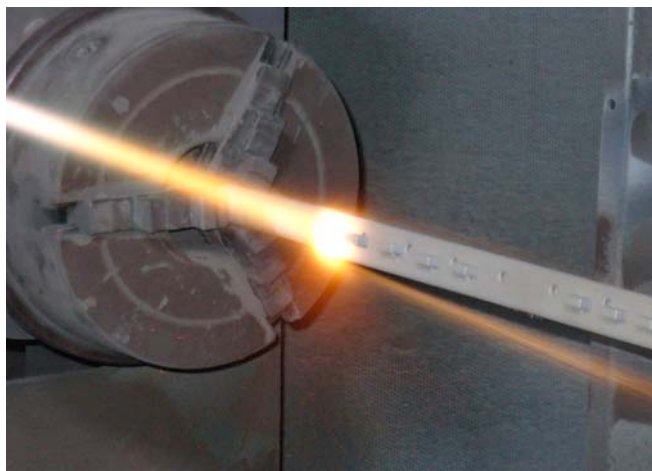


Figura 3-12. Detalle del proceso de rociado.



Figura 3-13. Medición de la temperatura de los bloques entre pasadas.

3.6. Rectificado

Posteriormente al proceso de Rociado Térmico, los bloques y los anillos fueron rectificados utilizando una rectificadora tangencial marca Proth, con un disco de diamantes marca Abracol (ver Figura 3-14) hasta obtener un acabado superficial uniforme, con una rugosidad en toda su superficie de ($R_a = 0,25 \mu\text{m}$).



Figura 3-14. Disco de Diamantes y Rectificadora Tangencial.

Para eliminar grasa e impurezas las probetas fueron limpiadas con un solvente y secadas, para luego ser pesadas en una balanza electrónica marca Scientech, modelo SA 310, como se aprecia en la Figura 3-15, la cual posee una precisión de 0,0001 gr.



Figura 3-15. Balanza Electrónica.

3.7. Ensayo de Desgaste por Deslizamiento

3.7.1. Elección de los Parámetros del Ensayo

Para la elección de la carga se realizaron pruebas preliminares para determinar la carga adecuada a la que sería sometido el conjunto bloque-anillo y obtener una huella uniforme sin destruir el recubrimiento. Según la norma ASTM G77 el ancho de huella debe estar comprendido entre 1-6 mm sin que la profundidad de huella llegue al sustrato.

Se usaron tres cargas de prueba con este fin: 150 N cuyo ancho de huella (11 mm) abarca casi la extensión del bloque y la profundidad llegó al sustrato (Figura 3-16c). La segunda carga fue de 89 N, donde el ancho aproximado de huella fue de 6 mm con un considerable desprendimiento de material (Figura 3-16b), por lo que se eligió la carga de 55,6 N, que dio anchos de huella de aproximadamente 2 mm (Figura 3-16a), con lo cual se trabajaría dentro de las especificaciones de la norma.

Otros dos parámetros a fijar en el ensayo de desgaste por deslizamiento en el equipo de desgaste son: la velocidad de deslizamiento y la presencia o no de lubricante.

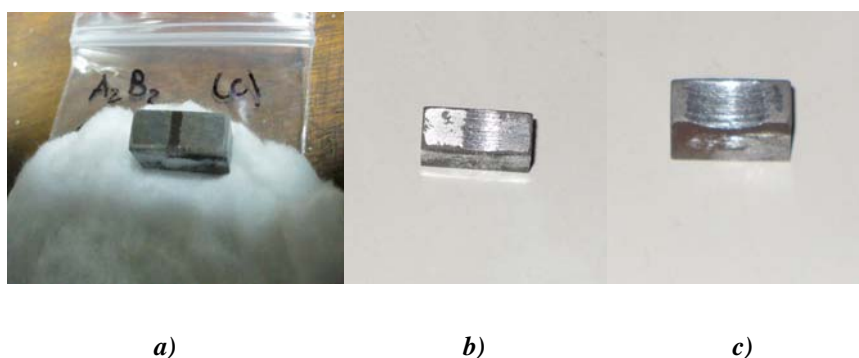


Figura 3-16. Cargas de prueba. a) 55,6 N b) 89 N c) 150 N.

Para este caso en particular se requería probar la resistencia al desgaste del recubrimiento por lo que no se varió el nivel de carga ni la velocidad de deslizamiento. Así mismo como el material depositado está diseñado para ser utilizado en piezas en contacto deslizante, se ensayó el par tribológico bajo las condiciones más desfavorables; es decir, sin lubricación.

A continuación se mencionan los valores de los niveles de prueba:

a) Carga Normal:

$$F_n = 55,60 \text{ N}$$

b) Velocidad de Deslizamiento:

$$V = 0,18 \text{ m/s}$$

c) Distancia Recorrida:

$$d = 550\text{m (5000 ciclos)}$$

d) Condiciones del Aire:

Temp. Ambiente: 18 °C

Humedad relativa: 60%

3.7.2. Procedimiento del Ensayo

Seguidamente se presenta el procedimiento que fue aplicado a un total de 27 pares tribológicos (Bloque sobre Anillo).

El procedimiento es el siguiente:

- a) Calibrar el equipo según la norma ASTM D 2714–94.
- b) Limpiar las probetas por método de inmersión durante 2 minutos en alcohol absoluto.
- c) Secar las probetas con un secador de aire caliente, para eliminar la humedad.
- d) Pesar el bloque y el anillo en una balanza electrónica, antes de instalarlos en la máquina.

- e) Colocar el anillo en la mordaza del tribómetro y asegurarlo de manera que quede fijo al eje cónico.
- f) Colocar el bloque en su mordaza y asegurarlo de forma tal que quede en contacto con la superficie del anillo.
- g) Colocar la(s) pesa(s) correspondiente(s) a la carga normal respectiva al ensayo.
- h) Ajustar la velocidad de rotación del motor, correspondiente a la velocidad de deslizamiento respectiva al ensayo.
- i) Iniciar el ensayo y observar que las probetas están en contacto bajo la acción de la carga (Figura 3-17).
- j) Detener el ensayo al alcanzar la distancia deslizada; es decir, (5000 ciclos).
- k) Desmontar el bloque y el anillo de sus respectivas mordazas.
- l) Remover el material desprendido de las superficies sin alterarlas.
- m) Pesar el bloque y el anillo desgastados, para determinar la pérdida de masa de cada uno.
- n) Guardar el par tribológico en un desecador, hasta ser observado por microscopia electrónica de barrido.
- o) Repetir el procedimiento con un nuevo par tribológico, para los parámetros operacionales establecidos, hasta completar el número de ensayos respectivos.



Figura 3-17. Acople Bloque-Anillo y centro de Control de la Máquina Falex.

3.7.3. Cálculos

El volumen desgastado de los bloques y de los anillos se puede calcular por las diferencias de masa de cada uno de estos, al ser pesados antes y después de cada ensayo consiguiéndose la masa desgastada, “m”, posteriormente se divide la masa “m” entre la densidad “ρ” del material respectivo, tanto del anillo como del recubrimiento, empleando la ecuación (3.1).

$$VD = \frac{\Delta m}{\rho} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde: VD, es el volumen desgastado [mm³]

ρ, es la densidad del material respectivo [gr/ mm³]

Δm, es el diferencial de masa de los bloques [gr]

La tasa de desgaste, TD, se define como el volumen desgastado, VD, por unidad de distancia deslizada, d:

$$TD = \frac{VD}{d} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

El volumen desgastado, VD, se calcula mediante la ecuación 3.1 para el anillo y el recubrimiento, la distancia recorrida, d = 550 m.

El coeficiente de fricción, μ, definido como el cociente de la fuerza de fricción, Fr, entre la carga normal, Fn, mediante la ecuación 3.3.

$$\mu = \frac{Fr}{Fn} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

La fuerza de fricción, Fr, es medida por medio de una celda de carga adaptada a la máquina de ensayo.

La relación oxígeno/combustible (λ), es el cociente entre la relación real oxígeno/combustible y su valor estequiométrico.

$$\lambda = \frac{\left[\frac{n_{O_2}}{n_{Comb}} \right]}{\left[\frac{n_{O_2}}{n_{Comb}} \right]_{st}} \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Donde: $\left[\frac{n_{O_2}}{n_{Comb}} \right]$ es la relación de moles reales

$\left[\frac{n_{O_2}}{n_{Comb}} \right]_{st}$ es la relación de moles estequiométrica

3.8. Ensayo de Dureza por Microindentación

Para la realización del ensayo de dureza por microindentación las muestras deben ser cortadas previamente, embutidas en baquelita y luego preparadas metalográficamente. Las mediciones de dureza se efectuaron sólo a las muestras que presentaron el mejor y peor resultado en cuanto a la tasa de desgaste, utilizando un microdurómetro marca Leitz Wetzlar, equipado con un penetrador Vickers y a una carga de 300 grf, por un tiempo de carga de 10 seg. (Figura 3-18).



Figura 3-18. Microdurómetro.

Los resultados se expresaron en función del promedio de diez indentaciones realizadas en la sección transversal del recubrimiento (Ver Figura 3-19).

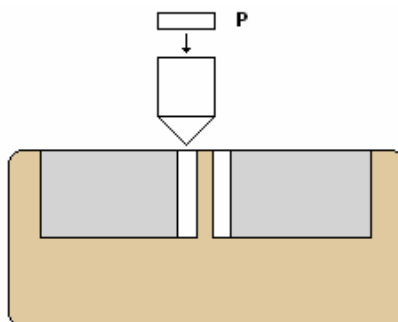
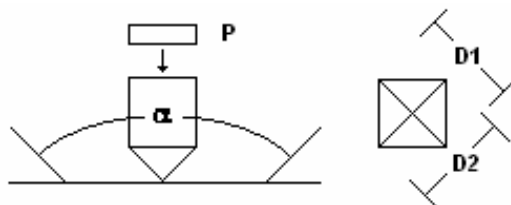


Figura 3-19. Esquema del Proceso de Microindentación.

Las ecuaciones utilizadas para el cálculo de la microdureza son las siguientes:

$$HV = \frac{2 * P * \text{Sen} \left(\frac{\alpha}{2} \right)}{(d)^2} \tag{Ec. 3.4}$$



$d = \frac{D1 + D2}{2}$, $\alpha = 136^\circ$ y P es la carga aplicada, sustituyendo se obtiene la siguiente ecuación para fuerza Vickers

$$HV = \frac{P * 1,854}{(d)^2} \tag{Ec. 3.5}$$

Donde: HV, es la microdureza Vickers [KgF/mm²]

P, es la carga normal aplicada en el ensayo [KgF]

d, es el promedio de las diagonales de la huella indentada [mm]

3.9. Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)

Como se indicó anteriormente las muestras fueron cortadas y preparadas metalográficamente. Para el desbaste se utilizaron papeles de carburo de silicio de granulometrías desde 80 hasta 1500 y para el pulido se emplearon paños de nylon o lona, de fieltro y de terciopelo con alúmina en suspensión de granulometrías de 1,0; 0,3 y 0,05 μm .

La microestructura, superficie de desgaste, composición y porosidad del recubrimiento fueron evaluadas mediante un microscopio electrónico de barrido marca Hitachi, modelo S-2400 (Figura 3-20) con capacidad para ampliaciones de hasta 300.000x y acoplado a un equipo de espectroscopia por dispersión de energía de Rayos X.



Figura 3-20. Microscopio Electrónico de Barrido marca Hitachi S-2400.

Las muestras seleccionadas para la realización de la microscopia electrónica de barrido fueron las condiciones que presentaron los mejores y peores resultados para el ensayo de desgaste por deslizamiento, además de la condición del fabricante.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1. Ensayo de Desgaste por Deslizamiento

4.1.1. Evaluación de la Tasa de Desgaste

La optimización del proceso se basó en la medición de la resistencia al desgaste por deslizamiento sin lubricación realizado en concordancia con la Norma descrita en la Metodología Experimental para las condiciones en estudio. La tabla 10 presenta los resultados de la pérdida volumétrica y tasas de desgaste, con su respectiva desviación estándar para el recubrimiento depositado con una aleación base Hierro-Cromo-Molibdeno mediante el proceso alta velocidad oxígeno-combustible (HVOF). Las muestras que obtuvieron los mejores resultados para este ensayo están resaltadas en azul, en rojo para la condición que arrojó los resultados más desfavorables y en verde se resaltaron los resultados que se obtuvieron para la condición recomendada por el fabricante de los polvos.

De esta tabla podemos destacar que la mejor condición (la N° 4) se comportó 1,26 mejor que la muestra rociada con los parámetros recomendados por el fabricante (la N° 5) y 3,86 veces mejor que la condición que presentó los valores más altos de desgaste (la N° 6). Podríamos deducir de acuerdo a los parámetros utilizados para estas condiciones que a medida que aumenta el flujo de combustible, para un mismo valor de tasa de alimentación de los polvos, se deteriora la resistencia al desgaste del recubrimiento, sin embargo no se cumple para el resto de las condiciones lo cual no nos permite deducir que el parámetro más influyente sea la tasa de combustible.

Tabla 10. Tasas de desgaste para las 9 condiciones de deposición

Condiciones	Alimentación de los Polvos (gr/min)	Flujo de combustible (L/h)	Pérdida volumétrica (mm ³)	Tasa de Desgaste (mm ³ /m)	Desviación Estándar
1	64	20,82	6,131E-01	1,115E-03	2,925E-04
2	64	22,71	4,228E-01	7,688E-04	8,322E-05
3	64	24,61	4,096E-01	7,448E-04	1,529E-04
4	76	20,82	1,982E-01	3,604E-04	5,091E-05
5	76	22,71	2,511E-01	4,565E-04	1,020E-04
6	76	24,61	7,664E-01	1,394E-03	1,121E-03
7	88	20,82	5,534E-01	1,006E-03	1,601E-04
8	88	22,71	4,889E-01	8,890E-04	8,320E-05
9	88	24,61	4,625E-01	8,408E-04	3,058E-04

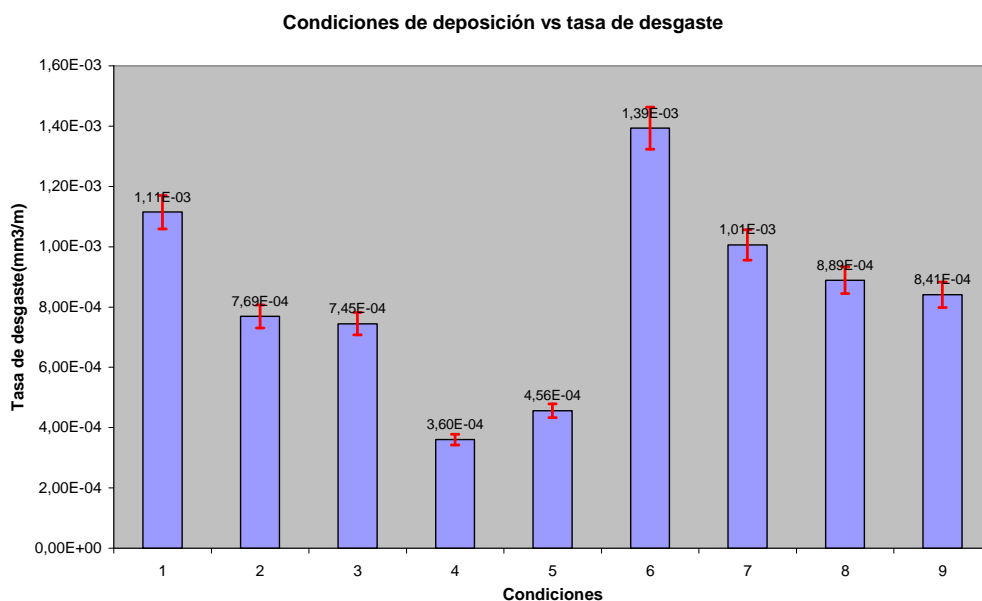


Figura 4-1. Tasas de desgaste para las condiciones de deposición de la aleación.

La Figura 4-1 nos presenta gráficamente los resultados obtenidos para la tasa de desgaste contenidos en la tabla 10 y en ella podemos observar que para las condiciones 1, 2 y 3, depositadas con la tasa de alimentación

más baja, a medida que aumenta el flujo de combustible disminuye la tasa de desgaste. Algo similar ocurre con las condiciones 7, 8 y 9 las cuales fueron depositadas con la tasa de alimentación más alta.

Tabla 11. Valores de λ para los distintos flujos de combustible

Flujos de Combustible(L/h)	20,82	22,71	24,61
Relación Oxígeno/Combustible	1,87	1,71	1,58

Estos resultados podrían explicarse bajo el análisis de que a mayor cantidad de combustible disminuiría la relación oxígeno-combustible, acercándola al valor estequiométrico ($\lambda=1$). En esta mezcla, λ es mayor que uno y por lo tanto se generaría una combustión completa con exceso de oxígeno (mezcla oxidante) incapaz de alcanzar una temperatura de fusión adecuada, pudiendo transportar el resto de oxígeno no quemado junto con el material a depositar a través de la boquilla de la pistola. Si la temperatura en la cámara de combustión no es suficiente para generar la temperatura adecuada que permita fundir totalmente las partículas a ser rociadas, entonces podría inferirse que las mismas impactan al sustrato poco fundidas o no fundidas, lo cual va a producir una menor cohesión interlamelar que expondría al recubrimiento a un mayor desgaste.

En el caso de las condiciones 4, 5 y 6 depositadas con una tasa de alimentación intermedia casualmente se presentan la mejor, la peor y la condición recomendada por el fabricante y en éstas se cumple que a medida que aumenta el flujo de combustible disminuye la resistencia al desgaste por deslizamiento. Evidentemente en estos casos operan mecanismos diferentes que no pueden ser explicados a partir de los gráficos presentados y el análisis debe hacerse desde el punto de vista estadístico lo cual se hará a través de análisis de varianza y superficies de respuesta.

4.1.2. Evaluación del Coeficiente de Fricción

Los resultados del coeficiente de fricción, μ , se obtienen al dividir la fuerza de fricción (F_r), indicada por una celda de carga analítica en la máquina de ensayos por deslizamiento, entre la fuerza normal (F_n), aplicada a cada muestra de acuerdo con la ecuación (3.5). En la Figura 4-2 se grafica el coeficiente de fricción (μ) en función de la distancia de recorrido, para una carga aplicada de 55,6 N y una velocidad de deslizamiento constante de 0,18 m/s para la condición del fabricante N° 5 (línea verde), la mejor condición N° 4 (línea azul) y la peor condición N° 6 (línea roja). Como podemos observar en esta figura el comportamiento del coeficiente de fricción para las condiciones en estudio es muy similar.

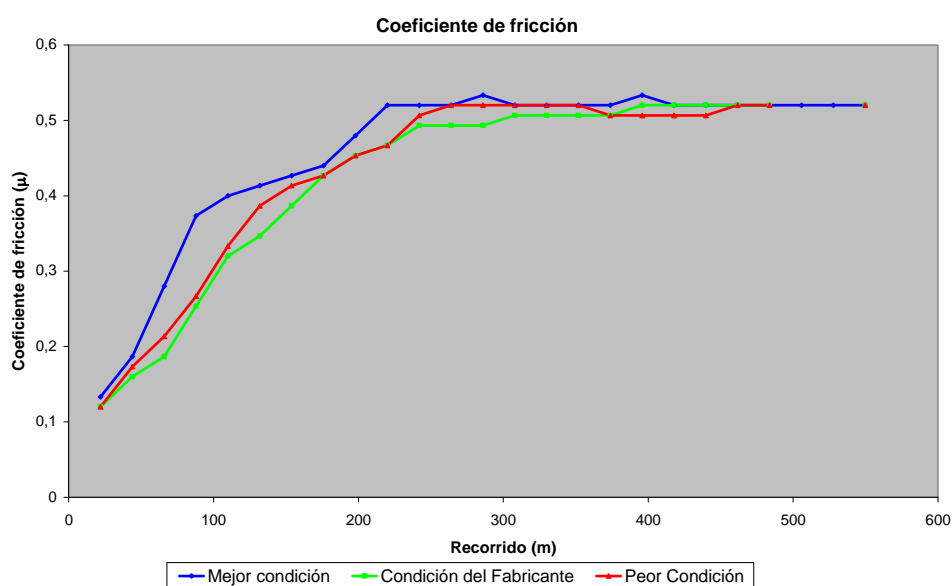


Figura 4-2. Comparación entre los coeficientes de fricción de la condición de menor desgaste, el fabricante de los polvos y la de mayor desgaste

En la Figura 4-2, podemos notar que tanto para la condición que presentó los valores más bajos de resistencia a la adhesión como para la

condición rociada con los parámetros recomendados por el fabricante el coeficiente de fricción alcanza, para una distancia de 22 m, un valor de 0,12 mientras que para la mejor condición este coeficiente fue ligeramente mayor alcanzando un valor de 0,13. Posteriormente, el coeficiente de fricción para la mejor condición aumenta rápidamente a 0,37 para una distancia de 88 m mientras que para la condición del fabricante y la peor condición alcanza los valores de 0,25 y 0,27 respectivamente.

En la etapa inicial las superficies hacen contacto en los picos, deformándolos y produciendo un aumento en el área de contacto entre ellas lo cual es conocido como “running-in” o estado transitorio el cual se caracteriza por cambios muy significativos del coeficiente de fricción. Este comportamiento fue explicado por Tabor (1977) quien desarrolló la teoría de adhesión la cual establece que cuando dos superficies metálicas libres de lubricante entran en contacto tienden a adherirse entre sí. Inmediatamente después, la mejor condición exhibe un lento incremento hasta los 176 m hasta llegar a alcanzar un valor de 0,44; etapa en la cual probablemente ha disminuido la rugosidad y el coeficiente de fricción asciende lentamente.

Entre los 176 y los 220 m cambia de nuevo la pendiente y el coeficiente de fricción asciende rápidamente hasta llegar a 0,52 μ , lo cual puede ser atribuido a la presencia en el recubrimiento de partículas no fundidas que se encuentran poco cohesionadas con la matriz, y al no ofrecer resistencia a los esfuerzos cortantes se desprenden y fracturan bajo la acción de la carga. Este fenómeno trae como consecuencia un aumento en la rugosidad y por ende un aumento en la fuerza de fricción requerida para deformar y triturar los picos formados. Finalmente el coeficiente de fricción se estabiliza en un valor promedio de 0,52.

El comportamiento de la muestra que presentó el peor comportamiento frente al desgaste por deslizamiento y la condición dada por el fabricante desde los 88 m hasta los 264 m es muy similar alcanzando

valores de 0,52 y 0,49, respectivamente. Entre los 286 m y los 374 m, la condición del fabricante muestra pequeños incrementos en el coeficiente de roce comenzando en un valor de 0,49 hasta estabilizarse en 0,52. Este hecho podría explicarse por el probable desprendimiento de partículas sólidas de óxido endurecidas por deformación. La estabilización de los coeficientes de fricción a partir de los 264 m ocurre para las tres condiciones lo cual podría ser atribuido a que esta aleación tiene tendencia a formar óxidos que podrían ser de hierro o de molibdeno dada la afinidad que tiene estos elementos por el oxígeno y estos óxidos podrían actuar como lubricantes.

Como la tasa de incremento del coeficiente de fricción es bastante lenta para las condiciones estudiadas, se descartaría la presencia de adhesión en esta fase del proceso, puesto que usualmente este mecanismo está asociado con grandes variaciones del coeficiente de fricción en distancias cortas, debido a la deformación por altas cargas presentes en materiales dúctiles (Stachowiak, 2000).

4.1.3. Análisis de desgaste de los anillos

Los anillos que constituyeron la otra mitad del par tribológico contra el cual se sometieron a prueba los bloques termo-rociados con la aleación en base hierro Cromo-Molibdeno fueron fabricados siguiendo las especificaciones dictadas por la norma descrita en la parte experimental, siendo el material de manufactura de los mismos un acero al carbono AISI 1045 sin tratamientos térmicos superficiales. La tabla 12 muestra, en correspondencia con el orden en las condiciones de deposición de los bloques mencionadas anteriormente, las pérdidas de masa y volumétricas con sus respectivas desviaciones estándar para cada anillo.

Tabla 12. Valores de desgaste para los anillos del par tribológico

Par Tribológico de Condición	Pérdida de Masa (g)	Pérdida Volumétrica (mm ³)	Desviación Estándar
1	1,73E-02	2,20E+00	8,27E-01
2	1,58E-02	2,01E+00	5,61E-01
3	9,90E-03	1,26E+00	4,64E-01
4	7,57E-03	9,61E-01	3,11E-01
5	6,17E-03	7,84E-01	4,81E-02
6	6,50E-03	8,26E-01	5,14E-02
7	5,67E-03	7,20E-01	4,00E-01
8	3,97E-03	5,04E-01	9,54E-02
9	3,47E-03	4,40E-01	5,39E-02

La Figura 4-3 nos presenta gráficamente los resultados obtenidos para la tasa de desgaste contenidos en la tabla 12 y en ella podemos observar un claro patrón descendente en las pérdidas volumétricas de los anillos.

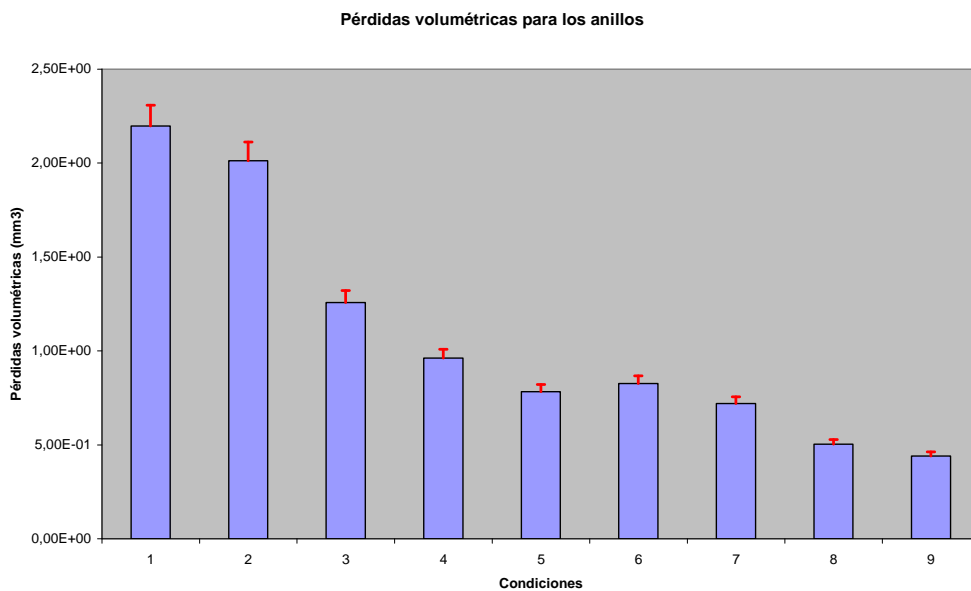


Figura 4-3. Tasas de desgaste para los anillos del par tribológico correspondientes a cada grupo de bloques

Se observa que para la condición 9 la pérdida volumétrica es 5 veces menor que para la condición 1, y que las pérdidas de los anillos son superiores a las de sus contrapartes los bloques, de lo cual se infiere que el recubrimiento base hierro Cr-Mo de los bloques desgasta al acero al carbono de los anillos. También se observa que a medida que los anillos se enfrentan contra recubrimientos depositados con mayor tasa de alimentación de polvos y mayores flujos de combustible, la pérdida volumétrica disminuye.

Ya que en todos los casos no se apreció una transferencia de material de los bloques a los anillos o viceversa, se explica esto por el hecho de que todos los anillos presentan marcas de desgaste por abrasión y una capa de óxido debido a las temperaturas generadas, donde en las condiciones 1,2 y 3 predomina la abrasión de los anillos mientras que las condiciones 4 a la 9 tienden a formar una mayor capa de óxido, lo que disminuiría la fricción y con ella el desgaste. En la figura 4-4 se puede apreciar este fenómeno, donde la condición 2 presenta una capa de óxido y marcas abrasivas, (Figura 4-4a) y la condición 7, donde se aprecia sólo el óxido (Figura 4-4b).



Figura 4-4. Desgaste en los anillos.

4.1.4. ANOVA

El ANOVA es un método que permite hacer un análisis estadístico en el cual a una variable cuantitativa (tasa de desgaste) se le determina en que medida se atribuye su variabilidad a 2 variables nominales o factores (tasa de alimentación de los polvos y flujo de combustible).

En el análisis de varianza la interdependencia entre las variables en estudios se mide usando una cualidad denominada atributos-p, en la cual las variables siguen una distribución normal de una o dos colas (zonas de rechazo), por lo que se elige un nivel de confianza para considerar que una variable es significativa en sus niveles o si por el contrario no hay efectos diferenciales entre los niveles evaluados. Para esta investigación se eligió un nivel de confianza del 95%, lo que equivale a decir que para valores de $p > 0,05$ no hay diferencias claras entre los niveles elegidos para los tratamientos, mientras que para el suceso contrario de $p < 0,05$ hay dependencia entre las variables y los niveles de ese factor influyen en la respuesta.

Como se puede apreciar en la tabla 13 los niveles elegidos no son determinantes en la variabilidad de la tasa de desgaste, Alimentación de los polvos (ADP) y el Flujo de Combustible (FC) tienen valores $p > 0,05$.

Tabla 13. Análisis de Varianza ANOVA para Tasa de Desgaste

Termino	Coef.	SE Coef.	T	p
Alimentación de los Polvos (ADP)	-0,000216	0,000329	-0,655	0,519
Flujo de Combustible (FC)	-0,002722	0,003333	-0,817	0,423
ADP*ADP	0,000001	0,000002	0,607	0,550
FC*FC	0,000057	0,000072	0,792	0,437
ADP*FC	0,000002	0,000008	0,279	0,783

Esto podría deberse al cerrado intervalo de valores elegidos para el estudio, propios de un estudio de optimización y cuyo fin primario es el de minimizar una variable, para lo cual se trabaja alrededor de valores centrales que en nuestro caso son los que suministra el proveedor de los polvos. Para minimizar la ocurrencia de un error que conlleve a obtener valores de probabilidad (p) inadecuados se recomienda aumentar el tamaño de la muestra (N) (Spiegel y Stephens 2002). En este caso el aumento de esta muestra se traduciría en un incremento de los parámetros a evaluar –un diseño experimental factorial 3^3 –.

En la figura 4-5 se pueden observar los efectos principales del flujo de combustible, donde se permite apreciar un patrón corroborado por los valores de desgaste de los bloques para las distintas condiciones, que para la tasa de alimentación de los polvos y el flujo de combustible entre las condiciones 4 y 5, mejor y la del fabricante respectivamente, sólo se encuentran diferencias mínimas en las tasas de desgaste.

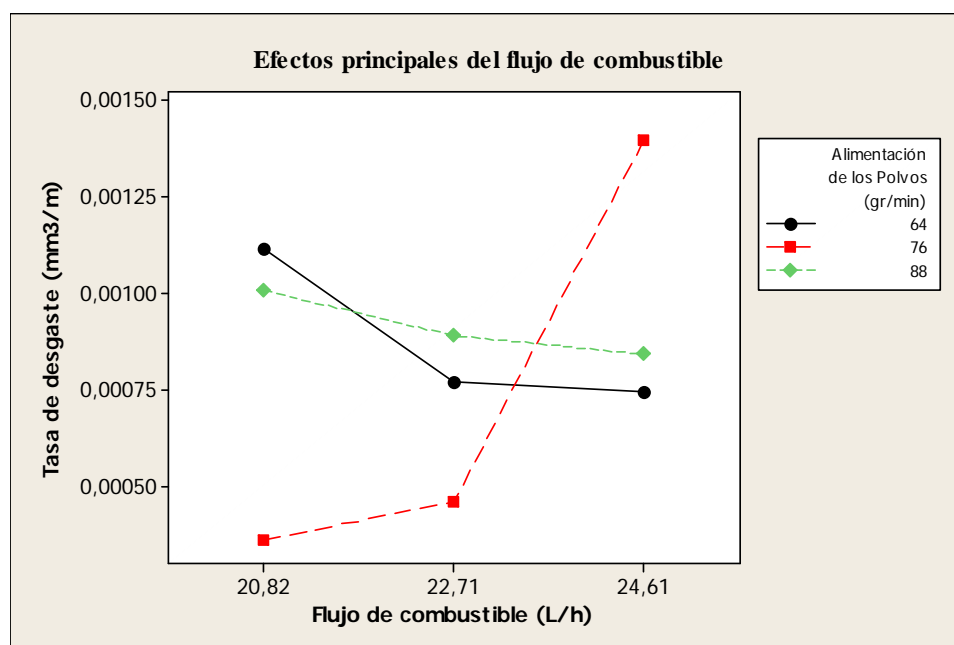


Figura 4-5. Efectos principales del flujo de combustible.

Sin embargo, al incrementar el flujo de combustible, para un flujo fijo de oxígeno y a bajas tasas de alimentación de los polvos, se quema una mezcla más rica que eventualmente producirá mayor energía térmica y cinética en la cámara de combustión, proyectando las partículas a altas velocidades (600-1200 m/s) y completamente fundidas.

Al aumentar la tasa de alimentación de los polvos con flujos de combustible de 20,82 L/h y 22,71 L/h, se transfiere la misma energía térmica y cinética a una mayor cantidad de estas partículas, lo que hace suponer que no todas serán fundidas, generando recubrimientos de mayor porosidad y menor cohesión entre partículas, lo que los hace menos resistentes a las cargas cortantes presentes en el fenómeno de desgaste por deslizamiento.

4.1.5. Metodología de Superficie de Respuesta

La metodología de superficie de respuesta utiliza herramientas gráficas que traducen los resultados obtenidos numéricamente en superficies tridimensionales y gráficas de contornos, por medio de las cuales es posible definir la(s) zona(s) mínimas o máximas, según sea el objetivo para la función respuesta, y a su vez, los valores de los parámetros variados para los cuales esta respuesta es máxima o mínima.

En la gráfica presentada dentro de la Figura 4-6 se aprecia la superficie tridimensional generada por el programa Minitab®, donde la respuesta (la tasa de desgaste, en este caso) se modela matemáticamente como una variable z dependiente, en función de la tasa de alimentación de polvos y el flujo de combustible, que serían las variables x e y de tipo independientes. Al expresar la tasa de desgaste como una función matemática tridimensional, se pueden apreciar los valores de las variables que minimizan esta función.

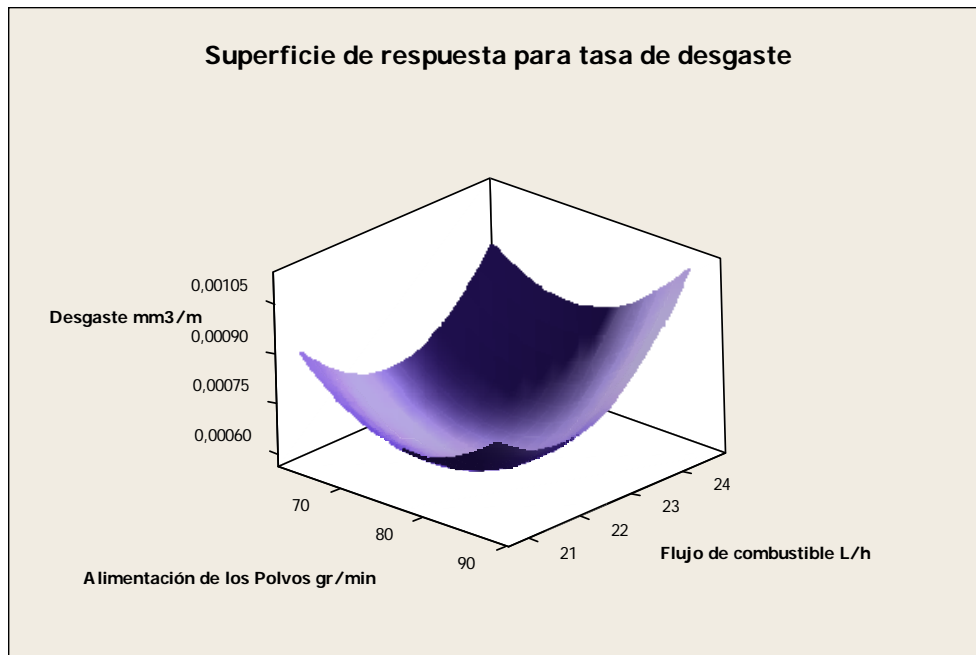


Figura 4-6. Superficie de respuesta tridimensional.

Las superficies tridimensionales permiten observar el comportamiento de la agrupación de datos, para predecir los intervalos de minimización, maximización o estabilización de las funciones respuesta. En este caso, la función tasa de desgaste presenta una sola zona de valores mínimos en la gráfica similar a un paraboloide, los cuales serán detallados en la visualización en la gráfica de contornos.

La gráfica de contornos presentada en la Figura 4-7 es una proyección horizontal de la superficie de respuesta tridimensional, que permite apreciar de manera visual los distintos valores de la función desgaste en función de los parámetros evaluados. La tasa de desgaste es indicada por una escala de colores, que muestra los distintos valores organizados como cotas, en la cual la zona azul oscuro presentó el menor desgaste y la zona verde oscuro presentó el mayor desgaste.

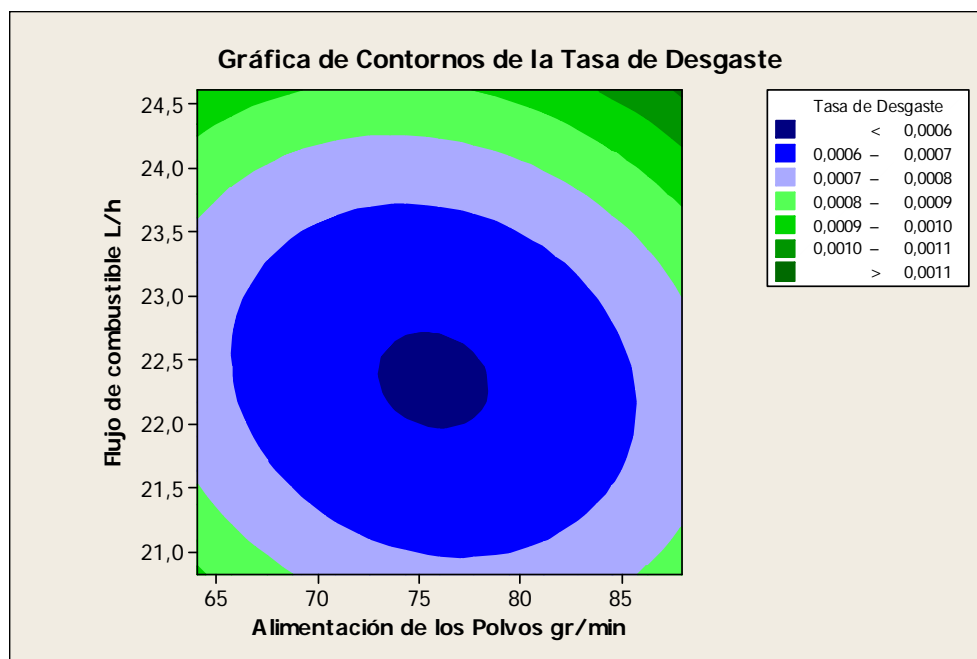


Figura4-7. Gráfica de contornos para distintas tasas de desgaste.

En el caso de esta investigación, se desea minimizar la función desgaste, obteniéndose para ello los siguientes valores presentados en la Tabla 14.

Tabla 14. Valores Optimizados para la deposición de la aleación base hierro Cromo-Molibdeno

	Alimentación de los Polvos	Flujo de Combustible
Rango Óptimo	72,83 - 78,47 gr/min	21,95 - 22,73 L/h (5,8 - 6 GPH)

Los valores mostrados en la tabla 14 corresponden a los parámetros de deposición optimizados para la aleación base Hierro-Cromo-Molibdeno, que fueron determinados mediante el análisis de la gráfica de contornos y superficie de respuesta, minimizando la función respuesta (desgaste), correspondiendo éstos a valores inferiores a $6 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$. En este punto se considera régimen de desgaste severo ($>10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$), pero equivalente a los resultados de un HVOF contra un acero al carbono (Cadenas, 2005).

4.2. Microindentación Estática

Para determinar la dureza se utilizó la técnica de microindentación para las muestras que presentaron el mejor y el peor comportamiento frente al desgaste por deslizamiento, así como también la condición de referencia dada por el fabricante de los polvos de alimentación. Se realizaron un promedio de diez indentaciones en la sección transversal de cada recubrimiento en estudio bajo una carga de 300 gr-f, por un tiempo de carga de 10 seg (ver Tabla 15). Previamente las muestras fueron embutidas en resina opaca y preparadas superficialmente siguiendo los estándares de preparación metalográfica.

Tabla 15. Resultados de los Ensayos por Microindentación

Condiciones	Promedios HV300	Desviación Estándar
Mejor	550,20	80,12
Fabricante	517,87	65,63
Peor	477,48	64,49

De acuerdo a los valores aquí presentados, es posible observar, comparando los valores de dureza con los de las tasas de desgaste por deslizamiento, que la condición considerada como la de peor resistencia al desgaste obtuvo una dureza superficial significativamente menor que aquella considerada como la de mejor resistencia al desgaste y que la recomendada por el fabricante de los polvos, de lo que se podría inferir que la resistencia al desgaste de las condiciones depositadas con una misma alimentación de polvos está relacionada con la dureza superficial del recubrimiento, sin embargo la desviación entre los valores no permite aseverar esta afirmación.

4.3. Microscopia Electrónica de Barrido

4.3.1. Análisis de la Microestructura

Como se observa en la Figura 4-8, correspondiente a la muestra que presentó la menor resistencia al desgaste, en ella se observa una cantidad relativamente alta de grietas entre las capas del recubrimiento, las cuales podrían deberse a partículas parcialmente fundidas o no fundidas que no alcanzaron la temperatura suficiente y al impactar las capas previamente depositadas no lograron deformarse para cohesionarse adecuadamente produciendo así las grietas observadas.

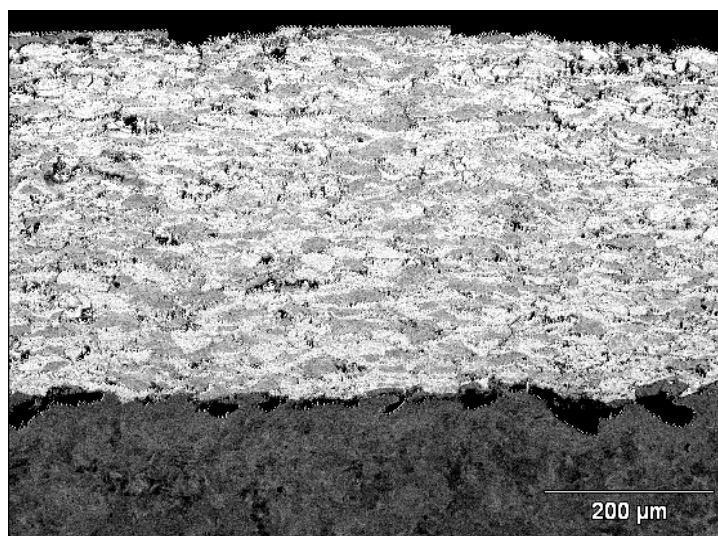


Figura 4-8. Imagen a 150X de la condición con la peor resistencia al desgaste.

Las cavidades presentes en la interfase recubrimiento/sustrato vienen como consecuencia de la deformación que sufre la superficie de este último por efecto del impacto de los granos de alúmina previos a la deposición de

la aleación, en la figura 4-9 la interfase de la muestra denominada “peor condición” se observa una mayor cantidad de estos huecos lo cual podría deberse a que las partículas que están siendo proyectadas no han alcanzado la fluidez (la temperatura no es la adecuada) suficiente para llenar los espacios lo cual podría llegar a comprometer la adhesión del recubrimiento.

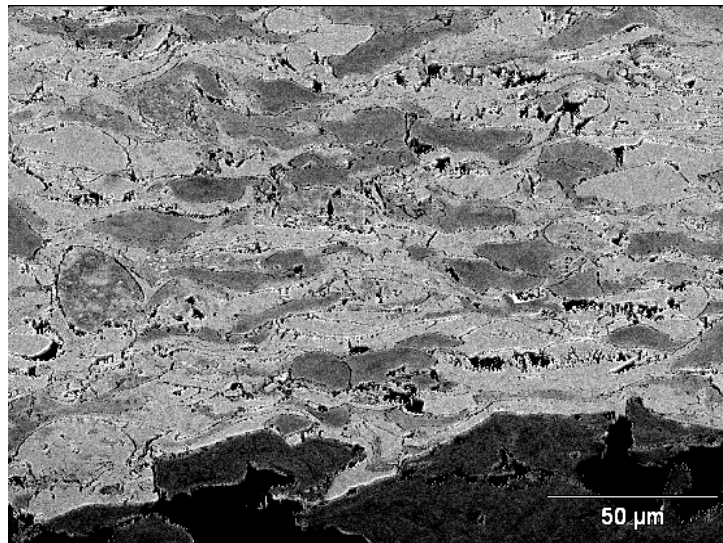


Figura 4-9. Micrografía a 600X de la condición con la peor resistencia al desgaste.

La imagen que se presenta en la Figura 4-10 corresponde a una fotomicrografía de la muestra depositada con los parámetros recomendados por el fabricante de los polvos. Se aprecia una estructura de capas con ciertas partículas no fundidas, y un número de poros y grietas inferior a la microestructura obtenida en la muestra que arrojó los valores más altos de resistencia al desgaste por deslizamiento.

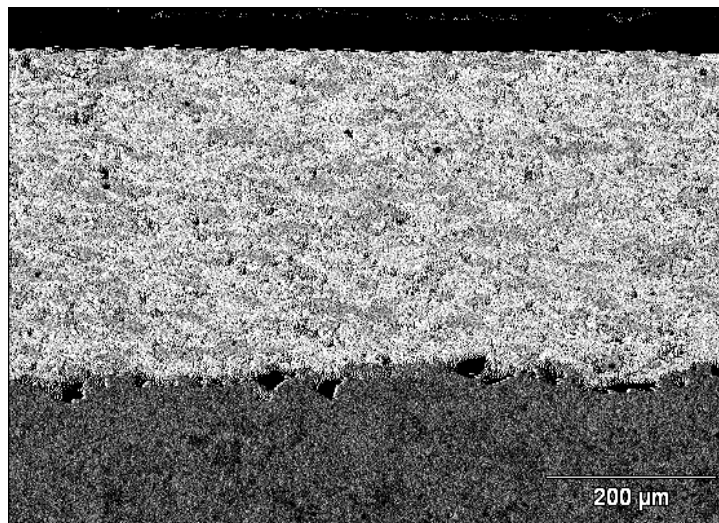


Figura 4-10. Imagen a 150X de la condición recomendada por el fabricante de los polvos.

La presencia de partículas no fundidas en los recubrimientos es una característica común en procesos por HVOF cuando se rocía con mezclas ricas en oxígeno ($\lambda > 1$). La figura 4-11 muestra un número apreciable de estas partículas.

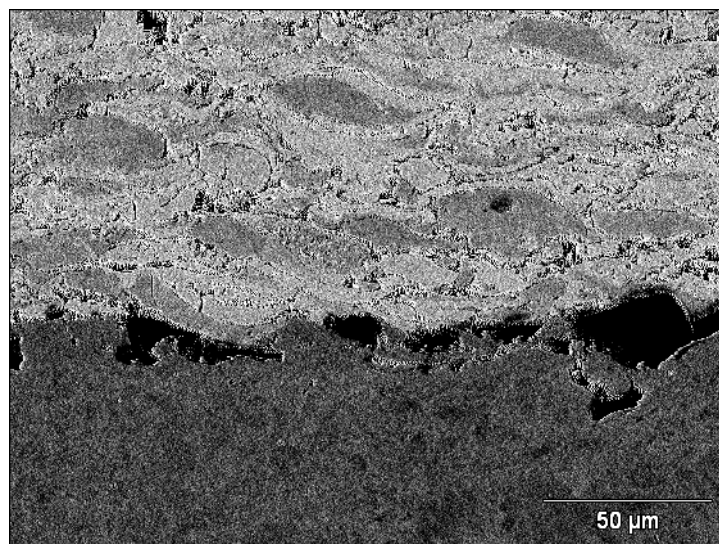


Figura 4-11. Micrografía a 600X de la condición del fabricante de los polvos.

En la Figura 4-12 se aprecia la microestructura de la condición que presentó la mejor resistencia al desgaste, la misma presenta una estructura de capas con pocas partículas no fundidas, una distribución uniforme de las fases y una menor cantidad de poros y grietas comparada con la microestructura obtenida en la muestra con las condiciones sugeridas por el fabricante de los polvos.

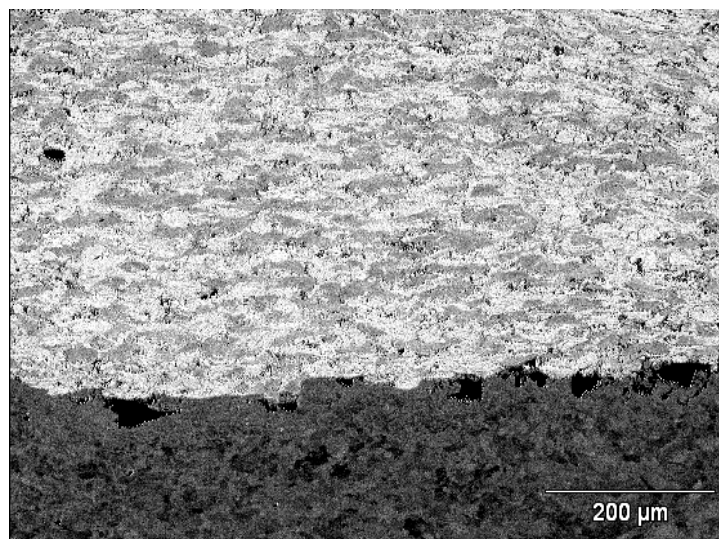


Figura 4-12. Imagen a 150X de la condición con la mejor resistencia al desgaste.

Para la fotomicrografía observada en la figura 4-13, la cual corresponde la condición que presentó la mayor resistencia al desgaste se observan una menor cantidad de partículas no fundidas, la interfase presenta un número de huecos menor que la muestra con los parámetros sugeridos por el fabricante. Lo cual podría deberse a que las partículas que están siendo proyectadas han alcanzado la fluidez suficiente para adaptarse a la rugosidad del sustrato al chocar con el mismo, lo cual incrementa la adhesión del recubrimiento.

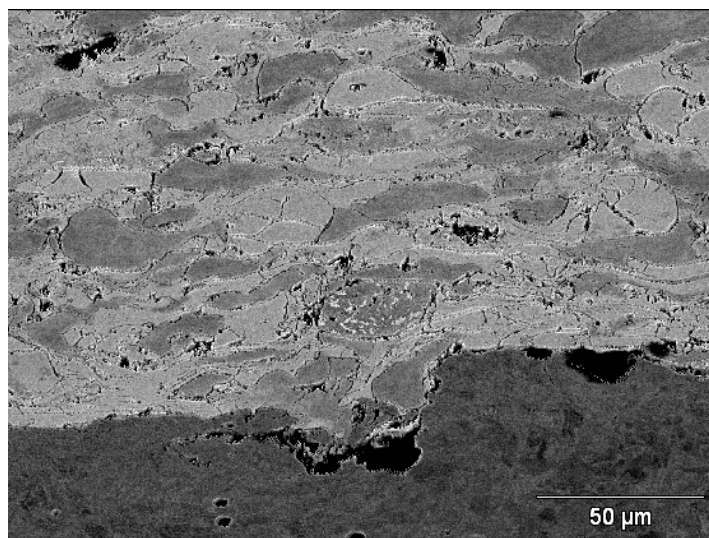


Figura 4-13. Micrografía a 600X de la condición con mejor resistencia al desgaste.

La distribución de grietas interlamelares a lo largo del recubrimiento en las tres condiciones, especialmente en la condición que obtuvo la peor resistencia al desgaste (Figura 4-9), permite inferir que estas partículas impactaron la superficie del sustrato a menor temperatura que en las otras condiciones evaluadas. A medida que se incrementa el flujo de combustible, los espacios interlamelares también parecen incrementarse.

Se realizó un análisis químico elemental semi-cuantitativo (EDS) (ver Figura 4-14), a través del cual podemos identificar los elementos presentes en las diferentes fases que se observan en la microestructura correspondiente a la muestra denominada “mejor condición”. Los resultados para cada punto indicado en esta figura se presentan en la tabla 16. De ella se desprende que los puntos 1 y 2 localizados en la fase blanca de la microestructura no presentan ninguna diferencia significativa en la proporción de los elementos presentes, así como tampoco los puntos 3 y 4 presentan diferencias apreciables entre sí, lo que sí se evidencia es que la fase de color gris oscuro (puntos 3 y 4) tiene diferencias apreciables con

respecto a la fase blanca en cuanto a la cantidad de Fe, Cr, Ni y Mo lo cual nos permite inferir que el recubrimiento presenta dos fases, siendo las fases blancas (puntos 1 y 2) las más similares a la composición inicial de los polvos.

Algunos elementos conocidos como parte de la aleación no se ven reflejados en los porcentajes mostrados en las tablas 16 y 17, hecho que se debe a que el equipo de microscopía no está calibrado para indicar las cantidades de elementos con bajos radios atómicos. Así, elementos como el Boro, Silicio o Carbono, presentes en esta aleación, no se ven reflejados.

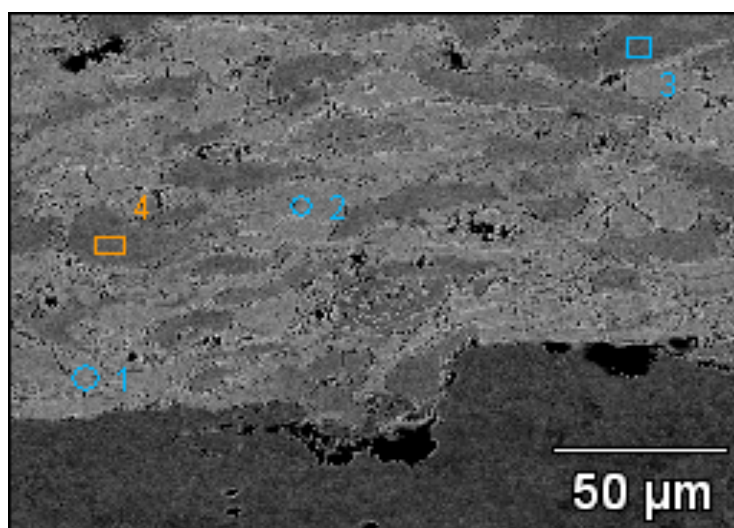


Figura 4-14. Imagen a 600X de la condición con mejor resistencia al desgaste con puntos de referencia para EDS.

Tabla 16. Porcentajes en peso en EDS para puntos seleccionados en la Figura 4-14.

	Si-K	Cr-K	Mn-K	Fe-K	Ni-K	Cu-K	Mo-L
Punto 1	5.49	20.93		54.54	0.94	3.07	15.03
Punto 2	5.60	20.88		54.38	0.71	3.23	15.21
Punto 3	0.60	17.15	1.56	68.79	10.00		1.90
Punto 4	0.90	17.13	1.71	67.84	10.19		2.23

Tabla 17. Porcentaje en peso atómico en EDS para puntos seleccionados en la Figura 4-14.

	<i>Si-K</i>	<i>Cr-K</i>	<i>Mn-K</i>	<i>Fe-K</i>	<i>Ni-K</i>	<i>Cu-K</i>	<i>Mo-L</i>
<i>Punto 1</i>	10.88	22.42		54.39	0.89	2.69	8.73
<i>Punto 2</i>	11.10	22.36		54.22	0.67	2.83	8.83
<i>Punto 3</i>	1.19	18.31	1.57	68.37	9.45		1.10
<i>Punto 4</i>	1.77	18.26	1.73	67.33	9.62		1.29

En las Figuras 4-15 a la 4-17, se realizó un mapa de distribución de hierro a lo largo del recubrimiento de manera cualitativa, en la cual se corrobora que las fases oscuras tienen un mayor contenido de hierro.

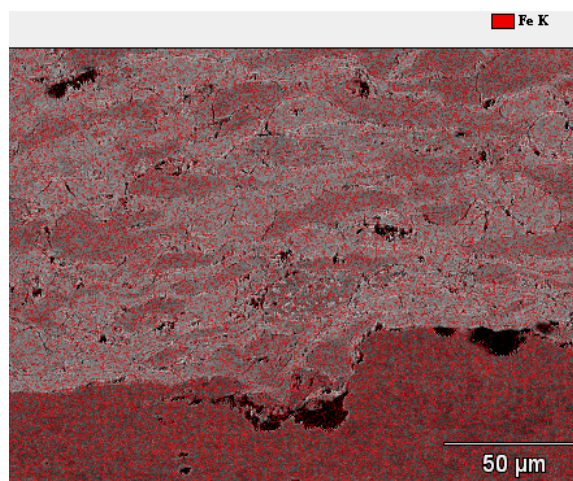


Figura 4-15. Contenido de hierro. Mejor resistencia al desgaste.

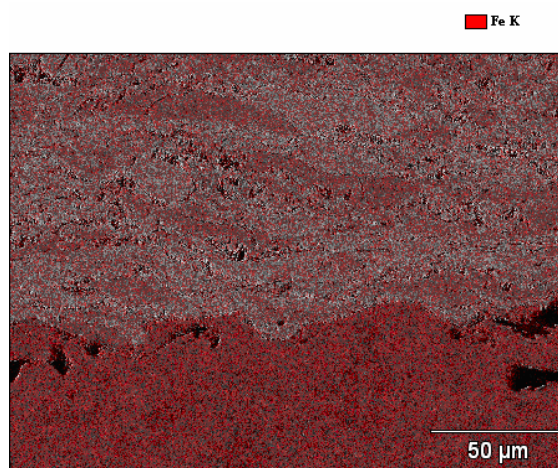


Figura 4-16. Contenido de hierro. Condición del fabricante.

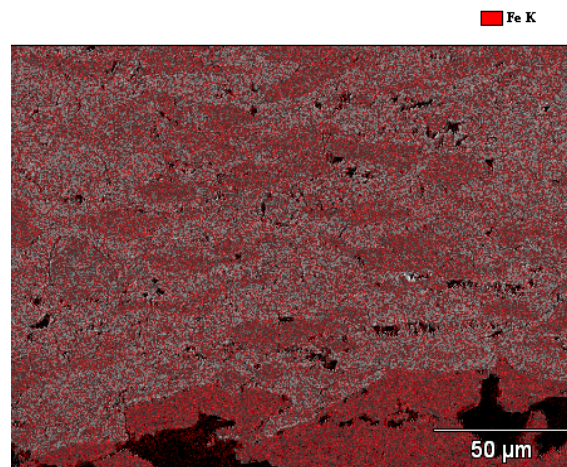


Figura 4-17. *Contenido de hierro. Peor resistencia al desgaste.*

Cuando una aleación se deposita por termo-rocado HVOF, las partículas que conforman la aleación se funden a presiones 7 veces la presión atmosférica debido a las temperaturas generadas por la combustión de ciertos hidrocarburos (Dodecano $C_{12}H_{26}$, Tridecano $C_{13}H_{28}$, Tetradecano $C_{14}H_{30}$, Pentadecano $C_{15}H_{32}$). Esta cámara de combustión se encuentra en la pistola de rociado, cuyo funcionamiento básico podría describirse como una zona donde se inyectan los polvos de la aleación junto con una mezcla de oxígeno y combustible que impulsan a la aleación -que en ese momento está compuesta de partículas total o parcialmente fundidas- a través de una tobera, que incrementa su velocidad hasta romper la barrera del sonido, impactando en la superficie a ser rociada ó sustrato.

La velocidad y temperatura a la que son proyectadas estas partículas son directamente dependientes de la combustión, por lo que los flujos de oxígeno y combustible son variables sensibles en cuanto a sus efectos en la calidad de los recubrimientos, y deben ser optimizados para cada material y equipo de aplicación (Klassen, 2008). En los sistemas de 3ra generación, como la pistola Tafa JP-5000 usada para este trabajo de investigación, el uso de combustibles líquidos incrementa el poder calorífico (y por ende, la

temperatura) a la que son calentadas las partículas dentro de la cámara de combustión.

Un recubrimiento con considerables espacios entre las capas de material depositado corresponde a una estructura más irregular que la organización ideal de largas partículas aplastadas (lamelas) que le dan a los recubrimientos HVOF sus altas densidades.

Al analizar los parámetros usados para la condición con menor resistencia al desgaste, se observa que es la que posee el mayor flujo de combustible, por lo que es probable que una mezcla como las usadas en este trabajo (oxidantes, $\lambda > 1$) disminuyan las temperaturas generadas en la cámara de combustión y las velocidades de proyección para las partículas (Li, Shi y Christofides, 2008). Igualmente, la baja cohesión entre los elementos de este recubrimiento por causa de los efectos arriba mencionados, influiría negativamente en la resistencia al desgaste de esta condición, haciéndola menos resistente al daño por efecto de esfuerzos de corte y compresión, como se observó en los ensayos de desgaste por deslizamiento.

4.3.2. Superficie de Desgaste

En las Figuras 4-18, 4-19 y 4-20 se muestran las huellas de desgaste en los bloques, para las condiciones que presentaron la mejor respuesta al desgaste por deslizamiento, la condición dada por el fabricante y la condición que arrojó los resultados más bajos respectivamente (4, 5 y 6). Se puede apreciar que los tamaños de huella son similares para las condiciones 5 y 6 mientras que para la condición 6 (peor) el ancho de la misma es mayor (ver Tabla 18). Estos resultados no concuerdan con los valores obtenidos en el ensayo de desgaste por deslizamiento, ya que en las gráficas de

coeficiente de fricción vs. recorrido, las condiciones del fabricante, la mejor y la considerada peor presentaron similares respuestas al desgaste.

Tabla 18. Anchos de huella para las condiciones evaluadas.

Condición 4 (Mejor)	Condición 5 (Fabricante)	Condición 6 (Peor)
1,51 mm	1,54 mm	1,88 mm

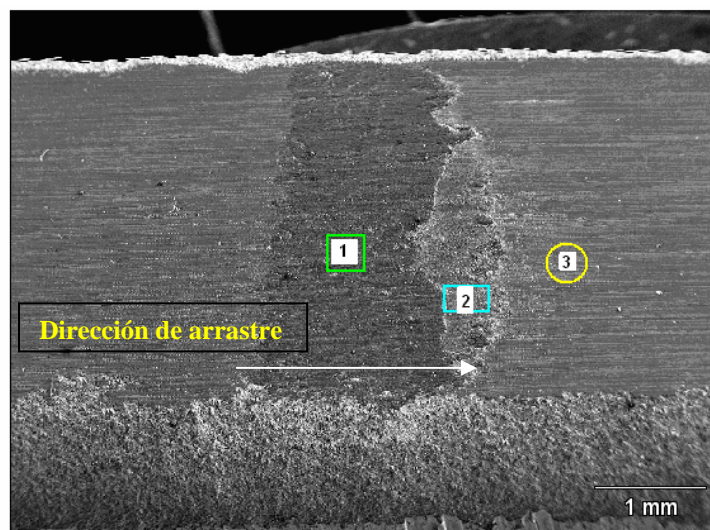


Figura 4-18. Micrografía a 20X para la huella de desgaste de la mejor condición con puntos para EDS

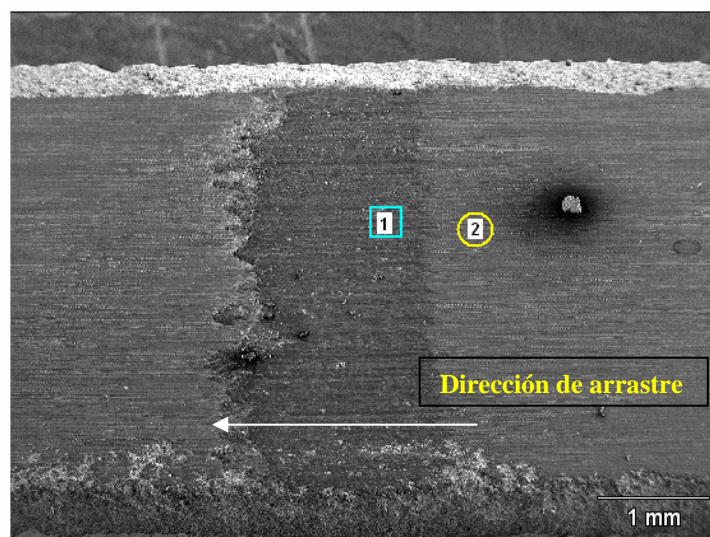


Figura 4-19. Micrografía a 20X para la huella de desgaste de la condición del fabricante con puntos para EDS.

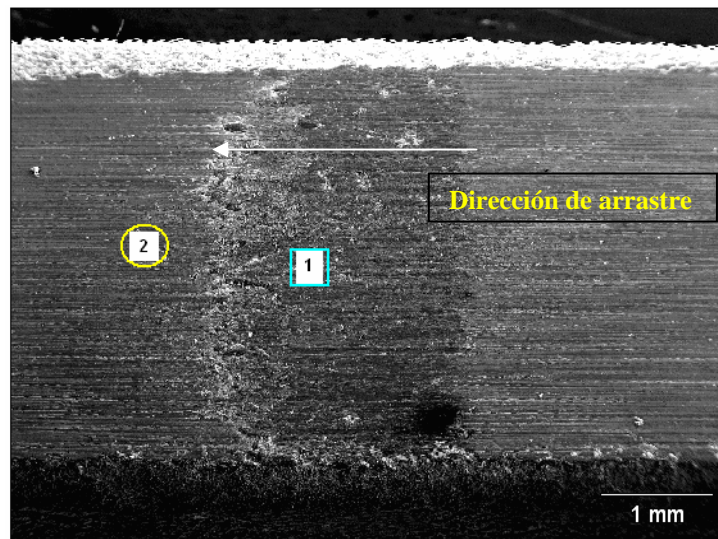


Figura 4-20. Micrografía a 20X para la huella de desgaste de la peor condición con puntos para EDS.

La Figura 4-21 corresponde a una zona de la huella de desgaste presentada en la figura 4-18 vista a una mayor magnificación. En ella podemos destacar una zona de surcos profundos ó arado producto del desgaste de una matriz que se ha deformado y ha sido removida por el mecanismo de arado bajo la acción de la carga aplicada (zona encerrada en recuadro negro). También se observan algunas partículas de segunda fase (ver óvalo de color naranja), probablemente formadas durante el rociado de los polvos, que se aprecian sin cohesión con la matriz. Esto probablemente es debido a que al removerse la matriz durante el ensayo algunas partículas de segunda fase quedan sin sustento y son fácilmente removidas. Finalmente estas partículas quedan atrapadas en el par tribológico y producen surcos de abrasión que se evidencian en el recuadro de color verde. En esta misma figura y encerrado en un círculo amarillo podemos observar una zona que pareciera ser estar fracturada y con la presencia de una grieta. Una magnificación de esta zona se presenta en la figura 4.22. Probablemente la matriz sometida a deformación plástica sufre endurecimiento por deformación y finalmente se fractura rendimiento produciendo

desprendimiento de material y por ende sería otro mecanismo de desgaste. Por lo tanto para esta condición podrían estar actuando tres mecanismos de desgaste: arado y deformación plástica, abrasión y fractura por endurecimiento por deformación.

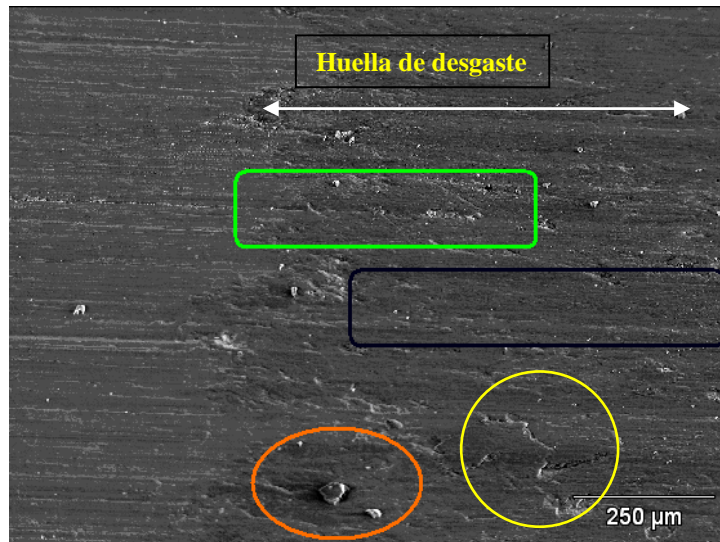


Figura 4-21. Micrografía a 100X para la superficie de desgaste de la mejor condición.

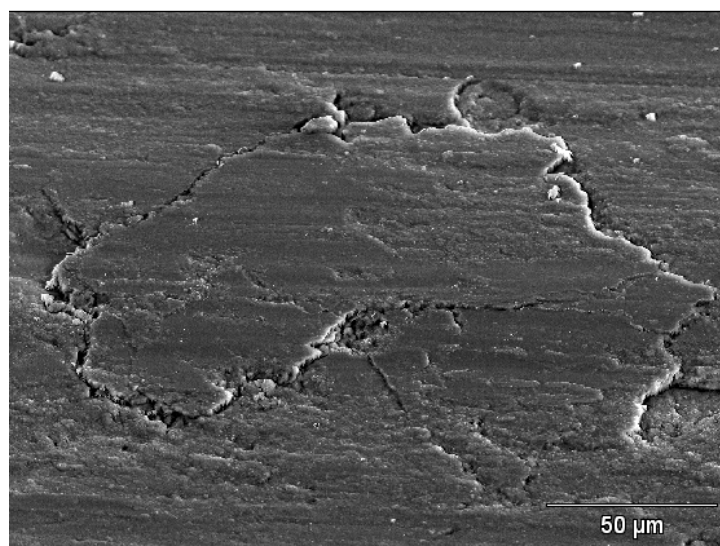


Figura 4-22. Micrografía a 600X para la superficie de desgaste de la mejor condición.

En las tablas 19 y 20 se presentan los resultados del análisis químico puntual realizado en las zonas indicadas por los números 1, 2 y 3 en la figura 4-18. El punto 1 se tomó en la parte interna de la huella revelando una cantidad mínima de los elementos que componen el recubrimiento excepto por el níquel y cobre, los cuales fueron removidos por la acción del desgaste. En el punto 2 se evidencia la presencia de todos los elementos aunque en una menor cantidad, lo que indica que esta es una zona de depósito de material removido, y el punto 3, que corresponde al recubrimiento, certifica las especificaciones dadas por el fabricante en su hoja técnica.

Tabla 19. Porcentaje en peso en EDS para puntos seleccionados en la Figura 4-18.

	<i>Si-K</i>	<i>S-K</i>	<i>Cr-K</i>	<i>Mn-K</i>	<i>Fe-K</i>	<i>Ni-K</i>	<i>Cu-K</i>	<i>Mo-L</i>
<i>Punto 1</i>	1.93		2.89	1.21	91.95			2.02
<i>Punto 2</i>	2.21		6.97	1.22	82.91	1.21	1.69	3.78
<i>Punto 3</i>	3.98	0.00	19.41		59.75	3.29	3.13	10.43

Tabla 20. Porcentaje en peso atómico en EDS para puntos seleccionados en la Figura 4-18.

	<i>Si-K</i>	<i>S-K</i>	<i>Cr-K</i>	<i>Mn-K</i>	<i>Fe-K</i>	<i>Ni-K</i>	<i>Cu-K</i>	<i>Mo-L</i>
<i>Punto 1</i>	3.79		3.07	1.21	90.77			1.16
<i>Punto 2</i>	4.35		7.42	1.23	82.19	1.14	1.47	2.18
<i>Punto 3</i>	7.87	0.00	20.75		59.47	3.12	2.74	6.04

Las similares tasas de desgaste presentes entre las condiciones del fabricante y la mejor, indican que los mecanismos que actúan en esta condición son similares. La menor cohesión entre las capas del recubrimiento y la gran cantidad de grietas a lo largo del espesor del recubrimiento origina el desprendimiento de partículas de mayor tamaño (Figura 4-23, círculo naranja) que son libres de moverse a través de las superficies en contacto, creando canales de cierta profundidad conocidos

como surcos de arado (Figura 4-23, recuadro azul). En la Figura 4-24 se aprecia el detalle de una zona de fractura debido al endurecimiento por deformación.

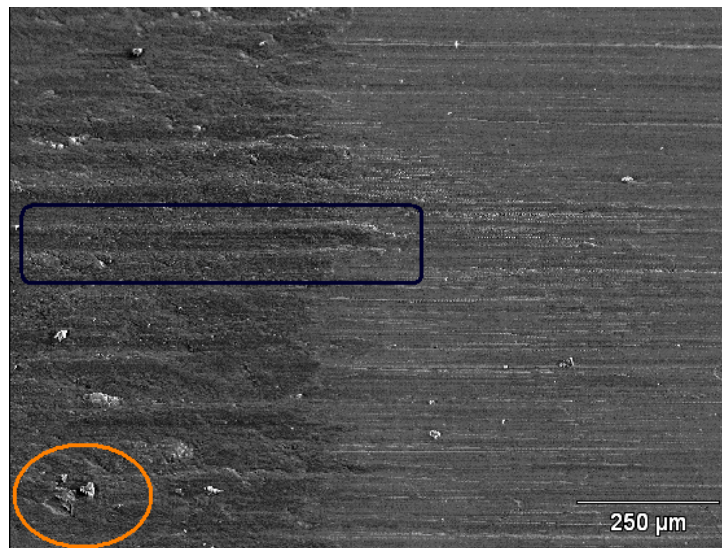


Figura 4-23. Micrografía a 100X para la superficie de desgaste de la condición del fabricante de los polvos.

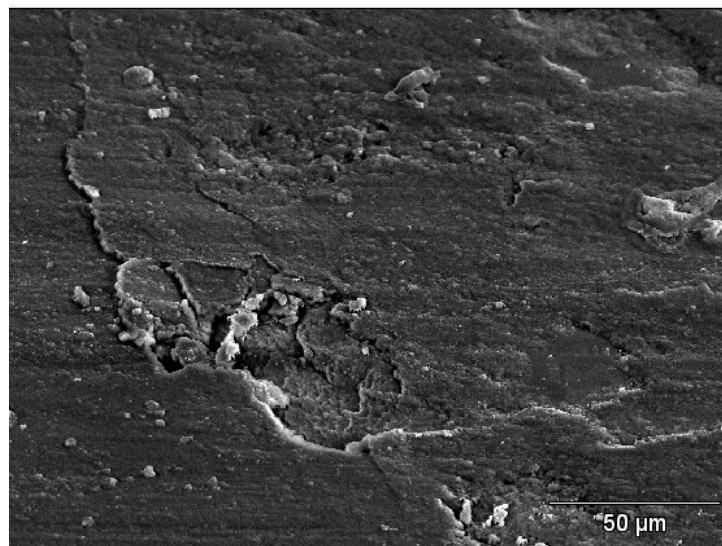


Figura 4-24. Micrografía a 600X para la superficie de desgaste de la condición del fabricante de los polvos.

Como en la muestra ensayada con las condiciones del fabricante de los polvos se distinguen claramente dos zonas, se analizó un punto en la huella y otro en el recubrimiento. El punto 1 se tomó en la parte interna hacia el borde de la huella revelando al igual que para la mejor condición, una cantidad mínima de los elementos que componen el recubrimiento sin la presencia del níquel y cobre, removidos por el mecanismo de desgaste. El punto 2 se tomó en el recubrimiento para descartar alteraciones en las especificaciones dadas por el fabricante de los polvos en su hoja técnica, luego de realizar el ensayo (ver Tabla 21 y 22).

Tabla 21. Porcentaje en peso en EDS para puntos seleccionados en la Figura 4-19.

	<i>Si-K</i>	<i>S-K</i>	<i>Cr-K</i>	<i>Fe-K</i>	<i>Ni-K</i>	<i>Cu-K</i>	<i>Mo-L</i>
<i>Punto 1</i>	2.31		3.60	91.89			2.20
<i>Punto 2</i>	3.94	0.00	19.46	58.52	3.94	3.99	10.15

Tabla 22. Porcentaje en peso atómico en EDS para puntos seleccionados en la Figura 4-19.

	<i>Si-K</i>	<i>S-K</i>	<i>Cr-K</i>	<i>Fe-K</i>	<i>Ni-K</i>	<i>Cu-K</i>	<i>Mo-L</i>
<i>Punto 1</i>	4.52		3.81	90.42			1.26
<i>Punto 2</i>	7.80	0.00	20.82	58.28	3.73	3.49	5.89

En la condición que presentó la peor resistencia al desgaste, la continua deformación plástica de la matriz de Hierro (Figura 4-25 recuadro rojo) deriva en un desgaste que deforma y desprende material de la misma, removiendo la masa principal (bulk) y exponiendo partículas de fase secundaria (Figura 4-25 círculos naranja), que son compuestos más duros tales como óxidos, formados debido a las altas temperaturas que se producen durante el proceso de desgaste por deslizamiento. Estos óxidos actúan en un principio como lubricantes estabilizando el coeficiente de fricción, también se endurecen debido a la deformación y se fracturan y se desprenden induciendo a un mecanismo de abrasión de tres cuerpos. En la Figura 4-26 se aprecia el detalle de la deformación plástica de la matriz y partículas de segunda fase desprendidas. En esta condición al igual que en

las anteriores los mecanismos son similares solo que en este caso la presencia de grietas interlamelares, compromete la resistencia del recubrimiento permitiendo una mayor remoción de la matriz. Este es el mecanismo principal siendo la fractura y abrasión de tres cuerpos los mecanismos secundarios.

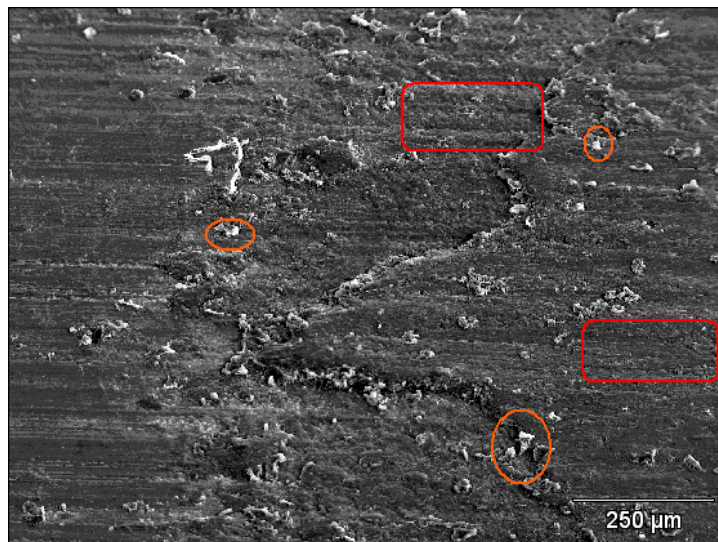


Figura 4-25. Micrografía a 100X para la superficie de desgaste de la peor condición.

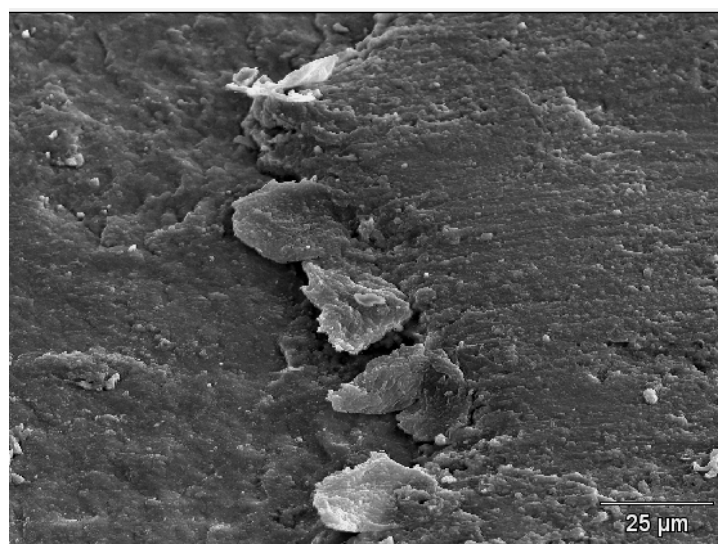


Figura 4-26. Detalle a 800X de partículas de segunda fase desprendidas.

En la condición que presentó la peor resistencia al desgaste, se analizó una zona en la huella que se deformó plásticamente y otra no ensayada cercana a la huella. Analizando la zona deformada en el punto 1 revela una cantidad mínima de los elementos que componen el recubrimiento, aunque en esta condición no hay rastros de Níquel y Molibdeno y se revela la presencia de elementos como el Cobre, Aluminio y Azufre en cantidades mínimas. El punto 2 se tomó en el recubrimiento y certificó la presencia de los elementos dados por el fabricante en su hoja técnica, aunque con una cantidad mínima de Aluminio (ver Tabla 23 y 24).

Tabla 23. Porcentaje en peso en EDS para puntos seleccionados en la Figura 4-20.

	<i>Al-K</i>	<i>Si-K</i>	<i>S-K</i>	<i>Cr-K</i>	<i>Mn-K</i>	<i>Fe-K</i>	<i>Ni-K</i>	<i>Cu-K</i>	<i>Mo-L</i>
<i>Punto 1</i>	2.61	2.90	1.20	2.43	1.70	86.26		2.90	
<i>Punto 2</i>	2.11	4.71		18.04		58.88	3.21	3.26	9.77

Tabla 24. Porcentaje en peso atómico en EDS para puntos seleccionados en la Figura 4-20.

	<i>Al-K</i>	<i>Si-K</i>	<i>S-K</i>	<i>Cr-K</i>	<i>Mn-K</i>	<i>Fe-K</i>	<i>Ni-K</i>	<i>Cu-K</i>	<i>Mo-L</i>
<i>Punto 1</i>	5.08	5.43	1.96	2.45	1.63	81.06		2.39	
<i>Punto 2</i>	4.22	9.05		18.70		56.83	2.95	2.77	5.49

La presencia de algunos elementos extraños a la composición del recubrimiento, como Aluminio y Manganeso, ocupando los lugares de componentes reales de la aleación base hierro -Cromo y Silicio respectivamente- se debe a los similares radios atómicos (posición relativa en la tabla periódica), por lo que el bombardeo de electrones los identifica erróneamente. Además, algunos elementos de radio atómico bajo, como Carbono, Boro, Oxígeno y Flúor no aparecen reflejados en los porcentajes en peso, debido a que la calibración del equipo, que realiza pruebas semi-cualitativas, no los permite.

CONCLUSIONES

El propósito del presente trabajo fue determinar los parámetros óptimos para la deposición de un aleación base hierro, mediante un proceso de rociado térmico por la técnica HVOF, utilizando un diseño experimental 3^2 , en el cual se variaron el flujo de combustible y la tasa de alimentación de los polvos. La resistencia al desgaste por deslizamiento fue considerada como la respuesta medida y la optimización se realizó a través de un análisis estadístico y superficie de respuesta. De este estudio se pudo determinar:

- Los mejores resultados de resistencia al desgaste por deslizamiento se logran utilizando un flujo de combustible entre 21,95 - 22,73 L/h (5,8 - 6 GPH) y la velocidad de alimentación de los polvos entre 72,83 - 78,47 gr/min.
- El estudio también permitió determinar que los parámetros flujo de combustible y tasa de alimentación de los polvos no representan una combinación estadísticamente significativa para obtener recubrimientos mediante la técnica HVOF utilizando una aleación base Fe- Cr-Mo.
- Los coeficientes de fricción obtenidos para la condición más resistente al desgaste, la menos resistente y la del fabricante se estabilizaron a un valor promedio muy similar, lo cual pareciera indicar la formación de una capa de óxido, debido a la fricción y las altas temperaturas, que actuaría como lubricante.
- El análisis de las superficies de desgaste indicó que los mecanismos de desgaste que operan en el desgaste por deslizamientos del recubrimiento base Fe-Cr-Mo son: remoción de la matriz por arado, fractura, (deformación plástica y endurecimiento por deformación) y

abrasión por tres cuerpos siendo el arado el mecanismo que más contribuye al desgaste.

- La menor resistencia al desgaste es probablemente debida a la falta de cohesión entre las capas que forman el recubrimiento las cuales, bajo la acción de la carga, son fácilmente removidas por arado, siendo éste el mecanismo principal de deterioro en este recubrimiento.
- El diseño experimental factorial, junto con la superficie de respuesta, son las herramientas más eficientes para optimizar procesos o respuestas cuyo número de variables sea >2 .
- Para las condiciones estudiadas no se pudo encontrar una relación entre la resistencia al desgaste por deslizamiento y la dureza del recubrimiento.

RECOMENDACIONES

- Para próximos estudios de optimización que involucre la deposición por HVOF de la aleación base Hierro-Cromo-Molibdeno, se recomienda hacer variaciones en el flujo de oxígeno, para así determinar que tanto influye en la calidad del recubrimiento una menor o mayor cantidad de oxígeno en la mezcla.
- Realizar un mantenimiento en la máquina de desgaste por deslizamiento para corregir la excentricidad que presentó el eje al momento de realizar los ensayos, para poder evaluar los recubrimientos a una mayor velocidad de deslizamiento.
- Ajustar la termocupla para realizar futuros ensayos que involucren lubricación y agregar un registrador de carga digital que permita cuantificar la fuerza de roce a lo largo de todo el recorrido de las muestras.
- A través de un tratamiento térmico posterior por llama, se pueden incrementar las propiedades físicas del recubrimiento como: la dureza, densidad, resistencia al desgaste y a la erosión. Aprovechando el contenido de Boro entre los elementos que componen el polvo a rociar.
- Se recomienda hacer estudios en las distintas aplicaciones del recubrimiento o partes mecánicas como: cigüeñales de motores diesel, cilindros, rotores de bombas, cojinetes, etc. Para evaluar el comportamiento de las propiedades de la aleación base Hierro-Cr-Mo en las mismas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bhushan, B. (1999). Modern tribology handbook. Vol. 1: Principles of Tribology. CRC Press. USA.
- Buckley, D. (1981). Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear and Lubrication. Elsevier. USA.
- Cadenas, P. (2005). Evaluación del desgaste por deslizamiento sin lubricación de un recubrimiento base níquel termorrociado por HVOF con y sin tratamiento térmico posterior por la llama oxiacetilénica. Trabajo de ascenso. Inédito. 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. Trabajo de ascenso. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Colmenares, J. (2004). Optimización de recubrimientos metálicos nanoestructurados depositados por rociado térmico. Trabajo de ascenso. Inédito. 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. Trabajo especial de grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

- Gil de Fuentes, L. (2002). Optimización de la calidad de recubrimientos base níquel obtenidos por termorrociado HVOF. Trabajo especial de grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Montgomery, D. (1991). Diseño y Análisis de Experimentos. México: Grupo Editorial Iberoamérica. 589 p.
- Neale, M. (1995). The Tribology Handbook. 2nd ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann. A member of the Reed Elsevier plc group. 582 p.
- Niemann, G. (1973). Tratado teórico-práctico de elementos de máquinas, cálculo, diseño y construcción. 2da ed. Barcelona, España: Editorial Labor. 786 p.
- Rabinowicz, E. (1965). Friction and Wear of Materials. USA: John Wiley and Sons.
- Smith, E. (1994). Mechanical Engineer's Reference Book. 12th ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann. A member of the Reed Elsevier group. 1194 p.
- Spiegel, M. y Stephens, L. (2002). Estadística. 3era ed. México Mc Graw-Hill Interamericana. 541 p.
- Stachowiak, G. (2000). Engineering Tribology. 2nd ed. Boston, USA: Butterworth-Heinemann. 769 p.

Stolarski, T. (1990). Tribology in Machine Design. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann. A member of the Reed Elsevier plc group. 311 p.

Fuentes Electrónicas:

Al Fadhli, H. (2003). Performance evaluation of (HVOF) thermal spray coating using inconel-625 powder. Disponible en: <https://eprints.kfupm.edu.sa/9867/1/9867.pdf> [Consulta: 2008, octubre 18].

Hasan, M. y otros (2007). Design and optimization of a multi-powder feed system for the HVOF deposition process. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com> [Consulta: 2008, mayo 13].

Houdková, Š. y otros (2004). Tribological characteristics of thermally sprayed coatings. Disponible en: <http://skodavyzkum.cz/projekty/tribologie/doc/VaP.pdf> [Consulta: 2009, marzo 22].

Klassen, T. (2008). HVOF Spraying. Disponible en: http://www.hsu-hh-de_werkstoffkunde_index-php_1uzmh1fg [Consulta: 2009, abril 06].

Koutský, J. (2004). High velocity oxy-fuel spraying. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com> [Consulta: 2008, marzo 13].

Maranho, O. y otros. (2007). Influence of parameters of the HVOF thermal spray process on the properties of multicomponent white cast iron coatings. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com> [Consulta: 2008, abril 13].

Marín V., C. (2008). Thermal Spray Protección de alto impacto. Revista Metal Actual [Revista en línea]. 8 Disponible: http://www.metalactual.com/8/tratamiento_thermal_spray.pdf [Consulta: 2008, abril 08].

Metalspray Tecnología al Servicio de la Industria. Información técnica. Disponible en: http://www.metalsprayperu.com/info_tecnica.htm [Consulta: 2008, octubre 12].

Neuville, S. y Matthews, A. (2007). A perspective on the optimization of hard carbon and related coatings for engineering applications. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com> [Consulta: 2008, mayo 15].

Reveron, H. (2002). Termorrociado. Disponible en: <http://prof.usb.ve/hreveron/Termo.htm> [Consulta: 2009, marzo 30].

Sartwell, B. y Legg, K. (2004). A Replacement of Chromium Electroplating on C-2, E-2, P-3, and C-130 Propeller Hubs Using HVOF Thermal Spray Coatings. Disponible en: <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA422443&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf> [Consulta: 2008, mayo 15].

Surichaqui, R. (2008). Depósitos por Flame-Spray. Disponible en: <http://yboon.net/~cosuroca/Apuntes/FiQui%20Recubrimiento/Informe%205.pdf> [Consulta: 2008, abril 30].

Turunen, E. (2005). Diagnostic tools for HVOF process optimization. Disponible en: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2005/P583.pdf> [Consulta: 2008, julio 09].

Turunen, E. y otros (2005). Parameter optimization of HVOF sprayed nanostructured alumina and alumina–nickel composite coatings. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com> [Consulta: 2008, mayo 11].

Voronetski, A. y Suchkov, S. (2005). Software Product for Modeling and Optimization of HVOF Processes. Disponible en: <http://www.nams.msisa.ru/SOURCE/seminarII/namsII.pdf> [Consulta: 2008, mayo 15].

Fuentes de Tipo Legal:

U.C.V. Facultad de Ingeniería. Subcomisión de bibliotecas para la normalización de de la presentación de trabajos especiales de grado. Instructivo para la Presentación de Tesis de Pregrado, Postgrado, Doctorado y Trabajos de Ascenso. (2005).

Standard Test Method for Calibration and Operation of the Falex Block-on-Ring Friction and Wear Testing Machine. (ASTM D 2714). (2003). ASTM International.

Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials (ASTM E 384). (2002). ASTM International.

Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test. (ASTM G 77). (1998). ASTM International.

Standard Test Method for Wear Preventive Properties of Lubricating Greases Using the (Falex) Block on Ring Test Machine in Oscillating Motion. (ASTM G 77). (2001). ASTM.

Fuentes Corporativas:

Sulzer Metco. (2006). Thermal Spray Materials Guide.

Publicaciones Periódicas:

Archard, J. (1953). Contact and Rubbing of Flat Surfaces. *Journal of Applied Physics*, Vol. (24): pp. 981-988.

Archard, J. y Hirst, W. (1956). An examination of a mild wear process. *JSTOR: Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematics and Physical Sciences*, Vol. (238), No. 1215: pp. 515-528.

Babilius, A. y Ambroza, P. (2003). Effect of Temperature and Sliding Speed on the Adhesive Wear. *Materials Science (MEDŽIAGOTYRA)*, Vol. (9), No. 4.

Li, M., Shi, D. y Christofides, P. (2003). Modeling and Control of an Industrial High Velocity Oxygen-Fuel (HVOF) Thermal Spray Process. *2004*, 43 (14): pp. 3632–3652.

ANEXOS

Coefficientes de fricción para la condición que presento mayor resistencia al desgaste (N° 4)

(76 g/min - 20,82 L/h combustible)																										
Minutos/F_r(N)	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	
	2	3	4	4,5	4,5	4,5	5	5	6	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	7	6,5	6,5	6,5	6,5			6,5	
	1,5	2	4	5,5	5,5	6	6	6	6	6,5	6,5	6	6,5	6	6	6	6	6	6	6	6	6			6	
	1,5	2	2,5	4	5	5	5	5,5	6	6,5	6,5	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7			7	
F₁	0,16	0,24	0,32	0,36	0,36	0,36	0,4	0,4	0,48	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,56	0,52	0,52	0,52	0,52			0,52	
F₂	0,12	0,16	0,32	0,44	0,44	0,48	0,48	0,48	0,48	0,52	0,52	0,48	0,52	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48			0,48	
F₃	0,12	0,16	0,2	0,32	0,4	0,4	0,4	0,44	0,48	0,52	0,52	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56			0,56	
f_{promedio}	0,13	0,19	0,28	0,37	0,4	0,41	0,43	0,44	0,48	0,52	0,52	0,52	0,53	0,52	0,52	0,52	0,52	0,53	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
recorrido(m)	22	44	66	88	110	132	154	176	198	220	242	264	286	308	330	352	374	396	418	440	462	484	506	528	550	

Coefficientes de fricción para la condición recomendada por el fabricante de los polvos (N° 5)

(76 g/min - 22,71 L/h combustible)																											
Minutos/F_r(N)	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50		
	1,5	2	2	3,5	4	3,5	4	4,5	4,5	5	5,5	5,5	5,5	6	6	6	6	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5				6,5	
	1,5	2	2,5	3	4	5	5,5	6	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
	1,5	2	2,5	3	4	4,5	5	5,5	6	6	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
F₁	0,12	0,16	0,16	0,28	0,32	0,28	0,32	0,36	0,36	0,4	0,44	0,44	0,44	0,48	0,48	0,48	0,48	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
F₂	0,12	0,16	0,2	0,24	0,32	0,4	0,44	0,48	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
F₃	0,12	0,16	0,2	0,24	0,32	0,36	0,4	0,44	0,48	0,48	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
f_{promedio}	0,12	0,16	0,19	0,25	0,32	0,35	0,39	0,43	0,45	0,47	0,49	0,49	0,49	0,51	0,51	0,51	0,51	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
recorrido(m)	22	44	66	88	110	132	154	176	198	220	242	264	286	308	330	352	374	396	418	440	462	484	506	528	550		

Coefficientes de fricción para la condición que presento menor resistencia al desgaste (N° 6)

(76 g/min - 24,61 L/h combustible)																										
Minutos/F_r(N)	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	
	1,5	2,5	3	4	5	6	6	6	6	6	6	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6	6	6	6	6,5	6,5			6,5	
	1,5	1,5	2	2,5	3	4	4,5	5	6	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	6
	1,5	2,5	3	3,5	4,5	4,5	5	5	5	5,5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	7
f₁	0,12	0,2	0,24	0,32	0,4	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,48	0,48	0,48	0,48	0,52	0,52				0,52
f₂	0,12	0,12	0,16	0,2	0,24	0,32	0,36	0,4	0,48	0,48	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,48
f₃	0,12	0,2	0,24	0,28	0,36	0,36	0,4	0,4	0,4	0,44	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,56
f_{promedio}	0,12	0,17	0,21	0,27	0,33	0,39	0,41	0,43	0,45	0,47	0,51	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,51	0,51	0,51	0,51	0,52	0,52				0,52
recorrido(m)	22	44	66	88	110	132	154	176	198	220	242	264	286	308	330	352	374	396	418	440	462	484	506	528	550	