CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

INCREMENTO DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE DEL CILINDRO DE BOMBA DE LODOS MEDIANTE LA APLICACIÓN POR ESPREADO TÉRMICO (PLASMA) DE RECUBRIMIENTOS CERÁMICOS

POR

JOSUE GARCIA NAVARRO

TESIS / MONOGRAFÍA

EN OPCION COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL

SALTILLO COAHUILA, DICIEMBRE 2008.

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

INCREMENTO DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE DEL CILINDRO DE BOMBA DE LODOS MEDIANTE LA APLICACIÓN POR ESPREADO TÉRMICO (PLASMA) DE RECUBRIMIENTOS CERÁMICOS.

POR

ING. JOSUÉ GARCÍA NAVARRO

MONOGRAFÍA

EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA
DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL

SALTILLO COHAUILA, MÉXICO. DICIEMBRE 2008

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V.

Gerencia de Desarrollo Humano

División de Estudios de Postgrado

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la monografía "INCREMENTO DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE DEL CILINDRO DE BOMBA DE LODOS MEDIANTE LA APLICACIÓN POR ESPREADO TÉRMICO (PLASMA) DE RECUBRIMIENTOS CERÁMICOS", realizada por el alumno(a) Josué García Navarro con número de matrícula 07ES057 sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El comité Tutorial

Tutor Académico

M.C. Juan Carlos Díaz Guillén.

Tutor en planta

Ing. Roberto Méndez Méndez

Asesor

M.C. Jesús Castillo Tamayo

Coordinador de Post grado

M.C. Claudia A. González Rodríguez.

CONTENIDO

Tema	Página
1. Síntesis	1
2. Objetivo	2
3. Justificación	3
4. Introducción	4
4.1 Antecedentes generales	4
4.2 Antecedentes del proyecto	6
5. Metodología	7
6. Revisión bibliográfica	8
6.1 Información general	8
6.1.1 ¿Qué es un recubrimiento?	8
6.1.2 Clasificación de los recubrimientos	9
6.1.3 Las proyecciones térmicas	10
6.1.4 Comparación del método de plasma	12
6.1.5 Ventajas del proceso por plasma	13
6.1.6 Desventajas del proceso por plasma	14
6.1.6 Aplicaciones de la proyección por plasma	15
6.2 Proceso de espreado térmico por plasma	16
6.2.1 Generación del plasma	16
6.2.2 Alimentación del polvo	18
6.2.3 Parámetros relevantes del proceso	18
6.2.4 Interacción de las partículas con el sustrato	21
6.2.5 Protección atmosférica	22
6.2.6 Materiales de aporte y materiales base	23
6.2.7 Características de las partículas	29

7. Desarrollo Experimental 34

7.1 Diseño de experimentos 34

7.1.1 Etapa 1: Aplicación y evaluación 35

7.1.2 Etapa 2: Evaluación resistencia al desgaste 36

7.2 Experimentación 36

7.2.1 Aplicación de recubrimientos y evaluación 36

7.2.2 Evaluación resistencia al desgaste 49

8. Resultados y conclusiones 52

9. Bibliografía 57

1.

SÍNTESIS

Las bomba de lodos son equipos utilizados en lo proceso de perforación de pozos petroleros. La finalidad de estas bombas es la inyección de los lodos que sirven para mantener una presión constante del pozo, sacar los recortes hacia la superficie, además de servir como refrigerante y lubricante del equipo durante el proceso.

Dentro del sistema de bomba de lodos existe un conjunto denominado "camisa-pistón" Véase la figura 7.1. La vida útil del sello de nitrilo del pistón es la que determina los paros operativos en las bombas y por lo consiguiente en los equipos de perforación.

Con la finalidad de incrementar la resistencia al desgaste del conjunto camisa-pistón, en el presente trabajo se propone la aplicación de un recubrimiento cerámico de bajo coeficiente de fricción mediante la técnica de espreado térmico por plasma que promueva el incremento de la vida útil del sello del pistón.

Se realizó un estudio del estado del arte de la técnica de espreado térmico arriba mencionada en el que se incluyen una descripción detallada del proceso, las ventajas y desventajas de este método así como sus principales aplicaciones entre otras. Adicionalmente se realizó un diseño de experimentos con la finalidad de evaluar la resistencia al desgaste de cinco recubrimientos cerámicos aplicados mediante espreado térmico por plasma con y sin la adición de bisulfuro de molibdeno como lubricante sólido.

2.

OBJETIVO

Formular un recubrimiento cerámico de bajo coeficiente de fricción para las bombas de lodos utilizadas en los equipos de perforación de pozos petroleros, que permita incrementar el tiempo de vida útil del sello de nitrilo del pistón y disminuya con esto los paros operativos reduciendo así los costos del proceso de perforación.

3.

JUSTIFICACIÓN

Mediante el desarrollo exitoso e implementación de los materiales con bajo coeficiente de fricción para la junta CAMISA – PISTON en las bombas de lodos, se pretende disminuir los paros operativos para mantenimiento, mejorar la productividad de los equipos de perforación, incrementar la capacidad productiva nacional así como analizar las posibilidades de exportación de un producto de este tipo.

4.

INTRODUCCIÓN

4.1 ANTECEDENTES GENERALES

La única manera de saber realmente si hay petróleo en el sitio donde la investigación geológica propone que se podría localizar un depósito de hidrocarburos, es mediante la perforación de un pozo.

La profundidad de un pozo es variable, dependiendo de la región y de la profundidad a la cual se encuentra la estructura geológica o formación seleccionada con posibilidades de contener.

La etapa de perforación se inicia acondicionando el terreno mediante la construcción de "planchadas" y los caminos de acceso, puesto que el equipo de perforación moviliza herramientas y vehículos voluminosos y pesados. Los primeros pozos son de carácter exploratorio, éstos se realizan con el fín de localizar las zonas donde se encuentra hidrocarburo, posteriormente vendrán los pozos de desarrollo. Ahora para reducir los costos de transporte los primeros pozos exploratorios de zonas alejadas pueden ser perforados por equipos mucho más pequeños que hacen pozos de poco diámetro.

Los pozos exploratorios requieren contar con variada información: perforación, perfilaje del pozo abierto, obtención de muestra y cementación.

De acuerdo con la profundidad proyectada del pozo y las condiciones propias del subsuelo, se selecciona el equipo de perforación más indicado.

Hay diversas formas de efectuar la perforación, pero el modo más eficiente y moderno es la perforación rotatoria o trepanación con circulación de lodos. En la figura 4.1 se puede observar un proceso de perforación de pozos petroleros.

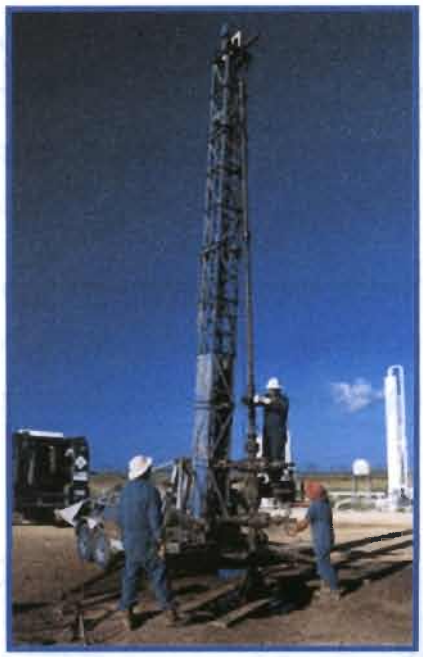


Figura 4.1.- Proceso de perforación de un pozo petrolero. *Revista el Mundo del Petróleo, ejemplar 32. Noviembre 2008.*

4.2 ANTECEDENTES DEL PROYECTO

En este proyecto se estará estudiando específicamente la aplicación de recubrimientos cerámicos por espreado térmico por plasma para el incremento de la resistencia al desgaste del conjunto camisa-pistón de las bombas de lodos. La situación se resume a continuación:

- Las bombas de lodo son equipos indispensables utilizados en los procesos de perforación y reparación de pozos petroleros.
- La finalidad de estas bombas es la inyección de los lodos que sirven para mantener una presión constante del pozo, además de servir como refrigerante y lubricante del equipo durante el proceso.
- El conjunto CAMISA-PISTON en el sistema "bomba de lodos" se considera un punto crítico que determina los periodos de paro en los equipos de bombeo. En la figura 4.2 se puede observar un esquema de una bomba de lodos
- Estos periodos están determinados por el tiempo de vida del sello del pistón, cuya duración es a su vez directamente dependiente de las propiedades tribológicas de la junta camisa-pistón.

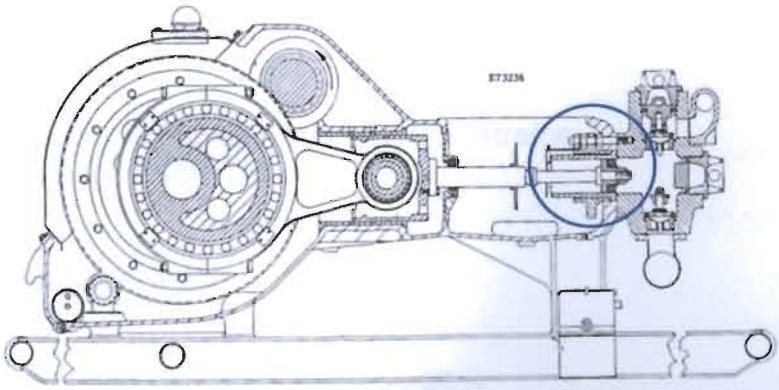


Figura 4.2.- Esquema de la estructura interna de una bomba de lodos identificando el conjunto camisa-pistón. *Revista el Mundo del Petróleo, ejemplar 32. Noviembre 2008.*

5.

METODOLOGÍA

La metodología propuesta para la realización de este proyecto es la siguiente:

1. Definición del problema

2. Estado del arte

3. Diseño de experimentos

    a) Material del sustrato = 1
    b) Recubrimientos cerámicos = 5 (Al_2O_3, CrC, WC, Cr_2O_3, Zr)
    c) Lubricante sólido (MoS_2) = 1 (spray)

4. Experimentación

    a) Preparación y acondicionamiento de sustratos
    b) Aplicación de recubrimientos

5. Evaluación y caracterización

    a) Caracterización química y metalográfica.
    b) Pruebas de desgaste

6. Análisis de resultados y conclusiones

6.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

6.1 INFORMACIÓN GENERAL

6.1.1 ¿QUÉ ES UN RECUBRIMIENTO?

Se puede definir un recubrimiento como "una región superficial de cualquier material con propiedades físicas y mecánicas diferentes de las del material base". Los objetivos a alcanzar con la aplicación de los recubrimientos son básicamente añadir, reemplazar, modificar y/o lubricar.

El implemento de un recubrimiento superficial permite que el material base sea optimizado para objetivos tales como resistencia mecánica, ligereza, etc., mientras que la superficie se optimiza para reducir el coeficiente de fricción, aumentar la resistencia al desgaste, o bien como un aislamiento térmico o eléctrico. [1]

6.1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS

En la tabla 6.1 se puede ver una clasificación general de los diferentes tipos de procesos de recubrimientos.

Tabla 6.1.- Clasificación general de tipos de recubrimientos.[1]

Deposición atómica	Recubrimientos gruesos (Bulk Coating)	Deposición de partículas
Ambiente electrolítico • Electroplaca • Sales fundidas • Desplazamiento químico	**Procesos Húmedos** • Pintura • Recubrimientos por inmersión	**Espreado térmico** • Plasma • Flama • HVOF
Ambiente vacío • Evaporación en vacío. • Deposición con haz iónico. • Haz molecular epitaxial.	**Espreado electrostático** • Impresión • Centrifugado	**Reacción por fusión** • Esmaltes • Impacto plating • Electroforesis
Ambiente plasma • Deposición sputter • Evaporación reactiva activada • Polimerización por plasma	**Revestimiento** • Explosivo • Roll Bonding	
Ambiente químico • CVD • Pirolisis Spray	**Sobre capa** • Soldadura • Fase líquida	

6.1.3 LAS PROYECCIONES TÉRMICAS

Se puede definir la proyección térmica como la adición de materiales en forma de partículas fundidas o semi fundidas finamente divididas, proyectadas sobre un sustrato previamente preparado.

El material a proyectar se funde a través de la energía calorífica que se obtiene mediante la combustión de gases ó de un diferencial de voltaje. En seguida el material fundido en estado plástico se proyecta sobre la pieza a recubrir con una alta energía cinética y térmica (Fig. 6.1), provocando la unión con una fuerza que va a depender del procedimiento empleado, de los parámetros utilizados, del material de aporte, del material base así como de la preparación previa.

Los valores de la fuerza de anclaje que se obtienen de estos recubrimientos superficiales pueden ser del orden de los 80 MPa.

Los procesos de termo espreado han sido utilizados para producir una gran variedad de capas protectoras que ayudan a mejorar la resistencia al desgaste, a la corrosión y resistencia a altas temperaturas así como para la restauración de partes desgastadas.[2]

Actualmente, los procedimientos de termo espreado más utilizados son:

- Flame power (Polvo por combustión).
- Flame wire (Alambre por combustión).
- Wire arc (Alambre por arco eléctrico).
- **Plasma spray (Por plasma).**
- Detonación
- HVOF (Alta velocidad oxi-gas).

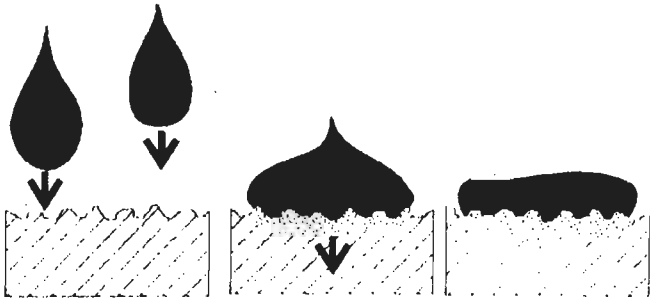


Figura 6.1.- Imagen que muestra el proceso de formación de un recubrimiento [1]

La calidad del recubrimiento aplicado depende directamente de las reacciones químicas entre partículas, el tamaño de las partículas, así como la morfología de la pieza, la velocidad de avance, el ángulo de incidencia con el que las partículas chocan sobre la pieza, y la distancia de proyección.

Los pasos principales que deben seguirse en un proceso de espreado térmico son los siguientes:

1.- Limpieza superficial del material a recubrir.

2.- Preparación de la superficie (por lo regular un proceso de granallado).

3.- Proyección de la capa de anclaje, o de la capa directamente en el caso de que esta última no requiera de una capa previa como liga.

4.- Mecanizado o rectificado final.

Es importante mencionar que durante el proceso de espreado térmico, el material a recubrir no debe superar los 150 °C para evitar posibles cambios estructurales o la adición de esfuerzos superficiales.

6.1.4 COMPARACIÓN DEL MÉTODO DE PROYECCIÓN POR PLASMA CON OTROS PROCESOS.

Se pueden apreciar en la Tabla No. 2 algunos datos comparativos correspondientes a diferentes parámetros de operación de los principales procesos de espreado térmico.

Tabla 6.2.- Características típicas de los diferentes tipos de espreados térmicos. [8]

SISTEMA	Temperatura proyección °C	Velocidad partícula m / s	Fuerza de anclaje MPa.	Porosidad de la capa %	Contenido de óxidos %
Arco plasma	> 10000	400 - 600	35 - 70	0.5 - 3	0.5 - 3
H.V.O.F.	3100	600 - 1000	50 - > 70	0.5 - 2	0.5 - 3
Arco eléctrico	4000	150 - 300	25 - 50	3 - 6	5 - 10
Combustión alambre	< 3100	80 - 200	15 - 40	3 - 8	5 - 10
Combustión polvo	< 3100	30 - 70	10 - 30	7 - 15	7 - 10

6.1.5 VENTAJAS DEL PROCESO DE ESPREADO TÉRMICO POR PLASMA

1.- Una elevada fuerza de unión y buena compactación debido a la alta velocidad de las partículas rociadas.

2.- La generación de calor debida a los procesos de disociación e ionización (plasma) es muy eficiente, proporcionando un calentamiento muy efectivo del material a fundir.

3.- Se minimiza la oxidación ya que la fuente de calor es inerte.

4.- Las grandes temperaturas generadas por el arco de plasma permiten la proyección de materiales con elevados puntos de fusión (metales refractarios, materiales cerámicos).

5.- Una de las grandes ventajas de este tipo de proceso es poder realizar recubrimientos con materiales cerámicos, ya que una de las principales características que presentan dichos materiales es su elevada temperatura de fusión.

6.1.6 DESVENTAJAS DEL PROCESO DE ESPREADO TÉRMICO POR PLASMA

1.- La aplicación del recubrimiento en grandes extensiones superficiales puede disminuir la consistencia y la uniformidad del revestimiento.

2.- La proyección tiende a producir revestimientos porosos, especialmente cuando se usa a altas velocidades. La porosidad disminuye con la proyección en vacío y con la disminución en la granulometría del polvo.

3.- Los depósitos realizados pueden contener productos originados de la oxidación, junto a alguna porosidad debida a la fusión incompleta.

6.1.7 APLICACIONES DE LA PROYECCIÓN POR PLASMA

Las principales aplicaciones de la proyección térmica por plasma son las siguientes:

- Protección contra diferentes mecanismos de desgaste: abrasión, adhesión, erosión y agrietamiento.
- Brinda protección contra: oxidación, corrosión por gases calientes, corrosión atmosférica y corrosión por inmersión.
- Provee protección térmica.
- Recuperación y reparación de piezas con desgastes o defectos localizados
- Mejora algunas propiedades superficiales que deben reunir cualidades especiales:

  ✓Aumento de la superficie específica

  ✓Recubrimientos con superficie activa o inerte

  ✓Aislamiento o conducción eléctrica

  ✓Capas autolubricantes

  ✓Superficies con propiedades catalíticas

  ✓Barreras de difusión

  ✓Recubrimientos decorativos

  ✓Recubrimientos de absorción o reflexión luminosa

6.2 PROCESO DE ESPREADO TÉRMICO POR PLASMA

La técnica de proyección por plasma tuvo su origen en Alemania, en los años veinte, sin embargo, no fue hasta finales de los años cincuenta, cuando comenzó el proceso a ser ampliamente usado y considerado [3].

Esta técnica de proyección puede ser empleada con una amplia variedad de materiales, incluidos los cerámicos y con un elevado rendimiento. Su empleo disminuye el riesgo de degradación del revestimiento y del sustrato, en comparación con otros procesos a altas temperaturas.

6.2.1 GENERACIÓN DE PLASMA.

Desde el año 1970, la técnica de la proyección por plasma ha experimentado una profunda evolución, a pesar de lo cual, el diseño del cañón empleado para la proyección de dicho plasma apenas ha sufrido modificaciones [4].

Este dispositivo, que aparece ilustrado en la figura 6.2, consta de dos electrodos: un cátodo en forma cónica situado en el interior de un ánodo cilíndrico, el cual se extiende más allá del cátodo, formando una boquilla en su extremo.

La refrigeración de los electrodos durante el proceso, se realiza por medio de un circuito con agua en circulación en su interior, lo que evita la fusión de dichos electrodos.

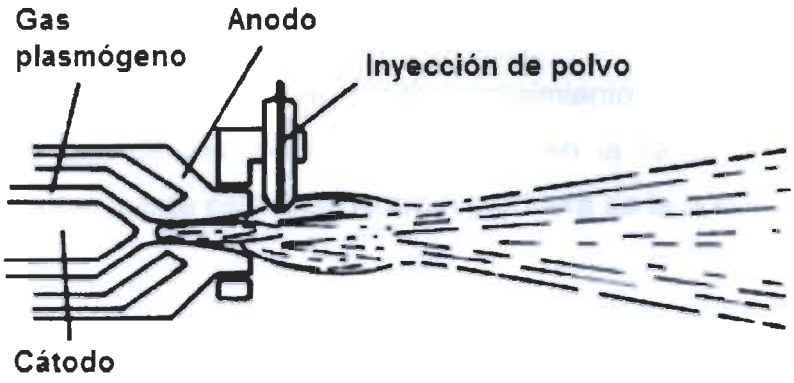


Figura 6.2.- Diagrama esquemático de un cañón de plasma.[4]

El plasma se genera cuando un impulso de corriente crea un arco entre los dos electrodos. El arco se mantiene por una corriente estacionaria de elevada intensidad y con un potencial de alrededor de 50 volts.

Un gas inerte fluye a través del espacio comprendido entre los dos electrodos, el cual y debido al arco eléctrico establecido disocia sus moléculas en sus átomos constituyentes ionizándolos.

De este modo, el gas existente en el interior del arco se transforma en un conjunto de iones y electrones muy energéticos, es decir, un plasma. La corriente en su recorrido entre los dos electrodos alcanza la boquilla del cañón, formando allí una llama de plasma.

6.2.2 ALIMENTACIÓN DEL POLVO

El material en polvo que origina el recubrimiento es transportado por medio de un gas de transporte, e inyectado en la llama de plasma. El inyector del polvo puede estar por dentro o por fuera de la boquilla.

El plasma generado, acelera las partículas de polvo inyectadas, fundiéndolas debido a la elevada temperatura del plasma. Las gotas de material fundido salen dirigidas al sustrato donde se solidifican y acumulan, originando un recubrimiento compacto.

Las partículas se deben fundir completamente, evitando una vaporización y permanecer en este estado hasta que hagan contacto con el material base. Si las partículas no se funden suficientemente, puede resultar un recubrimiento de pobre calidad.

6.2.3 PARÁMETROS RELEVANTES EN EL PROCESO DE ESPREADO TÉRMICO POR PLASMA

6.2.3.1 GASES PLASMÓGENOS

En la práctica, el argón o el nitrógeno son los gases primarios utilizados para la generación del plasma, junto con adiciones que varían entre el 5% y el 25%, de un gas secundario, normalmente hidrógeno o helio.

6.2.3.2 TAMAÑO DE PARTÍCULA DE POLVO

Para cada material de revestimiento y para cada cañón de plasma existe un tamaño adecuado de las partículas del polvo, oscilando éste entre 5 y 60 micras. Un tamaño superior al adecuado originará que las partículas no lleguen a fundirse, con lo cual podrán separarse de la llama o rebotar en el sustrato sin adherirse a él.

6.2.3.3 MODO DE INYECCIÓN DEL POLVO

La forma en que las partículas se introducen en la llama condiciona su fusión y posterior deposición. La presión del gas portador del polvo, debe estar convenientemente ajustada para que las partículas lleguen a la llama, pero sin atravesarla.

6.2.3.4 DISTANCIA AL SUSTRATO

Cuando la proyección se realiza en contacto con el aire y el material fundido ha abandonado la llama de plasma, las partículas de polvo comenzarán a enfriarse y desacelerarse. Por lo tanto, un factor básico a considerar es la distancia entre el cañón y la superficie a revestir, la cual suele oscilar entre los 5 y los 10 centímetros cuando la proyección se realiza en contacto con el aire. La eficacia de la proyección varía en función de la distancia de proyección [5].

6.2.3.5 VELOCIDAD DE LAS PARTÍCULAS

La velocidad de salida del plasma es del orden de los 600 m/seg, observándose que las partículas de polvo de mayor tamaño responden más lentamente a la aceleración impresa por el gas y que dichas partículas una vez aceleradas pierden velocidad más lentamente que el propio gas. Ejemplos de este fenómeno han sido reportados por Vardelle[6], como se aprecia en la Figura 6.3.

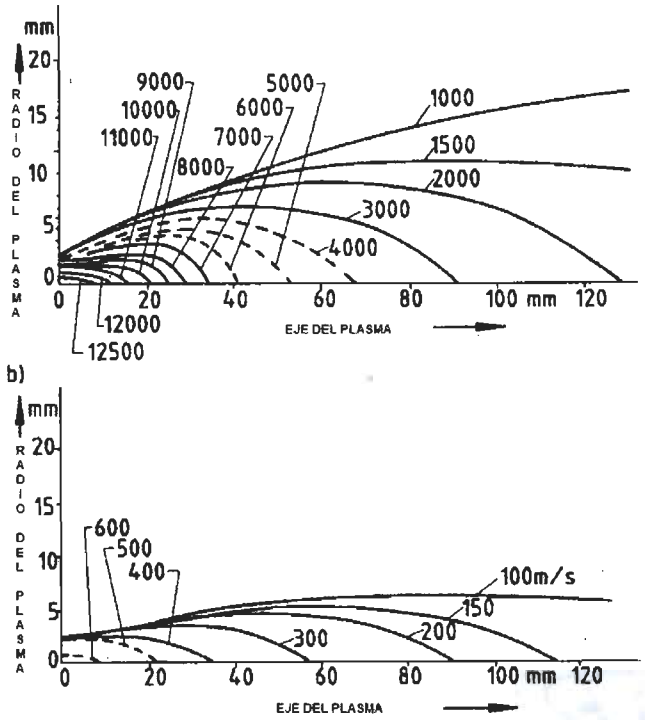


Figura 6.3.- Diagrama que muestra la relación entre la temperatura del plasma y la velocidad de partícula. [6]

6.2.4 INTERACCIÓN DE LAS PARTÍCULAS CON EL SUSTRATO

Cuando las partículas de polvo fundidas llegan al sustrato, colisionan con él; dicho sustrato debió de haber sido previamente sometido a un proceso de limpieza y de acabado superficial, que le confiera cierta rugosidad para que aumente la adhesión del recubrimiento.

Estas partículas se solidifican y van recubriendo todas las irregularidades del sustrato con el material proyectado (figura 6.4). Las partículas continúan llegando y acumulándose sobre el revestimiento en una razón que dependerá de la superficie a revestir y de la velocidad con que el cañón se mueva sobre dicha superficie.

Figura 6.4.- Formación de un recubrimiento mediante espreado térmico. [2]

6.2.5 PROTECCIÓN ATMOSFÉRICA.

La atmósfera en que se realice la deposición térmica, influirá en las propiedades que presente la capa depositada. De esta manera, existirán dos posibles métodos de proyección: proyección por plasma al aire libre y proyección por plasma al vacío.

En el caso de espreado térmico por plasma al aire (APS por sus siglas en inglés), el proceso de proyección se produce en condiciones atmosféricas ambientales. Debido al efecto protector del haz inerte del plasma, las posibilidades de reacción del polvo con el aire son bastante limitadas. Los polvos de metales reactivos o de aleaciones pueden oxidarse en la superficie. La elevada velocidad de solidificación y de enfriamiento da lugar a que las estructuras de las capas de plasma sean de un grano muy fino, presentando mayor resistencia al desgaste.

El método de espreado térmico al vacio (VPS por sus siglas en inglés), se emplea cuando se exige de las capas depositadas alta densidad y pureza, ausencia de óxidos y adherencia; en este caso la proyección se debe realizar en una cámara con atmósfera inerte. En la proyección por plasma en vacío, la presencia de argón evita la reacción no deseada entre la atmósfera y el haz de plasma, el material base o el material proyectado. El resultado son capas de mayor densidad, mejor adherencia y cohesión y estructura óptima.

6.2.6 MATERIALES DE APORTE Y MATERIALES BASE.

6.2.6.1 MATERIALES DE APORTE

Los materiales que reúnan los siguientes requisitos, pueden ser utilizados como recubrimientos para proyección por plasma:

- ✓ El material no debe sufrir transformaciones no deseadas al momento de su proyección (descomposición, sublimación, oxidación, etc.)

- ✓ El material de proyección debe estar fabricado en forma adecuada para obtener una inyección correcta, (tamaño, magnitud, distribución y forma de las partículas).

- ✓ Los materiales que actualmente se proyectan por medio de espreado térmico por plasma pueden clasificarse en los siguiente grupos:

  - Metales puros (Mo, Ti, Ni Ta, Al, Zn, etc.)
  - Aleaciones (NiCr, NiCrAlY, FeCrBSiC, aceros, bronces, etc.)
  - Pseudoaleaciones (Cu-W, bronce-acero, Al-Mo etc.)
  - **Cerámicas (Al_2O_3, Cr_2O_3, ZrO_2, TiO_2, WC etc.)**
  - Cermets (Cr_3C_2/NiCr, CW/Co, ZrO_2/NiAl ....)
  - Plásticos (poliéster, polietilenos, etc.)
  - Materiales biocompatibles (hidroxiapatita,)

Mediante la técnica de espreado térmico por plasma, se pueden obtener capas con cualidades extraordinarias, las cuales no se pueden conseguir con los procedimientos tradicionales de recubrimiento. Especialmente recubrimientos de óxidos cerámicos como Al_2O_3, los cuales gracias a sus altas propiedades de alta dureza, estabilidad química y característica refractaria son utilizados para resistir desgaste ocasionado por fricción y por erosión de partículas sólidas. [7]

6.2.6.1.1 LUBRICANTES SÓLIDOS

Los lubricantes sólidos son aquellos los cuales al aplicarlos sobre las superficies metálicas forman una delgada capa de lubricante de aspecto sólido (quedando la superficie metálica como si se le hubiera aplicado fina capa de pintura) que recubre el perfil de las rugosidades, rellenando una parte de los valles y dando lugar a un área real de soporte de carga equivalente al 40% del área real.

Estos lubricantes pertenecen al grupo de extrema presión y se consideran de segunda generación; su utilización es ideal en aquellos mecanismos que funcionan bajo condiciones de pare y arranque, porque en ese momento se presentan condiciones de película límite; el lubricante de película sólida elimina esta condición e impide que se presente el desgaste adhesivo.

CARACTERÍSTICAS DE LOS LUBRICANTES DE PELÍCULA SÓLIDA

- Elevado punto de fusión y alta estabilidad térmica.
- Película elástica y resistencia a la deformación plástica obteniendo por lo tanto un coeficiente de fricción bajo.
- Estructura laminar conformada por partículas sub-micrométricas, lo que permite una orientación en el sentido del movimiento del mecanismo.
- Bajo grado de dureza y solubilidad limitada.
- Gran adherencia a las superficies.
- Cualidades anti-corrosivas y buena estabilidad química.
- Recomendado para condiciones de altas temperaturas y elevadas presiones unitarias y donde es necesario evitar la corrosión por vibración.
- Soportan la presencia de gases, ácidos y disolventes.
- Aptos para lubricar aquellas superficies que deban hacer las veces de conductores de la electricidad.

Con la finalidad de aumentar el tiempo de vida de juntas sometidas a fricción y desgaste continuos de equipos mecánicos, es necesaria la disminución del coeficiente de fricción de la junta, la cual trae consigo la necesidad de utilizar materiales lubricantes, los cuales pueden ser líquidos o sólidos.

Los lubricantes líquidos no pueden ser utilizados bajo condiciones extremas de operación como: altas temperaturas, vacio, bajo condiciones de alta presión o ambientes agresivos, además de que se debe de tener un control sobre ellos y monitorear los niveles de lubricante ya que pueden disminuir; para el caso de utilización de lubricantes sólidos [7] (grafito, MoS_2, CaF_2) los problemas anteriormente mencionados pueden evitarse debido a que las partes que utilizan un lubricante sólido no necesitan de los cuidados o atención como las que utilizan lubricantes líquidos, lo que resulta importante cuando el equipo en funcionamiento es de difícil o limitado acceso, como el caso de las estaciones espaciales.

La distribución uniforme de un lubricante sólido sobre una matriz afecta sus propiedades tribológicas, lo que se relaciona con la formación de una capa superficial estable la cual se alcanza con la adición de una cantidad controlada de lubricante sólido[8] la adición de cantidades altas de lubricante sólido puede causar una disminución en las propiedades mecánicas y un incremento en el coeficiente de fricción.

En el caso de la aplicación de recubrimiento por la técnica de espreado térmico por plasma, son tres los tipos de lubricantes sólidos que pueden ser adicionados a la matriz del recubrimiento, con el objetivo de disminuir el coeficiente de fricción: Grafito, MoS_2, CaF_2.

El Grafito se obtiene a partir del grafito natural y en una pureza hasta del 99% en peso de carbono. Cuando se utiliza en suspensión coloidal el tamaño de la partícula debe ser menor de dos micras. El grafito es estable hasta temperaturas de 400°C, pero por encima de esta temperatura se combina con el oxígeno y produce anhídrido carbónico. En atmósferas inertes es estable hasta temperaturas entre 2.500 y 2.750°C; no es tóxico y resiste composiciones de halógenos y ácidos de azufre hasta temperaturas de 100°C. Generalmente se emplea mezclado en polvo como un lubricante adicional en aceites y grasas y se denominan lubricantes EP de segunda generación, presentan un excelente poder de deslizamiento y le confieren al mecanismo lubricado una capacidad adicional de soporte de carga.

El MoS_2 se obtiene a partir de la molibdenita, que contiene aproximadamente 0,4% de bisulfuro de molibdeno (MoS_2) puro. Si este material se somete a un proceso de lavado y trituración, se obtiene el MoS_2 con un 99,9% de pureza. El MoS_2 tiene una estructura laminar cristalina en forma de capas, en donde entre dos laminillas de azufre se encuentra una de molibdeno; cada laminilla es tan fina que aproximadamente 1.630 de ellas superpuestas alcanzan solamente un espesor de una micra.

Debido a su estructura molecular, el MoS_2 resiste altas presiones y se desplaza fácilmente en dirección paralela a la superficie sobre la cual es aplicado. Esta capacidad de desplazamiento interno, sumado a su excelente adhesividad hacia las superficies metálicas, da lugar a la superposición de las laminillas y a la formación de una extraordinaria película lubricante límite ó sólida. La explicación más aceptada de la forma como trabaja la película sólida de MoS_2, se deriva de la fuerte atracción conque los átomos de azufre son atraídos por las superficies metálicas y por la unión individual poco fuerte entre dichos átomos, lo que hace que la fricción entre dos superficies recubiertas con MoS_2 sea baja y se deslicen fácilmente.

El fluoruro de calcio (CaF_2) es utilizado como un reactivo químico y como un lubricante sólido. Es un material con una estructura no laminar similar a la del grafito y a la del bisulfuro de molibdeno.

El coeficiente de fricción y la rugosidad de la superficie dependen directamente del contenido de CaF_2, mientras que la microdureza se ve afectada por la distancia desde la pistola de plasma a la pieza de trabajo. [8]

6.2.6.2 MATERIAL BASE

Todos los metales y aleaciones pueden ser utilizados como metal base en la técnica de espreado térmico por plasma, destacando los siguientes:

- Todo tipo de aceros.
- Fundición gris y nodular.
- Aleaciones de Ni y Co.
- Metales ligeros y sus aleaciones, tales como aluminio, magnesio y titanio.
- Cobre y sus aleaciones.

6.2.7 CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES DE LAS PARTÍCULAS Y RECUBRIMIENTOS

6.2.7.1 GENERALIDADES

Cuando una gota de material fundido choca con el sustrato se aplasta sobre el mismo, actuando dicho sustrato como sumidero de calor; un frente de solidificación se extiende entonces hacia la parte externa de la capa formada, originándose una especie de montículo de material solidificado por el que fluye el resto del material hasta que todo el material se endurece, creando una protuberancia característica según se ve en la figura 6.5.

Las partículas sucesivas se unen entre sí de una forma mecánica. En ciertos revestimientos, el proceso de sinterización puede unificar el depósito. Durante la deposición del recubrimiento se originan muchas celdillas de aire atrapado, lo cual da lugar a recubrimientos con cierta porosidad.

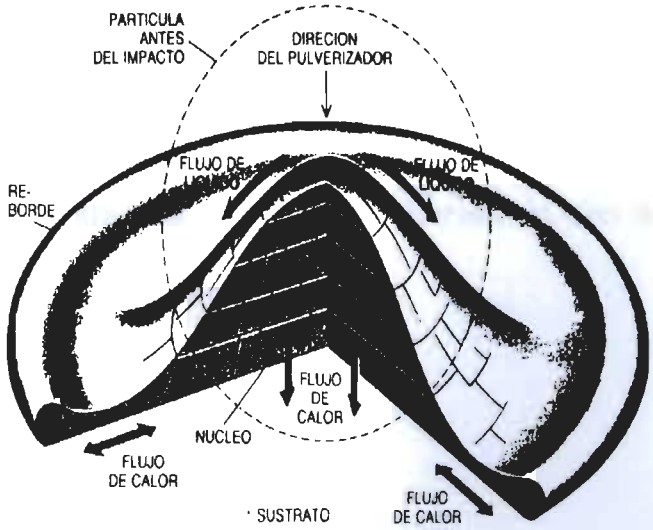


Figura 6.5.- Interacción de una partícula con el sustrato. [4]

Si la proyección se realiza al vacío, desaparece el principal causante de la porosidad, el aire, siendo la velocidad de las partículas más elevada, lo cual originará depósitos más lisos, densos y libres de poros.

6.2.7.2 ANCLAJE AL SUSTRATO

Los mecanismos de adhesión pueden ser clasificados en tres principales categorías:

Unión mecánica: una partícula fundida golpea contra una superficie rugosa, donde el entrelazamiento mecánico entre las asperezas del depósito y del sustrato conducirán a una adherencia mecánica.

Unión metalúrgica: consecuencia de la formación de una zona de interdifusión o un compuesto intermedio entre el material proyectado y el sustrato.

Unión física: debida a la acción de las fuerzas de Van der Waals entre depósito y sustrato.

6.2.7.3 PROCESO DE GRANALLADO.

El granallado es una técnica de tratamiento de limpieza superficial por impacto, mediante la cual se puede lograr un excelente grado de limpieza y simultáneamente un correcto acabado superficial.

En líneas generales, es utilizado para:

- Limpieza de piezas de fundición ferrosas y no ferrosas, piezas forjadas, etc.
- Decapado mecánico de alambres, barras, chapas, etc.
- Shot Peenning (aumenta la resistencia a la fatiga de resortes, elásticos, engranajes, etc.).
- Limpieza y preparación de superficies, donde serán aplicados revestimientos posteriores (pintura, cauchos, etc.).

En general se puede decir que el granallado es el bombardeo de partículas abrasivas (granalla) a gran velocidad (65 - 110 m/s), que al impactar con la pieza tratada, produce la eliminación de los contaminantes de la superficie.

6.2.7.3.1 GRANALLA

La granalla de acero es un abrasivo utilizado en numerosas aplicaciones como el tratamiento de superficies por granallado y el aserrado de bloques de granito. Se presenta en forma de partículas redondas o angulares; su composición química cuenta con un alto porcentaje de carbono y la gama de dimensiones está comprendida entre 0,1 y 8 mm.

Se obtiene por atomización de acero líquido, seguido de una serie de tratamientos térmicos y mecánicos que le confieren características técnicas que se adaptan a las necesidades de los utilizadores; generalmente los perdigones se tratan térmicamente mediante un proceso de revenido y templado para quitar la vasta estructura martensítica obtenida de la atomización sobre agua.

La granalla se fabrica mediante la fusión de chatarra, cuidadosamente seleccionada en su calidad y sometida a un control de detección de radioactividad. La fusión se realiza en hornos eléctricos. La composición química del acero líquido se analiza por espectrometría óptica. Durante la atomización, el caldo metálico se transforma en las partículas de granalla. El tamaño de las partículas de granalla y su forma física son exhaustivamente controlados.

6.2.7.4 TEMPERATURA DEL SUSTRATO

El precalentamiento del material base antes de la deposición, provocará una solidificación más lenta y por tanto una reducción de la tensión residual que puede originarse entre el sustrato y el recubrimiento.

6.2.7.5 POST PROCESADO DEL RECUBRIMIENTO

El post procesado del recubrimiento proyectado por plasma se usa en ciertas aplicaciones para mejorar las características del depósito. El acabado, la textura, la densidad y la composición, son propiedades que pueden ser modificadas según la función del recubrimiento.

La operación más efectuada es la densificación del recubrimiento mediante los métodos de fusión del recubrimiento, empleando lásers [10],[11] haz de electrones, plasma jets o llamas.

El acabado superficial de los recubrimientos proyectados térmicamente posee alta rugosidad (alrededor de las 10μm), haciéndose necesaria la mecanización para producir acabados aceptables.

Algunos recubrimientos porosos son densificados al ser infiltrados con metales líquidos, epoxis u otros polímeros, que producen el sellado de los poros del recubrimiento. En otros casos se han empleado recubrimientos de difusión, que han incrementado la protección contra la corrosión de muchos recubrimientos proyectados térmicamente, añadiendo elementos tales como el cromo o el aluminio a la superficie del recubrimiento.

7.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Con la finalidad de evaluar la resistencia al desgaste de cinco recubrimientos cerámicos aplicados mediante espreado térmico por plasma, así como la influencia de la adición de lubricante sólido MoS_2 sobre su resistencia al desgaste se realizó el presente desarrollo experimental.

7.1 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

El diseño de experimentos consta de dos etapas básicas:

- **Etapa 1:** Aplicación de recubrimientos y evaluación metalográfica.
- **Etapa 2:** Evaluación de propiedades de resistencia al desgaste

7.1.1 ETAPA 1: APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS Y EVALUACIÓN METALOGRÁFICA.

En esta primer etapa se aplicaron por el método de espreado térmico por plasma los recubrimientos cerámicos mencioandos en la Tabla 7.1, con una repetitividad de 3 probetas. Los recubrimientos fueron depositados sobre una placa ASTM 1018 de acero al carbono de 3/8" de espesor sin pre calentamiento.

Posteriormente las muestras fueron cortadas y preparadas para su evaluación metalográfica.

Tabla 7.1.- Tipos de recubrimientos a utilizar durante la primera etapa.

Tipo de recubrimiento	Carburo de Cromo (A)	Zirconia (B)	Alúmina (C)	Carburo de tungsteno (D)	Oxido de Cromo (E)
No de Probeta					
1	1.A	1.B	1.C	1.D	1.E
2	2.A	2.B	2.C	2.D	2.E
3	3.A	3.B	3.C	3.D	3.E

7.1.2 ETAPA 2: EVALUACIÓN DE PROPIEDADES DE RESISTENCIA AL DESGASTE

Una ves aplicados los recubrimientos y caracterizados metalográficamente se procedió a evaluar sus propiedades de resistencia al desgaste. Previo a la evaluación se aplicó MoS_2 en aerosol sobre las probetas recubiertas con la finalidad de evaluar el efecto de éste sobre las propiedades de resistencia al desgaste respecto a las probetas sin recubrir.

Las pruebas de desgaste se realizarón en el equipo automatizado para pulido de metalografías marca Allied, modelo Dual Prep B. Controlando parámetros como tiempo, fuerza y revoluciones por minuto.

Las pruebas se realizaron a 15 probetas con MoS_2 y 15 sin MoS_2.

Al haber finalizado la segunda etapa se procedió a la selección del mejor recubrimiento cerámico siendo evaluadas las siguientes características para la toma de decisión:

- Mejor resistencia al desgaste.
- Viabilidad económica.

7.2 EXPERIMENTACIÓN

7.2.1 APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS Y EVALUACIÓN METALOGRÁFICA

7.2.1.1 IDENTIFICACIÓN DEL METAL BASE

En la figura 7.1 se muestra una imagen del conjunto camisa-pistón de la bomba de lodos. En la imagen 7.1.a, se observa el pistón con el sello de nitrilo. La figura 7.1.b muestra la camisa con un enchaquetado interno de diferente material, además que se indica el lugar donde serán aplicados los recubrimientos cerámicos.

Con la finalidad de indentificar los materiales que componen la camisa, se realizó un análisis químico mediante fluorescencia de rayos X sobre la parte interna y externa. Los resultados obtenidos confirman que la parte interna de la camisa es de un material conocido como Ni-Hard clase 3, mientras que la parte externa es de acero al carbono 1016.

Figura 7.1.- Sello y pistón de bombas de lodos.

7.2.1.2 PREPARACIÓN DEL METAL BASE.

Previo a la aplicación de los recubrimientos, fue necesario realizar un proceso de granallado para limpieza y acondicionamiento del metal base, con la finalidad de lograr una óptima rugosidad y obtener un anclaje apropiado mecánico al momento de aplicar los recubrimientos.

El proceso de granallado se llevó a cabo dentro de las instalaciones de COMIMSA. Se utilizó una granalla angular de malla No. 10. De aproximadamente 2 mm de diámetro.

Después del acondicionamiento superficial del sustrato mediante granallado, se procedió a medir la rugosidad obtenida por medio de un rugosímetro. Las figuras 7.2 y 7.3 muestran la placa granallada y el rugosímetro así como el proceso de medición de rugosidad. Se realizaron 5 mediciones a lo largo de la placa granallada obteniendo un valor promedio de rugosidad de 159 μ/in.

Figura 7.2.- Placa granallada y rugosímetro.

Figura 7.3.- Proceso de medición de rugosidad.

7.2.1.3 APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS POR PLASMA.

Mediante la técnica de espreado térmico por plasma, se aplicaron cinco recubrimientos cerámicos sobre una placa de acero AISI 1018. La figura 7.2 muestra la placa sustrato previo a la aplicación del recubrimiento como se muestra en la figura 7.2.

Figura 7.2.- Placa de acero ASTM 1018 como material de sustrato

Se utilizaron polvos comerciales con las características presentadas en la tabla 7.2 La figura 7.3 muestra la presentación comercial de los recubrimientos cerámicos.

Tabla 7.2 Características de los polvos cerámicos.[9]

Polvo Característica	**Cr_2O_3**	**CW**	**Zr**	**Al_2O_3**	**CrC**
Composición química	SiO_2 (5%) TiO_2 (3%) Cr_2O_3 (Resto)	Co (12%) C (4%) Fe (1%) W (Resto)	Y_2O_3 (7-9%) ZrO_2 (Resto)	99.5% Polvo blanco	Ni (50%) Cr (50%)
Tamaño de partícula	-270 malla + 11 micrones	-200 + 325 malla	-140 + 325 malla	325 malla	-270 malla
Temperatura de fusión	2435°C	Arriba de 1260°C	2691°C	2072°C	1890°C
Densidad	1.4 gr/cm^3	12.3 gr/cm^3	2.27 gr/cm^3	3.86 gr/cm^3	6.68 gr/cm^3
Dureza	69-75 RC	40 RC	30-40 RC	9 Mohs Hardness @ 20°C	1300Kg/Mm^2 Mohs Hardness @ 20°C

Figura 7.3.- Polvos cerámicos

La aplicación de los recubrimientos cerámicos se llevo a cabo en un equipo de espreado térmico por plasma marca Miller Thermal modelo 3600. En la figura 7.4 se presenta una vista del equipo de plasma utilizado y en la figura 7.5 las placas de acero con los recubrimientos aplicados.

Figura 7.4.- Equipo de plasma

Figura 7.5.- Recubrimientos cerámicos aplicados a las probetas

Los parámetros que se utilizaron para la aplicación de los diferentes tipos de recubrimientos cerámicos se muestran en la tabla 7.3.

Tabla 7.3.- Parámetros involucrados en el depósito de los recubrimientos cerámicos

Tipo de recubrimiento	Presión de gases (psi)		Voltaje (Volts)	Amperaje (Amperes)
	ARC GAS (Argón)	AUX GAS (Helio)		
Zirconia	50	60	40	800
Alúmina	50	100	40	500
Carburo de Tungsteno	50	100	45	900
Carburo de Cromo	50	100	40	500
Óxido de Cromo	50	75	40	500

Después de haber sido aplicados los recubrimientos cerámicos fueron cortados y montados para realizar pruebas metalográficas, evaluando su micro estructura y los espesores de las capas depositadas.

Es importante mencionar que existen en todos los casos diferencias significativas en el espesor de la capa a lo largo de todo el recubrimiento aplicado, esto se debe a que la aplicación de las capas superficiales es totalmente manual y depende al 100% de las habilidades del operador del equipo.

7.2.1.4 CARACTERIZACIÓN DE RECUBRIMIENTOS

MICROSCOPIA ÓPTICA

Con la finalidad de evaluar los recubrimientos cerámicos aplicados se realizaron los procesos de corte y montaje transversal de las probetas, así como la preparación metalográfica de las mismas. Para la evaluación del espesor de las capas se utilizó un microscopio óptico mediante el software Pro Plus.

En las Tablas de la 7.3 a la 7.7, se presentan los valores mínimos y máximos y la diferencia entre estos obtenidos al realizar las mediciones de los espesores de las capas aplicadas.

Tabla 7.4.- - Rango de espesores reportados en el microscopio para la capa de CrC.

Probeta	Espesor de recubrimientos	
	Altos (µm)	**Bajos (µm)**
Carburo de Cromo (CrC)	**366.29**	243.58
	329.66	296.70
	386.43	305.85
	419.45	294.86
Mínimo / Máximo	**419.45**	**243.58**
Diferencia	175.87 micras = 0.00692 "	

Tabla 7.5.- Rango de espesores reportados en el microscopio para la capa de WC.

Probeta	Espesor de recubrimientos	
	Altos (µm)	**Bajos (µm)**
Carburo de Tungsteno (WC)	382.77	294.86
	419.40	325.99
	461.54	313.17
	470.68	324.14
Mínimo / Máximo	**470.68**	**294.86**
Diferencia	175.82 micras = 0.00692 "	

Tabla 7.6.- Rango de espesores reportados en el microscopio para la capa de Cr_2O_3.

Probeta	Espesor de recubrimientos	
	Altos (µm)	**Bajos (µm)**
Óxido de Cromo (Cr_2O_3)	241.75	194.13
	214.28	223.43
	239.92	201.45
	298.52	232.59
Mínimo / Máximo	**298.52**	**194.13**
Diferencia	104.39 micras = 0.00410 "	

Tabla 7.7.- Rango de espesores reportados en el microscopio para la capa de Al_2O_3.

Probeta	Espesor de recubrimientos	
	Altos (µm)	Bajos (µm)
Óxido de Aluminio (Al_2O_3)	401.08	369.95
	483.50	375.44
	496.32	362.62
	465.18	360.80
Mínimo / Máximo	**496.32**	**360.80**
Diferencia	135.52 micras = 0.00533 "	

Tabla 7.8.- Rango de espesores reportados en el microscopio para la capa de Zr.

Probeta	Espesor de recubrimientos	
	Altos (µm)	Bajos (µm)
Zirconia (Zr)	239.92	206.95
	280.21	175.81
	258.24	133.69
	254.57	148.37
Mínimo / Máximo	**280.21**	**133.69**
Diferencia	146.52 micras = 0.00576 "	

La tabla 7.9 muestra el resumen de los espesores máximos y mínimos obtenidos mediante microscopía óptica.

Tabla 7.9.- Tabla que muestra los puntos máximos y mínimos en los espesores.

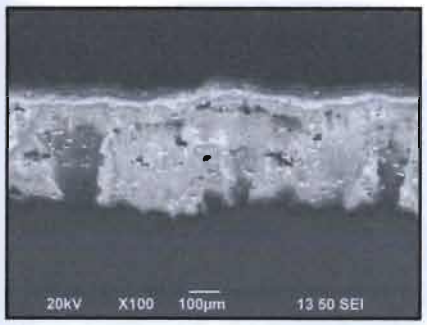
Recubrimiento	Máximo milésimas	Mínimo milésimas	Diferencia milésimas
Carburo de Cromo	16.5	9.6	6.9
Carburo de Tungsteno	18.5	11.6	6.9
Óxido de Cromo	11.7	7.6	4.1
Alúmina	19.5	14.2	5.3
Zirconia	11.0	5.3	5.8

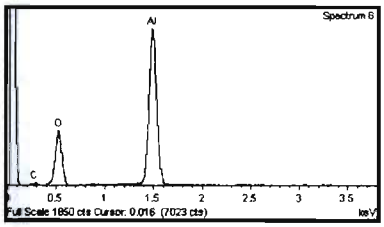
ANÁLISIS MEDIANTE MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.

Con la finalidad de evaluar las características químicas y físicas de los recubrimientos aplicados, se realizó el análisis transversal mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) utilizando espectroscopía de energía dispersiva (EDS) como técnica para análisis químico cualitativo.

A continuación se presentan los resultados de la evaluación para cada recubrimiento aplicado.

- **Alúmina**

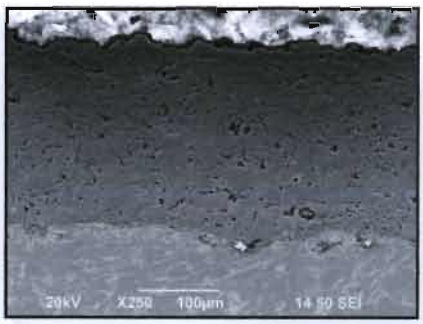


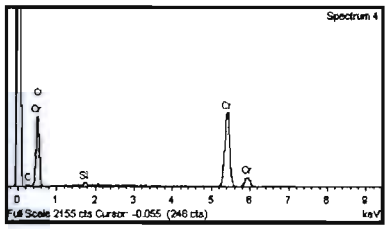


Elemento	% en peso
C	9.28
O	50.34
Al	40.38

Figura 7.6.- Micrografía y espectro EDSX de Al_2O_3.

- **Óxido de Cromo**

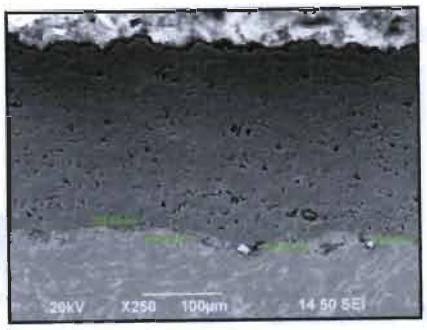


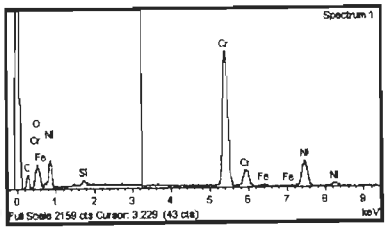


Elemento	% en peso
C	4.10
O	35.74
Si	0.67
Cr	59.48

Figura 7.7.- Micrografía y espectro EDSX de Cr_2O_3.

- **Carburo de Cromo**

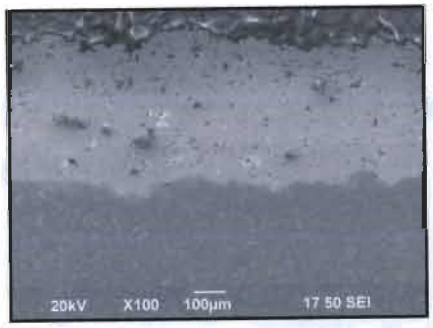


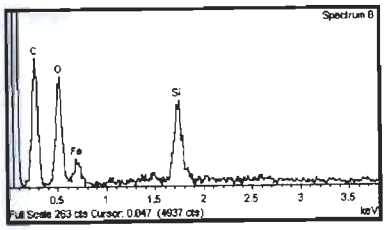


Elemento	% en peso
C	15.72
O	4.73
Ni	22.65
Cr	55.34

Figura 7.8.- Micrografía y espectro EDSX de CrC.

- **Carburo de Tungsteno**

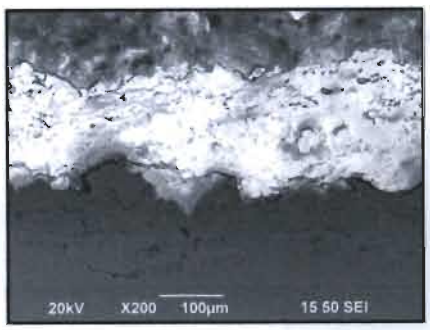


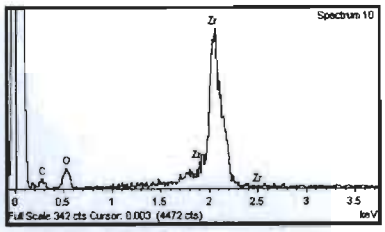


Elemento	% en peso
C	14.17
O	5.01
Ni	21.03
W	46.21

Figura 7.9.- Micrografía y espectro EDSX de WC

- **Zirconia + Cama de Níquel**





Elemento	% en peso
C	23.01
O	24.76
Zr	52.23

Figura 7.10.- Micrografía y microanálisis de Zr.

7.2.2 EVALUACIÓN DE PROPIEDADES DE RESISTENCIA AL DESGASTE.

Después de realizar el análisis físico-químico de los recubrimientos mediante microscopía electrónica de barrido, se procedió a realizar la evaluación de la resistencia al desgaste.

Para realizar esta prueba las probetas fueron montadas en baquelita y fueron colocadas en un porta muestras como se muestra en la Figura 7.11.

Figura 7.11.- Carrusel porta muestras para pruebas de desgaste.

En seguida que las muestras fueron colocadas en el carrusel, éste se colocó en la máquina pulidora (ver figura 7.12) para comenzar la prueba.

Figura 7.12.- Máquina pulidora automatizada.

Para realizar las pruebas de desgaste se fijaron los siguientes parámetros en la máquina:

- **Lija de Carburo de Silicio No:** 80
- **RPM:** 300
- **Tiempo:** 5 minutos
- **Fuerza:** 43 Newtons (4.38 Kg)

8.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

A continuación se presentan los resultados obtenidos posteriores a las pruebas de desgaste. Se compara el grado de desgaste (por pérdida en dimensiones). De los cinco recubrimientos analizados con y sin la aplicación de MoS_2 en spray como agente lubricante sólido. (Todas las pruebas fueron realizadas e con la finalidad de asegurar la repetitividad del proceso). Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 7.13

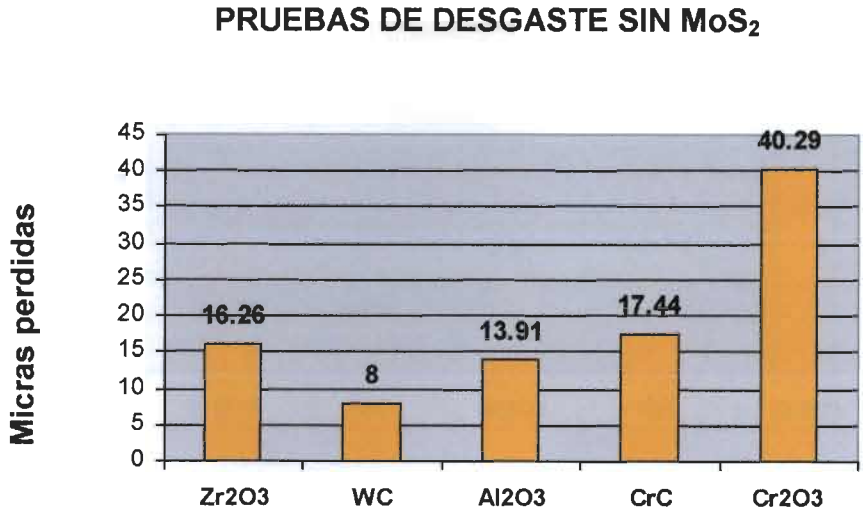


Figura 7.13.- Diferencia de pérdida en medidas (micras) de recubrimientos sin MoS_2. Pruebas realizadas en equipo automatizado para pulido de metalografías marca Allied, modelo Dual Prep B.

La figura 7.13 muestra los resultados de las pruebas de desgaste (pérdida de dimensiones del recubrimiento) como una función del tipo de recubrimiento. Como se puede observar el recubrimiento que presentó menor grado de desgaste fue el Carburo de Tungsteno (WC) con una pérdida de 8 micras, seguido por Alúmina, Zirconia, Carburo de Cromo y Óxido de Cromo con 13.91, 16.26, 16.39 y 40.29 µm perdidas respectivamente.

Después de haber realizado esta prueba de desgaste y haber analizado los resultados, se procedió a realizar la misma prueba solo que esta vez se añadió Bisulfuro de Molibdeno en aerosol (MoS_2) como lubricante sólido a las probetas.

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 7.14

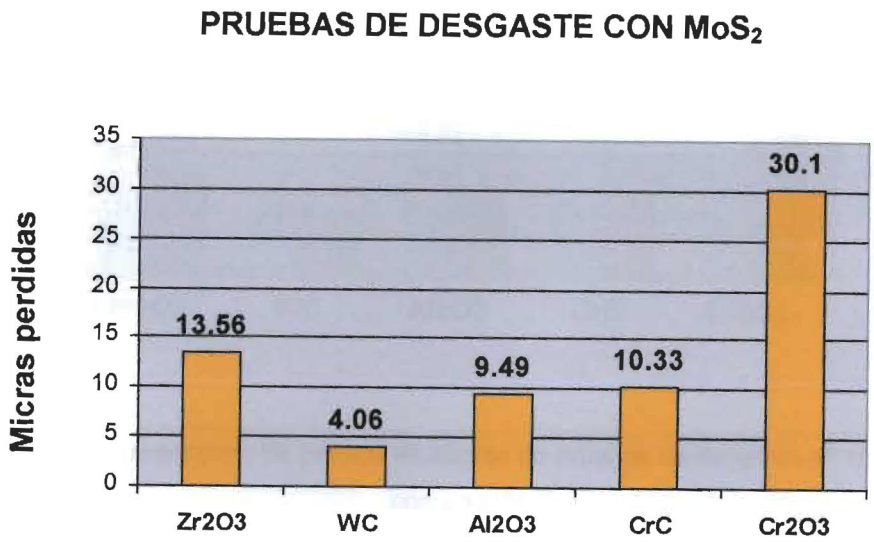


Figura 7.14.- Diferencia de pérdida en medidas (micras) de recubrimientos con MoS_2 pruebas realizadas en equipo automatizado para pulido de metalografías marca Allied, modelo Dual Prep B.

En el caso de las muestras con MoS_2, se puede observar que el recubrimiento con menor pérdida en dimensiones sigue siendo el Carburo de Tungsteno con 4.06 µm, seguido por Alúmina, Carburo de Cromo, Zirconia y Óxido de Cromo con, 9.49 µm, 10.33 µm, 13.56 µm y 30.1 µm de desgaste respectivamente.

La figura 7.15 muestra un comparativo de los resultados obtenidos en ambas pruebas de desgaste (con y sin bisulfuro de molibdeno). La serie 1 dentro de la gráfica corresponde a los recubrimientos sin bisulfuro de molibdeno y la serie 2 a los recubrimientos con adición de MoS_2.

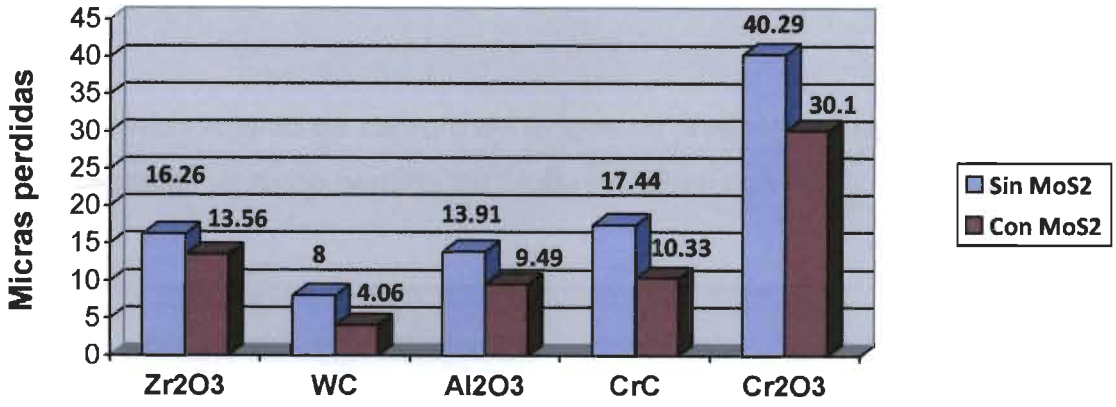


Figura 7.15.- Comparativo de pérdida en micras en pruebas de desgaste en recubrimientos con y sin MoS_2

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede determinar qué la adición de MoS_2 disminuye el grado de desgaste en un 49% para el Carburo de Tungsteno, para la Alúmina, Zirconia, Carburo de Cromo y Óxido de cromo disminuye en un 31%,16%, 40% y 25% respectivamente.

CONCLUSIONES

Después del análisis realizado a cinco recubrimientos cerámicos aplicados mediante la técnica de espreado térmico por plasma, se puede concluir y recomendar lo siguiente:

- El recubrimiento de carburo de tungsteno presenta el menor grado de desgaste. 8μm de perdida sin MoS_2 y 4.06μm con MoS_2

- El bisulfuro de molibdeno (lubricante sólido) disminuyó considerablemente el desgaste de los recubrimientos. El WC con la adición de MoS_2 disminuyó en un 49%, para la Alúmina, Zirconia, Carburo de Cromo y Óxido de cromo disminuyó en un 31%,16%, 40% y 25% respectivamente.

- Los mejores resultados se obtuvieron con la combinación de Carburo de Tungsteno con adición de lubricante sólido MoS_2

RECOMENDACIONES.

- Realizar pruebas "en campo" para el conjunto camisa- piston con MoS_2 (en las bombas de lodos con un prototipo)
- Analizar el efecto de la adición de otro tipo de lubricantes (CaF2, grafito) sobre las propiedades de resistencia la desgaste del recubrimiento.
- Estudiar el sello de nitrilo del pistón y buscar optimizar su resistencia al desgaste.
- Hacer una relación de costo – beneficio de los diferentes recubrimientos aplicados en las pruebas.

9.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Análisis comparativo de diferentes recubrimientos sobre aluminio. Nancy Quarantaa, Marta Caligarisa, Graciela Mansillaa y Fernando Palmieria. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional San Nicolás. Argentina.

[2] Microstructure and mechanical properties of Al_2O_3–Al composite coatings deposited by plasma spraying. Hijian Yin, Shunyan Tao, Xiaming Zhou , Chuanxian Ding. Laboratory of inorganic coating materials, Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences.

[3] Plasma spraying of alloys and ceramics. Scandinavian Journal of Metallurgy. Kvernes I, Espeland M. and Norhom O. Vol 17. 1988. Pp 8-16.

[4] Coating properties and characteristics optimization of the operation of a plasma generator for thermal spraying. Ducos M. and Reitz V. International Thermal Spraying Conference. Montreal, Canada. September 1986. Pp 8-12.

[5] Plasma deposited laser remelted wear resistant layers. Mordike, B. L and Karhmann, W. N. Advances in thermal spraying. Proceeding of the Eleventh International Thermal Spraying Conference.

[6] Influence of the percentage of hydrogen and of the size and injection velocity distributions on the momentum and heat transfer between plasma jet and ceramic powders during plasma spraying process. Vardelle M. and Fauchais, P.

[7] Plasma-sprayed coatings treated with lasers: tribological behavior of Cr_2O_3. Cuetos, J.E. Fernández. Rico, R. Vijande, A. Rincón. Wear, Vol 169. Noviembre 1993. Pp 173-179.

[8]. ASM Metals Hanbook. Volume 6. Welding, brazing and soldering

[9] Plasma sprayed composite coatings with reduced friction coefficient. Wojciech Śórawski, Rafał Chatys, Norbert Radek, Joanna Borowiecka-Jamrozek. Kielce University of Technology, Faculty of Mechatronics and Machines Building, al. Tysiąclecia państwa polskiego 7, 25-314 Kielce, Poland.

[10] High-temperature evaluation of solid lubricant coatings in a foil thrust bearing. Christopher E. Fanning, Thierry A. Blanchet. Rensselaer Polytechnic Institute, Department of Mechanical, Aerospace and Nuclear Engineering, Troy, Ny 12180, United States.

[11] Tribological properties of plasma sprayed Al/Al_2O_3 composite coatings Zhijian Yin, Shunyan Tao , Xiaming Zhoua, Chuanxian Ding. Laboratory of inorganic coating materials, Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences.