

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**“EVALUACIÓN DEL DESGASTE POR DESLIZAMIENTO Y
PROPIEDADES MECÁNICAS EN MATERIALES
UTILIZADOS PARA LA FABRICACIÓN DE
COMPRESORES RECIPROCANTES”**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los Bachilleres

Da Silva F. Domingo R.

Hoyer R. Rafael E.

Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2009

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

“EVALUACIÓN DEL DESGASTE POR DESLIZAMIENTO Y PROPIEDADES MECÁNICAS EN MATERIALES UTILIZADOS PARA LA FABRICACIÓN DE COMPRESORES RECIPROCANTES”

Tutor Académico: Prof. María Rodríguez de Prato.

Tutor Industrial: Ing. Andrea Scagni.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Bachilleres
Da Silva F. Domingo R.
Hoyer R. Rafael E.
Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2009



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA DE PRODUCCION



Caracas, 12 de mayo de 2.009

ACTA

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

DOMINGO DA SILVA y RAFAEL HOYER

Titulado:

“EVALUACIÓN DEL DESGASTE POR DESLIZAMIENTO Y PROPIEDADES MECÁNICAS EN MATERIALES UTILIZADOS PARA LA FABRICACIÓN DE COMPRESORES RECIPROCANTES”

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


Prof. Andrea Scagni
Jurado




Prof. Crisanto Villalobos
Jurado


Prof. María de los A. Rodríguez
Tutora



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA DE PRODUCCION



Caracas, 12 de mayo de 2.009

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

Presente.-

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

DOMINGO DA SILVA
C.I.V.- 13.600.272

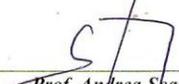
RAFAEL HOYER
C.I.V.- 15.178.688

“MENCION HONORÍFICA”

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

“EVALUACIÓN DEL DESGASTE POR DESLIZAMIENTO Y PROPIEDADES MECÁNICAS EN MATERIALES UTILIZADOS PARA LA FABRICACIÓN DE COMPRESORES RECÍPROCANTES”

Sin otro particular a que hacer referencia, quedamos de usted,


Prof. Andrea Scagni
Jurado




Prof. María de los A. Rodríguez
Tutora


Prof. Crisanto Villalobos
Jurado

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

DEDICATORIA

A Dios y mi virgen, por hacerlo todo posible y por permitirme llegar tan lejos como he querido.

A mi mamá y a mi papá, por el apoyo a lo largo de mi vida, ya que nada me ha faltado gracias a ellos. Estoy sumamente agradecido de tenerlos como padres.

A mi Hermano y hermana, gracias por el apoyo y ser parte de mi inspiración a lo largo de mi vida.

A todas las personas que he conocido a lo largo de este trayecto y que me han ayudado a ser la persona que soy hoy.

Domingo Da Silva.

A mi mamá y a mi papá, por brindarme todas las oportunidades y confiar en mí.

A mis hermanes, por ser el apoyo en todo momento.

A Andreina, quién tuvo la paciencia durante estos años y me guió en este trayecto.

A mi abuelo, gracias por enseñarme!

Para todas aquellas personas que siempre me han apoyado.

Rafael Hoyer.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por habernos permitido alcanzar esta meta.

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

A nuestros padres Gilda, Domingo, Eglé y Eddy, por orientarnos y brindarnos su apoyo y cariño en todo momento y en todos los aspectos de nuestras vidas.

A nuestra tutora Angie Prato, por ser nuestra guía y apoyo para sacar adelante este trabajo.

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

Al personal de Plasmatec Ingenieros, por su colaboración y espíritu de trabajo hicieron que nuestro trabajo en la empresa fuera una tarea más sencilla.

Al Prof. Esteban, Gustavo, Jesús y demás personal del IUT, por la disposición y colaboración brindada para la realización de nuestro trabajo.

A mi compañero de tesis, Rafael.

Gracias por haber compartido conmigo la realización de este y muchos otros trabajos a lo largo de la carrera, y espero que nuestra amistad continúe.

A mi compañero Domingo, quién estuvo en todo momento brindando su apoyo para salir adelante durante este trayecto.

A nuestros amigos incondicionales: Helgar, Renzo, Tomas, Ana, Ernesto, Eduardo, Fabián, Carlos, Víctor, Fernando, quienes de una u otra forma nos demostraron cada día su aprecio e hicieron de nuestra estadía en la universidad una experiencia única.

Domingo Da Silva.

Rafael Hoyer.

Da Silva F., Domingo R. y Hoyer R., Rafael E.

**EVALUACIÓN DEL DESGASTE POR DESLIZAMIENTO Y
PROPIEDADES MECANICAS EN MATERIALES
UTILIZADOS PARA LA FABRICACIÓN DE
COMPRESORES RECIPROCANTES**

**Tutor Académico: Prof. María Rodríguez de Prato. Caracas, U. C. V.
Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica. Año 2009, 107pp.**

Palabras Claves: Rociado Térmico Por Plasma, Recubrimiento Base Mo-Ni, Desgaste Deslizante, Lubricación, Tratamiento Térmico.

Se evalúa y comparan el comportamiento ante el desgaste por deslizamiento de la fundición gris y un recubrimiento base molibdeno depositado por la técnica de rociado térmico por plasma y como contraparte se utilizo nylon 6, basándose en el ensayo de desgaste con la configuración bloque sobre anillo según la norma ASTM G77. Se empleo el diseño experimental factorial 4^2 con la finalidad de evaluar el comportamiento de ambos materiales, ante distintas variaciones de carga y velocidad, para obtener las condiciones mas desfavorables para cada material evaluado. Se realizaron dos tratamientos térmicos diferentes a los recubrimientos, el primero en un horno de atmosfera controlada de argón a una temperatura de 600°C , el segundo mediante la exposición directa del recubrimiento a una llama oxiacetilénica a una temperatura de 600°C . Estos recubrimientos fueron evaluados con las condiciones más desfavorables de carga y velocidad determinadas anteriormente. Seguidamente se realizaron estudios de dureza, microscopía

electrónica de barrido para la mejor y peor condición arrojada por los ensayos de desgaste, evaluando la microestructura, composición química, porosidad y mecanismos de desgaste presentes en la superficie del material ensayado.

Se determinó que la aplicación de los tratamientos térmicos posteriores en los recubrimientos en base molibdeno, mejora en manera significativa el comportamiento ante el desgaste de los mismos, superando incluso a la fundición gris. Igualmente se determinó que el modo de desgaste en el recubrimiento se debe a un proceso de abrasión de tres cuerpos debido al desprendimiento de la fase dura del mismo. Y el modo de desgaste para la fundición gris se debe a la pérdida de una de las láminas de grafito. Se encontró adicionalmente que no existe correlación entre la dureza y la respuesta ante el desgaste en los recubrimientos evaluados.

Da Silva F., Domingo R. y Hoyer R., Rafael E.

**EVALUATION OF SLIDING WEAR AND MECHANICAL
PROPERTIES IN MATERIALS USED FOR THE
MANUFACTURE OF RECIPROCATING COMPRESSORS**

Academic Tutor: Prof. María Rodríguez de Prato. Caracas, U. C. V.

Faculty of Engineering, School of Mechanical Engineering. Year 2009,

107pp.

Key Words: Thermal Plasma Spraying, Base Coating Mo-Ni, Sliding Wear, Lubrication, Heat Treatment.

We evaluate and compare the sliding wear behavior of cast iron and a molybdenum-based coating deposited by the technique of thermal plasma

spraying and as counterpart Nylon 6, based on testing of sliding wear with the block on ring configuration according to the ASTM G77. Using a 4^2 factorial experimental design to evaluate the behavior of both materials, with different variations of load and linear speed, to get the most unfavorable conditions for each material evaluated. There were two different heat treatments on the coating, the first in a controlled furnace atmosphere of argon at a temperature of 600°C , the second by direct exposure to a coating oxiacetilénica flame at a temperature of 600°C . These coatings were evaluated with the most unfavorable conditions of load and speed previously identified. Then studies of hardness, scanning electron microscopy, for better and worse thrown by the wear test, evaluating the microstructure, chemical composition, porosity and wear mechanisms on the surface of the material tested.

It was determined that the application of heat treatments subsequent coatings based on molybdenum, a significant improvement in behavior to wear them, surpassing even the cast iron. We also found that the mode of wear of the coating is a process of three-body abrasion due to the release of the last phase of it. And the way to wear the cast iron is due to the loss of one of the layers of graphite. We found additionally that there is no correlation between hardness and wear in response to the coatings evaluated.

INTRODUCCIÓN

Los procesos industriales dependen de elementos mecánicos que sean capaces de cumplir y soportar las condiciones de operación, en todos los casos el desgaste siempre está presente. El desgaste se hace inevitable siempre que existan cuerpos sólidos en contacto y limita la vida útil de éstos, por ésta razón se requiere estudiar las superficies de los cuerpos que estarán en contacto, es conocido que muchas de las fallas de los componentes mecánicos se originan en las superficies de éstos. Por estos motivos se ha incrementado el estudio de las superficies, incluso éstas se han sometido a distintos tratamientos y recubrimientos superficiales con la finalidad de modificar las propiedades mecánicas para adaptar el comportamiento superficial a los requerimientos del proceso.

Cuando los elementos mecánicos se desgastan, se generan gastos por mantenimiento, menor rendimiento de los mismos y disminución de la eficiencia del proceso. Por estos motivos, entre otros, se requiere de materiales que brinden gran resistencia ante el desgaste y ofrezcan un buen comportamiento.

En la industria petrolera los compresores reciprocantes juegan un rol de gran importancia, pues son estos los encargados de la reinyección de gas a los pozos de petróleo, el desgaste que tiene lugar en sus partes incrementa el número de paradas de procesos y los costos de producción.

Mediante la técnica del rociado térmico por plasma y el estudio del comportamiento tribológico de los materiales que conforman a estas máquinas térmicas se ha buscado dar solución a este problema de desgaste.

El desarrollo tecnológico que a tenido lugar en los últimos años a permitido crear nuevas aleaciones y nuevos materiales (polímeros) capaces de sustituir a los de fabricación original, estos desarrollos permiten la recuperación de los elementos mecánicos a través de procesos, tal como, el rociado térmico por plasma. En este sentido, los recubrimientos que pueden ser depositados a través de un proceso de rociado térmico por plasma van desde metales, cerámicos, plásticos o polímeros, hasta cualquier combinación que se necesite para obtener un amplio rango de características físicas. El molibdeno es un de los materiales metálicos capaz de ser rociado por éste proceso. Los recubrimientos base molibdeno son usados extensamente en aplicaciones industriales para combatir la degradación de los componentes.

El rociado térmico se ha convertido en una técnica muy importante de deposición de material a nivel industrial, tanto para la fabricación como para el mantenimiento de piezas (reconstrucción dimensional). La ventaja de esta técnica consiste en las bajas temperaturas necesarias para la aplicación de los recubrimientos, evitando así costosas deformaciones por los esfuerzos térmicos y cambios en la microestructura de los metales revestidos, su fragilización y consecuente rotura en servicio.

El estudio del comportamiento tribológico a través de la resistencia al desgaste de estos materiales permite determinar si es posible sustituir los materiales de fabricación original por otros que permitan mejorar las condiciones de funcionamiento u operación y garanticen una mayor vida útil de sus partes.

El estudio de desgaste por deslizamiento se puede realizar a través del ensayo de desgaste Falex con la configuración bloque sobre anillo, el cual permite determinar el coeficiente de fricción a través de las variables escogidas de carga, velocidad y distancia. Realizando la medición del volumen desgastado es posible obtener valores de tasa de desgaste. Adicionalmente, si se realiza un estudio microestructural de los materiales considerados es posible establecer los diferentes mecanismos de desgaste que se dan en las superficies de los materiales. Con estos resultados se puede establecer una evaluación entre el comportamiento de los materiales de fabricación y los materiales propuestos para la sustitución de los mismos.

El presente trabajo de investigación pretende evaluar el comportamiento ante el desgaste por deslizamiento de la fundición gris (material original de fabricación de compresores recíprocos) y compararla con el comportamiento de un recubrimiento base molibdeno bajo los mismos parámetros de carga, velocidad y distancia.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Justificación de la Investigación.

Los compresores reciprocantes son máquinas de generación térmica, empleados para elevar la presión de un fluido compresible, tal como: aire, gas, vapor, entre otros. Éstos son empleados en diversas aplicaciones industriales, tales como, la industria química, industria de refrigeración y aire acondicionado, herramientas neumáticas y equipos de perforación, sobrealimentación de motores de combustión interna y en la reinyección de gas a los pozos en la industria petrolera.

El proceso de reinyección de gas dentro del pozo de petróleo es fundamental en la operación de ésta industria y la eficiencia del proceso depende del correcto funcionamiento y operación de los elementos mecánicos que conforman éstas máquinas. El proceso de compresión que se da en éstos elementos tiene lugar dentro de los cilindros que conforman éstas máquinas térmicas, dentro de éstos se ubican los pistones, ambos elementos (cilindro y pistón) están sometidos a cargas y esfuerzos de compresión. Los pistones son elementos mecánicos, en ellos se alojan los anillos, elementos sometidos a contacto directo entre el cilindro y el pistón, a su vez éstos son los encargados de producir el sello mecánico entre ambos elementos (cilindro y pistón).

Los cilindros de los compresores reciprocantes son fabricados originalmente con fundición gris, a su vez, los anillos de los pistones de éstos compresores son fabricados originalmente con polímeros.

El desgaste presentado por estos elementos bajo contacto, sometidos a la acción de una carga reduce la eficiencia de la operación, pérdida de potencia por fricción, el incremento en el consumo de lubricantes y como resultado de esto, el reemplazo de los componentes y la obsolescencia de las máquinas en su conjunto.

En el ejercicio profesional el desgaste de los elementos de máquinas es un problema con el cual los ingenieros están acostumbrados a lidiar. La solución a éste, no es común enfocarla en la búsqueda de superficies que mejoren el rendimiento bajo las condiciones de operación.

Sin embargo, en las últimas décadas el interés en el tema de desgaste se ha incrementado, y como consecuencia se ha realizado un gran esfuerzo por explicar las causas del fenómeno y predecir las posibles consecuencias.

Como muestra de éste interés se han agrupado a las disciplinas involucradas en la interacción de superficies en contacto, con movimiento relativo, en presencia o ausencia de algún medio interpuesto, y a esta agrupación de tópicos se le ha dado el nombre de *Tribología* (Del griego: Tribos=frotar).

Muchas investigaciones sobre el desgaste están dedicadas a los aspectos básicos del fenómeno; estableciendo unos resultados que no pueden ser aplicados de forma inmediata. En otros casos, las investigaciones se dedican a aspectos de mayor aplicación, tales como los efectos de diferentes variables y la evaluación de diversos materiales.

A diferencia de otros fenómenos, el comportamiento de los materiales al desgaste no constituye una característica de los mismos, por el contrario depende de todo un sistema tribológico, el cual por lo general está constituido por dos cuerpos, un lubricante y el ambiente. En ciertas ocasiones, pequeñas variaciones en las variables (velocidad, carga y condiciones ambientales), pueden ocasionar cambios drásticos en la tasa de desgaste de cualquiera de las superficies en contacto.

Sin embargo, en muchos casos esto no es posible ó no es deseable y entonces, el diseño de las superficies para las condiciones específicas de operación se ha hecho más importante, particularmente con el fin de reemplazar cuerpos de materiales costosos por materiales más económicos o recuperar elementos obsoletos y prolongar la vida útil de los mismos, a través, de revestimientos depositados por diferentes técnicas, entre ellas, soldadura, implantación iónica, rociado térmico de alta velocidad oxígeno combustible, rociado térmico por plasma, entre otras.

En este trabajo de grado se realizará una evaluación del desgaste por deslizamiento y propiedades mecánicas, empleando para éste el ensayo de desgaste Falex con la configuración bloque sobre anillo, a través del cual se podrá establecer una comparación entre dos materiales empleados comúnmente para la fabricación de compresores recíprocos, tales como, fundición gris y la aleación a base de molibdeno depositada por la técnica de rociado térmico por plasma y como contraparte Nylon 6.

1.2 Alcances.

- Depositar el recubrimiento base molibdeno-níquel mediante la técnica de rociado térmico por plasma con los parámetros recomendados por un trabajo anterior Conde, V. y Dávila, A. (2007).
- Realizar dos tratamientos térmicos distintos a los recubrimientos depositados por la técnica de Rociado Térmico por Plasma, el primero en un horno de atmósfera controlada de argón hasta alcanzar una temperatura de 600°C, seguido de un enfriamiento en el mismo. El Segundo, mediante el uso de llama oxiacetilénica hasta alcanzar una temperatura de 600°C, seguido de un enfriamiento al aire.
- La investigación se centrará en la evaluación de los recubrimientos a base molibdeno depositados por la técnica de rociado térmico por plasma, sin y con tratamiento térmico posterior y la fundición gris, utilizando como contraparte nylon.
- El ensayo de desgaste y fricción, se llevará a cabo en el equipo Falex utilizando la configuración bloque sobre anillo, siguiendo las consideraciones de la normal ASTM G 77, variando las condiciones de velocidad y carga para determinar las mejores condiciones.
- Se realizaran ensayos de desgaste, dureza, tenacidad y microscopia electrónica, con la finalidad de determinar el comportamiento mecánico y tribológico de los diferentes materiales y determinar el mejor.
- Evaluar la resistencia al desgaste de la fundición gris y el recubrimiento a través del volumen desgastado.
- Determinar el mecanismo de desgaste presente en los materiales estudiados.

1.3 Objetivos de la Investigación.

1.3.1 Objetivo General.

El objetivo general del presente Trabajo Especial de Grado propuesto es, evaluar la resistencia al desgaste por deslizamiento y propiedades mecánicas en recubrimientos base molibdeno depositados por la técnica de Rociado Térmico por Plasma y compararlas con una fundición gris, utilizando como contraparte nylon.

1.3.2 Objetivos Específicos.

- Determinar la resistencia al desgaste por deslizamiento de una fundición gris utilizada en la fabricación de compresores recíprocos para lo cual se variarían cargas y velocidades de deslizamiento.
- Determinar la resistencia al desgaste por deslizamiento de un recubrimiento depositado con una aleación base molibdeno obtenido por la técnica de rociado térmico por plasma y compararla con la fundición gris.
- Determinar la influencia del tratamiento térmico posterior sobre la microestructura y la resistencia al desgaste del recubrimiento base molibdeno.
- Determinar los mecanismos de desgaste presentes en los materiales estudiados.
- Comparar los resultados obtenidos de la resistencia al desgaste para los materiales estudiados.

- Determinar la dureza y tenacidad del recubrimiento con y sin tratamiento térmico posterior y compararlas con la fundición.

1.4 Estudios Preliminares o Antecedentes.

Scagni, C. y De Santa Ana, A. (2007) evaluaron el comportamiento frente al desgaste de recubrimientos depositados por la técnica de Rociado térmico por Plasma en cilindros de compresores de gas empleados en la industria petrolera. En dicho trabajo se empleo una aleación base molibdeno como material de aporte, se determinó la resistencia al desgaste por deslizamiento y el coeficiente de fricción a través del ensayo de desgaste empleando la configuración bloque sobre anillo. Los resultados obtenidos demostraron una reducción mayor al 100% en la tasa de desgaste de los cilindros recubiertos con éste material, contribuyendo a la mejora de las condiciones de operación de éstos equipos.

Cadenas, P., Rodríguez, M. y Staia, M. (2002) investigaron el efecto del tratamiento térmico posterior sobre la resistencia al desgaste por deslizamiento de un recubrimiento base níquel depositado por la técnica de proyección térmica de alta velocidad oxígeno-combustible (HVOF). La resistencia al desgaste por deslizamiento sin lubricación del recubrimiento en estado como- rociado así como también tratado térmicamente fue investigada bajo diferentes condiciones tribológicas siguiendo la norma ASTM D2714-88 la cual establece una configuración geométrica bloque sobre anillo. La distancia de deslizamiento se mantuvo constante a un valor de 550m.

Un acero AISI D-2 fue utilizado como contraparte. A partir de los resultados obtenidos se pudo determinar que los recubrimientos tratados térmicamente tuvieron una resistencia al desgaste 1,5 veces mayor a la presentada por el recubrimiento sin tratamiento térmico, para todos los niveles de carga normal y velocidad de deslizamiento estudiadas.

Coronado, J. y otros (2004) Diseñaron y construyeron un tribómetro con la finalidad de estudiar el desgaste por deslizamiento que tiene lugar en el par tribológico bronce-acero presente en las chumaceras de los molinos de caña de azúcar. Se tomaron distintas composiciones de bronce y distintos lubricantes para la realización del estudio. Determinaron la resistencia al desgaste y el coeficiente de fricción a través de la configuración Bloque sobre Anillo y mediante el uso de la técnica de microscopía electrónica lograron determinar los mecanismos de desgaste presentes en las muestras, de éste se pudo determinar que el par tribológico que favorece las condiciones de operación está conformado por acero SAE 1045 y bronce SAE 64 y aceite como lubricante.

Conde, V. y Dávila, A. (2007) lograron determinar las condiciones óptimas de aplicación de un recubrimiento base molibdeno-níquel depositado mediante el proceso de Rociado Térmico por Plasma, emplearon la técnica del diseño factorial 3^3 con la finalidad de controlar la variabilidad del proceso aleatorio. Se realizaron variaciones en los tres parámetros del proceso, es decir, voltaje, amperaje y tasa de alimentación de polvos.

Se realizaron ensayos de abrasión para caracterizar los recubrimientos y determinar la resistencia al desgaste por deslizamiento, de ésta forma lograron establecer que los parámetros óptimos de aplicación de los recubrimientos base molibdeno-níquel vienen dados por: 794 - 800 A, 57,5 - 70 gr/min, 36 - 37,5 V. La optimización de los parámetros en base a la dureza condujo a los siguientes rangos de valores: 730 - 785 A, 40 - 60 gr/min, 39,8 - 40 V. Encontraron a su vez que no existe correlación entre la dureza y la respuesta ante el desgaste abrasivo en los recubrimientos evaluados.

Irrisarri, A. y García, A. (2005) Evaluaron el comportamiento ante el desgaste de tres aleaciones de aluminio y una fundición gris. Para el estudio se adoptó la configuración bola sobre disco. Se realizaron dos variaciones de carga y velocidad a una temperatura que varió entre 20 a 300 °C. Se determinó que la aleación AS12UNG reforzada con 15% de fibras cortas de alúmina posee la mejor resistencia ante el desgaste, superando incluso al comportamiento ofrecido por la fundición gris a temperaturas inferiores a los 150 °C.

Forlerer, E. y Corujeira, S. (2001) Utilizaron la configuración bloque sobre anillo, sin variaciones de carga y velocidad para determinar la resistencia al desgaste de dos aleaciones, Zn-27% wt. Al reforzada con 3,5% de Si y 3,5 % wt Si +8 % vol de Si. Determinaron que el material más reforzado es el más resistente al desgaste presenta, el refuerzo con Si disminuye el coeficiente de fricción y la tasa de desgaste.

Cetinel, H. y otros (2004) desarrollaron una red artificial de nervios como técnica para la predicción de las pérdidas por desgaste en los recubrimientos de molibdeno. Los recubrimientos fueron depositados en los sustratos del hierro dúctil empleando la técnica del Rociado Térmico por Plasma. El sistema fue sometido a variaciones de carga para estudiar el desgaste por deslizamiento del recubrimiento empleando como contraparte el acero AISI303 sin lubricación y en un medio ácido. Las piezas fueron seccionadas y se realizó un estudio teórico de la microdureza de los recubrimientos; las cargas, el ambiente y la duración de las pruebas de fricción fueron parámetros elegidos como variables para determinar la cantidad de material perdido por la acción del desgaste. Los resultados obtenidos fueron empleados para el acondicionamiento de las redes con la finalidad de simular el comportamiento bajo condiciones de desgaste del recubrimiento, permitiendo desarrollar un sistema capaz de proporcionar información más rápidamente que la obtenida a través del cálculo por el método de los elementos finitos.

2. MARCO TEÓRICO.

2.1 Tribología.

El término *Tribología* (Del griego: Tribos=frotar), es usado desde finales del siglo XX para definir a la ciencia encargada de estudiar los fenómenos de fricción, desgaste y lubricación que se presentan entre las superficies solidas en contacto bajo la acción de un movimiento. El Gobierno Inglés utilizo en 1966 éste término para dar a conocer un plan de acción cuya intención era disminuir los gastos generados en los elementos mecánicos al no considerar los efectos originados por la fricción, el desgaste y la lubricación. Las principales causas del deterioro de los elementos mecánicos son: rata de envejecimiento, desperfectos mecánicos y el deterioro de la superficie E. Rabinowicz., (1995).

Reducir la fricción ha sido la premisa del desarrollo tecnológico a lo largo de la historia, al disminuir los efectos originados por los fenómenos de fricción y desgaste, se obtiene una prolongación en la vida útil de los mecanismos y elementos de máquinas.

El objetivo de la Tribología no sólo consiste en disminuir los efectos desfavorables, pues en algunos casos éste puede variar, por ejemplo:

- Mínimo desgaste y mínima fricción: si se considera la operación de rodamientos, engranajes, levas, entre otros.

- Mínimo desgaste y máxima fricción: al presentarse sistemas de frenos, embragues, neumáticos, entre otros.

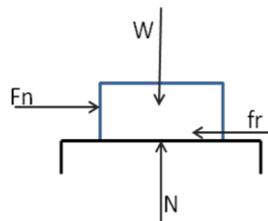
2.2 Fricción.

Se define fricción como la resistencia al movimiento que se ejerce cuando un objeto sólido se mueve tangencialmente respecto a la superficie de otro sólido. La fricción (μ) es expresada en términos relativos de fuerza como, el cociente entre la fuerza de fricción (f_r) y la carga normal (f_n) a las superficies de contacto, según la ecuación 2.1.

El término μ es un coeficiente adimensional, carece de unidades ya que ambos términos están expresados bajo unidades iguales.

$$\mu = \frac{f_r}{F_N} \quad \text{Ec. (2.1)}$$

La fuerza de fricción estática es la necesaria para iniciar el movimiento. Si la fuerza tangencial es menor al valor de ésta, no existe movimiento y la fuerza de fricción es igual o mayor a la fuerza tangencial aplicada. La fuerza de fricción cinética o dinámica es la necesaria para mantener el movimiento, ver Figura 2.1.



Las altas velocidades de deslizamiento entre las superficies en contacto generan aumentos en la temperatura, debido al roce, con lo cual se transforma energía cinética en energía térmica y el respectivo aumento de temperatura en ambas superficies.

Las fuerzas de roce están presentes en casi todos los fenómenos que observamos, intervienen en el movimiento de objetos en el seno de fluidos, cuando existe deslizamiento de un objeto sobre otro y cuando rueda sobre una superficie. En estos casos se producen adherencias entre las zonas de contacto y a su vez estas zonas son deformadas por el deslizamiento. A escala atómica, estas adherencias y deformaciones se relacionan con interacciones de los átomos y/o moléculas de la superficie del objeto con otros átomos y/o moléculas de la superficie sobre la que se desliza. Se pueden producir roturas o nuevas formaciones de enlaces químicos.

La fuerza de roce se ve afectada por la intensidad del contacto entre el objeto y la superficie, es decir, la fuerza normal (F_N) y de algunas propiedades de las superficies de contacto, ver Figura 2.3.

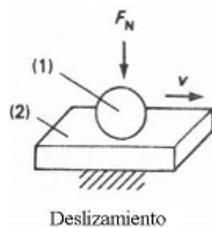


Figura 2.3. Esquema de Deslizamiento de un Objeto (1) sobre una Superficie (2).

Fuente: Elaboración propia.

Cuando una rueda ideal rígida rueda sin deslizar a velocidad constante por una carretera ideal, rígida y horizontal, no hay ninguna fuerza de roce que frene su movimiento. Sin embargo, los neumáticos reales y las carreteras se deforman continuamente y la banda de rodadura del neumático y la carretera se gastan, lo cual indica que la carretera ejerce una fuerza de roce por rodadura (f_r) que se opone al movimiento. Para mantener la rueda rodando con velocidad constante, hay que ejercer una fuerza sobre la rueda que iguale en magnitud y se oponga a la fuerza de roce por rodadura ejercida por el asfalto, ver Figura 2.4.

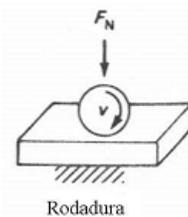


Figura 2.4. Esquema de Rodadura de un Cuerpo sobre una Superficie.

Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de roce por rodadura μ_r depende de la naturaleza de las superficies en contacto y de la composición de la rueda y la carretera.

2.3 Desgaste.

Según la Asociación Americana de Metales (ASTM, 1994), desgaste “es el daño producido a una superficie sólida, que implica generalmente la pérdida progresiva o desplazamiento de material, debido al movimiento relativo entre esa superficie y una sustancia o sustancias de contacto”.

Todos los procesos de desgaste toman lugar cuando existe una superficie de contacto entre sólidos en movimiento, siendo el requerimiento que exista degradación y remoción del material en la zona de interacción. La escala de material removido puede ser atómica, como ha sido propuesta en el modelo para el desgaste de diamante de Seal (Hartley, 1980) o macroscópica, en las cuales cantidades relativamente grandes de material son removidas, tal como ocurre en maquinaria diseñada para operaciones de triturado y molido.

La magnitud del desgaste depende principalmente de las propiedades intrínsecas del material utilizado, de la naturaleza y condición de las superficies en fricción, y de las fuerzas químicas y físicas que actúan en la superficie del material utilizado. Debido a la compleja naturaleza del desgaste, no hay una relación cuantitativa que permita calcular la cantidad de desgaste para ensayos de laboratorio.

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

2.3.1 Tipos de Desgaste.

Según la ASM, los tipos de desgaste pueden ser clasificados en: desgaste adhesivo, abrasivo, corrosivo, erosivo y desgaste por fatiga superficial.

Otros autores (Brostow, 1979) clasifican los mecanismos de desgaste de manera diferente, la diferencia principal radica en el hecho de considerar el desgaste oxidativo como un mecanismo aislado al desgaste corrosivo, además de no tomar en cuenta el desgaste erosivo como un mecanismo de desgaste principal; mientras que Shaw (Hartley, 1980) y Burwel (Jastrzebski, 1959) consideran cuatro tipos de desgaste principal: adhesivo, abrasivo, corrosivo y por fatiga superficial.

2.3.1.1 Desgaste Adhesivo.

El desgaste adhesivo es un desgaste básico, se presenta siempre que exista contacto entre superficies sólidas. Es aquel que ocurre cuando el deslizamiento entre dos superficies sólidas ocasiona que los fragmentos removidos de una se adhieran sobre la otra y viceversa. Esta adhesión se da a nivel de sus estructuras atómicas, cuando ambas superficies se encuentran en movimiento relativo y se encuentran expuestas a altas presiones en su zona de contacto. Subsecuentemente las fuerzas de deslizamiento fracturan las uniones separando el material de una superficie y transfiriéndola a otra; esto resulta en la formación de pequeñas cavidades en una de las superficies y pequeñas proyecciones en la otra, que a su vez pueden conducir a un daño adicional. También puede presentarse desprendimiento del material, lo que contribuye a la acción de otros mecanismos de desgaste, ver Figura 2.5.

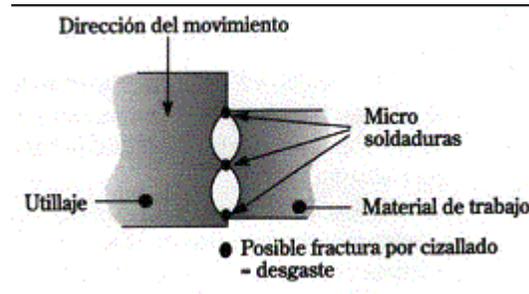


Figura 2.5. Esquema del Desgaste Adhesivo.

Fuente: Elaboración propia.

Entre algunos de los factores influyentes en la aparición de éste tipo de desgaste encontramos: el acabado superficial, el material de las superficies y la temperatura. Un excelente acabado superficial de dos superficies de igual material, permite que éstas se adhieran con mucha facilidad, esto se debe a que tanto la similitud del material como la poca rugosidad, colaboran en ese enlace a nivel atómico.

La temperatura influye de manera contraria al fenómeno de desgaste adhesivo debido a que, en la ocurrencia de este fenómeno, se aumenta la temperatura formando óxido, el cual reduce la velocidad de desgaste por adhesión ya que el óxido actúa como un lubricante. Sin embargo, si la formación de este óxido ocurre a tasas muy elevadas, entonces se produce un fenómeno de desgaste mayor, como lo es la corrosión.

Es común encontrar este tipo de desgaste en elementos de máquinas, tales como: cojinetes de deslizamiento, chumaceras, bocinas, bujes, engranajes, entre otros.

2.3.1.2 Desgaste Corrosivo.

Es el resultado de la acción combinada de un ambiente corrosivo y fuerzas mecánicas actuando sobre una superficie. Es ocasionado por la reacción superficial de un metal con el medio que lo rodea, con consecuente formación de películas superficiales (óxidos). Regularmente estas películas son duras y crean una capa protectora sobre la superficie, que va creciendo y a su vez se fragiliza, lo que la hace propensa a ser removida dejando expuesto al material nuevamente para que el ciclo se vuelva a repetir.

Este material desprendido en el caso de dos superficies en contacto se comporta como un tercer cuerpo, pudiendo crear otro tipo de desgaste, en particular el desgaste abrasivo, ver Figura 2.6.

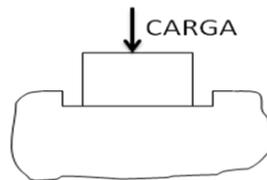


Figura 2.6. Esquema del Desgaste Corrosivo.

Fuente: Elaboración propia.

Este tipo de desgaste colabora en la propagación o formación de otros tipos de desgaste que pudieran ser muy perjudiciales para la disminución de la vida útil de las maquinarias o elementos de máquinas. Es típico observar este tipo de desgastes en los cascos de los barcos, carrocerías de autos y en general, en superficies expuestas al medio ambiente.

2.3.1.3 Desgaste Erosivo.

Es un tipo de desgaste que involucra pérdidas de material de una superficie en contacto con un fluido que contiene partículas. Las partículas son impulsadas por el fluido en el cual éstas se encuentran en suspensión, y van deformando plásticamente la superficie impactada, produciendo sobre la misma una superficie granular fina. El movimiento relativo entre la superficie y el fluido es esencial para este proceso, y la fuerza de las partículas que causan el daño es aplicada por el fluido. La velocidad de propagación de este tipo de desgaste aumenta con la velocidad a la que viajan las partículas y con el ángulo de impacto de las mismas sobre la superficie.

Se puede considerar como un desgaste abrasivo con la diferencia de que en la abrasión, la fuerza ejercida por las partículas erosivas en el material es debida a su desaceleración, mientras que en la erosión, la fuerza que se aplica es externa y aproximadamente constante.

La erosión en la cual el movimiento relativo de las partículas es casi paralelo a la superficie erosionada es llamada erosión abrasiva, mientras que la erosión en la cual el movimiento relativo de las partículas es casi normal a la superficie erosionada es llamada erosión por choque.

Este fenómeno es típico de maquinaria para procesos industriales que involucren chorros de líquidos o gases con sólidos en suspensión, tales como: compresores, turbinas, granalladoras, entre otros.

2.3.1.4 Desgaste por Fatiga Superficial.

Es observado principalmente en aplicaciones giratorias, tales como: engranajes o rodamientos, donde las cargas cíclicas son producidas por las bolas o rodillos sobre las pistas. Este tipo de desgaste se produce por la aplicación continua de cargas, las cuales causan tensiones sobre las capas superficiales, creando fisuras sobre las mismas. Estas fisuras, se propagan paralelas a la superficie causando un escamado que origina un repentino desprendimiento de material, ver Figura 2.7.

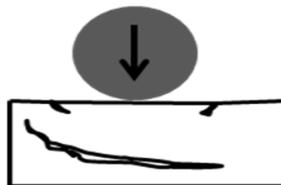


Figura 2.7. Esquema del Desgaste por Fatiga Superficial.

Fuente: Elaboración propia.

Las superficies de alta dureza y buen acabado superficial, libres de ralladuras, fisuras, y otras imperfecciones reducen considerablemente el desgaste por fatiga superficial.

2.3.1.5 Desgaste Abrasivo.

Se llama abrasión al desgaste producido por partículas duras que son forzadas en movimiento contra una superficie, ocasionando deformación plástica y desprendimiento de material. Se considera que este tipo de desgaste puede tomar dos formas externas: una en la cual la deformación plástica es lo más importante, y la otra en la cual la fractura con deformaciones plásticas limitadas es lo que predomina.

En el desgaste abrasivo, la severidad de la superficie dañada es mucho menor que en el desgaste adhesivo y las superficies deslizantes pueden seguir trabajando hasta que sean completamente desgastadas (Jastrzebski, 1959). Este tipo de desgaste se puede visualizar en equipos de perforación de suelos, molinos de bolas, trituradoras, bombas y en algunos casos, en cuerpos en contacto deslizante.

Según la ASTM, el desgaste abrasivo es aquel “debido a partículas o protuberancias duras que son forzadas unas contra otras y que se mueven a lo largo de una superficie sólida”. Este desgaste se produce cuando partículas duras penetran una superficie y desplazan o remueven material en forma de astillas alargadas o tiras.

Debido a ello, una superficie lisa o pulida se vuelve áspera, con marcas y ranuras bastante irregulares, pudiendo o no, haber productos o restos metálicos desprendidos o adheridos, ver Figura 2.8.

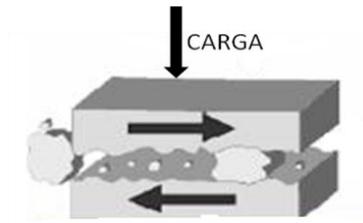


Figura 2.8. Esquema del Desgaste Abrasivo.

Fuente: Elaboración Propia.

Cuando las partículas abrasivas se ponen en contacto con el material, éste es removido por mecanismos que dependen de la naturaleza del sistema. El principal de ellos es, en este caso, el corte o micromaquinado de la superficie, ocasionado por partículas duras que se comportan como pequeñas herramientas de corte.

2.3.2 Desgaste por Deslizamiento en Polímeros.

La fricción de los plásticos es similar a la producida en los metales, excepto por la apreciada en el Politetrafluoretileno, conocido por sus siglas PTFE. Pero la resistencia a la incrustación es superior a la de los metales blandos. Existe incertidumbre sobre el efecto de la rugosidad en la tasa de desgaste. Durante el desgaste de un polímero, las superficies de fricción experimentan un reposo durante el período de desgaste, posteriormente, la tasa de desgaste tiene un comportamiento constante, referido como un comportamiento lineal.

Es en esta región lineal donde los investigadores han buscado coeficientes de desgaste útiles para las aplicaciones requeridas. Se define una segunda cantidad descrita por algunos como un roce severo, a partir del cual puede empezar a surgir un desgaste muy severo.

La descripción más común es la dada por la relación PV, donde P es el promedio de presión de contacto y V es la velocidad de deslizamiento. Cada polímero tiene su propio límite PV. Este es un criterio térmico tomado de la idea de que, al multiplicar el límite PV por el coeficiente de fricción (μ), se obtiene el aporte de energía en la interfaz de deslizamiento.

Si la energía no es removida del sistema a una tasa lo suficientemente alta, la superficie del polímero alcanzará una temperatura elevada capaz de derretirlo y deformarlo y ocurrirá un desgaste severo. Existen tres razones de peso para dudar de esta hipótesis.

La primera razón se basa en que no hay una gran disminución del desgaste severo como se ha estimado, si las especies fundidas aparecieran repentinamente en la región de contacto. La segunda razón indica que los límites PV publicados no se encuentran en el mismo orden de magnitud que los puntos de fusión de un grupo de polímeros. Como última, tenemos que el gas desarrollado por el deslizamiento bajo la operación de desgaste leve, se forma a temperatura muy superior a la del punto de fundición del polímero.

La naturaleza de la transferencia de las películas es importante en el proceso de desgaste. Algunas películas como las de PTFE y Polietileno puro son lisas y delgadas y sus espesores poco visibles. En otros casos las películas transferidas son discontinuas o en forma de manchas.

Si se forma una película de polímero sobre la superficie de un metal, esta permanece adherida firmemente. La pérdida de polímero es mínima durante la primera y múltiples pasadas de deslizamiento y generalmente la fricción también disminuye.

En las primeras etapas del deslizamiento la tasa de acumulación de película transferida depende de la orientación del acabado superficial con respecto a la dirección de deslizamiento y varía con el tipo de contaminante o suciedad en la superficie de deslizamiento.

El acabado superficial no tiene efecto aparente sobre la tasa de desgaste, es probable que los productos de desgaste llenen los poros o ranuras de la superficie.

2.4 Lubricación.

Las superficies de deslizamiento en el hogar a menudo son lubricadas para evitar el contacto seco entre las mismas y así prolongar su vida.

En el siglo XX se ha dedicado mayor tiempo a la reducción del desgaste que a la reducción de la fricción, sin embargo, ésta última fue de gran importancia durante el siglo XVIII, cuando se empleaban animales para transmisión de potencia y en el siglo XIX, cuando se estaban elaborando las vías férreas.

Una vez más, la importancia de la fricción se ha renovado debido al aumento en el costo de combustible. Los elementos mecánicos están diseñados para cumplir con ciertos requisitos, expresados en términos de capacidad de carga, rigidez y comportamiento dinámico. Muchas de estas propiedades son cuantificables, sin embargo, el buen diseño también incluye variables no matemáticas, tal como, la forma en que se aplica el lubricante, como detener e iniciar el movimiento en un cojinete, alineación entre elementos, entre otras.

Una película de lubricante es indispensable para prolongar la vida útil de elementos mecánicos, siendo el objetivo principal de la lubricación, reducir el efecto de los esfuerzos de corte y normales generados en el contacto superficial.

2.4.1 Lubricación por Capa Límite.

La lubricación límite ocurre a baja velocidad relativa entre los componentes y cuando no hay una capa completa de lubricante cubriendo las piezas. Durante lubricación limítrofe, hay contacto físico entre las superficies y hay desgaste.

La cantidad de desgaste y fricción entre las superficies depende de un número de variables: la calidad de las superficies en contacto, la distancia entre las superficies, la viscosidad del lubricante, la cantidad de lubricante presente, la presión, el esfuerzo impartido a las superficies, y la velocidad de movimiento. Todo esto afecta la lubricación por capa límite.

2.4.2 Lubricación Hidrostática.

Dos superficies deslizantes pueden separarse por el bombeo de un fluido en la región de contacto, a una presión capaz de separar ambas superficies. Un gran volumen de fluido podrá separar a gran distancia las superficies de deslizamiento, lo cual reducirá la resistencia al movimiento de deslizamiento, sin embargo, la energía necesaria para bombear el fluido debe ser tomada en cuenta. La lubricación hidrostática es eficaz en todas las velocidades, pero su fiabilidad es influida por la confiabilidad de la bomba externa necesaria para producir el bombeo del fluido.

2.4.3 Lubricación Hidrodinámica.

Si una superficie desliza a lo largo de otra superficie a una velocidad moderadamente alta y si la forma de la superficie conductora es tal que se puede recoger el fluido debajo de la superficie de deslizamiento, las dos superficies serán separadas y podrán deslizarse fácilmente.

Este efecto recibe el nombre de lubricación hidrodinámica, la formación de ésta depende de la geometría, velocidad de los elementos, carga aplicada y viscosidad del fluido utilizado.

La lubricación de los cojinetes ha sido ampliamente estudiada a lo largo de los dos siglos pasados debido a que éstos son ampliamente utilizados en las maquinarias de generación de energía y en los equipos ferroviarios. G. Hirn fue uno de los primeros investigadores del comportamiento de estos componentes. El realizo experimentos lubricando algunos cojinetes con aceites animales, vegetales y minerales, por medio de sus resultados el noto que el coeficiente de fricción era directamente proporcional a la velocidad a temperatura constante y también era directamente proporcional a la viscosidad del lubricante. G. Hirn pudo concluir que no estaba realizando una medición real de la fricción, sino una resistencia al deslizamiento, pero debida a una capa intermedia. El la llamo “fricción media”, que a su vez dio paso para definir el arrastre viscoso.

La lubricación hidrodinámica no depende de la introducción de lubricante a presión, aunque puede ocurrir; pero requiere de la existencia de un suministro adecuado todo el tiempo. La presión de la película es creada por la propia superficie en movimiento al jalar el lubricante hacia una zona cuneiforme a una velocidad suficientemente alta para crear la presión necesaria, a fin de separar las superficies contra la carga en el cojinete.

Es común llamar a la lubricación hidrodinámica como lubricación de *película completa* o *fluida*, ver Figura 2.9.

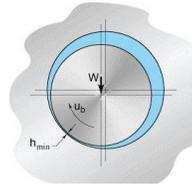


Figura 2.9. Esquema del proceso de Lubricación Hidrodinámica.

Fuente: www.widman.biz.

2.5 Esfuerzos de contacto.

Los puntos de contacto superficial que son encontrados en la práctica de la ingeniería con frecuencia ejecutan movimientos complejos y apelan a transmitir tanto fuerzas como momentos. Por ejemplo, el punto de contacto entre un par de dientes de engranaje que se mueve en el espacio, en aquel punto las dos superficies se mueven el uno en relación con el otro con un movimiento que combina tanto rodamiento como deslizamiento.

El área de contacto entre cuerpos que se conforman o entran en contacto es generalmente pequeño comparado con las dimensiones de los cuerpos en si; los esfuerzos son sumamente concentrados en la región cerca del contacto. Generando una geometría de esfuerzos particular dependiendo de la geometría de los cuerpos en contacto. Los esfuerzos de contactos fueron comenzados a estudiar alrededor de 1882, por Heinrich Hertz, por lo tanto se le conoce como esfuerzos Hertzianos. La teoría de Hertz es restringida a superficies de no fricción y sólidos perfectamente elásticos.

El progreso en la mecánica de contacto en la segunda mitad de este siglo ha sido asociado en gran parte con el retiro de estas restricciones. A continuación se describe un planteamiento que permite obtener los esfuerzos y deformaciones ocurridas entre dos cuerpos que se encuentran en contacto, bajo la acción de una carga. Para esto se utiliza la teoría de hertz y los diferentes planteamientos hechos por autores acerca del tema, con el fin de facilitar y acelerar los métodos de cálculo.

2.5.1 Esfuerzos de Contacto en Superficies Curvas.

En el caso de esfuerzos hertzianos entre cuerpos con superficies curvas, la teoría de hertz plantea un modelo matemático que permite calcular los esfuerzos y deformaciones derivados del contacto.

Este tipo de contacto entre superficies curvas, Hertz los denomina esfuerzos de contacto en un "punto", debido a que el contacto entre las superficies se presenta un punto que esta sobre el plano tangente a los dos cuerpos, ver Figura 2.10A.

Estos esfuerzos y deformaciones, son causados por la carga normal que actúa en la dirección del eje que pasa por el punto de contacto, dando como resultado una región elíptica que representa el área de contacto entre las superficies, ver Figura 2.10B.

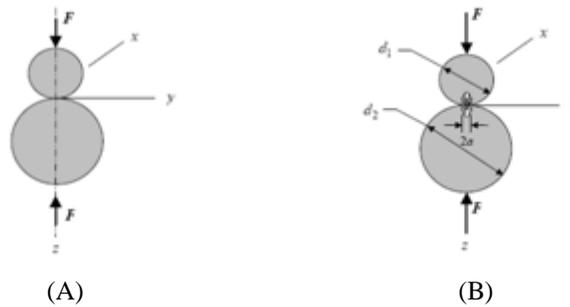


Figura 2.10. (A) Contacto entre Superficies Curvas. (B) Distribución de Presión.

Fuente: Joseph E. Shigley 6ª Edición.

Considerando dos esferas sólidas y elásticas en contacto a través de una fuerza F , generando un área de contacto circular de radio a , se obtiene la siguiente ecuación:

$$a = (K_\alpha)^{\frac{2}{3}} \sqrt[3]{F} \quad \text{Ec. (2.2)}$$

Sustituyendo en la ecuación,

$$K_\alpha = \sqrt[3]{\frac{3 \left(\frac{(1 - \nu_1^2)/E_1}{d_1} + \frac{(1 - \nu_2^2)/E_2}{d_2} \right)}{8}} \quad \text{Ec. (2.3)}$$

Donde:

F : fuerza aplicada.

ν_1 y ν_2 : modulo de Poisson para las esferas.

E_1 y E_2 : modulo de elasticidad para las esferas.

d_1 y d_2 : diámetro de las esferas.

Esta expresión general para el radio de contacto puede ser aplicada para dos casos comunes adicionales:

- Contacto de la esfera con un plano ($d_2 = \infty$).
- Contacto de la esfera con una superficie esférica interna ($d_2 = -d$).

Retornando al caso de la esfera vs esfera, la presión máxima de contacto, p_{max} , ocurre en el centro del área de contacto, y es calculada por la ecuación:

$$P_{max} = \frac{3F}{2\pi a^2} \quad \text{Ec. (2.4)}$$

2.5.2 Esfuerzos de Contacto en Superficies Cilíndricas.

Cuando los elementos en contacto son dos cilindros de longitud l y diámetro d_1 y d_2 , el área de contacto es un rectángulo angosto de ancho $2b$ y longitud l , ver Figura 2.11A. Y la distribución de la presión es elíptica, ver Figura 2.11B.

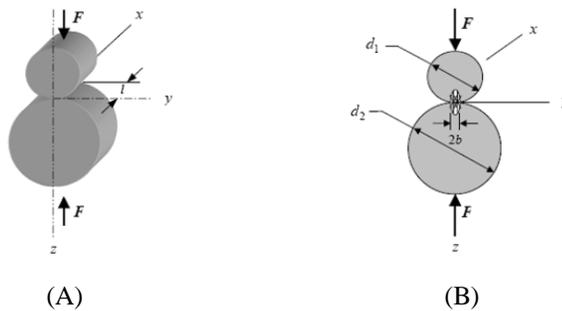


Figura 2.11. (A) Contacto de Superficies Cilíndricas. (B) Distribución de Presión.

Fuente: Joseph E. Shigley 6° Edición.

El semiancho b viene dado por la ecuación:

$$b = (K_b)^{\frac{2}{3}} \sqrt[3]{F} \quad \text{Ec. (2.5)}$$

Sustituyendo en la ecuación:

$$K_b = \sqrt[2]{\frac{2 \left(\frac{(1 - \nu_1^2)/E_1}{d_1} + \frac{(1 - \nu_2^2)/E_2}{d_2} \right)}{\pi l}} \quad \text{Ec. (2.6)}$$

Donde:

F : fuerza aplicada.

ν_1 y ν_2 : modulo de Poisson para los cilindros.

E_1 y E_2 : modulo de elasticidad para los cilindros.

d_1 y d_2 : diámetro de los cilindros.

l : longitud de los cilindros (se asume, $l_1=l_2$).

Esta expresión de contacto rectangular, puede ser utilizada para dos casos adicionales los cuales son frecuentemente encontrados:

- Cilindro en contacto con un plano ($d_2 = \infty$).
- Cilindro en contacto con una superficie cilíndrica interna ($d_2 = -d$).

La presión de contacto máxima entre los cilindros se encuentra a lo largo de una línea longitudinal en el centro del área de contacto rectangular, y es calculada como:

$$P_{max} = \frac{2F}{\pi bl} \quad \text{Ec. (2.7)}$$

2.6 Rociado Térmico.

Actualmente las aplicaciones industriales se encuentran en constante desarrollo, es por esto que las tecnologías empleadas para realizar recubrimientos han presentado un crecimiento sostenido durante los últimos años. Los sistemas de rociado térmico destacan dentro de este grupo emergente de nuevas tecnologías, éstos consisten básicamente en la proyección de materiales de distintas naturalezas (cerámica, metálica, polímeros, entre otros). El material de alimentación es calentado y propulsado como partículas individuales o gotas sobre la superficie a recubrir, a través de una pistola o rociador. Mientras el material es calentado, este cambia a un estado plástico o fundido y es comprimido y acelerado hacia la superficie, utilizando para esto un gas de transporte (generalmente inerte), ver Figura 2.12.

Los procesos de rociado pueden ser clasificados en procesos de combustión y en procesos eléctricos.

Los procesos de combustión incluyen el rociado por llama, rociado por detonación y proyección térmica de alta velocidad, mientras que los procesos eléctricos incluyen el rociado por arco eléctrico y el rociado por plasma, distintas investigadores han centrado sus estudios en el desarrollo de estas tecnologías y sus aplicaciones. Conde y Davila, (2007); De Santa Ana y Scagni, (2007).

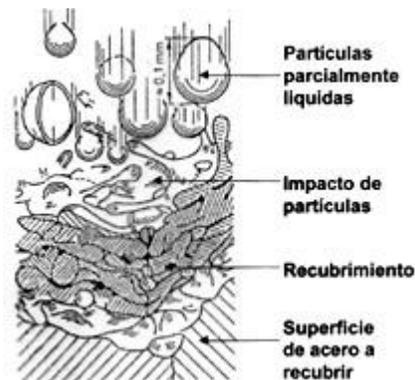


Figura 2.12. Representación del proceso de rociado térmico.

Fuente: <http://www.metalsprayperu.com>

2.6.1 Rociado Térmico por Plasma.

El sistema de rociado térmico por plasma es de gran flexibilidad pues desarrolla suficiente energía capaz de fundir cualquier tipo de material. Gracias a las altas temperaturas y altas energías térmicas del plasma jet, se pueden rociar materiales con alto punto de fusión tales como cerámicas y metales refractarios.

Este proceso utiliza un arco eléctrico de corriente continua para generar un flujo de plasma gaseoso parcialmente ionizado a muy altas temperaturas que actúa como la fuente de calor para el rociado. El arco se forma entre dos electrodos no consumibles, el cátodo de tungsteno y el ánodo de cobre, separados por una pequeña distancia dentro de una cámara. Cuando la corriente continua es aplicada al cátodo, este forma un arco eléctrico con el ánodo mientras los gases pasan por la cámara, ver Figura 2.13

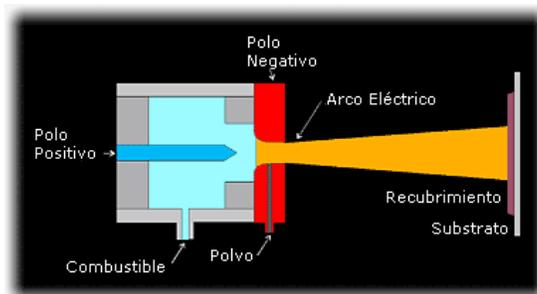


Figura 2.13. Descripción del Proceso de Rociado Térmico por Plasma.

Fuente: Plasmatec Ingenieros. (2009).

El arco eléctrico generado es tan potente que disocia y ioniza los gases, transformándolos en un estado de "plasma". Mientras el plasma inestable se recombina de nuevo a su estado gaseoso, se libera una gran cantidad de energía térmica donde las temperaturas pueden llegar a los 5000-8000 °C (9000-14500 °F) (Burns y Bradley, 1967). En ese momento se inyecta el material de aporte en forma de polvo a la cámara de gas, el cual es fundido y disparado a grandes velocidades (aproximadamente 200-300 m/s) y altas temperaturas por un pequeño orificio que produce chorro de gas caliente. Inevitablemente, algunas partículas de aire son arrastradas por la corriente de rociado, por lo que puede ocurrir la oxidación del material de aporte.

Un aspecto importante a mencionar es que a pesar de las altas temperaturas de este proceso, el sustrato o el componente a reconstruir, elevará su temperatura solamente de 38 °C a 260 °C (100 °F a 500 °F). Además, el proceso de rociado por plasma genera recubrimientos de alta calidad mediante la combinación de altas temperaturas, un medio de rociado relativamente inerte y altas velocidades de partícula.

Las pistolas para el rociado térmico por plasma han sido diseñadas para trabajar bajo una gran variedad de condiciones y parámetros de operación. En los comienzos del desarrollo de este proceso, no se tenía suficiente información de la influencia de las variables involucradas, ni de cómo éstas afectaban la calidad y el desempeño de los recubrimientos. Esto debido a que el proceso en sí, implica la formación de un jet de plasma a altas velocidades y altas temperaturas, con reacciones físicas y químicas violentas, complejas y difíciles de estudiar.

Sin embargo, en los últimos años el proceso de rociado térmico por plasma se ha convertido en una tecnología bastante aceptada en la industria debido a que ya se tiene un amplio conocimiento de cuales variables afectan a un material en particular y de que modo lo hacen.

2.7 Parámetros de Deposición para el Proceso de Rociado Térmico por Plasma.

La calidad de los recubrimientos es afectada por dos factores principales, tales como: la preparación de la superficie y los parámetros de rociado térmico. La adhesión del recubrimiento se ve afectada por la preparación de la superficie, mientras que la microestructura y resistencia del recubrimiento se ve afectada por los parámetros de deposición. Los parámetros de deposición son seleccionados según las condiciones de operación y limitaciones del equipo disponible. Entre los parámetros de mayor importancia durante el proceso de rociado térmico encontramos: la temperatura de precalentamiento del sustrato, distancia de rociado, presión del gas primario, presión del gas secundario, voltaje, amperaje y tasa de alimentación.

2.8 Materiales.

2.8.1 Material del Recubrimiento.

Los materiales rociados por plasma a considerar para una aplicación en particular deben ser seleccionados, si es posible, entre aquellos que han sido desarrollados específicamente para este proceso. Entre los materiales que pueden ser depositados a través de un proceso de rociado térmico por plasma se encuentran los metales, cerámicos, polímeros o cualquier combinación de estos que se necesite para obtener un amplio rango de propiedades físicas y/o mecánicas. Dentro de los numerosos materiales metálicos que pueden ser rociados se encuentra el molibdeno, ver Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Propiedades Químicas del Molibdeno (Mo).

Numero Atómico	42
Valencia	2,3,4,5,6
Estado de Oxidación	+6
Electronegatividad	1,8
Masa Atómica (g/mol)	95,94
Densidad (g/ml)	10,2
Punto de Ebullición (°C)	5560
Punto de Fusión (°C)	2610

En la industria del rociado térmico, el molibdeno muchas veces es mezclado con elementos como cromo o níquel, que mejoran la adhesión y cohesión del recubrimiento (Rastegar y Craft, 1993), para luego ser depositado en componentes en movimiento donde el desgaste es un problema crítico de desempeño.

Una gran variedad de composiciones resultantes pueden ser generadas por la mezcla de molibdeno con otros polvos que, en la mayoría de los casos, contienen cantidades variables de níquel, cromo, boro y silicio.

Estos recubrimientos de molibdeno rociados térmicamente son usados extensamente en diferentes aplicaciones industriales para combatir la degradación de partes y estructuras debido al desgaste mecánico, y así poder mejorar el funcionamiento de componentes de ingeniería tales como pistones, anillos de pistones, ejes y cigüeñales (Babu et. al., 1996), ya que aumentan la resistencia al desgaste, a la corrosión y a la degradación térmica. Además, el molibdeno encuentra aplicaciones en componentes industriales como sellos y rodamientos, como un recubrimiento superficial para prevenir la degradación de esas superficies que se encuentran en condiciones de contacto deslizante, ya que reduce el coeficiente de fricción. Sin embargo, su uso no es recomendable en aplicaciones que requieran resistencia a la oxidación a altas temperaturas.

El material a utilizar en el presente trabajo de investigación para lograr los recubrimientos es una aleación base molibdeno-níquel, cuya composición es 75%wtMo – 25%wt NiCrBSi, generado por la mezcla mecánica de ambos polvos. Los elementos aleantes (NiCrBSi) después del rociado térmico, se distribuyen uniformemente a lo largo de la matriz de molibdeno, obteniendo así una composición homogénea y evitando la acumulación de ciertas fases en una sola zona.

2.8.2 Fundición Gris.

Son metales poco maleables o dúctiles, pero más fundibles que el hierro. Su punto de fusión varía entre los 1100°C y 1300°C.

Proviene de los altos hornos, como primera etapa de la producción de hierros y aceros. Por el color de la fractura se clasifica el arrabio (hierro bruto en lingote), en fundición blanca y fundición gris.

La fundición gris contiene de 3 a 4,5% de carbono, funde entre los 1200 y 1300°C, es muy fluida y tiene la propiedad de llenar bien los moldes por dilatación al solidificarse, la superficie de su fractura es de color gris. Se caracteriza porque una parte del carbono se separa en forma de grafito al solidificarse. Se utiliza para la fabricación de objetos de fundición, es menos frágil que la blanca y fácilmente trabajable, ver Figura 2.14.

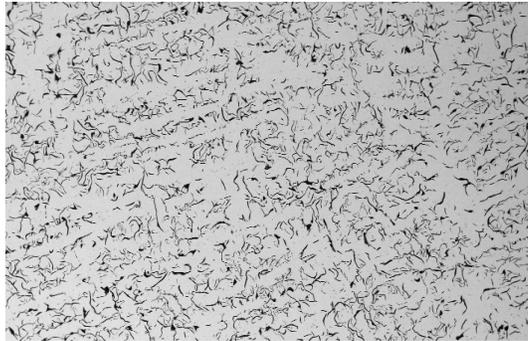


Figura 2.14. Fundición Gris.

Fuente: Elaboración Propia.

La mayoría de las fundiciones grises son aleaciones hipoeutécticas que contienen entre 2,5 y 4% de carbono. El proceso de grafitización se realiza con mayor facilidad si el contenido de carbono es elevado, las temperaturas elevadas y si la cantidad de elementos grafitizantes presentes, especialmente el silicio, es la adecuada.

El grafito adopta la forma de numerosas laminillas curvadas, que son las que proporcionan a la fundición gris su característica fractura grisácea o negruzca.

Se caracterizan por que se pueden vaciar del horno para obtener piezas de muy diferente tamaño y complejidad pero no pueden ser sometidas a deformación plástica, no son dúctiles ni maleables y poco soldables pero sí maquinables, relativamente duras y resistentes a la corrosión y al desgaste.

Las fundiciones tienen innumerables usos y sus ventajas más importantes son:

- Son más fáciles de maquinar que los aceros.
- Se pueden fabricar piezas de diferente tamaño y complejidad.
- En su fabricación no se necesitan equipos ni hornos muy costosos.
- Absorben las vibraciones mecánicas y actúan como autolubricantes.
- Son resistentes al choque térmico, a la corrosión y de buena resistencia al desgaste.

2.8.3 Nylon.

El nylon es un polímero sintético que pertenece al grupo de las poliamidas. Es una fibra manufacturada conformada por repetición de unidades con uniones amida entre ellas.

Las sustancias que componen al nylon son poliamidas sintéticas de cadena larga que poseen grupos amida (-CONH-) como parte integral de la cadena polimérica. Existen varias versiones diferentes de Nylon siendo el nylon 6 uno de los más conocidos, ver Figura 2.15.



Figura 2.15. Cilindro de Nylon 6 Color Blanco.

Fuente: www.smallparts.com.

El Nylon fue la primera fibra producida enteramente de polímero sintético y se caracterizó por primera vez en 1899. En 1929, este estudio fue renovado por Carothers en la Compañía Du Pont de Neumors. La primera patente se solicitó en 1931. En julio de 1935, el nylon 6,6 fue elegido por Dupont para ser introducido en el mercado. Esta fue seguida por una patente de aplicación que se publicó en 1937.

Los Nylons han encontrado campos de aplicación como materiales plásticos en aquellos sectores o usos particulares donde se requiere más de una de las propiedades siguientes: alta tenacidad, rigidez, buena resistencia a la abrasión, buena resistencia al calor.

Debido a su alto costo no han alcanzado, naturalmente, la aplicabilidad de materiales tales como polietileno o poliestireno, los cuales tienen un precio tres veces más bajo que el del nylon.

Las aplicaciones más importantes de los homopolímeros se encuentran en el campo de la ingeniería mecánica. Aplicaciones bien establecidas son las siguientes: asientos de válvulas, engranajes en general, excéntricas, cojinetes, rodamientos, entre otras. Además de las propiedades ventajosas señaladas en líneas anteriores, las piezas de nylon pueden funcionar frecuentemente sin lubricación, son silenciosas, pudiendo en muchos casos moldearse en una sola pieza evitándose el ensamblado de las diferentes piezas metálicas o el uso de máquinas caras con la consiguiente pérdida de material.

Desde hace ya algunos años los nylons cuentan con un fuerte competidor, las resinas acetáticas, las cuales presentan superior resistencia a la fatiga, mayor resistencia a la fluencia y también mayor resistencia al agua que las poliamidas. Bajo condiciones medias de humedad, los nylons son superiores en resistencia al impacto y en resistencia a la abrasión. Cuando se considera que un nylon es apropiado para una determinada aplicación, es necesario antes de elegir el tipo de poliamida, tener en cuenta las propiedades mecánicas, la resistencia al agua y la facilidad de procesado de los mismos. Así, el nylon 6,6 presenta las mejores propiedades mecánicas, pero, por otra parte, es el que presenta mayores dificultades de procesado y tiene un valor de absorción de agua alto. El nylon 6 es el más fácil de procesar, tiene propiedades ligeramente inferiores al nylon 6,6.

En medicina y farmacia se utilizan objetos moldeados y esterilizables fabricados con poliamidas. Debido a su durabilidad, y a pesar de su mayor costo, los peines de nylon para el cabello han encontrado una amplia aceptación.

Las películas de nylon se emplean cada vez más en aplicaciones de embalaje para productos alimenticios y farmacéuticos. El valor del nylon para estas aplicaciones estriba en la posibilidad de hervir la bolsa con los alimentos dentro y en la baja transmisión del olor.

Aunque los nylons no se consideran generalmente como aislantes, debido a su tenacidad, y en cierto grado a su resistencia a la temperatura, se han abierto camino en este sector (arrollamientos y bobinas, y bloques terminales). Las ventajas que presentan en ciertos aspectos las resinas acetálicas y los policarbonatos han mermado considerablemente la aplicabilidad del nylon en este campo del aislamiento eléctrico.

En este trabajo de investigación se evaluarán anillos elaborados en Nylon 6.

2.8.4 Lubricante.

Cualquier sustancia que se coloque entre superficies, con el fin de disminuir la fricción, se denomina lubricante, el cual ayuda también a evacuar el calor generado.

Las funciones básicas de los lubricantes son, la reducción de la fricción, disipación del calor y dispersión de los agentes contaminantes. El diseño de un lubricante es una tarea compleja que involucra un cuidadoso balance de propiedades, tanto del aceite base como de los aditivos.

Un mecanismo puede quedar bien o mal lubricado, dependiendo de factores tales como la viscosidad del aceite utilizado, la cantidad aplicada, el método de lubricación y la frecuencia entre relubricaciones.

2.8.4.1 Principales Características de los Lubricantes.

La viscosidad es una de las propiedades mas importante de un aceite lubricante y es uno de los factores responsables de la formación de la capa de lubricación. La viscosidad afecta la generación de calor en rodamientos, cilindros y engranajes debido a la fricción interna del aceite. Esto afecta las propiedades sellantes del aceite y la velocidad con la que éste es consumido y a su vez determina la facilidad con la que las máquinas pueden iniciar el funcionamiento a diversas temperaturas. La operación de un elemento mecánico depende fundamentalmente del uso de un aceite cuya viscosidad sea la apropiada para las condiciones de operación.

El lubricante escogido para las condiciones de operación debe actuar como un refrigerador, es decir, debe ser capaz de remover el calor generado por la fricción y otras fuentes tal como, la combustión o el contacto con sustancias a temperaturas elevadas.

Al realizar estas tareas el lubricante debe conservar sus propiedades, es decir, no debe sufrir algún cambio. Los cambios en la estabilidad térmica y estabilidad a la oxidación harán disminuir la eficiencia del lubricante. Los lubricantes deben permanecer efectivos bajo la presencia de agentes contaminantes, tales como: el agua y material desprendido.

Los lubricantes se diferencian por: su composición, calidad y grado de viscosidad. Según su composición pueden ser clasificados como lubricantes de base mineral, base semisintética y base sintética. Los aceites minerales son mezclas de hidrocarburos.

Los aditivos son sustancias químicas que se añaden a los aceites lubricantes para proporcionarles o incrementar sus propiedades, o por el contrario, para suprimir o reducir las que sean contraproducentes.

En el presente trabajo especial de grado se plantea como solución ante los problemas de desgaste estudiar el comportamiento de pares tribológicos, para los cuales se decidió utilizar fundición gris, recubrimiento base molibdeno y nylon, el cual fue seleccionado como contraparte para fines de simular el par tribológico real. A su vez se utilizara la configuración bloque sobre anillo bajo lubricación.

2.9 Diseño Experimental Factorial.

En el estudio sobre la mejora de procesos industriales (control de calidad), es usual trabajar con problemas en los que hay muchos factores que pueden influir en la variable de interés. La utilización de experimentos completos en estos problemas tiene el gran inconveniente de necesitar un número elevado de observaciones y además puede ser una estrategia ineficaz porque, por lo general, muchos de los factores en estudio no son influyentes y mucha información recogida no es relevante. En este caso una estrategia mejor es utilizar una técnica secuencial donde se comienza por trabajar con unos pocos factores y según los resultados que se obtienen se eligen los factores a estudiar en la segunda etapa.

Por diseño factorial se entiende aquel en el que se investigan todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores en cada ensayo completo o réplica del experimento. Este tipo de diseño se usa en estudios en los cuales la cantidad de factores a estudiar es igual o mayor a dos, es decir, en experimentos en los que intervienen diversos factores que, en conjunto o asociados, influyen en la respuesta del sistema.

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

Los factores se pueden definir como variables independientes los cuales influyen en la salida del sistema, mientras que las variables que indican la respuesta del sistema o salidas del proceso, se denominan variables dependientes. En el diseño experimental factorial cada combinación de factores es conocido como tratamientos. Este método se puede representar de la forma x^y , donde la “y” representa los factores involucrados en el proceso y la “x” representa los niveles a los que son evaluados dichos factores, por lo que x^y es igual al número de tratamientos posibles. Hay diferentes casos particulares de esta metodología, entre ellas tenemos a los diseños experimentales 2^2 , 2^3 , 3^2 , 3^3 que son los mas usados.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 Material de las Probetas.

3.1.1 Sustrato.

Con la finalidad de realizar el estudio comparativo entre los materiales utilizados para la fabricación de compresores recíprocos, se adquirió fundición gris laminar ASTM A-36 para la fabricación de las probetas. La composición química se muestra en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Composición Química Fundición Gris Laminar.

Carbono	Silicio	Magnesio	Fosforo	Azufre
2.5-4.3	1.0-3.0	0.4-1.0	1.0	0.25

A su vez se adquirió un acero AISI 1020 con la finalidad de ser utilizado como sustrato del material a depositar. Las propiedades mecánicas y composición química se muestran de éste se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Composición química y propiedades mecánicas del acero AISI 1020.

COMPOSICIÓN QUÍMICA									
%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cu	%Al	%Mo	%Ni	%Cr
0.26	9.99	0.04	0.05	0.4	0.2	0.999	0.05	0.15	0.15

PROPIEDADES MECÁNICAS	
Esfuerzo de Fluencia	Esfuerzo Último a la Tracción
250 Mpa	400-550 Mpa

Como material de recubrimiento se empleó una aleación base molibdeno-níquel, cuya composición es: 75%wtMo – 25%wt NiCrBSi, generada por mezcla mecánica.

3.1.2 Contraparte.

Como contraparte fue utilizado el Nylon 6. Las propiedades físicas, mecánicas y térmicas de éste material se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Propiedades Físicas, mecánicas y térmicas del Nylon 6.

Propiedades Físicas	
Densidad (g/cm ³)	1,14
Índice Refractivo	1,53
Propiedades Mecánicas	
Coefficiente de Fricción	0,2-0,3
Dureza Rockwell	M89
Modulo de Tracción (GPa)	3,3
Relación de Poisson	0,41
Resistencia a la Tracción (MPa)	82

Propiedades Térmicas	
Coefficiente de Expansión Térmica ($\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)	90
Conductividad Térmica a 23C ($\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	0,25
Temperatura Máxima de Utilización (C)	80-180
Temperatura Mínima de Utilización (C)	-30

3.2 Fabricación de las Probetas.

La fabricación de las probetas para el ensayo utilizando la configuración bloque sobre anillo, se realizó según las dimensiones indicadas por la norma ASTM-G77, ver figura 3.1 y 3.2 respectivamente.

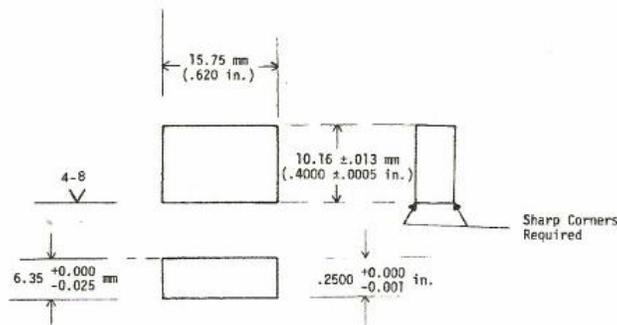


Figura 3.1. Dimensiones (en mm) de los Bloques.

Fuente: ASTM G-77.

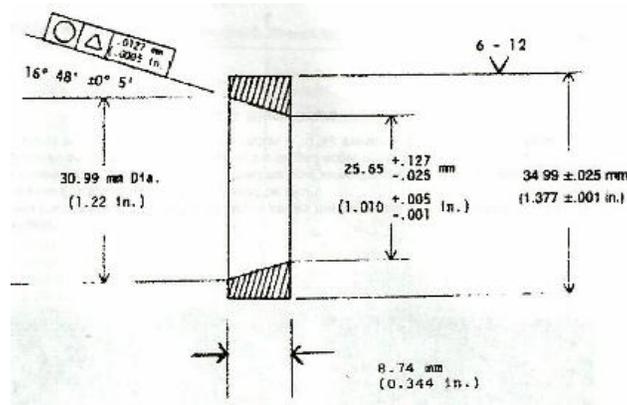


Figura 3.2. Dimensiones (en mm) de los anillos.

Fuente: ASTM G-77.

3.3 Proceso de Deposición.

Los recubrimientos depositados a través del proceso de rociado térmico por plasma requieren que la superficie a rociar sea preparada previamente para que el recubrimiento pueda adherirse correctamente al sustrato, ya que ese proceso de adherencia puede considerarse como parte del diseño de la estructura del recubrimiento. Los procedimientos previos a la deposición serán explicados a continuación.

3.3.1 Limpieza.

Resulta esencial que la superficie del sustrato esté limpia y libre de impurezas tales como grasa, aceite o polvo antes de aplicar cualquier tipo de recubrimiento.

Además, aunque la limpieza de la superficie de probetas que posteriormente van a ser sometidas a un proceso de arenado no debe ser tan rigurosa, ésta debe estar libre de aceite o grasa debido a que este proceso, más que limpiar la superficie, ocasionaría que las partículas de grasa se incrustaran en ella contaminando así el abrasivo utilizado. Por esto, para garantizar que la superficie de las probetas estuviese libre de impurezas, las mismas fueron limpiadas con un solvente industrial conocido comúnmente como thinner.

3.3.2 Pre calentamiento.

El pre calentamiento del sustrato se realiza con el fin de eliminar la humedad de la superficie a rociar, por lo que posterior a la limpieza con thinner, se procedió a un pre calentamiento de las muestras mediante llama oxiacetilénica a una temperatura de aproximadamente 60°C por tiempo de un minuto, este proceso se muestra en la Figura 3.3.



Figura 3.3. Pre calentamiento de las probetas con llama oxiacetilénica.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.3 Proceso de Arenado.

Una vez realizado el precalentamiento, las muestras fueron sometidas a un proceso de arenado con Alúmina Al_2O_3 (1-3mm) a una presión de 50-60 psi, mediante un equipo de proyección de abrasivo por presión de aire, este proceso se muestra en la Figura 3.4.

El arenado se realiza para eliminar cualquier tipo de óxido que pudiera haber quedado en la superficie del sustrato después de la limpieza. Además, se genera una superficie lo suficientemente rugosa para que el recubrimiento se adhiera de manera eficiente al sustrato, garantizando así el anclaje mecánico entre ellos. Después del arenado, la superficie debe mantenerse limpia y protegida de cualquier tipo de contaminación, por lo que este proceso es realizado pocos minutos antes a la deposición.



Figura 3.4. Proceso de arenado con alúmina Al_2O_3 .

Fuente: Elaboración propia.

3.3.4 Deposición del Recubrimiento.

Previo a la deposición del recubrimiento, las muestras a rociar fueron precalentadas a una temperatura aproximada de 70 – 80 °C, utilizando para esto la llama de la pistola de plasma marca PRAXAIR modelo SG-200, mostrada en la Figura 3.5.

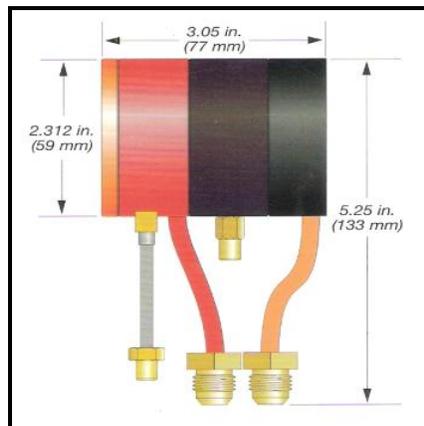


Figura 3.5. Dimensiones de la pistola de plasma SG-200.

Fuente: Catálogo Praxair.

El motivo de este precalentamiento es evitar el choque térmico que se generaría al proyectar las partículas de plasma calientes sobre el sustrato a temperatura ambiente, además de promover la expansión de las muestras para evitar así posibles agrietamientos en la interfase sustrato-recubrimiento.

Inmediatamente después del precalentamiento se procedió al rociado térmico de las muestras. Los grupos de probetas a ser rociadas, se dispusieron sobre pletinas de acero diseñadas para tal fin.

Para la realización del rociado se empleó una unidad de plasma de corriente continua marca METCO tipo 7MC, la pistola antes mencionada y un alimentador de polvos marca Mark XV.

Los parámetros de deposición para el rociado térmico del recubrimiento base molibdeno-níquel fueron previamente optimizados por Conde y Dávila, éstos son indicados en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Parámetros de Deposición para los Recubrimientos.

Temperatura de precalentamiento del sustrato (°C)	70 - 80
Distancia de rociado (mm)	80 - 100
Presión del gas primario: Argón (psi)	80
Presión del gas secundario: Helio (psi)	60
Voltaje (v)	40
Amperaje (A)	750
Tasa de alimentación (gr/min)	60

3.4 Tratamiento Térmico.

Se realizaron dos tipos de tratamientos térmicos diferentes, con la finalidad de mejorar las propiedades mecánicas de las muestras depositadas por la aleación molibdeno-níquel.

El primero, se realizó en un horno de atmósfera controlada de argón, marca ADAMEL LHOMARCY y un dispositivo de control electrónico marca LOVE CONTROL serie 2600. La tasa de calentamiento fue de 10°C por minuto, hasta alcanzar la temperatura de 600°C, con un tiempo de permanencia de 30 minutos. Una vez culminado el lapso de permanencia se realizó un enfriamiento posterior controlado dentro del horno, a una tasa de enfriamiento de 15°C por minuto.

El segundo, consistió en un tratamiento térmico por llama oxiacetilénica, mediante la exposición directa de las muestras a la llama hasta alcanzar la temperatura de 600°C, controlada mediante un termómetro infrarrojo marca FLUKE modelo 68. Esta exposición se prolongó por un espacio de tiempo de 5 minutos, para luego proceder a un enfriamiento al aire libre.

3.5 Diseño de Experimentos.

Con la finalidad de realizar el estudio de desgaste por deslizamiento se adoptó el método del diseño factorial. Este método permite incluir la variación de los niveles de carga y velocidad a fin de obtener el comportamiento de los materiales en estudio ante las distintas variaciones posibles, con la finalidad de encontrar las condiciones más desfavorables para ambos materiales y proceder al estudio comparativo entre éstos para determinar la condición a la cual se evaluarán los recubrimientos con los tratamientos térmicos posteriores. El estudio se realizó siguiendo el modelo factorial 4^2 , éste permite establecer dos parámetros variables y cuatro variaciones de los mismos, ver tabla 3.5.

Por cada tratamiento se requieren tres muestras para la realización del estudio de desgaste y obtención de datos estadísticos. Adicionalmente se obtuvo una muestra testigo (la cual no tiene la configuración de las muestras del ensayo) a fin de realizar los ensayos de dureza, tenacidad, microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido.

Tabla 3.5. Distribución para el Diseño Factorial 4².

Parámetros	Carga (N)	Velocidad (m/s)
Tratamientos		
1	221	0,275
	221	0,370
	221	0,503
	221	0,640
2	441	0,275
	441	0,370
	441	0,503
	441	0,640
3	551	0,275
	551	0,370
	551	0,503
	551	0,640
4	661	0,275
	661	0,370
	661	0,503
	661	0,640

En total son necesarias 64 probetas por cada material a evaluar (recubrimiento y fundición gris), a fin de garantizar las condiciones establecidas.

Bajo esta configuración de ensayos son necesarios un total de 196 anillos de Nylon 6 debido a que éste constituye el par tribológico que se encuentra en la configuración original de los compresores recíprocos.

Los valores de carga fueron establecidos bajo el estudio de esfuerzo de contacto entre los pares tribológicos seleccionados, considerando la máxima deformación plástica permisible en el Nylon 6, ver anexo A. Éste permitió establecer los siguientes valores de carga: 221, 441, 551 y 661 N. Los valores de velocidad fueron establecidos según la capacidad de operación del equipo Falex empleado para la realización del ensayo, dando como resultado los siguientes niveles de velocidad: 0.275, 0.370, 0.503 y 0.640 m/s. La distancia de recorrido para el ensayo de desgaste fue de 2000m.

3.6 Ensayo de Desgaste.

Los ensayos de desgaste se realizaron en función a las especificaciones de la norma ASTM G-77. La misma contempla que las probetas deben ser planas, estar libres de óxido e impurezas y tener una rugosidad para los bloques entre $0,102 - 0,203\mu\text{m}$ y los anillos entre $0,152 - 0,305\mu\text{m}$. Para ello se realizaron las medidas en un perfilómetro marca ZYGO modelo PTI 250. Donde la rugosidad para los bloques es de $0,173 \pm 0,023 \mu\text{m}$ y para los anillos $0,270 \pm 0,011 \mu\text{m}$.

Las probetas fueron pesadas antes y después de ser ensayadas en una balanza analítica marca Scientech, modelo SA 310, cuya precisión es de 0.0001gr ubicada en el Laboratorio de Metrología de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela, ver Figura 3.6.



Figura 3.6. Balanza Analítica.

Fuente: Elaboración propia.

Los ensayos de desgaste se llevaron a cabo en la máquina de desgaste marca FALEX con la configuración bloque sobre anillo, mostrada en la Figura 3.7, ésta se encuentra ubicada en el Laboratorio de Lubricación y Desgaste de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela y permite determinar la fuerza de roce y el desgaste bajo condiciones controladas de operación.

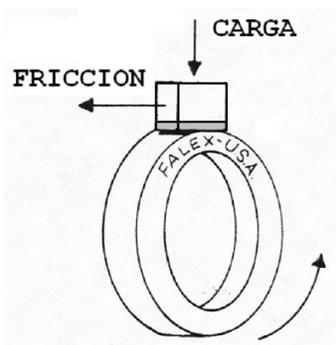


Figura 3.7. Configuración bloque sobre anillo.

Fuente: ASTM G-77.

Para simular la operación real del par tribológico se empleó un lubricante para compresores recíprocos marca Shell Corena P100. Las propiedades de éste se muestran en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Propiedades del Lubricante Shell Corena P100.

	Método de Prueba	Shell Corena P 68	Shell Corena P 100	Shell Corena P 150
ISO VG	ISO 3448	68	100	150
Standard de desempeño	DIN 51506	VDL 68	VDL 100	VDL 150
Viscosidad Cinemática @ 40°C, cSt	D 445	68	100	155
100°C, cSt		7.8	9.2	12.1
Densidad a 15 °C	D 1298	883	899	902
Punto de inflamación COC, °C	D 92	235	240	240
Punto de fluidez °C	D 97	-33	-33	-33
Valor de neutralización, mg KOH/g	D 974	0.3	0.3	0.3
Cenizas sulfatadas, % m	DIN 51575	0.06	0.06	0.06
Estabilidad a la oxidación (delta-CCR), % m	DIN 51352-2	1.8	2	2.3
Propiedades de los residuos de la destilación (20%)				
Residuos de carbón (CCR), %m	DIN 51551	0.3	0.3	0.3
Viscosidad cinemática a 40 °C, mm ² /s	DIN 51562	100	160	280
Prevención de la corrosión	D 665B	Pasa	Pasa	Pasa
Separación del agua a 54 °C, min	D 1401	30	-	-
a 82 °C, min		-	20	20

3.7 Determinación del Coeficiente de Fricción.

El bloque es cargado contra el anillo que rota a una velocidad dada. La fuerza requerida para mantener el bloque en su lugar, es continuamente medida durante el ensayo mediante una celda de carga, este dato es la fuerza de fricción, la cual permite obtener el coeficiente de fricción, según ecuación:

$$\mu = \frac{f_r}{F_N} \quad \text{Ec. (2.1)}$$

Donde:

μ : Coeficiente de fricción.

f_r : Fuerza de roce o fricción.

F_N : Fuerza o carga normal.

3.8 Determinación de la Tasa de Desgaste.

Los resultados del ensayo fueron reportados en términos de pérdida volumétrica del material, siendo el mejor material, aquel que pierde menos volumen para las condiciones de carga y velocidad establecidas. El cálculo de la pérdida de volumen está establecido mediante la ecuación:

$$\text{Pérdida Volumetrica (mm}^3\text{)} = \frac{\Delta m \text{ (gr.)} \times 1000}{\rho \left(\frac{\text{gr.}}{\text{cm}^3}\right)} \quad \text{Ec. (3.1)}$$

donde:

$\Delta m = (\text{masa inicial} - \text{masa final}) [\text{gr}]$: Pérdida de masa medida en la muestra.

ρ : Densidad del Recubrimiento.

3.9 Ensayo de Microindentación Estática.

El ensayo de microindentación Vickers fue realizado en las instalaciones del Instituto Universitario de Tecnología Dr. Federico Rivera Palacios (IUT). Acorde a la norma ASTM E-384, utilizando un microdurómetro marca Leitz Wetzlar, equipado con un penetrador Vickers (Figura 3.8) y a una carga de 500 grf, por un tiempo de carga de 10 segundos. Los resultados se expresaron en función del promedio de diez indentaciones realizadas en la sección transversal de las distintas muestras.

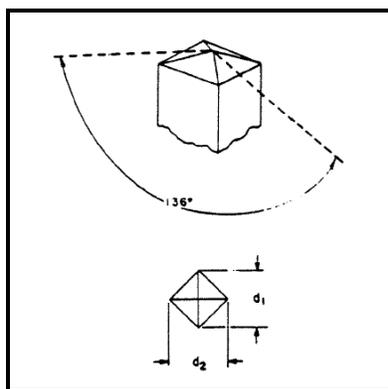


Figura 3.8. Geometría del indentador.

Fuente: www.scielo.org.co.

3.10 Ensayo de Macroindentación Estática.

El ensayo de Macroindentación Vickers fue realizado en las instalaciones del Laboratorio de Metalografía ubicado en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela. Acorde con la norma ASTM A-370. El ensayo se realizo en el equipo Vickers Hardness Tester, modelo FV-700. La carga empleada para la realización de las indentaciones fue 20 Kgf. con una duración de 10 segundos. Los resultados son el promedio de seis indentaciones realizadas en la Sección transversal de las distintas muestras.

3.11 Ensayo de Tenacidad.

Con el uso del microscopio electrónico se evaluaron las medidas de las diagonales de las microgrietas generadas por las macroindentaciones. Asumiendo el módulo de elasticidad aproximadamente igual a 0,30 Bolelli y Cannillo, (2007) y utilizando la formula de Evans y Wilshaw (1976) se pudo evaluar la tenacidad de los materiales.

$$K_{1c} = 0,079 \frac{L}{a^{\frac{3}{2}}} \log \left(\frac{4,5a}{c} \right) \quad \text{Ec. (3.2)}$$

Donde:

L : es la carga de indentación (mN).

a : es la mitad de la diagonal (μm).

c : es el promedio de la logitud de la grieta medida desde el centro de la indentación.

K_{IC} : es la tenacidad ($\text{MPam}^{1/2}$).

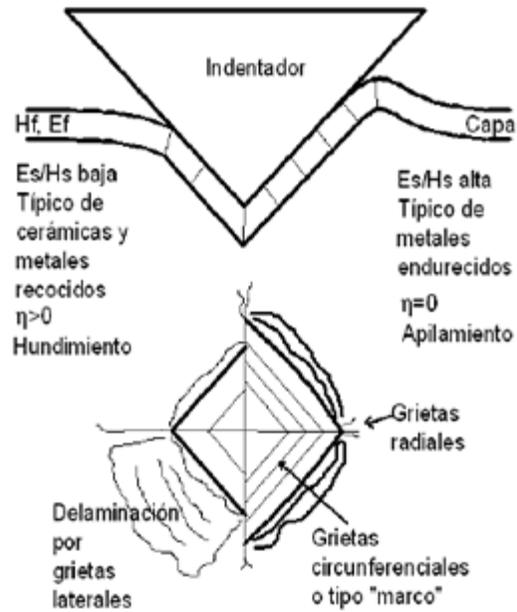


Figura 3.9. Tipos de grietas producidos durante la indentación con indentadores piramidales.

Fuente: www.scielo.org.co.

3.12 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).

Previo a los estudios de microscopía, las muestras fueron cortadas y preparadas metalográficamente en el Laboratorio de metalografía de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela, lo cual consistió en un desbaste con lijas desde 320 hasta 1200 y un posterior pulido fino con un paño Billiard marca Buehler con alúmina en suspensión desde 0,3 a 0,05 micras. Utilizando para esto un equipo de pulido con velocidad variable marca Buehler, modelo MetaServ 3000, ver Figura 3.10.



Figura 3.10. Equipo de Pulido.

Fuente: Elaboración propia.

Mediante un microscopio electrónico de barrido marca Philips, modelo XL 30, acoplado con equipo de espectroscopía por dispersión de energía de rayos X, ver Figura 34. Se evaluó la superficie de desgaste, microestructura, composición y porosidad del recubrimiento.



Figura 3.11. Microscopio Electrónico de Barrido.

Fuente: Elaboración propia.

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

3.13 Coeficiente de Desgaste.

Aplicando la ecuación de Archard se determino el coeficiente de desgaste K , del sistema tribológico. Ésta constante depende de las condiciones particulares de trabajo, y se obtiene a partir de la expresión:

$$V = \frac{k W s}{H}$$

Ec. (3.3)

Donde:

V : Volumen de material removido (mm^3).

K : Coeficiente de Desgaste.

W : Carga normal a la superficie (N).

s : Distancia de deslizamiento (mm).

H : Dureza del material (N/mm^2).

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Tasa de desgaste y coeficientes de fricción.

Como se describió en la metodología experimental el primer paso para la realización del estudio comparativo de resistencia al desgaste de recubrimientos depositados con una aleación Mo – Ni y una fundición gris, fue realizar ensayos de desgaste por deslizamiento a diferentes niveles de cargas y velocidades de deslizamiento, a fin de encontrar las condiciones más desfavorables para ambos materiales. Los resultados de tasa de desgaste (TD), en función de la carga se presentan a continuación en la figura 4.1.

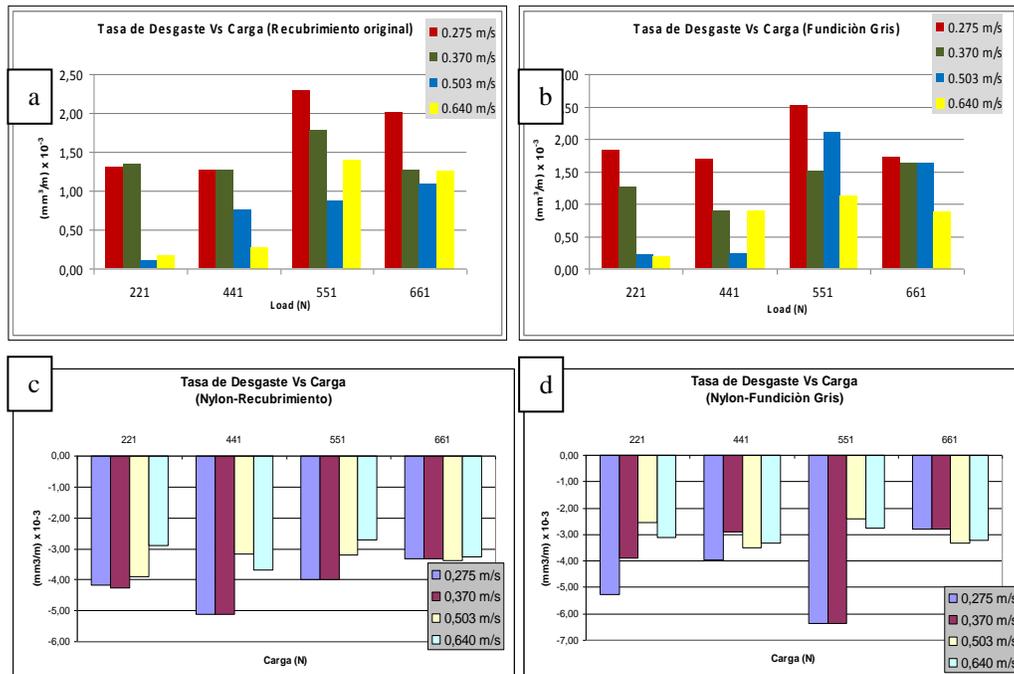


Figura 4.1. Tasa de desgaste Vs Carga normal para: a) recubrimiento condición original, b) fundición gris, c) Nylon contra recubrimiento y d) Nylon contra fundición.

La figura 4.1(a) y 4.1(b), contiene los resultados de la tasa de desgaste (TD) de los bloques en estado como-rociado y la fundición gris respectivamente, en función de la carga normal (F_n) para cada velocidad de deslizamiento estudiada. En éstas se observa, que la tasa de desgaste (TD) aumenta con la carga normal para ambas condiciones estudiadas, lo cual coincide con la teoría de Archard (1953). Para los valores de tasa de desgaste obtenidos, el régimen de desgaste se considera severo ya que los valores de la tasa de desgaste son mayores a $1E-05$ [mm³/m]. Se evidencia que los valores de desgaste para ambos materiales son relativamente iguales, observando las mayores diferencias mayores en la carga de 551 N, en la cual el recubrimiento es un 25% superior a la fundición gris para todas las condiciones.

Analizando los resultados obtenidos, se puede decir que para bajas cargas en los recubrimientos y la fundición, la resistencia al desgaste aumenta con la velocidad de deslizamiento. Para cargas superiores a los 441 N el comportamiento es más aleatorio. Este comportamiento está relacionado con el incremento de la temperatura y el comportamiento de la contraparte para cada condición de ensayo. Además la contraparte de nylon sufre menor deformación plástica a mayor velocidad y esto reduce el área de contacto entre el bloque y el disco disminuyendo de esta manera el coeficiente de fricción y por ende el desgaste. (K. Ludema et. al., 1996).

La figura 4.1(c) y 4.1(d), presenta los resultados de la tasa de desgaste (TD) del nylon como contraparte del recubrimiento en condición como-rociado y la fundición gris, respectivamente.

En ambos gráficos se evidencia que los valores de tasa de desgaste son negativos ya que los mismos no pierden material, por el contrario ganan peso. Debido a las características del nylon, al ser un material plástico, actúa como una trampa para todo el material que se desprende producto de la interacción entre los pares tribológicos durante el ensayo, el material atrapado en el nylon interviene en el proceso de desgaste actuando como agente abrasivo, generando desgaste por un tercer cuerpo.

A partir de estos valores de tasa de desgaste se evidencia que el recubrimiento en condición como-rociado, posee un comportamiento relativamente estable ante las distintas variaciones de carga y velocidad. Los valores más bajos de tasa de desgaste son obtenidos para la carga de 221 N y velocidades de deslizamiento de 0,503 y 0,640 m/s. La tasa de desgaste en estos casos está por debajo de 10^{-4} mm³/m. La menor tasa de desgaste para el recubrimiento en su estado como-rociado fue obtenida para la carga de 221 N y velocidad de deslizamiento de 0,503 m/s, la mayor tasa de desgaste se presenta para la carga de 551 N y velocidad de deslizamiento de 0,275 m/s. En el caso de la fundición gris se observa una mayor tasa de desgaste para la carga de 551 N ante cualquier variación de velocidad de deslizamiento. El menor valor de desgaste se presenta ante la carga de 221 N y velocidad de deslizamiento de 0,640 m/s, el mayor valor de desgaste se presenta ante la carga de 551 N y velocidad de deslizamiento de 0,275 m/s.

Los coeficientes de fricción medidos para los distintos recubrimientos depositados por la técnica de rociado térmico por plasma sobre los sustratos de acero AISI 1020, en condición como-rociado y la fundición gris, ambos ante la contraparte de nylon se muestran en el Anexo A. Los valores de coeficientes de fricción para los peores resultados de tasa de desgaste se muestran en la figura 4.2.

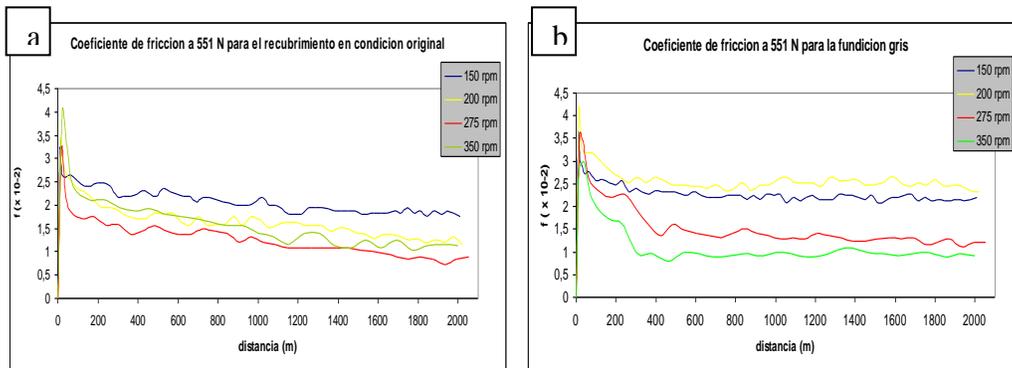


Figura 4.2. Coeficientes de fricción Vs desplazamiento para la peor condición: a) recubrimiento original y b) fundición gris.

Los valores del coeficiente de fricción representados en la figura, son función de la distancia recorrida de 2000m para una carga normal de 551 N y las distintas velocidades de deslizamiento, tanto para el recubrimiento en condición como-rociado, como para la fundición gris. Los valores iniciales del coeficiente de fricción son bastante altos, este fenómeno se debe a la necesidad de vencer el coeficiente de fricción estático y la eliminación de rugosidades e imperfecciones en las superficies de contacto, una vez superado el mismo los valores del coeficiente de fricción disminuyen hasta tomar un valor casi estable (coeficiente de fricción dinámico) y se logra a cortas distancias de desplazamiento, aproximadamente 25 m.

El coeficiente de fricción que se presenta en el recubrimiento es mucho menor al obtenido en la fundición. Al aumentar la velocidad de deslizamiento éste disminuye, fenómeno explicado previamente.

A partir de los resultados anteriores se decidió efectuar los ensayos de desgaste en los tratamientos térmicos posteriores para los peores resultados del recubrimiento en condición como-rociado, en relación a la fundición gris donde la carga de 551 N refleja las mayores tasas de desgaste y la velocidad de 0.370 m/s, refleja las mayores pérdidas para tres de las cuatro condiciones de carga, los resultados obtenidos se presentan en la figura 4.3 y 4.4 respectivamente.

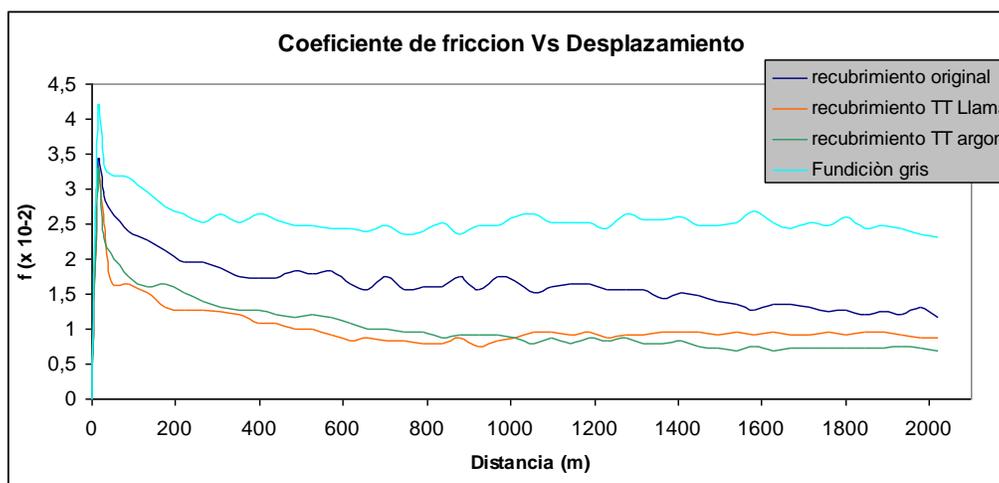


Figura 4.3. Coeficientes de fricción Vs desplazamiento para los materiales utilizados.

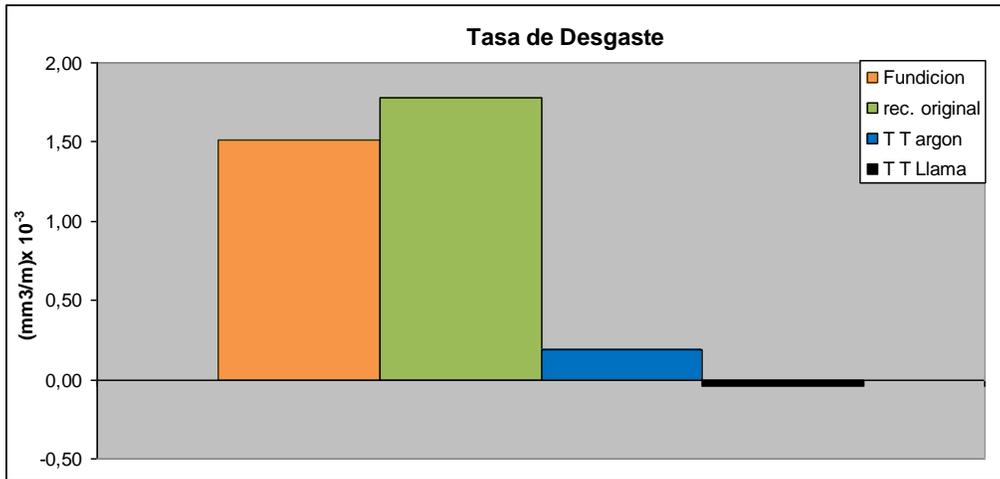


Figura 4.4. Tasa de desgaste Vs carga para los materiales utilizados.

Los resultados obtenidos muestran que el recubrimiento como rociado es 1.18 veces menos resistente al desgaste que la fundición gris, y con los posteriores tratamientos térmicos se obtiene que para el recubrimiento con tratamiento térmico en atmósfera controlada, es 8 veces mas resistente al desgaste que la fundición y 9 veces mas que el recubrimiento como rociado, mientras que el recubrimiento con tratamiento térmico a llama, es 38 veces mas resistente al desgaste que la fundición y 44 veces mas que el recubrimiento como rociado.

La mejora en la resistencia al desgaste lograda por el recubrimiento sometido al tratamiento térmico en atmósfera controlada está directamente relacionada con los cambios microestructurales, tales como: mejor distribución de las fases endurecedoras, mayor densidad y homogeneidad, la formación de óxidos, así como también una mayor cohesión entre las partículas, producidos como consecuencia de los tratamientos térmicos posteriores, lo cual se traduce en una mayor resistencia a los esfuerzos cortantes producto de la fricción.

En el recubrimiento con tratamiento térmico de llama se evidencia que la tasa de desgaste es negativa, esto se debe a la ganancia de peso durante el ensayo, esta condición presenta una fase diferente (MoO_2) a la observada en la condición tratada en atmósfera controlada, y la formación de gran cantidad de grietas debido a las diferencias térmicas durante el tratamiento.

Al observar el gráfico de coeficiente de fricción Vs desplazamiento (figura 4.3), para el recubrimiento con tratamiento térmico a llama, se aprecia que a partir de los 1000 m aproximadamente, el coeficiente de fricción que hasta ese momento era inferior toma valores superiores que el de la condición con tratamiento térmico en atmósfera controlada, esto se debe a que los óxidos formados en el tratamiento son aplanados por la acción de la fuerza de fricción y debido a la acción repetitiva de la carga, los mismos son endurecidos por deformación hasta que fracturan y luego se desprenden.

Los óxidos que actúan como lubricante, cuando se desprenden generan abrasión uno de los mecanismos principales en el desgaste. La figura 4.5. Representa el comportamiento del nylon contra cada uno de los materiales.

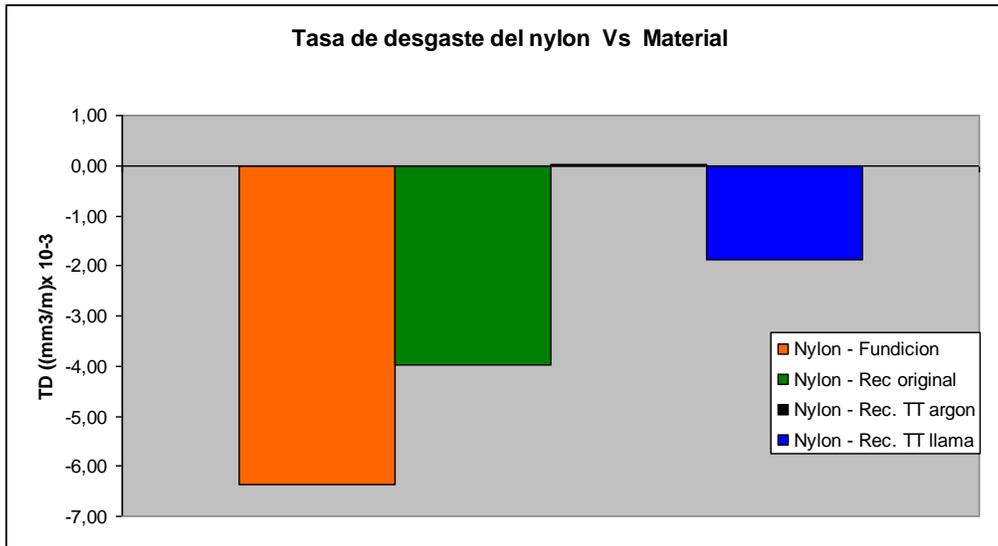


Figura 4.5. Tasa de desgaste del nylon Vs material utilizado.

En la figura 4.5, se evidencia que para el recubrimiento con el tratamiento térmico en atmósfera controlada, la contraparte de nylon sufre desgaste, Mientras que para las demás condiciones existen una ganancia de peso debido a que el nylon atrapa el material que se desprende del recubrimiento y la fundición.

La tabla 4.1, muestra los coeficientes de desgaste según Archard para cada uno de los materiales ensayados donde se evidencia que tanto la fundición gris como el recubrimiento en como-rociado poseen un comportamiento similar. Donde el recubrimiento como rociado es 1.21 veces mayor que la fundición, y los recubrimientos tratados térmicamente presentan una mejora notable.

Donde el recubrimiento con tratamiento térmico a llama es 20 veces inferior que la fundición y 24 veces inferior que el recubrimiento como rociado, mientras que el recubrimiento con tratamiento térmico en atmósfera controlada es 5,4 veces inferior que la fundición y 6,5 inferior que el recubrimiento como rociado. Es importante destacar que el coeficiente de desgaste representan la pendiente en la curva de tasa de desgaste versus desplazamiento, y al lograr reducir en forma significativa la misma se logra prolongar la vida útil del componente y de ésta forma lograr reducir los costos de mantenimiento o sustitución.

Tabla 4.1. Coeficientes de desgaste de las muestras evaluadas según Archard.

Material	Recubrimiento original	Tratamiento a Llama	Tratamiento en Atmósfera Controlada	Fundición Gris
Coefficiente de fricción (K)	8,96 x10-6	3,73 x10-7	1,38 x10-6	7,47 x10-6

4.2 Estudio de la porosidad, dureza y tenacidad.

Antes de iniciar los ensayos de desgaste se procedió a evaluar las propiedades mecánicas y la porosidad de los materiales utilizados, debido a la influencia de éstas en el comportamiento ante desgaste de cada uno de los materiales ensayados. Los resultados obtenidos se aprecian en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Propiedades mecánicas y porosidad de las muestras evaluadas.

Muestra	Recubrimiento Original	Tratamiento a Llama	Tratamiento en Atmósfera Controlada	Fundición Gris
Porosidad (%)	1.77 ± 0.20	1.62 ± 0.23	1.55 ± 0.15	2,10 ± 0.10
Dureza Macro (Kg/mm²)	359,1 ± 39,6	428,5 ± 39,8	332,8 ± 50,1	266,7 ± 41,0
Dureza Micro (kg/mm²)	563,6 ± 101.1	549 ± 110	573,8 ± 98.2	290 ± 20.3
K_{1C} (MPa m^{1/2})	2,019 ± 0,299	1,906 ± 0,355	1,106 ± 0,279	

Para el análisis de la porosidad se utilizó un analizador de imágenes EDAXIMAG, equipo ubicado en las instalaciones del Instituto Universitario de Tecnología Dr. Federico Rivero Palacios (IUTRC). En las mismas se aprecian los poros revelados en la sección transversal de cada recubrimiento, no se aprecia gran diferencia entre la cantidad de poros existentes en cada tratamiento. Donde el recubrimiento como rociado es un 15,70% menor que la fundición gris, y los posteriores tratamientos térmicos mejoran la porosidad en un 8,50% para el de llama y un 12,40% para el de atmósfera controlada.

En la tabla 4.2, Se observa que el porcentaje promedio de porosidad en la condición con tratamiento térmico en atmósfera controlada es menor en un 12.40% a la condición como-rociado. Hwang et. al. (2005) encontraron que existían numerosos poros en la intercara de los splats de recubrimientos de molibdeno, lo que hace que la cohesión entre los mismos sea relativamente débil. De esta manera dedujeron que la alta porosidad afecta negativamente la resistencia al desgaste de los recubrimientos evaluados, particularmente a altas cargas. Estos resultados se corresponden con los obtenidos en esta investigación, siendo la condición con tratamiento térmico en atmósfera controlada la que presentó un mejor comportamiento respecto al recubrimiento en su condición como-rociado ante el desgaste y a su vez, ésta presenta un menor porcentaje de porosidad. Sin embargo, el mejor comportamiento ante el desgaste lo presentó la condición con tratamiento térmico de llama, donde se genera la fase MoO_2 , la cual presenta mayor dureza y contribuyen con la disminución del desgaste ya que actúan como lubricantes. Estudiando con detenimiento la ecuación de Archard se puede concluir que a mayor dureza, se disminuye la tasa de desgaste de un material, esto se evidencia en los recubrimientos tratados térmicamente, en los cuales la variación de la dureza propicio resultados positivos ante el comportamiento al desgaste.

A demás de la tabla 4.2 se observa que los resultados de dureza promedio el recubrimiento como rociado es 1.94 veces mayor que la fundición gris, donde los tratamientos térmicos generan que la dureza sea menor un 3% para el tratamiento térmico a llama y 1.8% mayor para el tratamiento en atmósfera controlada y los resultados del K_{1C} obtienen una reducción para cada recubrimiento en el orden del 5.60% al 45% para el tratamiento a llama y atmósfera controlada respectivamente.

Sin embargo la resistencia al desgaste se ve influenciada por la presencia de óxidos que actúan como lubricantes y colaboran con la reducción de los coeficientes de fricción.

4.3 Microscopía Electrónica de Barrido.

Mediante la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) se procedió al estudio de los ensayos de desgaste para la mejor y peor condición obtenidas por los ensayos, en las cuales se evaluó la microestructura, composición de los recubrimientos, porosidad y mecanismos de desgaste presentes en la superficie de las muestras ensayadas.

4.4 Microestructura y Composición Química Elemental (EDS).

Con la finalidad de analizar la influencia de la microestructura sobre la resistencia al desgaste de los recubrimientos, se realizó el estudio en la sección transversal del recubrimiento como-rociado y en los recubrimientos sometidos a tratamiento térmico posterior de atmósfera controlada y llama oxiacetilénica. Para las condiciones como-rociado, con tratamiento térmico a llama y tratamiento térmico en atmósfera controlada respectivamente. En la modalidad de electrones retrodispersados (BSE), se puede observar una estructura en forma de láminas, así como también cierto grado de porosidad, características propias de los recubrimientos depositados mediante el proceso de rociado térmico por plasma (Babu et. al., 1996).

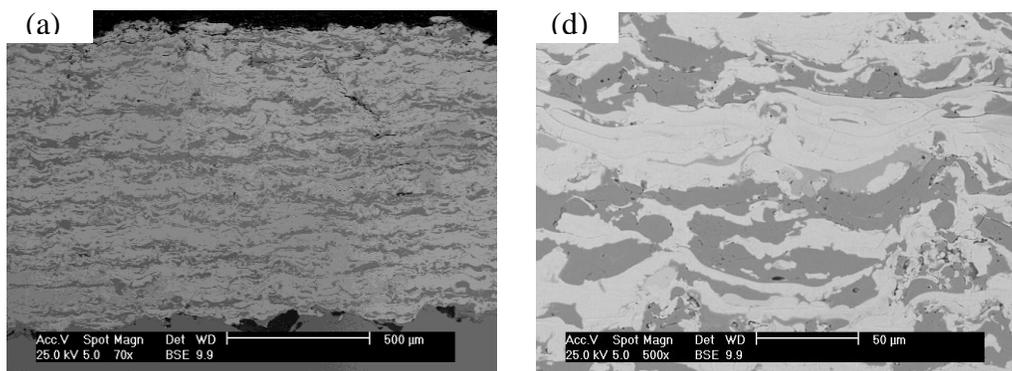
Adicionalmente, con este modo de electrones primarios se observa la diferencia en composición química, mostrando fases elementalmente distintas, las cuales serán analizadas más adelante por medio de un análisis químico elemental semicuantitativo por espectroscopía por dispersión de energía de rayos X.

En la figura 4.6 (a, b y c), se muestran las fotomicrografías de la sección transversal de las tres condiciones analizadas anteriormente con magnificación de 70x. A simple vista se puede decir, tal como se señaló, que se trata de recubrimientos típicos obtenidos por la técnica de rociado térmico por plasma. El espesor del recubrimiento como-rociado es aproximadamente 990 μm , el sometido a tratamiento térmico de llama presenta un espesor aproximado de 980 μm y el sometido a tratamiento térmico en atmósfera controlada es aproximadamente de 843 μm . Esto permite afirmar que el proceso de oxidación en el recubrimiento sometido al tratamiento térmico de llama no lleva cambios bruscos en el espesor y el proceso de tratamiento en atmósfera controlada lleva a una mejor densificación del recubrimiento, es decir, reducción de la porosidad y espaciamiento interlaminar.

Al analizar la interfase entre el sustrato y el recubrimiento se observó que todas las condiciones presentaron un comportamiento bastante uniforme en cuanto al copiado de la superficie preparada por parte del recubrimiento. Aunque, sí se evidencia la presencia de partículas de alúmina que han quedado incrustadas en el sustrato, lo cual es debido a que estas partículas tienen mayor dureza que el sustrato y son difíciles de eliminar con la limpieza posterior.

En las condiciones como-rociado y con tratamiento térmico en atmósfera controlada, ver Figura 4.6 (d y f), se observó que son recubrimientos más homogéneos que el sometido al tratamiento térmico de llama en cuanto a la distribución de las fases. Donde los recubrimientos como rociado y con tratamiento en atmósfera controlada, presentan un menor grado de porosidad e irregularidades. Además, en el recubrimiento sometido a tratamiento térmico por llama se genera una nueva fase, que será presentada posteriormente (oxidación del molibdeno).

Adicionalmente, en la condición como-rociado y con tratamiento térmico en atmósfera controlada ver figura 4.6 (d y f), se observaron poros alineados de manera perpendicular a las lamelas formadas, lo que se traduce en una falta de cohesión entre los splats que conforman el recubrimiento. Esta falta de cohesión disminuye la resistencia al desgaste de los depósitos (Yin et. al., 2007). Por el contrario, la condición con tratamiento térmico de llama ver figura 4.6 (e), presenta un recubrimiento con zonas agrietadas mas irregulares y poros en la misma.



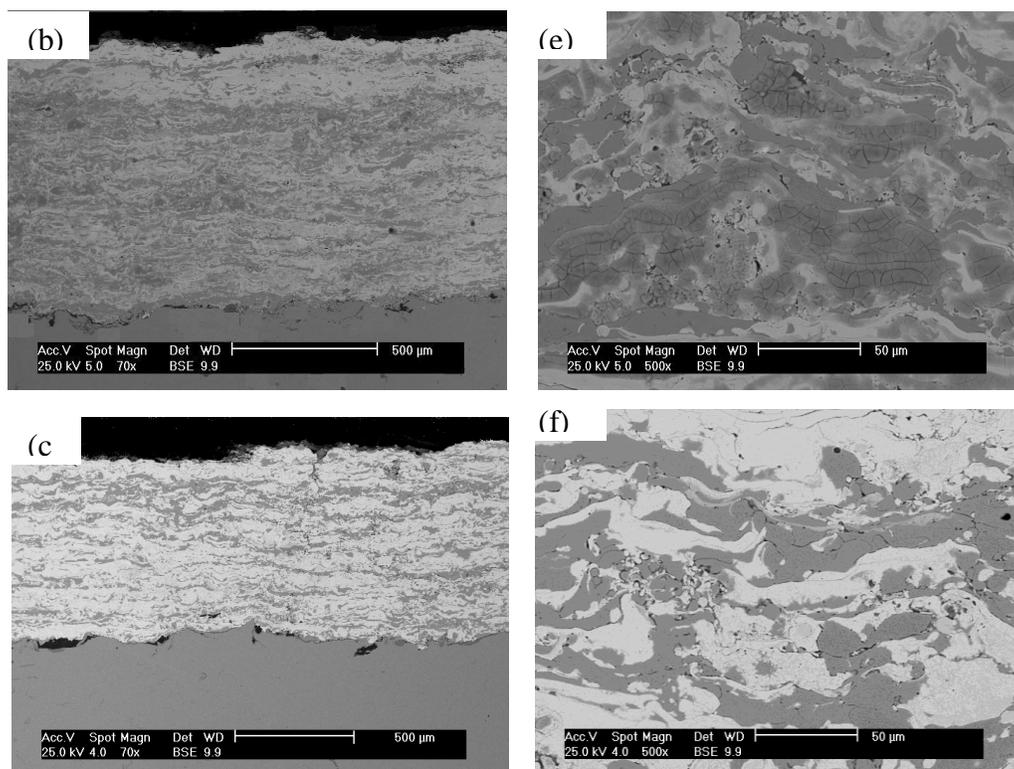


Figura 4.6. Fotomicrografías de la sección transversal de: (a) y (d) original, (b) y (e) tratamiento a llama y (c) y (f) tratamiento en atmósfera controlada.

La figura 4.7, muestra el análisis químico semi-cuantitativo realizado en las tres fases observadas en el recubrimiento en condición como-rociado. Una fase blanca, una fase gris clara y otra fase gris oscura. La fase clara está formada en su mayoría por molibdeno, la fase gris clara por molibdeno y níquel y la fase gris oscura por níquel y cromo. Estos resultados corresponden en su mayoría a la composición química ofrecida por el proveedor del polvo, adicionalmente se encontró un pequeño porcentaje de hierro en la fase de la aleación NiCrBSi.

El boro no es reportado ya que el MEB – EDS presenta en su configuración una ventana de berilio que no permite la detección y cuantificación precisa de dicho elemento, consecuencia de que el boro es más liviano que el berilio.

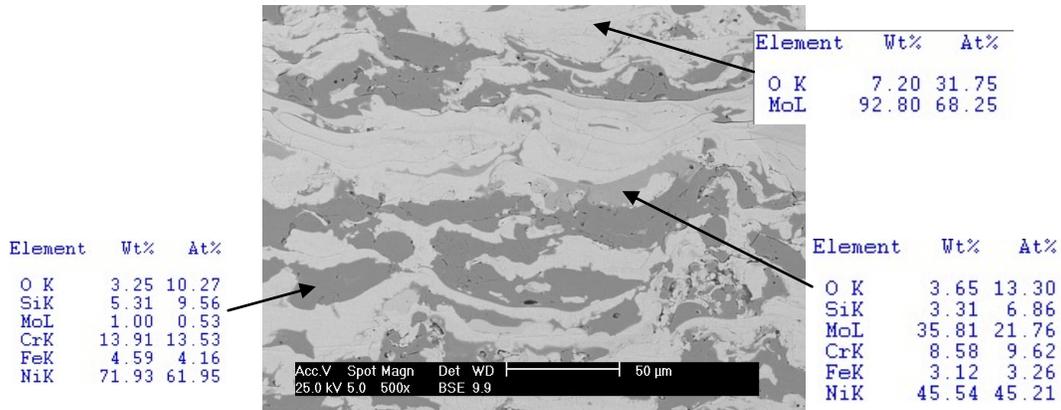


Figura 4.7. Fotomicrografía de la condición original la cual muestra los análisis por EDS.

De igual forma, un detalle al recubrimiento sometido a tratamiento térmico en atmósfera controlada, se muestra en la figura 4.8 a través de una micrografía en modo de electrones primarios con magnificación de 1000x. En la cual se evidencian tres fases similares a las obtenidas por el recubrimiento en su condición como-rociado. Adicionalmente se puede observar el análisis químico elemental por EDS realizado a las distintas fases. Este análisis demuestra que la fase blanca es distinta a la anterior, pues en ésta aparece níquel y en la fase gris clara se observó un aumento en la cantidad de molibdeno presente.

En cuanto a la fase gris oscura se observó un aumento en la cantidad de cromo y silicio. Lo cual puede ser atribuido a la difusión de estos elementos a través del recubrimiento, durante el tratamiento térmico.

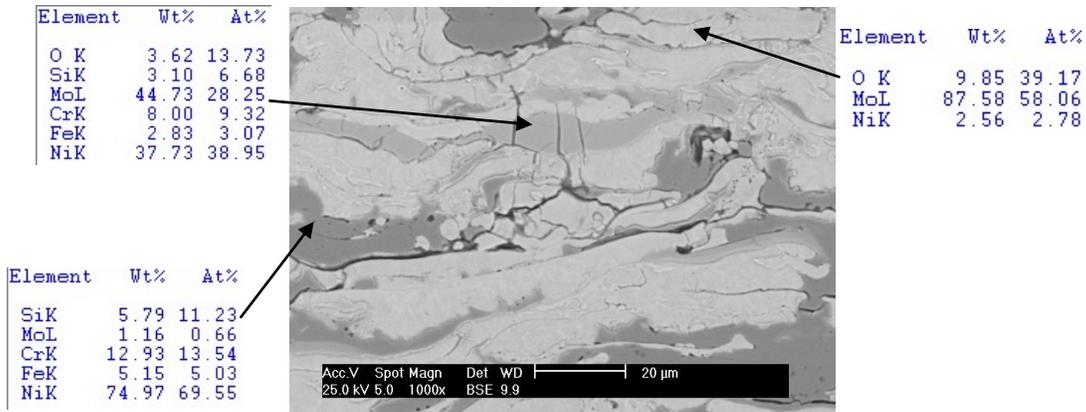


Figura 4.8. Fotomicrografía de la condición tratamiento en atmósfera controlada la cual muestra los análisis por EDS.

Al realizar una magnificación de 500x a la micrografía correspondiente a la condición sometida a tratamiento térmico de llama, se observó una fase de color diferente a las encontradas anteriormente y con presencia de grietas (ver círculo en la fotografía) lo que conllevó a un análisis químico por EDS, el cual indicó que el interior de la fase está conformado por óxido molibdeno, ver Figura 4.9. Las relaciones atómicas del molibdeno y el oxígeno indican que podría tratarse de un óxido de molibdeno (MoO_2), formado por las altas temperaturas que se generan en el proceso.

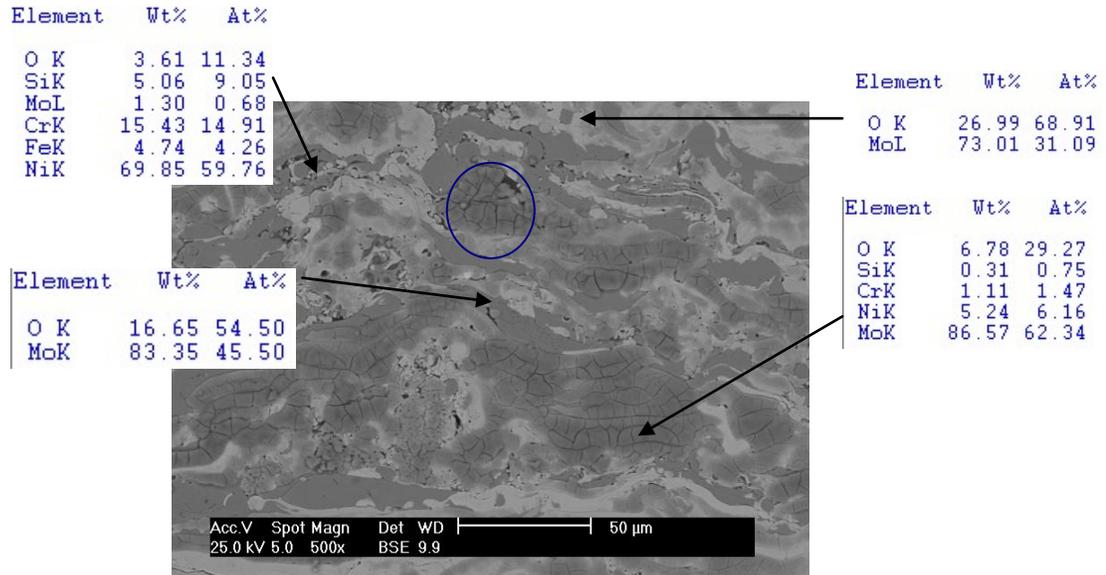


Figura 4.9. Fotomicrografía de la condición tratamiento a llama la cual muestra los análisis por EDS.

En la misma figura 4.9, Se evidencia la presencia de grietas tanto perpendiculares como paralelas a la dirección de las lamelas formadas, originadas por las diferencias de temperatura a las cuales son expuestos los recubrimientos durante el proceso de enfriamiento y calentamiento. Esto se evidencia en todas las condiciones pero en mayor cantidad con la de tratamiento térmico.

En la figura 4.10, se muestra la microestructura de la fundición gris, se observa grafito laminar uniformemente distribuido, siendo ésta la estructura esperada para este tipo de material. No se evidencia gran porosidad.

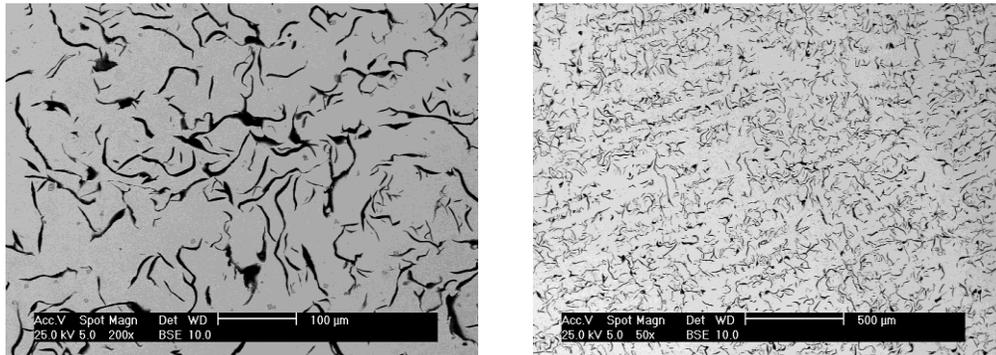
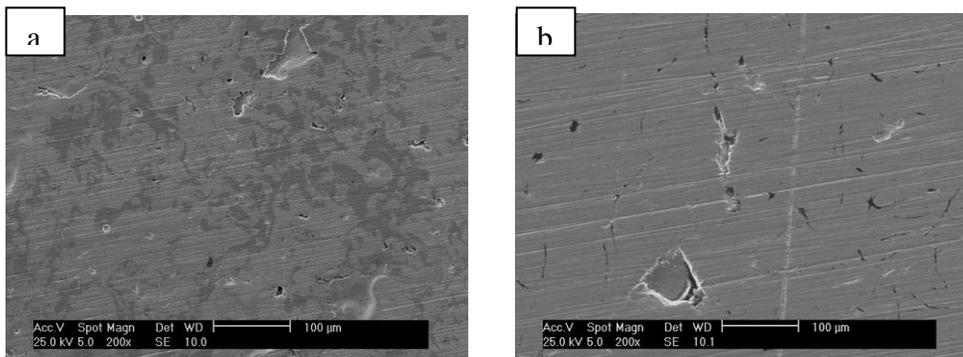


Figura 4.10. Fotomicrografía de la fundición gris.

4.5 Estudio de las superficies de desgaste.

Se procedió mediante el uso de la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) al estudio de los ensayos de desgaste para la mejor y peor condición arrojados por los ensayos, en las cuales se evaluó la superficie de desgaste para determinar los mecanismos de desgaste presentes.



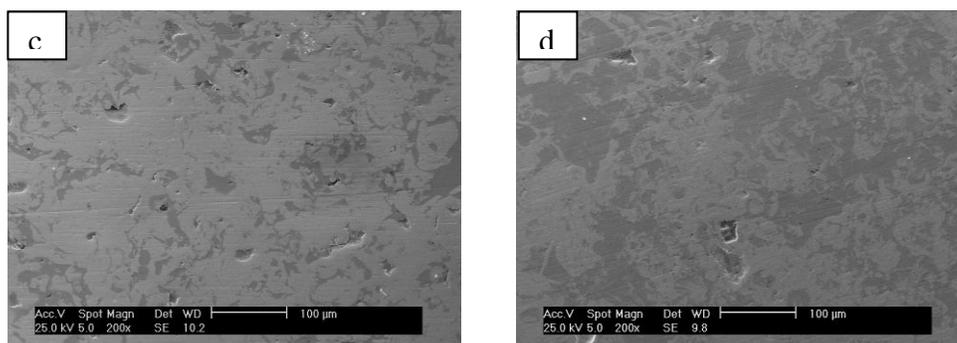


Figura 4.11. Micrografía de la superficie de desgaste en modo de electrones secundarios: (a) recubrimiento original, (b) fundición gris, (c) recubrimiento con tratamiento en atmósfera controlada y (d) recubrimiento con tratamiento a llama.

Con la finalidad de analizar la influencia de la estructura y danos superficiales de los materiales utilizados, durante el ensayo de desgaste se realizó una micrografía en cada uno de ellos, a una magnificación de 200x la cual es mostrada en las Figuras 4.11(a), 4.11(b), 4.11(c) y 4.11(d) para el recubrimiento original, la fundición gris, el recubrimiento con tratamiento en atmósfera controlada y con tratamiento a llama respectivamente. En la modalidad de electrones secundarios (SE), en las cuales se puede observar la evolución del desgaste y la reducción que resulta en el recubrimiento después de la aplicación de los tratamientos térmicos, tanto para el recubrimiento como para la fundición gris.

La figura 4.12(a) y 4.12(b), corresponden a una imagen obtenida por microscopía electrónica de barrido de la superficie de desgaste de la condición original que presentó los peores resultados en cuanto a volumen removido, en la cual se observa la formación de surcos propios de un proceso abrasivo y microgrietas.

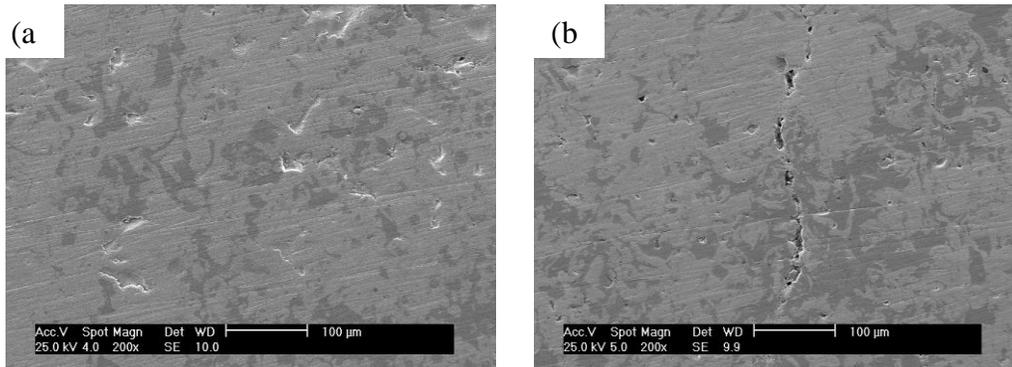


Figura 4.12 Micrografía de la superficie de desgaste condición original en modo de electrones secundarios con magnificación de 200x.

La figura 4.13(a) y 4.13(b), corresponde a una magnificación a 500x de la superficie desgastada de la condición original tomadas tanto en electrones secundarios (SE) como primarios (BSE). Aquí pueden observarse los principales mecanismos de desgaste, entre ellos la deformación plástica (círculos amarillos), y la presencia de microfracturas, debidas principalmente por el desprendimiento de la fase más dura del recubrimiento rica en níquel (círculos rojos).

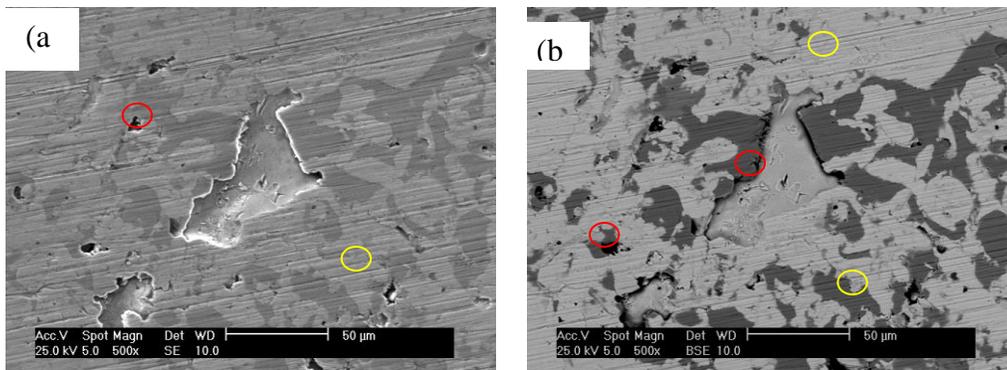


Figura 4.13. Micrografía de la superficie de desgaste condición original (a) en modo de electrones secundarios y (b) en modo de electrones primarios con magnificación de 500x.

La figura 4.14 (a y b), corresponde a una imagen de la superficie de desgaste de la condición que obtuvo los peores resultados de pérdida volumétrica (551 N y 0.370m/s) en magnificación de 1000x. En esta imagen se observa la formación de surcos propios de un proceso abrasivo. Sin embargo, se observa una especie de surcos más profundos que pueden venir dados por una partícula de mayor dureza y óxidos que se desprendió y que genera un proceso de abrasión por tres cuerpos (círculos rojos). Este mecanismo surge debido a la presencia de fases más duras que quedan en relieve debido a que la matriz, más dúctil, es socavada por el efecto del abrasivo. Estas partículas quedan atrapadas en el anillo (nylon) y se convierten en abrasivos produciendo los surcos mostrados en la figura. Además se muestran zonas donde la fase rica en níquel y cromo presentan danos graves. Estas partículas duras posiblemente no se integran durante la fusión y son desprendidas más fácilmente.

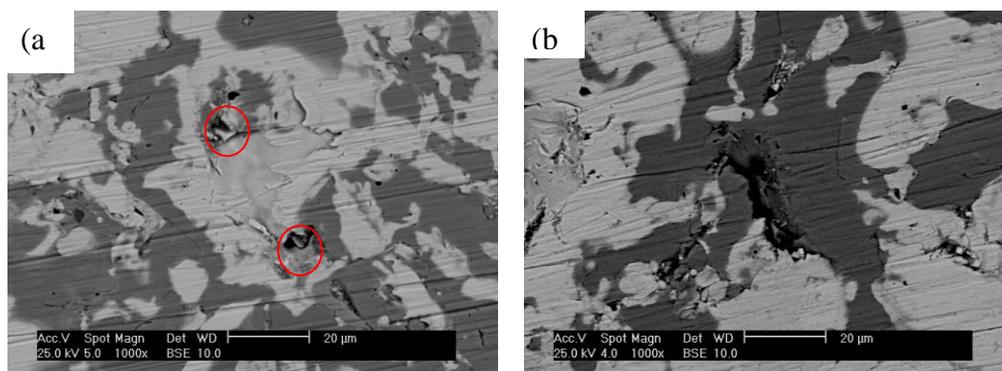


Figura 4.14. Micrografía de la superficie de desgaste condición original con magnificación de 1000x.

La figura 4.15(a), corresponde a una imagen obtenida por microscopía electrónica de barrido de la superficie de desgaste de la fundición gris, en la cual se observa la formación de surcos propios de un proceso abrasivo (círculos amarillos), zonas con huecos. La figura 4.15(b), corresponde a una imagen tomada a 200X, donde se evidencia los principales mecanismos de desgaste, tales como: surcos del proceso abrasivo (círculos amarillos), y el desprendimiento de material proveniente de la fundición (círculo rojo)

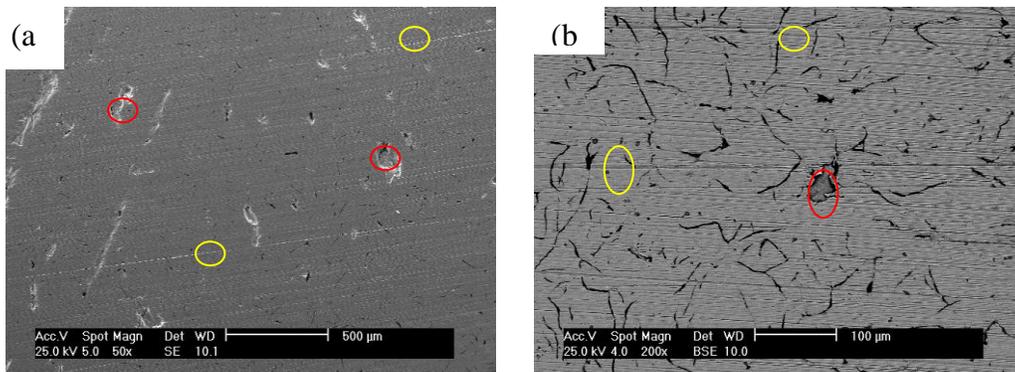


Figura 4.15. Micrografía de la superficie de desgaste de la fundición en modo de electrones secundarios: (a) magnificación de 50x y (b) detalle con magnificación de 200x.

La figura 4.16(a), corresponde a una imagen donde se evidencia la deformación plástica en la matriz de fundición al colapsar el nódulo de grafito de la misma. En este caso el grafito deja de actuar como lubricante intrínseco de la fundición y se acelera el proceso de desgaste en esa zona.

La figura 4.16 (b), es una imagen tomada a 500X, en la cual se aprecia surcos con mayor deformación plástica, debido al abrasión de un material duro, y de la pérdida de una de las laminas de grafito junto con un alto grado de deformación plástica a su alrededor.

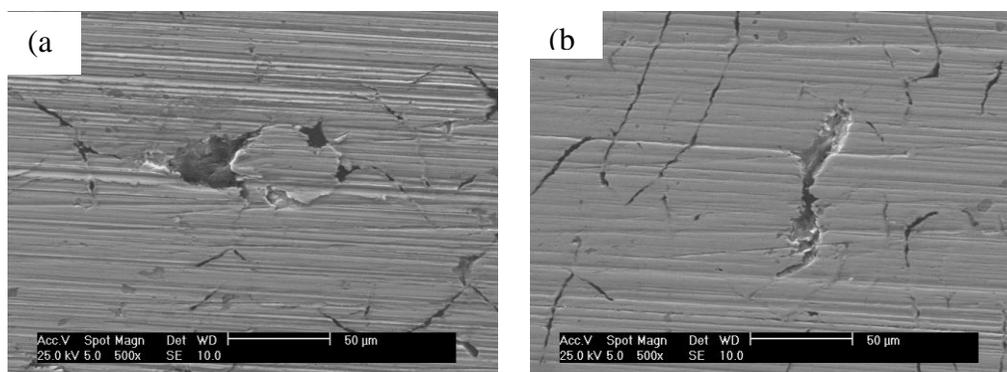


Figura 4.16 Micrografía de la superficie de desgaste de la fundición en modo de electrones secundarios: (a) magnificación de 500x y (b) detalle con magnificación de 500x.

Al evaluar en detalle la fundición ante el desgaste se evidencia que la aplicación de mayores cargas es donde comenzamos a detectar algún daño, y esto se debe a que la película de grafito se rompe bajo estas cargas y no se regenera, puesto que el hueco que se crea al extraer las láminas de grafito se cierra bajo la carga aplicada, produciéndose un contacto directo entre superficies (bloqueo y anillo).

La figura 4.17, corresponde a una imagen obtenida por microscopía electrónica de barrido de la superficie de desgaste de la condición con tratamiento térmico con atmósfera controlada, en la cual se observa la formación de surcos propios de un proceso abrasivo (círculos amarillos), zonas con fracturas y huecos (círculos rojos).

Sigue existiendo el arranque de la fase rica en níquel (en menor grado de la misma). Esto evidencia que el tratamiento colabora con la disminución del principal mecanismo de desgaste (abrasión por tres cuerpos), al mejorar la consolidación de las fases presentes en el recubrimiento.

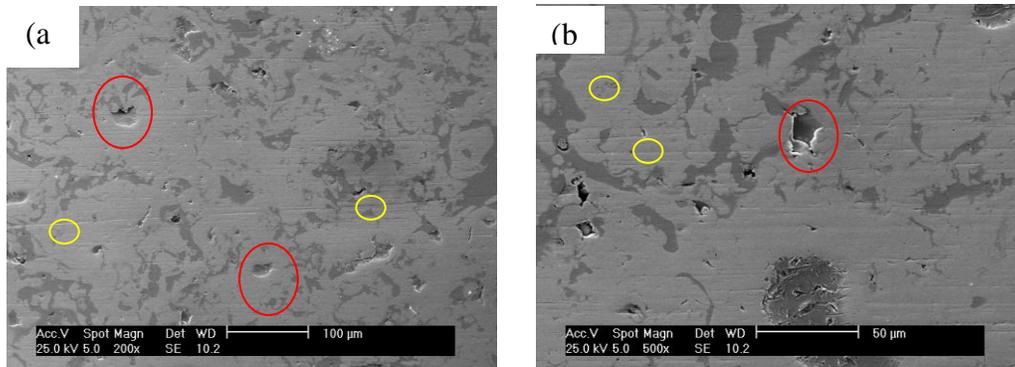


Figura 4.17 Micrografía de la superficie de desgaste de la condición con tratamiento térmico con atmósfera controlada en modo de electrones secundarios (a) magnificación de 200x y (b) magnificación 500x.

La figura 4.18, es una imagen tomada a 1000X, correspondiente a un detalle de la superficie de desgaste, donde se evidencia el arranque de la fase rica en níquel (circulo amarillo) y deformación plástica debido al mismo proceso de arranque de material en la zona (circulo rojo).

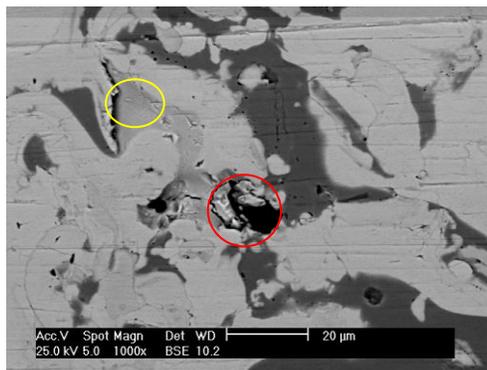


Figura 4.18. Micrografía de la superficie de desgaste de la condición con tratamiento térmico con atmósfera controlada en modo de electrones secundarios magnificación de 1000x.

La figura 4.19(a) y 4.19(b), corresponden a una imagen obtenida por microscopía electrónica de barrido de la superficie de desgaste de la condición con tratamiento térmico a llama, en la cual se observa la formación de surcos propios de un proceso abrasivo, zonas con grietas, provenientes del mismo tratamiento que pueden ser producto de las altas tasas de enfriamiento y calentamiento a la cual se ven expuestas las partículas del recubrimiento.

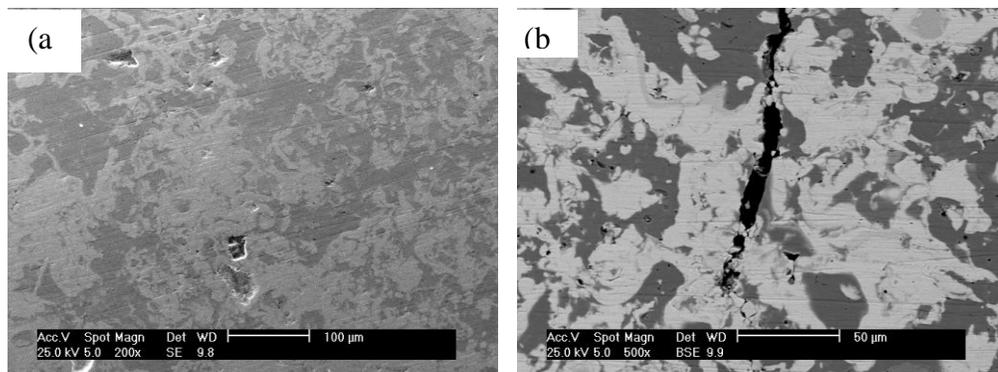


Figura 4.19. Micrografía de la superficie de desgaste de la condición con tratamiento térmico a llama: (a) electrones secundarios magnificación de 200x y (b) electrones primarios magnificación de 500x.

La Figura 4.20 (a y b), donde se evidencia los microporos que se encuentran entre las fases duras (circulo amarillo), demostrando la falta de integración de las mismas al resto del recubrimiento generando su posterior arranque de la matriz y de deformación plástica (circulo rojo) que se genera del desprendimiento de las partículas duras de la matriz, debido al endurecimiento que sufren las mismas por la acción repetitiva de la carga.

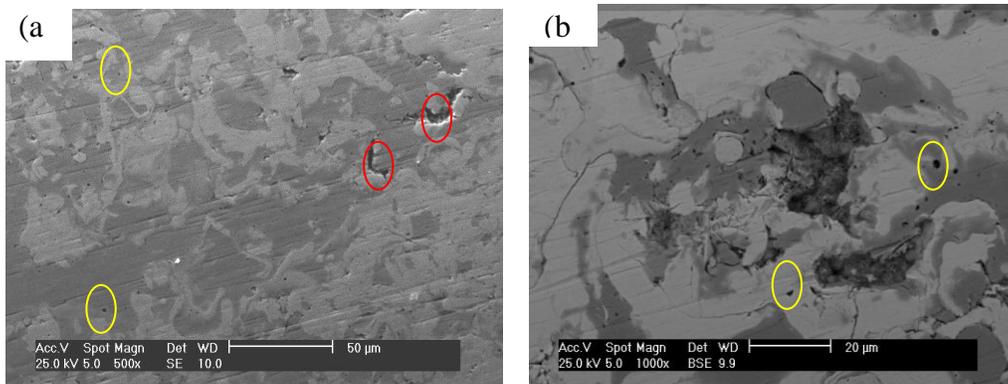


Figura 4.20 Micrografía de la superficie de desgaste de la condición con tratamiento térmico a llama (a) electrones secundarios a 500X y (b) electrones primarios a 1000x.

CONCLUSIONES

Con la realización de este estudio se ha podido demostrar que en los compresores de gas Natural, pueden ser sustituidos o recuperados con los recubrimientos depositados mediante rociado térmico por Plasma utilizando una aleación Mo-Ni, con tratamiento térmico posterior ya que presentaron mejores resultados comparados con la fundición gris en cuanto a la resistencia al desgaste por deslizamiento.

Los resultados muestran que los menores coeficientes de fricción se obtuvieron en el par tribológico recubrimiento condición tratada térmicamente en atmósfera controlada –Nylon. Lo cual fue atribuido a la formación de óxidos y mayor cohesión de las fases como consecuencia del tratamiento térmico.

Los tratamientos térmicos no produjeron cambios significativos en la dureza determinada por indentación vickers, ni en la porosidad indicando que estos aspectos no incidieron en la resistencia al desgaste obtenida en los recubrimientos tratados térmicamente.

Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que el tratamiento térmico con llama incrementa en un 97.75% la resistencia al desgaste por deslizamiento del recubrimiento como rociado y supera en un 97.35% a la fundición gris.

Mientras que el tratamiento térmico en atmósfera controlada incrementa en un 89.33% la resistencia al desgaste por deslizamiento del recubrimiento rociado y supera en un 87.42% a la fundición gris.

Los resultados de dureza no muestran mayor dependencia funcional en el comportamiento ante el desgaste, sino la cohesión de las distintas fases presentes en el recubrimiento con o sin tratamiento térmico, juega un rol de mayor importancia en el mismo.

Se determino que el mecanismo de desgaste fue el endurecimiento de los óxidos formados, su posterior fractura lo cual contribuyo posteriormente al mecanismo de abrasión de tres cuerpos.

- Aumentar el tiempo de permanencia para el tratamiento térmico en atmósfera controlada, a fin de mejorar la coherencia de las fases presentes en el recubrimiento.
- Controlar la tasa de enfriamiento en el tratamiento térmico a llama a fin de evitar la formación de grietas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society for Testing and materials (1994). D 2714-94 Standard Test Method for Calibration and Operation of the Falex Block-on-Ring Friction and Wear Testing Machine. ASTM International. Pennsylvania.

American Society of Metals (1992). Friction, lubrication and wear technology. *ASM Handbook*, Vol. 18. ASM International. United States of America.

Gonzalez, D. y otros (2005). Influencia del recubrimiento superficial sobre las prestaciones frente al desgaste y la fatiga de una aleación de aluminio 7075. *Anales de mecánica de la fractura*, 22, 335-340.

Irisarri, A. y Garcia, A. (2005). Comparación del comportamiento frente al desgaste de cuatro materiales. *Anales de mecánica de la fractura*, 22, 294-299.

Bolelli, G. y otros (2007). Microstructural and tribological comparison of HVOF-sprayed and post-treated M–Mo–Cr–Si (M = Co, Ni) alloy coatings. *Wear*, 263, 1397-1416.

Hinojosa, M. y otros (2004). Propiedades de escalamiento de las superficies de fractura del nylon. *Polimer*, 7(25), 4829-4836.

Babu, M. y otros (1996). Simultaneous optimization of flame spraying process parameters for high quality molybdenum coatings using Taguchi Methods. *Surface and Coatings Technology*, 79, 276-288.

- Giraldo, D. y Vélez, J. (2002). Estudio del desgaste por deslizamiento en seco de algunos plásticos. *Dyna*, 71(144), 1-8.
- Scagni, C. y De Santa Ana A. (2007). Evaluación de recubrimientos depositados por tecnología plasma-spray en cilindros de compresores de gas natural utilizados en la industria petrolera. Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad Metropolitana. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Caracas.
- Conde, M. y Davila, A. (2007). Optimización de la calidad de un recubrimiento base molibdeno-niquel depositado por la técnica de rociado térmico por plasma. Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Caracas.
- Shigley, J. y Mitchell, L. (1985). Diseño en Ingeniería Mecánica. 3ra ed. McGraw-Hill. Mexico.
- Ludema, K. (1996). Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology. CRC Press. New York.
- Verhoeven, J. (1987). Fundamentos de Metalurgia Física. Editorial Limusa. Mexico.
- Stolarski, T. (1990). Tribology in Machine Design. Butterworth-Heinemann. Oxford.

Stachowiak, G. y Batchelor, A. (1994). *Engineering Tribology*. 2da ed. Butterworth-Heinemann. Australia.

Bavaresco, L. y Klisans, J. (2000). Estudio de la resistencia al desgaste de recubrimientos rociados mediante la técnica de alta velocidad oxígeno combustible. Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Caracas.

Brostow, W. (1979). *Science of Materials*. John Wiley & Sons. New York.

Capote, S. y Perdomo, L. (2006). Optimización de un recubrimiento cerámico (WC-12%CO) depositado mediante el proceso de rociado térmico por plasma. Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Caracas.

Colmenares, J. (2004). Optimización de recubrimientos metálicos nanoestructurados depositados por rociado térmico. Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Caracas.

Cetinel, H. y otros (2006). [Artificial neural network-based prediction technique for wear loss quantities in Mo coatings](#). *Wear*, 261, 1064-1068.

Forn, A. y otros (2003). [Mechanical and tribological properties of Al-Si-Mo plasma-sprayed coatings](#). *Journal of Materials Processing Technology*, 143, 52-57.

Cubillán, A. y Liccionis, O. (2002). Estudio de la resistencia al desgaste del acero AISI 4340 bajo condiciones de deslizamiento sin lubricación. Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Caracas.

Cadenas, P., Rodríguez, M. y Staia, M. (2002). Efecto del tratamiento térmico posterior sobre la resistencia al desgaste por deslizamiento de un recubrimiento base molibdeno níquel depositado por HVOF. *Revista de Metalurgia*, 43(1), 121-133.

Ferrara, S. y Pérez, R. (2001). Evaluación de la resistencia al desgaste de un recubrimiento depositado por rociado térmico (HVOF). Trabajo Especial de Grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Caracas.

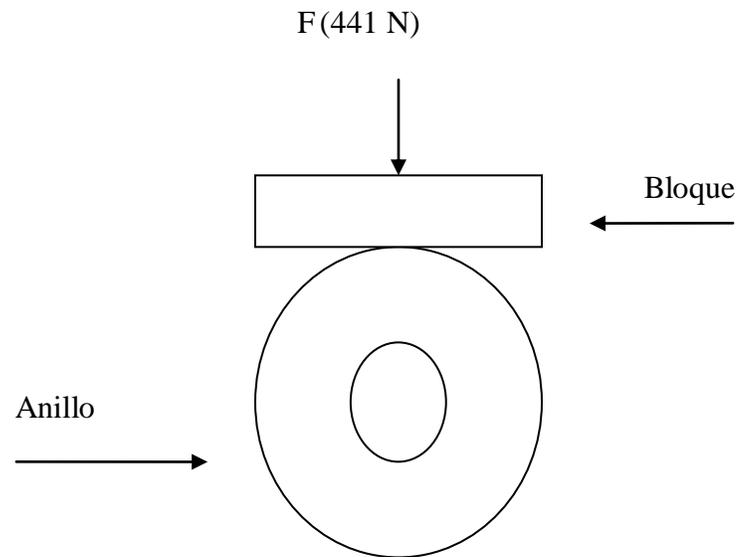
Hartley, N. E. W. (1980). Tribological and Mechanical Properties. *Treatise on Materials Science and Technology*, 18, 321- 371.

Hwang, B. y otros (2005). Effects of blending elements on wear resistance of plasma-sprayed molybdenum blend coatings used for automotive synchronizer rings. *Surface and Coatings Technology*, 194, 256-264.

Rabinowicz, E. (1992). Friction and Wear of Materials. John Wiley & Sons. New York.

Rigney, D. A. (1988). Sliding Wear of Materials. *Annual Review of Materials Science*, 18, 141- 163.

Yuansheng, J. y otros (1992). The tribological behaviour of various plasma-sprayed coatings against cast iron. *Surface and Coatings Technology*. 52, 169-178.

CÁLCULO DE LAS CARGAS PARA EL ENSAYO DE DESGASTE

Anillo: Nylon 6

$E_1 : 3 \times 10^3$ MPa (modulo de elasticidad)

$\Gamma_1 : 0.48$ (modulo de poisson)

$d_1 : 35$ mm (diámetro)

$\sigma_f : 40$ Mpa (tensión de fluencia)

Bloque: Fundición Gris

$E_2 : 99.97 \times 10^3$ MPa (modulo de elasticidad)

$\Gamma_1 : 0.211$ (modulo de poisson)

$d_2 : \infty$ (diamentro)

Área de contacto (b):

$$b = K_b \sqrt{F}$$

$$K_b = \left[\frac{2}{\pi l} \frac{(1-\nu_1^2)/E_1 + (1-\nu_2^2)/E_2}{(1/d_1) + (1/d_2)} \right]^{1/2}$$

Entonces:

$$b = 3.055 \times 10^{-2} \text{ mm}/\sqrt{\text{N}}$$

Presión máxima de contacto (P_{\max}) para el anillo:

$$P_{\max} = \frac{2F}{\pi b l}$$

Entonces

$$P_{\max} = 21.88 \text{ MPa}$$

El valor de P_{\max} se compara con σ_f del anillo de nylon y se verifica que el valor sea menor para evitar la deformación del material (para este caso no existe deformación del anillo).