

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTUDIO COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE
POR RODADURA DE CIGÜEÑALES RECUPERADOS POR
ROCIADO TÉRMICO Y SOLDADURA TIG**

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de
Venezuela
Por los Bachilleres:
Alberto Antonio Marcano Pelarda
José Fernando Vázquez March
Para optar por el título
De Ingeniero Mecánico

Caracas, 2003

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTUDIO COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE
POR RODADURA DE CIGÜEÑALES RECUPERADOS POR
ROCIADO TÉRMICO Y SOLDADURA TIG**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. María de Los Ángeles Rodríguez de Prato
TUTOR INDUSTRIAL: Prof. Andrea Scagni

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de
Venezuela
Por los Bachilleres:
Alberto Antonio Marcano Pelarda
José Fernando Vázquez March
Para optar por el título
De Ingeniero Mecánico

Caracas, 2003

Caracas, 14 de Noviembre de 2002

ACTA

Los abajo firmantes, miembro del Jurado examinador del Trabajo Especial de Grado de los Brs. ALBERTO A. MARCANO PELARDA y JOSÉ FERNANDO VÁZQUEZ MARCH, designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, titulado:

“ESTUDIO COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE POR RODADURA DE CIGÜEÑALES RECUPERADOS POR ROCIADO TÉRMICO Y SOLDADURA TIG”

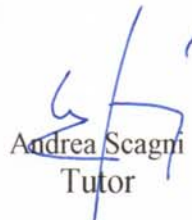
Dejan constancia, por medio de la presente acta, que consideran que el referido trabajo ha cumplido con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico, sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expresadas por los autores.



María Rodríguez de Prato
Tutora



Crisanto Villalobos
Jurado



Andrea Scagnoli
Tutor



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



Los suscritos, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los bachilleres VÁZQUEZ M., JOSE F. Cédula de Identidad V.- 14.501.814 y MARCANO P. ALBERTO A. , Cédula de Identidad V.- 14.533.916 , el cual lleva por título

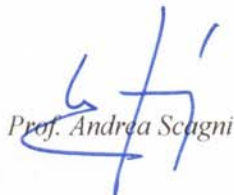
“ESTUDIO COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE POR RODADURA DE CIGÜEÑALES RECUPERADOS POR ROCIADO TÉRMICO”

Decidimos conferirle una

MENCION HONORIFICA

En reconocimiento al esfuerzo realizado como estímulo a la actividad creativa demostrada en el transcurso de la elaboración de este Trabajo Especial de Grado, el cual constituye un aporte importante e inédito al estudio en el área de Recubrimientos Resistentes al Desgaste.

En fe de lo anteriormente expuesto se levanta la presente Acta en la ciudad de Caracas, a los veinticuatro días del mes de octubre del año dos mil tres, dejándose constancia que, de acuerdo a la normativa vigente, actuó como Coordinador del Jurado Examinador la Profa. María de los A. Rodríguez de Prato.


Prof. Andrea Scagni


Prof. Crisanto Villalobos


Profa. María A. Rodríguez de Prato
Coordinador

DEDICATORIA

A Dios por sobre todas las cosas por haberme colocado en un lugar privilegiado, por darme la oportunidad de permitirme lograr todo lo que soy, por regalarme la presencia en mi vida de las personas que me han ayudado a construir quien soy hoy en día, en resumen por regalarme esta experiencia que se llama vida.

A mi familia, dos palabras, gracias los amo. Por Uds. tengo y soy todo lo que soy, esto es para todos ellos.

En especial a mis padres, son indescriptibles gracias por llevarme de la mano toda la vida y aguantarme, a mis hermanos que son el mayor tesoro que tengo, de hecho son los mejores, sin ellos no sería yo, a mis sobrinos por recordarme que siempre es bueno ser un niño.

A mi siempre hermanos sergio, carlitos, carlucho, conchi, andreina, ángel, nandito, el chino, el calvo, leo, will, nachos, paty, morochos, leito, y los que por algún motivo la vida nos ha alejado y no están aquí, gracias por regalarme su paciencia y por valorarme, y por simplemente siempre estar allí, demostrando el concepto de amistad, sin Uds. todo sería distinto.

A todo el comando de la universidad por recuerdos que perduraran en mi memoria por toda la vida, fueron, son y serán el mejor grupo, gracias por existir.

Dedicatoria

A mi hermano y compañero de tesis nandito, por fin lo logramos, gracias por tener la paciencia, constancia y apoyo cuando a mi me fallaron.

A todos aquellos que no nombro que han contribuido de una u otra forma a construir mi persona y al logro de mis metas.

A todos lleguen mis sinceros agradecimientos con la esperanza de que algún día pueda retribuir todo lo que han hecho por mi persona, demostrare que han hecho una inversión en mi.

**“TIENEN EL MUNDO EN SUS MANOS SOLO TIENEN QUE
HACERLO GIRAR DEPENDE DE UDS EL SENTIDO QUE LE DEN”**

Alberto Marcano

DEDICATORIA

A mi madre, que también hizo el papel de padre, por su grandioso esfuerzo de llevar adelante a tres muchachos...

A mis amigos en general, sobre todo los de la Universidad, por pasar momentos inolvidables.

A una mujer muy especial, a mi novia Patricia Mijares...

A nuestro amigo, Frank Martínez, que siempre nos acompaña con sus recuerdos...

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer principalmente a Plasmatec Ingenieros, C.A. por permitirnos utilizar sus instalaciones para realizar nuestro trabajo de grado.

A todos los técnicos que allí trabajan, especialmente al Sr. Guillermo Valencia, Sr. Alejandro Álvarez, a Julio Escalona y José Luna.

A nuestra Tutora Académica, Prof. María de Los Ángeles Rodríguez de Prato, por su valiosa e incondicional ayuda durante la realización del trabajo de grado.

A la Ing. María José Del Elmo por su colaboración en la obtención del acero utilizado como sustrato.

Al Sr. Esteban González y al Sr. Antonio Fernández por sus donaciones, Sr. Edgar Durán (Jefe del Taller de Tratamientos Térmicos de FERRUM Aceros, C.A.), al Sr. Antonio Adegas, por su excelente trabajo de tornería y al Sr. José Patiño por sus servicios prestados en la rectificación de algunas probetas.

Al Ing. Crisanto Villalobos por su colaboración brindada para realizar este trabajo de investigación.

MARCANO P, ALBERTO A. / VÁZQUEZ MARCH, J. FERNANDO

**ESTUDIO COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE
POR RODADURA DE CIGÜEÑALES RECUPERADOS POR
ROCIADO TÉRMICO Y SOLDADURA TIG**

Tutora Académico: María De Los Ángeles Rodríguez

Tutor Industrial: Andrea Scagni

Tesis. Caracas. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería.

Escuela de Ingeniería Mecánica. 2003. 106 págs

Palabras claves: Termorrociado, Soldadura TIG, Desgaste por Rodadura,
Cigüeñal Motor Fuera de Borda, Recubrimiento

En el presente trabajo se evaluó la resistencia al desgaste por rodadura de las muñequillas de cigüeñales de motores fuera de borda recuperados por dos procesos diferentes. El material utilizado para la fabricación de las muñequillas fue un acero AISI 8620 por ser éste el material recomendado para esta aplicación.

Uno de los procesos utilizados para la recuperación de las muñequillas fue Rociado Térmico por la técnica HVOF, para la cual se utilizó una aleación base níquel conocida comercialmente como Colmonoy 88. Posteriormente el recubrimiento fue sometido a un Tratamiento Térmico por Llama Oxiacetilénica.

El otro proceso utilizado a fin de establecer comparaciones fue Soldadura TIG (Tungsteno Gas Inerte), utilizando un electrodo en base Fe-Cr denominado E-6-60. Un grupo de muñequillas fue sometido a un Tratamiento Térmico posterior de Alivio de Tensiones a fin de evaluar el efecto de este Tratamiento sobre la resistencia al desgaste por rodadura de la pieza recubierta.

Para la realización de este estudio se construyó un banco de pruebas, el cual simularía las cargas dinámicas a las cuales están sometidas las muñequillas de los cigüeñales de motores fuera de borda.

Las piezas de los materiales ensayados fueron cortadas para su posterior análisis mediante Microscopía Óptica y Electrónica de Barrido, permitiendo apreciar los cambios que sufrieron los recubrimientos al ser sometidos a carga.

La dureza de todas las muestras fue evaluada utilizando la norma ASTM E-384-73 mediante un Micrómetro.

La resistencia al desgaste por deslizamiento fue calculada a través del ensayo de Pin On Disk en un Tribómetro, siguiendo las especificaciones de la norma G 99-95-A.

A través de este estudio se pudo determinar que las muñequillas recuperadas por el proceso de Soldadura TIG presentaron un mejor comportamiento frente al desgaste por rodadura.

ÍNDICE

Introducción	1
Objetivos	4

CAPÍTULO 1

1.- Fundamento Teórico	5
1.1.- Motores Fuera de Borda	5
1.2.- Termorrociado	7
1.2.1.- Generalidades	7
1.2.2.- Grupos de Termorrociado de acuerdo al método de generación de calor	9
1.2.3.- Técnicas del Termorrociado	11
1.2.3.1.- High Velocity Oxy-Fuel (HVOF)	11
1.2.3.2.- Ventajas Generales del Termorrociado	14
1.2.4.- Aplicación del Termorrociado	15
1.3.- Soldadura TIG (GTAW)	19
1.3.1.- Generalidades	19
1.3.2.- Gas Protector	21
1.3.3.- Ventajas de la Soldadura TIG	22
1.3.4.- Defectos en la Soldadura	22
1.4.- Teoría del Desgaste	23
1.4.1.- Desgaste por Rodadura	25
1.4.2.- Esfuerzos de Contacto de Hertz	26
1.5.- Estudios Realizados Anteriormente Relacionados con el	

Desgaste	28
----------	----

CAPÍTULO 2

2.- Selección de los componentes del Banco de Ensayos	32
2.1.- Selección del Motor Eléctrico	32
2.2.- Selección de las Poleas	33
2.3.- Selección de la Correa	33
2.4.- Selección del Eje	34
2.5.- Selección de los Rodamientos de Apoyo	34

CAPÍTULO 3

3.- Descripción de los Equipos	37
3.1.- Características del Banco de Ensayos	37
3.1.1.- Sistema de Bastidores	37
3.1.2.- Sistema de Potencia	38
3.1.3.- Sistema de Lubricación	39
3.1.4.- Sistema de Carga	41
3.1.5.- Sistema de Registro de Temperatura	42
3.2.- Equipo para la Soldadura TIG	42
3.3.- Equipo para el Termorrociado (High Velocity Oxy – Fuel)	43

CAPÍTULO 4

4.- Metodología Experimental	45
------------------------------	----

Índice

4.1.- Materiales	45
4.2.- Fabricación de los ejes	46
4.3.- Procedimiento Experimental de los Ensayos de Desgaste por Rodadura	51
4.4.- Ensayos de Desgaste por Rodadura	53
4.5.- Pin On Disk	56
4.6.- Microscopía Electrónica de Barrido	60

CAPÍTULO 5

5.- Resultados y Análisis de Resultados	61
5.1.- Microscopía Electrónica de Barrido	61
5.1.1.- Microestructura del Recubrimiento depositado con Colmonoy 88 tratada con llama oxiacetilénica	61
5.1.2.- Microestructura del Recubrimiento depositado por Soldadura TIG sin tratamiento térmico	62
5.1.3.- Microestructura del Recubrimiento depositado por Soldadura TIG con tratamiento térmico	63
5.2.- Evaluación de los Ensayos de Microdureza	65
5.3.- Evaluación de la Resistencia al Desgaste por Rodadura	68
5.4.- Ensayo de Desgaste Deslizante (Pin On Disk)	78

CAPÍTULO 6

6.1.- Conclusiones	88
--------------------	----

Índice

6.2.- Recomendaciones	90
- Referencia Bibliográficas	92
- Apéndice	97
- Anexos	103

INTRODUCCIÓN

Los cigüeñales de los motores fuera de borda utilizan rodamiento (llamados rodamientos de agujas) en vez de cojinetes de deslizamiento. Lo peculiar de estos rodamientos es que sus partes móviles como son las agujas, ruedan directamente contra la superficie del cigüeñal y la superficie de la biela, y no como en los rodamientos convencionales los cuales tienen sus propias pistas para rodar. Esta situación trae como consecuencia el desgaste de la superficie del cigüeñal y la biela, y posteriormente la sustitución de los mismos por otros completamente nuevos.

El desgaste se puede definir como el deterioro de la superficie debido al uso. Ocurre en una amplia variedad de operaciones, y en algunas industrias es muy elevado el gasto anual por concepto de reposición de piezas desgastadas. El desgaste es también muy importante en la práctica de la ingeniería. En muchos casos constituye el principal factor que limita la vida y el rendimiento de los componentes de máquinas. Ningún elemento de máquina es inmune al desgaste; este fenómeno se manifiesta siempre que exista carga y movimiento.

La prolongación de la vida útil de los componentes mecánicos por medio del control del desgaste se ha convertido en una importante herramienta para la reducción de costos de producción en la industria. El control del desgaste es ahora uno de los principales objetivos. Como respuesta al estudio que esta preocupación amerita, surgen nuevos procesos como la soldadura de reparación y el termorrociado

Introducción

El concepto de mantenimiento y recuperación de elementos de máquinas ha estado muy debatido, así como el de soldadura de mantenimiento o recuperación y el de termorrociado, cuestionándose incluso si existe o no como tal, o si es simplemente la aplicación de un proceso tecnológico más a un campo de trabajo. Siempre ha sido un tema muy discutido en vista de la gran importancia que representa ofrecer el mejor y más eficaz método, técnica y tecnología a los menores costos y en el menor tiempo posible.

En la actualidad, gracias a los avances tecnológicos y los diversos estudios científicos en pro de satisfacer las demandas de reparación, también la tecnología del termorrociado se está presentando como una de las soluciones más notorias para ser empleada en la reconstrucción de una gran variedad de elementos de máquinas, abarcando el sector industrial, naval, automotriz, etc. El termorrociado consiste en la proyección de partículas semi-fundidas sobre un sustrato. El material proyectado puede ser metálico, cerámico, plástico o refractario; y viene suministrado en forma de polvo o alambre. La gran ventaja que presenta la tecnología del termorrociado para estas aplicaciones, es su flexibilidad en la variedad de materiales, procesos, control de tolerancias, recuperación y reparación de piezas y demás tecnologías periféricas que pueden llegar a utilizarse.

El empleo del termorrociado en el campo automotriz se ha estado desarrollando para la reconstrucción y mejoramiento de aquellos elementos de motor que se encuentran sometidos a las solicitudes más severas, por ejemplo: pistones, válvulas, cigüeñales, anillos, etc.

Introducción

En este trabajo se pretende determinar si la técnica de recubrimiento por termorrociado y de soldadura TIG, se pueden aplicar exitosamente para la recuperación de los cigüeñales de motores fuera de borda. Para esto se decidió diseñar y construir un banco de ensayos capaz de simular las cargas producidas en la muñequilla del cigüeñal de un motor fuera de borda, eligiéndose como referencia un motor fuera de borda YAMAHA de 140 hp, utilizando como material de ensayo un acero aleado igual al material de los cigüeñales reales de los motores fuera de borda.

OBJETIVOS

.- OBJETIVOS GENERALES:

Realizar un estudio comparativo de la resistencia al desgaste por rodadura de cigüeñales de motores fuera de borda recuperados mediante Termorrociado (HVOF) y Soldadura TIG.

.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Construcción y puesta en marcha del Banco de Pruebas para la realización de los ensayos de desgaste por rodadura.
- Evaluar la resistencia al desgaste por rodadura de un eje recubierto con Colmonoy 88 mediante la técnica del Rociado Térmico (Alta Velocidad Oxígeno Combustible conocida como HVOF) con Tratamiento Térmico posterior.
- Evaluar la resistencia al desgaste por rodadura de un eje recubierto con un electrodo E-6-60 mediante Soldadura TIG sin y con Tratamiento Térmico posterior.
- Efectuar un estudio comparativo de la resistencia al desgaste de los ejes recuperados con las dos técnicas: Termorrociado y Soldadura TIG.

CAPÍTULO I. FUNDAMENTO TEÓRICO

1.1.- MOTORES FUERA DE BORDA

Los motores fuera de borda son del tipo de tres lumbreras, pero sólo se toma aire por la lumbrera del cárter controlada por el pistón. Estos motores se colocan con el cigüeñal en posición vertical, del modo que el árbol de accionamiento que baja el engranaje propulsor pueda acoplarse a él directamente. Los motores de dos cilindros se construyen con los cilindros opuestos y gemelos.

Los motores fuera de borda son motores de dos tiempos y como tales no llevan cárter de aceite. Por ello es que no utilizan cojinetes de deslizamiento, como los ya conocidos en los motores de cuatro tiempos, en su lugar usan rodamientos de aguja.

La lubricación de los motores fuera de borda se consigue por intermedio de la mezcla 50:1; por cada 50 partes de gasolina se encuentra 1 parte de aceite para motores fuera de borda. Al reposar en la gasolinera, se añade una cierta cantidad de aceite en el combustible, que posteriormente entrará en el motor a través del carburador. Mientras que el combustible se mezcla con el aire produciendo los gases con capacidad de arder posteriormente, el aceite, más difícil de mezclar con el aire, se deposita en gran parte, cumpliendo su función más importante que es la de lubricar el motor. En consecuencia, los motores fuera de borda no necesitan bomba de aceite, filtro, manómetro ni radiador de aceite. La falta de todas estas piezas no le añaden en absoluto ya

Capítulo I
Fundamento Teórico

que la mezcla de aire, combustible y aceite lubricante alcanzan al pistón por arriba y por abajo, lubricando a su eje, a la biela y al cigüeñal y llegando a todos los cojinetes que necesiten engrase. La ventaja de este sistema de engrase radica principalmente en que el motor recibe siempre aceite nuevo y limpio.

En este tipo de motores, el motor o unidad de potencia va colgado en el espejo de popa fuera de la borda de la lancha, por lo tanto no ocupan espacio interior. Dentro de sus características más resaltantes podemos citar:

- Aplican a embarcaciones que van de pequeñas a medianas (generalmente hasta 30 pies)
- Básicamente usan gasolina y son de 2 tiempos.
- Cáster seco. El aceite va mezclado con la gasolina en la proporción 50:1 aproximadamente).
- Potencias comúnmente no mayores de 250 hp, aún cuando existen motores que pueden pasar de los 300 hp.
- Relación potencia/peso alta, es decir, potencia relativamente alta para su tamaño.
- Sirven de timón y de sistema de estabilización de la embarcación. (power trim).

1.2.- TERMORROCIADO

1.2.1.- Generalidades

El termorrociado es un término genérico que involucra un grupo de procesos que emplean energía química o eléctrica para calentar, acelerar y depositar materiales metálicos, intermetálicos, cerámicos, polímeros compuestos sobre sustratos preparados. En estos procesos el material a rociar es alimentado en forma de polvo, alambre o varilla, en pistolas o antorchas en las cuales el material es calentado hasta temperaturas cercanas o relativamente superiores a las del punto de fusión.

A través de una corriente de aire o gases comprimidos, las partículas rociadas en estado de semi-fusión, a velocidades que exceden los 600 m/s para procesos de alta velocidad, la cual permite que sobre el sustrato las partículas impacten fuertemente haciendo posible que se vayan formando capas delgadas relativamente homogéneas con una microestructura refinada. Estas capas, como se ve en la Figura 1.1, se van enfriando y solidificando progresivamente adheriéndose en forma continua sobre la superficie rugosa preparada del sustrato (se consigue el espesor total del revestimiento mediante múltiples pasadas).

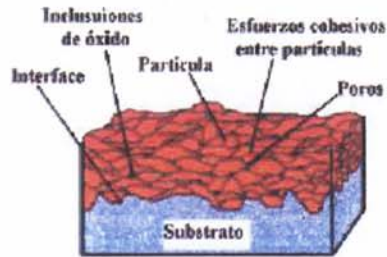


Figura 1.1. Proceso de Termorrociado

En los últimos años 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. El entendimiento de cada componente y cada variable debe ser la mejor, de manera que sea posible realizar una correcta selección y combinación acorde con la aplicación donde se vaya a efectuar el termorrociado.

En general una de las mayores ventajas del termorrociado es su amplia variedad de materiales que pueden llegar a ser usados como revestimientos (de hecho cualquier material que pueda fundirse sin descomponerse, puede llegar a ser termorrociado). Por otra parte, esta técnica permite aplicar revestimientos sin llegar a calentar significativamente la superficie del sustrato.

1.2.2.- Grupos de Termorrociado de acuerdo al método de generación de calor:

Comercialmente el termorrociado es calificado en dos grupos básicos en función del método de generación de calor:

El primer grupo utiliza gases de combustión como fuente de energía. La utilización de mezclas de combustibles líquidos o gaseosos junto con un agente oxidante, permite calentar y acelerar las partículas del material de recubrimiento a rociar. Por otra parte, este grupo es subdividido comercialmente en dos grupos: aquellos que emplean combustión externa sin restricción de calentamiento, a presiones bajas, en aire ambiental y aquellos procesos que emplean combustión interna con una alta rata de flujo y presión, que permite obtener velocidades supersónicas a la salida de la pistola (High Velocity Oxi-Fuel o HVOF).

El segundo grupo utiliza energía eléctrica como fuente para generar el calor necesario para fundir y acelerar las partículas del material a rociar. Dentro de este grupo se encuentran:

- Plasma: sin arco transferido y con arco transferido
- Plasma inducido
- Arco-Eléctrico

La selección apropiada del método de termorrociado es normalmente realizada de acuerdo al material de revestimiento a emplear, los requerimientos exigidos al recubrimiento, la economía, el tamaño y geometría de las piezas y la manipulación de los equipos.

1.2.3.- Técnicas del Termorrociado

1.2.3.1.- High Velocity Oxy-Fuel (HVOF)

La técnica del termorrociado a través del HVOF emplea una mezcla de combustible (normalmente Propano, Propileno, Metil –Acetileno- Propadeno, MAPP, o Hidrógeno) junto con oxígeno para generar la energía requerida en una cámara de combustión; en ciertos casos se emplea Kerosene líquido más aire el cual funciona como oxidante. Los productos de la combustión son expandidos por medio de una tobera, en la cual se llegan alcanzar velocidades supersónicas. El material a rociar es introducido normalmente de forma axial en la tobera, en donde es calentado (llevándolo hasta un estado de semi-fusión) y acelerado a velocidades por encima de 550 m/s. En la siguiente Figura se ilustra dicho proceso:

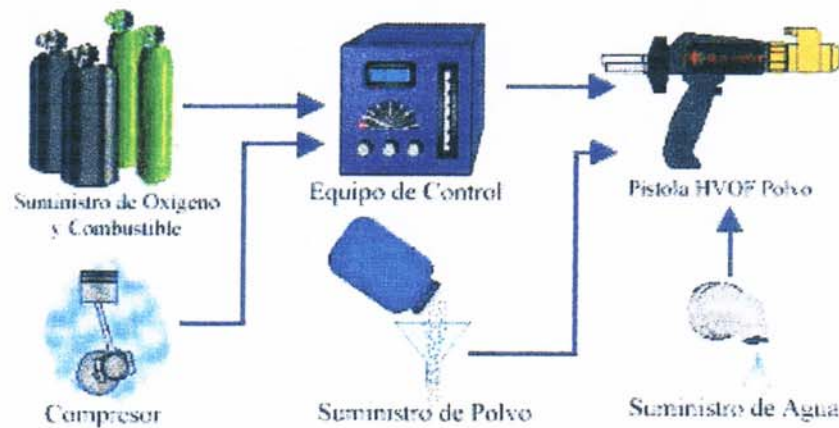


Figura 1.2. Proceso de Termorrociado mediante HVOF

Hoy en día la técnica del HVOF se subdivide en dos grupos: combustión pulsante y combustión continua.

A.- El grupo de combustión pulsante lo comprende la pistola de detonación o D-Gun (Detonation Gun), el cual fue el primer método introducido en el termorrociado por HVOF y el cual ha sido desarrollado para la deposición de revestimientos duros y resistentes al desgaste tales como carburos y óxidos. La D-Gun emplea una serie de explosiones controladas producto de una mezcla normalmente de oxígeno y acetileno, estas detonaciones originan altas presiones y altas temperaturas dentro de la pistola, las cuales llegan a niveles cercanos o en ocasiones por encima del punto de fusión de los materiales rociados, además de producir altas aceleraciones que permiten que las partículas del material lleguen a alcanzar velocidades cercanas a los 760 m/s. Cambiando el combustible y algunos parámetros se pueden llegar a alcanzar velocidades cercanas a los 1000 m/s. Este proceso que emplea la D-Gun es cíclico y luego de cada detonación, la cámara es purgada mediante nitrógeno y el proceso se repite de cuatro a diez veces por segundo.

B.- El segundo grupo, Combustión Continua, comprende los otros tres métodos del HVOF. Estos operan con una mezcla de combustible que consiste en Oxígeno más Propileno, Propano, Hidrógeno y en determinadas aplicaciones emplea combustible líquido como el kerosene. Las pistolas de este grupo tienen ductos de refrigeración (por aire o por agua), y ductos donde se realiza la mezcla Oxígeno/Combustible bajo cierta presión controlada, luego los gases acelerados producen una corriente la cual arrastra el material

de revestimiento (en forma de polvo), el cual circula a través de una tobera para luego salir expulsado hacia el substrato.

La gran velocidad alcanzada por las partículas produce una característica única de estos métodos de HVOF, el llamado Choque de Diamante, el cual puede visualizarse en la Llama. La temperatura de combustión alcanza los 2750 °C y forma una configuración circular en la Llama. El material de recubrimiento generalmente es introducido en la pistola en forma axial (lo que permite un calentamiento uniforme de éstos), la velocidad promedio alcanzada por las partículas del revestimiento está dentro de un rango de 760 m/s a más de los 900 m/s, producto de las altas velocidades alcanzadas por los gases de combustión, la cual oscila entre 1370 m/s a 2160 m/s.

1.2.3.2.- Ventajas Generales del Termorrociado

La Tabla 1.1 contiene las ventajas, con respecto a otros métodos de deposición de recubrimiento, del Termorrociado:

Tabla 1.1. Ventajas del Termorrociado

Beneficio del Revestimiento	A causa de:
Densidad alta (poca porosidad)	Mucha energía de impacto
Alta dureza	Menos degradación y mejor adherencia
Mejor resistencia al desgaste	Revestimientos duros y rígidos
Fuerte adherencia con grandes esfuerzos de cohesión	Mejoramiento de la adhesión entre las partículas
Poco contenido de óxidos	Menor tiempo de exposición al aire
Poco contenido de partículas esféricas fundidas	Menor calentamiento de las partículas
Buena retención del polvo químico y de sus fases	Reducción del tiempo a altas temperaturas
Revestimientos delgados (por pasadas)	Mejoramiento de los esfuerzos residuales
Superficies más lisas y pulidas	Velocidad de impacto alta

1.2.4.- Aplicación del Termorrociado:

Uno de los aspectos más importantes de los revestimientos hechos por medio de las técnicas de termorrociado es probablemente su diversidad de aplicaciones; en parte debido a una razón principal. Se refiere a la casi ilimitada selección de materiales (más de 200 materiales de revestimiento con diferentes características de dureza, coeficiente de fricción, resistencia y otras tantas más propiedades), pudiéndose agrupar estos en: metales puros, aleaciones metálicas, cermet, cerámicas, carburos, polímeros, materiales de compuestos generales como polvos compuestos de Al-Ni y Ni-grafito.

Todo esto permite que los revestimientos hechos por medio de las técnicas de termorrociado sean aplicados prácticamente a cualquier sustrato (metálicos, plásticos, compuestos, etc). A su vez, estos revestimientos pueden en cierta forma, ser aplicados a partes o elementos con: maquinado final, tratamiento térmico, en donde se ha practicado soldadura y otros procesos de alta temperatura.

Los revestimientos del termorrociado ofrecen propiedades en los materiales que no pueden ser encontrados en las piezas metálicas forjadas. Estos revestimientos pueden ser aplicados en áreas selectas en vez de aplicarse a la pieza entera, lo cual permite que los costos disminuyan en vista de la eliminación de los procesos innecesarios.

Las aplicaciones de las técnicas de termorrociado se han estado incrementando a través de los últimos años, básicamente la mayoría de las aplicaciones están orientadas hacia el campo de las piezas que necesiten tener resistencia al desgaste y a la corrosión.

1.- Resistencia a la corrosión: aleaciones con base de aluminio y zinc son las más ampliamente utilizadas para realizar revestimientos anticorrosivos por medio de la técnica del termorrociado. Estos son usados para proteger de la corrosión a las piezas y grandes estructuras (barcos, puentes, etc) de hierro y acero que se encuentran en medios muy favorables para la corrosión. En general, en la industria marina es donde se consigue el mayor rango de aplicación. Otros materiales empleados como revestimiento para ésta técnica incluye: los aceros inoxidable, bronce con aluminio y aleaciones con base níquel.

2.- Resistencia al desgaste: uno de los más importantes usos del termorrociado es para la resistencia al desgaste. Este es empleado para resistir casi todas las formas de desgaste, incluyendo el abrasivo, adhesivo y el producido por fatiga de la superficie (fretting, erosión, cavitación, etc). Los revestimientos empleados para tal fin involucran una gran variedad de metales y de sus aleaciones, cerámicas, cermet, carburos y algunos plásticos de poca fricción. Generalmente, la resistencia al desgaste de los revestimientos aumenta con su densidad y fuerza cohesiva. Las matrices se endurecen por medio de la solidificación rápida, por la dispersión introducida a través del termorrociado y por la suma de fases endurecidas separadamente, por ejemplo: carburos de cromo, tungsteno, titanio y/o por inclusiones de óxido.

Los siguientes factores deben tomarse en cuenta para aplicar estos revestimientos:

- El revestimiento debe ser duro. En partícula, las superficies duras deben exceder la dureza de los granos abrasivos presentes.
- El abrasivo más común es la Silica (arena), cuya dureza es aproximadamente 820 Hv (comparándola, los compuestos con Tungsteno y Carburo/Cobalto tienen una dureza de 1400 a 1800 Hv; la del Óxido de Aluminio es cercana a los 2100 Hv).
- La información acerca del abrasivo y sus propiedades, es importante a la hora de seleccionar el tipo de revestimiento para poder determinar su factibilidad.
- Si el sistema está encerrado, los desechos que se produzcan por el proceso del desgaste, podrían ser tomados en cuenta para la escogencia del espesor del revestimiento a ser aplicados.
- El revestimiento debe exhibir resistencia a la oxidación a la temperatura de operación.

3.- Restauración de Dimensiones en piezas desgastadas: La técnica del termorrociado en este ámbito es empleada para: reparar o redimensionar partes corroídas o desgastadas, repara elementos con errores dimensionales, repara corrosión por picadura, imperfecciones superficiales o para renovar superficies semi-desgastadas durante su operación. En ocasiones revestimientos con pocos esfuerzos residuales y/o pocos costosos, son empleados para construir áreas críticamente desgastadas, que luego son maquinadas.

Una de las grandes ventajas que presenta la técnica del termorrociado para reparar y recuperar piezas desgastadas, es la cantidad y variedad de materiales que pueden llegar a termorrociarse. Muchos de estos revestimientos pueden rociarse con sustancias tales como fluoropolímeros que permiten mejorar la lubricación, otras sustancias que incrementan la resistencia al desgaste, etc.

Dentro del gran número de piezas que pueden recuperarse a través de las técnicas del termorrociado, las más comunes son:

- Los asientos de algunos cojinetes y engranajes.
- Áreas en donde se ubiquen los sellos de aceite.
- Carcasas de turbomáquinas (turbinas, bombas, compresores, etc).
- Elementos de turbomáquinas (álabes, tuberías, etc)

4.- *Otras aplicaciones:* una gran variedad de aplicaciones de termorrociado has estado desarrollándose con el transcurrir de los años, estas incluyen las de control de fricción en algunos elementos, cubriendo un amplio espectro desde baja fricción hasta una alta fricción, como por ejemplo de esta aplicación se pueden citar las realizadas en ciertas industrias textiles en las cuales se ha cubierto una gran área de las características topográficas de las superficies para manejar fibras sintéticas muy abrasivas (revestimientos tales como la alúmina han estado empleándose en superficies que varían desde muy planas hasta muy rugosas, dependiendo del coeficiente de fricción requerido).

En los últimos años se han desarrollado revestimientos que incluyen moderadores nucleares, superficies catalíticas, partes de filamentos para retener el calor isostático y finalmente para revestir componentes tales como las toberas de los propulsores de cohetes, crucetas y moldes.

1.3.- SOLDADURA TIG (GTAW)

1.3.1.- Generalidades

El proceso GTAW (gas tungsten arc welding), es también conocido como TIG (con tungsteno y gas inerte), es un proceso de arco que utiliza un electrodo de tungsteno prácticamente inconsumible, y una atmósfera protectora de gas inerte suministrada en forma externa, generalmente de helio, argón o una mezcla de ambos (ver Figura 1.3). Las técnicas de manipulación necesarias para soldar con este proceso son similares a las que se requieren para la soldadura con gas consumible. La Soldadura TIG fue desarrollada inicialmente con el propósito de soldar metales anticorrosivos y otros metales difíciles de soldar, no obstante al pasar del tiempo, su aplicación se ha

expandido incluyendo tanto soldaduras como revestimientos endurecidos (hardfacing) en prácticamente todos los metales usados comercialmente^[10].

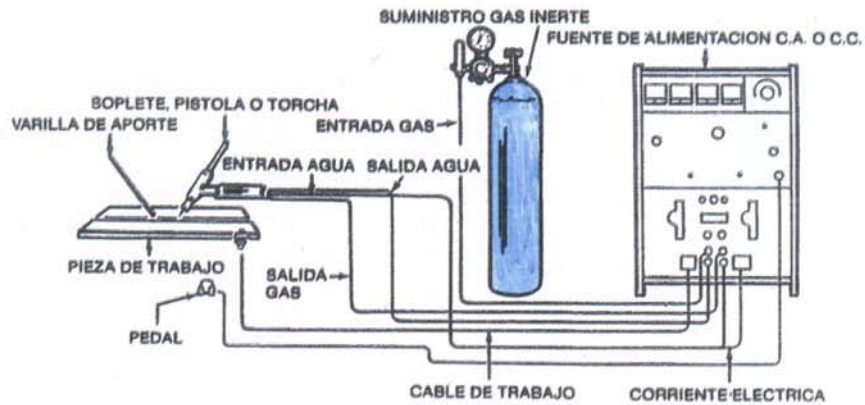


Figura 1.3. Proceso de Soldadura TIG^[11]

La alta densidad de corriente eléctrica producida por este proceso hace posible soldar a mayores velocidades, y obtener mayor penetración, que con la soldadura a gas consumible o con la de arco metálico protegido. Pueden lograrse soldaduras de calidad excepcional pero todo depende del ajuste del equipo y de la apropiada preparación del metal base (limpieza). Este proceso puede ser manual, semiautomático o automático^[12].

El campo de aplicación de esta soldadura es muy amplio, ya que puede utilizarse en casi todos los metales o aleaciones fundibles con un arco eléctrico, que no se vaporicen bajo el calor del arco y que puedan ser soldados sin fracturarse. Podemos citar algunos ejemplos de materiales que se pueden soldar mediante esta técnica^[13]:

- Aceros al carbono, aleados e inoxidables.
- Aluminio y la mayoría de sus aleaciones.
- Magnesio y sus aleaciones
- Cobre, cobre – níquel, bronce, entre otros

1.3.2.- Gas Protector

El escudo de gas que expulsa la antorcha es muy importante para asegurar soldaduras de calidad. La forma de todas las partes internas y externas de la boquilla han sido creadas para lograr las características apropiadas del flujo de gas.

En la soldadura TIG la zona de soldadura es resguardada de la atmósfera por un gas inerte que es alimentado a través de la antorcha, Argón y Helio pueden ser usados con éxito en este proceso.

El *helio* es un gas más liviano que el aire y con una mayor capacidad calorífica. Adicionalmente, la característica del arco otorga voltajes menores que el argón, lo que es deseable para la soldadura de materiales finos y en posiciones vertical y sobre la cabeza. El Helio genera un arco más caliente, permitiendo una elevación del voltaje en el arco del 50-60%. En comparación con el argón posee una mejor conductividad térmica, es más ligero y tiene una mayor conducción de calor hacia las piezas.

El *argón*, en comparación con el helio, permite soldaduras más estables, mayor voltaje de arco, menor costo y mejor disponibilidad y mayor facilidad para iniciar el arco. Este gas es principalmente utilizado por su gran versatilidad en la aplicación exitosa de una gran variedad de metales, además de su alto rendimiento permitiendo soldaduras con un bajo flujo para ejecutar al proceso^[11].

1.3.3.- Ventajas de la Soldadura TIG

Este método de soldadura se caracteriza por poseer ciertas ventajas sobre otras técnicas^[11]:

- Suelda casi todos los materiales metálicos
- Produce soldaduras perfectas aún en cordones cortos
- Siempre deposita un metal de soldadura de alta calidad
- No posee salpicaduras
- Es económico
- Requiere poco trabajo de terminación

1.3.4.- Defectos en la Soldadura:

La presencia de defectos superficiales o internos pueden promover un comportamiento en servicio de la soldadura inadecuado. Los defectos comúnmente encontrados en soldaduras incluyen porosidades, inclusiones de escoria y grietas entre otros.

- a) Porosidad: se produce a partir de burbujas de gas que permanecen atrapadas en el cordón y provienen generalmente de la humedad contenida en el electrodo o sobre la pieza. Este fenómeno se evita precalentando la pieza a soldar o secando los electrodos. La porosidad también se produce a consecuencia de grasa, pinturas y revestimientos metálicos sobre la pieza a unir, por lo menos, en la zona en que se funde.

- b) Inclusiones de escoria: producen pérdidas en las propiedades mecánicas afectando el trabajo posterior de las juntas. Por lo general, se debe a la limpieza deficiente en los cordones internos cuando hay múltiples pases.

- c) Grietas: consiste en una discontinuidad por fractura en el metal que puede haber sido provocado durante el proceso de soldadura, bien por efectos de tensiones o por enfriamiento brusco^[14].

1.4.- TEORÍA DEL DESGASTE

Se puede definir el desgaste como el deterioro de la superficie debido al uso. El desgaste es también muy importante en la práctica de la ingeniería; en muchos casos constituye el principal factor que limita la vida y el rendimiento de los elementos de máquinas.^[15]

Ningún elemento de máquina es inmune al desgaste. Este fenómeno se manifiesta siempre que exista carga y movimiento. La complejidad del desgaste se acentúa al considerar el número de factores necesarios para describirlos. Los principales factores que intervienen en el desgaste se enumeran a continuación de la siguiente forma^[15]:

1.- Variables relacionadas con la metalurgia:

- Dureza
- Tenacidad
- Constitución y estructura
- Composición química

2.- Variables relacionadas con el servicio:

- Materiales en contacto
- Presión
- Velocidad
- Temperatura
- Acabado de la superficie

3.- Otros factores que contribuyen:

- Lubricación
- Corrosión

1.4.1.- Desgaste por Rodadura

El desgaste por rodadura puede manifestarse en forma de socavaduras, astillamiento, grietas y picaduras. Por lo general este tipo de falla se atribuye a la repetición cíclica de los esfuerzos de contacto entre superficies correspondientes, tales como los producidos en la muñequilla del cigüeñal de un motor fuera de borda a consecuencia del contacto con las agujas del rodamiento. La intensidad del esfuerzo causa una grieta que separa una partícula del cuerpo principal del material. La cavidad así formada es una falla de desgaste por rodadura.^[15]

El problema general de los esfuerzos producidos por el contacto local de cuerpos elásticos fue estudiado por *Hertz*, quien elaboró una solución al problema, definiendo el tipo de distribución de esfuerzos que cabría esperar.

Se ha convenido en aceptar que probablemente el desgaste por rodadura sea una modalidad de falla por fatiga superficial, aunque difiere en varios aspectos de las formas convencionales de fatiga.

El desgaste por rodadura comienza por aparecer en la superficie como una pequeña “V” que va creciendo progresivamente hasta convertirse en una “V” grande, lista a ser desalojada.

Cuando la partícula es desalojada, la orientación de las grietas es tal que el vértice de la “V” corresponde al vértice del abanico formado por la socavadura.^[5]

Para controlar el desgaste por rodadura, hay que buscar cualquier cambio que reduzca los factores de *Hertz* y en algunos casos la velocidad de deslizamiento. En términos generales, al aumentar la dureza se aumenta la resistencia al desgaste por rodadura. Es necesario destacar, que al incrementar la dureza, se reduce la tendencia de una superficie imperfecta a ajustarse por desgaste o flujo plástico y por lo tanto aumentan las presiones de contacto localizadas. La resistencia al desgaste por rodadura puede aumentarse considerablemente puliendo la superficie en rodadura.^[15]

1.4.2.- Esfuerzos de Contacto de Hertz

Cuando dos cuerpos que tienen superficies curvas se presionan uno contra otro, el contacto en punto o línea se transforma en contacto de área, y el esfuerzo desarrollado en ambos cuerpos es tridimensional. Estos problemas de esfuerzo de contacto surgen en los siguientes casos: el contacto entre una rueda y un riel o entre una leva y su seguidor, en el ajuste de dientes de engranes y en la acción de cojinetes de rodamiento, entre otros. Dichos esfuerzos, se conocen con el nombre de *esfuerzos de contacto de Hertz*.^[16]

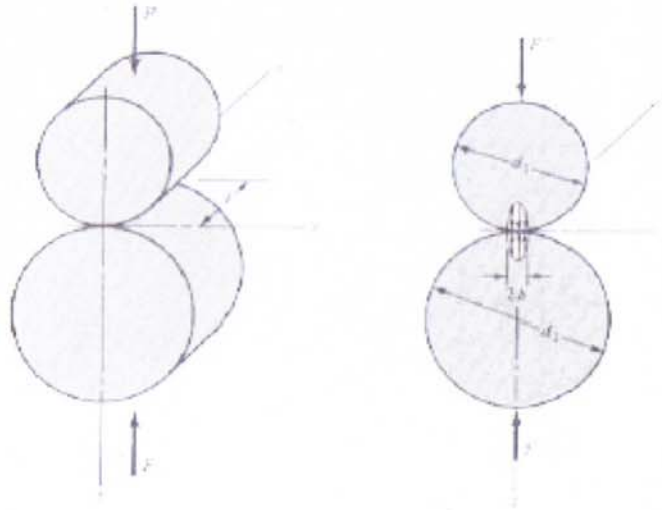


Figura 1.4. Esfuerzos de Hertz producidos en dos cilindros mantenidos en contacto por una fuerza F .^[16]

Cuando dos cilindros macizos, como los mostrados en la Figura 1.4, de diámetro $d1$ y $d2$ se presionan entre sí con una fuerza F se obtiene un área de contacto circular de b . Si se especifica que L es la longitud de los cilindros, $E1$ y $E2$ son los módulos de elasticidad y que $V1$ y $V2$ son los módulos de Poisson de los dos cuerpos en contacto, el radio b será determinado por la ecuación^[16]:

$$b = \sqrt{\frac{2F}{\pi L} \frac{(1-V^2_1)/E1 + (1-V^2_2)/E2}{1/d1 + 1/d2}} \quad (\text{ecuación 1.1})$$

1.5.-ESTUDIOS REALIZADOS ANTERIORMENTE RELACIONADOS CON EL DESGASTE

A fin de buscar una solución al problema de desgaste de los elementos de máquinas, y específicamente de los cigüeñales de motores fuera de borda, se han realizado algunos trabajos, que han puesto en marcha el estudio del comportamiento de materiales que han sido recubiertos utilizando variedad de técnicas. Vale resaltar que este tema de Trabajo Especial de Grado nace de la necesidad, por parte de la empresa *Plasmatec Ingenieros, C.A.*, de implantar una tecnología con bases para la recuperación o reconstrucción de cigüeñales de motores fuera de borda, ya que esta práctica es muy poca conocida a nivel nacional.

Langer y Méndez^[17] (1990) determinaron la influencia del Termorrociado sobre la resistencia a la fatiga de un acero empleado para la construcción de cigüeñales. Reportaron que el desprendimiento del material termorrociado era la causa más evidente de la disminución del límite de resistencia a la Fatiga y que la temperatura a la cual se llevaba a cabo el termorrociado no era factor que incidiera en la disminución del límite de resistencia a la Fatiga en piezas con recubrimientos termorrociados. En 1996, *Mazur, Cristalinis y Kubiak*^[18] repararon por Soldadura carcasas de alta e intermedia presión de turbinas de vapor, fabricadas con aceros al Cr-Mo y al Cr-Mo-V. Ellos analizaron las causas típicas de fallo y localizaron las mismas en las carcasas de alta e intermedia presión de las turbinas de vapor. Estudiaron también la soldabilidad de los aceros de baja aleación al Cr-Mo y al Cr-Mo-V y concluyendo que está relacionada directamente con las

microestructuras desarrolladas en el metal de soldadura. Además presentan paso a paso la técnica utilizada para la reparación por soldadura.

Acosta y Clemente^[8] (1999) establecieron un estudio comparativo de la resistencia al desgaste de la aleación Babbitt aplicada como recubrimiento de cojinetes mediante dos procesos distintos, Termorrociado y Soldadura TIG, bajo condiciones de lubricación al límite. Los resultados evidenciaron que las probetas recubiertas mediante Soldadura TIG presentaron un nivel de desgaste mayor que las otras, debido posiblemente a la distribución heterogénea de los elementos aleantes del Babbitt como consecuencia del proceso del recubrimiento. Del mismo modo, *Lozada y Paolillo*^[2] evaluaron en el año 1998 la capacidad de carga en ejes que fueron Termorrociados por medio de Técnicas de Deposición de Arco Eléctrico y High Velocity Oxy-Fuel (HVOF). Para ello, realizaron una base de datos de los diferentes motores Diesel de camiones más difundidos en el mercado Venezolano. Los resultados arrojaron que las bocinas que fueron recubiertas mediante HVOF para condiciones de lubricación al Límite resultaron ser las mejores ya que presentaron el menor desgaste; y por otro lado, los mejores resultados encontrados para las bocinas bajo la condición de Lubricación Hidrodinámica fueron las recubiertas por el proceso HVOF.

En el año 2000, *Wagner, Fiala y Barbezat*^[19], realizaron un estudio en cuanto a la relación sobre la microestructura de desgaste y corrosión por Rociado Térmico sobre depósitos metálicos. Emplearon numerosas técnicas de deposición de los recubrimientos, entre ellas: Llama, HVOF, Plasma (APS, VPS, WSP), para generar un rango de diferentes espesores de recubrimiento.

Utilizaron varias aleaciones de base Níquel, comenzando por una composición química simple (Ni) y terminando por una aleación compleja (Ni-Cr-Al-Y). Los resultados de corrosión fueron muy limitados; ninguno fracasó dentro del período de pruebas. Los resultados indicaron que los depósitos realizados mediante Rociado por Plasma al Vacío (VPS) y Rociado por Plasma Atmosférico (APS) fueron los mejores, mientras los peores fueron los hechos a través del Termorrociado por Llama (FS). Por otro lado, los resultados de los ensayos de desgaste señalaron que los depósitos realizados por WSP (Water – Stabilized Plasma Spraying) tuvieron el menor desgaste. En el mismo año, *Siegmann, Brandt y Margadant*^[20] ejecutaron diferentes pruebas de desgaste para comparar el comportamiento de los diferentes recubrimientos ensayados bajo las distintas técnicas empleadas. Se evaluaron muestras de diferentes materiales para determinar la resistencia al desgaste de recubrimientos termorrociados, obteniéndose que los recubrimientos a base de WC-Co depositados por HVOF mostraron una resistencia al desgaste de 4 a 5 veces más alta que el Cromo Duro.

Andrade y Pule^[3] (2001) evaluaron muñones de motores Diesel Rociados Térmicamente bajo régimen de lubricación al límite. Ellos utilizaron varias técnicas de Termorrociado y varios materiales como recubrimiento. Reportaron que el recubrimiento Metco 449P depositado mediante la técnica de Llama Subsónica presentaba la menor tasa de desgaste. Se concluyó que la dureza no está relacionada directamente con la tasa de desgaste de los recubrimientos y que el acero inoxidable AISI 420 presentó mayor desgaste que el Metco 1. En el 2001, *Ferrara y Pérez*^[21] evaluaron la resistencia de un recubrimiento de una mezcla que contiene 10% de una aleación Ni-Cr-B-Si-

W, conocida comercialmente como Colmonoy 88 y un 90% de WC-12%Co depositado por Rociado Térmico mediante la técnica de HVOF. Concluyeron que la resistencia al desgaste, tanto erosivo como abrasivo, aumentó con la aplicación del tratamiento térmico y que el menor coeficiente de fricción y la menor rugosidad fueron presentadas por las muestras tratadas térmicamente.

En el 2002, *Galárraga y González*^[22] determinaron la resistencia al desgaste abrasivo y erosivo de recubrimientos depositados por la técnica de HVOF, utilizando como sustrato un acero AISI 1020. Se depositaron dos tipos de recubrimientos: el 20%(WC – 12%Co) + 80% Colmonoy 88, y una aleación de WC – 10%Co) + 4%Cr. Concluyeron que el tratamiento térmico mejoró la resistencia al desgaste abrasivo hasta de un 51% y un 12% en el ensayo erosivo, resultando ser la aleación de (WC – 10%Co) + 4%Cr la más resistente ante el ensayo de desgaste abrasivo.

Tal vez, el trabajo más significativo resulta ser el realizado por *Cadenas y Machado*^[15] donde evaluaron el desgaste por rodadura de dos materiales termorrociados (carburo de Tungsteno y un acero al Cr – Ni – B) a alta velocidad, usados para las muñequillas de los cigüeñales de motores fuera de borda. Reportaron que el proceso de termorrociado hipersónico proporcionaba un recubrimiento de muy buena calidad, de una gran adherencia y una baja porosidad, pero que dichos recubrimientos estudiados no eran aptos para la reconstrucción o recuperación de los cigüeñales de los motores fuera de borda ya que fallaron antes del tiempo de ensayo.

CAPÍTULO 2. SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL BANCO DE ENSAYOS

2.- Selección de los componentes del Banco de Ensayos:

Para la selección de los diferentes elementos que conforman el banco de ensayos, se hizo referencia al trabajo de grado realizado por los estudiantes Pedro Cadenas y Salvador Machado^[15], dado que nuestros ensayos se basarían en la misma metodología utilizada por ellos.

2.1.- Selección del Motor Eléctrico:

La potencia que deberá utilizar el motor eléctrico, será la necesaria para vencer las pérdidas producidas por la fricción, tanto en los rodamientos de apoyo del eje como en los rodamientos de agujas de la biela y por el cual se transmite la carga al eje.

Según [15], la potencia necesaria para el accionamiento del eje será:

$$Pot = 681,87 \text{ watts} = 0,914 \text{ HP}$$

Dado que no se disponía en la empresa *Plasmatec Ingenieros C.A.* de un motor con tales especificaciones, se solicitó el préstamo de un motor eléctrico trifásico con una potencia de 1,8 HP y de 1800 r.p.m. al laboratorio de Automatización Industrial de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

Capítulo II

Selección de los Componentes del Banco de Ensayos

2.2.- Selección de las poleas:

La velocidad aproximada del eje que vamos a ensayar debe ser de 3600 r.p.m. y debido a que la velocidad del motor era de tan sólo 1800 r.p.m., nos vimos en la necesidad de seleccionar unas poleas con una relación de diámetros de 2:1. Para tal fin, escogimos una polea con un diámetro igual a 4 pulg. que estaría solicitada al eje del motor y otra polea con un diámetro de 2 pulg. fijada al eje a ensayar.

2.3.- Selección de la correa:

Se estimó una distancia entre el eje del motor eléctrico y el eje a ensayar de 55 cms, tomando este valor como la distancia entre centros de las poleas. La longitud aproximada de la correa se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$L = 2C + \pi(R_1 + R_2) + (R_2 - R_1)^2 / C \quad (\text{ecuación 2.1})$$

Donde:

L: longitud de la correa

C: distancia entre centros

R1, R2: radios de las poleas

Capítulo II

Selección de los Componentes del Banco de Ensayos

$$L = 2*55 + \pi*(5,08 + 2,54) + (5,08 - 2,54)^2 / 55$$
$$\Rightarrow L = 134,03 \text{ cms}$$

En definitiva se seleccionó una correa de 134 cms (53 pulg.) de longitud de sección trapezoidal del tipo 3L.

2.4.- Selección del eje:

Para la selección de las dimensiones de los ejes a ensayar se tomaron las mismas especificaciones de los ejes que utilizaron los estudiantes Pedro Cadenas y Salvador Machado en su trabajo^[15]. En la Plano N° 1 se pueden observar dichas medidas (ver anexos)

2.5.- Selección de los Rodamientos de Apoyo:

Para la selección de los rodamientos de apoyo, se escogió un rodamiento “Y” con anillo de fijación excéntrico con rodamiento simple de bolas, comúnmente conocido como chumacera. Dicho rodamiento debía tener un diámetro interno igual a $35 \pm 0,1$ mm, dado que el diámetro externo de la sección del eje donde se apoyarían las chumaceras era de 35 mm.

Capítulo II

Selección de los Componentes del Banco de Ensayos

Para asegurar el buen funcionamiento de los rodamientos durante todo el período de pruebas, se determinó la vida útil de los mismos mediante la siguiente ecuación:

$$L = \frac{10000000}{60 * r.p.m.} * (C / P)^a \quad (\text{ecuación 2.2})$$

Donde:

L: vida del rodamiento en horas

r.p.m.: velocidad a la cual gira el rodamiento

C: capacidad de carga dinámica en N

P: carga sobre el rodamiento N

a: constante de los rodamientos de bolas

Según [15], la carga que soporta cada rodamiento es de aproximadamente 11000 N y que la velocidad de giro del rodamiento será la misma que la del eje, es decir, de 3600 r.p.m. Ahora, según las especificaciones de la chumacera seleccionada, indica que la capacidad de carga dinámica es de 19600 N^[23] y que la constante “a” para los rodamientos de bolas es 3; entonces tenemos que:

$$L = \frac{10000000}{60 * 3600} * (19600 / 11000)^3$$

Capítulo II

Selección de los Componentes del Banco de Ensayos

$$\Rightarrow L = 262 \text{ horas}$$

La vida útil de cada rodamiento de apoyo estará cercana a las 262 horas, lo que garantiza el buen funcionamiento de los mismos.

CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS

3.1.- Características del Banco de Ensayos:

El banco de ensayos está constituido por: el sistema de bastidores, el sistema de potencia, el sistema de lubricación, el sistema de carga y el sistema de registro de temperatura. Todo este conjunto se puede apreciar a través de la Figura 4.1.



Figura 4.1. Vista general del banco de ensayos.

3.1.1.- Sistema de Bastidores:

Fue diseñado y construido para soportar una carga máxima de 3000 kgf. En este se aloja los distintos componentes y accesorios que conforman el banco de prueba.

Material: Vigas IPN 80

3.1.2.- Sistema de Potencia:

Podemos observar en la Figura 4.2 los componentes que conforman el sistema de potencia del banco de ensayo:



Figura 4.2. Vista frontal del sistema de potencia

- Motor Eléctrico Trifásico de 1,8 hp y 1800 rpm
Marca: Siemens



Figura 4.3. Motor Eléctrico

- 1 polea de un canal Tipo A de 4 pulg. (101,6 mm) de diámetro y 1 polea de un canal Tipo A de 2 pulg. (50,8 mm) de diámetro.

Material: Hierro Fundido

- 1 correa de sección trapezoidal Tipo A

Marca: Douglas

- Rodamientos “Y” con anillo de fijación excéntrico (Chumaceras)

Modelo: Serie Yet 2

Marca: SKF

Díámetro Interior: 35 mm

Capacidad de Carga Estática: 15300 N

Capacidad de Carga Dinámica: 19600 N

- Rodamientos de Agujas

Material: acero al cromo



Figura 4.4. Rodamientos de Agujas

3.1.3.- Sistema de Lubricación:

La lubricación utilizada para los ensayos fue una mezcla de gasolina sin plomo y aceite para motores fuera de borda. con una relación de 50:1 (por cada 50 partes de gasolina se encuentra 1 de aceite) y se realizó mediante

lubricación continua. Se puede observar el sistema de lubricación a través de la Figura 4.5:



Figura 4.5. Vista lateral del sistema de lubricación

- Flujo volumétrico de la lubricación: $5,56 \times 10^{-4}$ l/s.
- Tanque de almacenamiento de capacidad diez (10) litros.
- Válvula Reguladora de Presión del Tipo “By-Pass”, con mecanismo de graduación manual.
Marca: Gago
- Línea de suministro Tipo manguera de Presión Media
Diámetro Interno: 0,0127 – 0,00952 m (0,5 – 3/8 pulg)

3.1.4.- Sistema de Carga:

- Pistón Hidráulico de capacidad de tres (3) toneladas (3000 kgf) en operación vertical.

Presión Máxima de Operación: 55,16 Mpa (8000 psi)

Diámetro del pistón: 26,01 mm (1,024 pulg)

Marca: Mega



Figura 4.6. Vista Frontal del Gato Hidráulico

- Manómetro de Presión:

Marca: Bourdon Sedeme

Caja de Acero Inoxidable MIT3 – MIT5 (TI/BH)

Caja ABS MMP # , sumergido en líquido amortiguador (Glicerina)

Capacidad Máxima: 68,947 Mpa (10.000 psi)

Precisión: Clase 1,6

- Biela de Motor Fuera de Borda:

Marca: Yamaha

Modelo: 1990

Longitud: 142 mm

3.1.5.- Sistema de Registro de Temperatura:

- Pirómetro

Marca: 3M

Modelo: IR – 1600



Figura 4.7. Pirómetro

3.2.- Equipo para la Soldadura TIG:

- Consola de Control:

Marca: Termal Dynamics

Parámetros de Control:

Voltaje, Amperaje, Presión del Argón y Tipo de Arco.

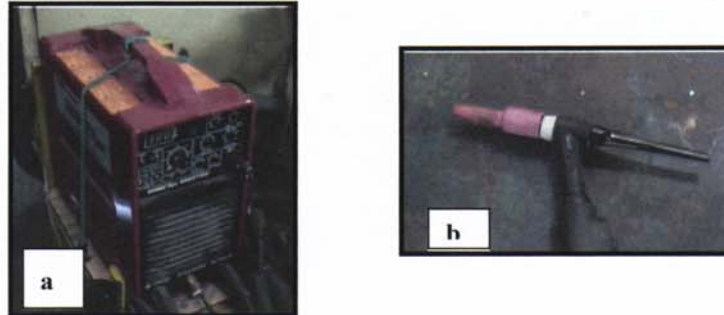


Figura 4.8. a) Consola de Control para la Soldadura TIG, b) Pistola utilizada para la Soldadura TIG

3.3.- Equipo para el Termorrociado (High Velocity Oxi-Fuel, HVOF):

- Pistola Tipo: JP - 5000



Figura 4.9. Pistola Tipo JP - 5000

- Consola de Control:

Marca: Sylco Nernex

Parámetros de Control:

- Kerosene: presión de la bomba, presión a la salida del flujómetro y caudal.
- Oxígeno: presión a la salida del flujómetro, presión a la salida de la válvula.
- Nitrógeno: presión y flujo de la bombona.
- Agua de Enfriamiento: presión, temperatura de entrada pistola, temperatura de salida pistola y flujo volumétrico.
- Polvo: tasa (gr/min)

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

4.1.- Materiales:

Para la realización de este trabajo se seleccionó como material base o sustrato un acero AISI 8620, material utilizado para la fabricación de los cigüeñales de motores fuera de borda, recibido en barras cilíndricas de 60 mm de diámetro y 170 mm de longitud, con una composición química contenida en la Tabla 4.1:

Tabla 4.1. Composición Química del acero AISI 8620, expresada en % en peso

<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>Ni</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>
0,18 – 0,23	0,70 – 0,90	0,15 - 0,35	0,40 - 0,70	0,40 – 0,60	0,15 - 0,25

La composición química del Colmonoy 88 en porcentaje en peso utilizada en el Termorrociado se presenta en la Tabla 4.2:

Tabla 4.2. Composición Química Aleación Base Níquel (% en peso) ^[24]

<i>Cr</i>	<i>W</i>	<i>B</i>	<i>Si</i>	<i>Fe</i>	<i>C</i>	<i>Ni</i>
15,0	17,3	3,0	4,0	3,5	0,8	Balance

La Tabla 4.3 muestra la composición química del electrodo E-6-60 utilizado en la soldadura TIG:

Tabla 4.3. Composición Química del Electrodo E 6-60, expresada en (% en peso) ^[25]

<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>Cr</i>	<i>Fe</i>
0,5	0,4	1,5	9,0	Balance

4.2.- Fabricación de los ejes:

Se maquinaron 6 ejes de acero con las especificaciones que se indican en el plano N° 1. De estos ejes maquinados, 2 ejes fueron recubiertos con polvos de aleación base níquel auto-fundente, conocida comercialmente como Colmonoy 88, con una composición química como se indica en la Tabla 4.2, en la muñequilla de los mismos mediante la técnica de Termorrociado High Velocity Oxy – Fuel (HVOF), como se muestra en la siguiente Figura:



Figura 4.1. Aplicación del Termorrociado

Para determinar el espesor del recubrimiento utilizamos la ecuación 1.1:

$$b = \sqrt{\frac{2F(1-V^2)/E1 + (1-V^2)/E2}{\pi L \cdot 1/d1 + 1/d2}} \quad (\text{ecuación 1.1})$$

Donde:

d1: Diámetro de la aguja del rodamiento (0,036 m)

d2: Diámetro del eje (0,0050 m)

F: Fuerza máxima aplicada sobre una aguja (6744 N)^[15]

L: Longitud de contacto entre los dos cuerpos (0,014 m)

E1: Módulo de Elasticidad de las agujas del rodamiento (205942924,4 KPa)^[16]

E2: Módulo de Elasticidad del recubrimiento (220517006,8 KPa)^[26]

Usualmente la relación de Poisson no varía notablemente con diferentes materiales usados en Ingeniería, por lo tanto tomaremos un valor de $V = 0,3$ ^[16]

$$\Rightarrow b = 1,073 \times 10^{-4} \text{ m} = 0,1073 \text{ mm}$$

Dado que el valor de esfuerzo máximo se encuentra localizado a 3 veces la magnitud del radio “b” de la distribución elíptica, entonces:

$$3b = 0,3219 \text{ mm}$$

Para garantizar que este esfuerzo máximo ocurra en el recubrimiento y no en el substrato, tomaremos el doble de esta distancia, es decir, $6b$

(aproximadamente 0,6 mm), por lo que se recubrirán a los ejes con 1,2 mm diametral de Colmonoy 88.

Para la deposición del recubrimiento se utilizó una pistola JP 5000 de la primera generación. Los parámetros utilizados para el rociado fueron los recomendados por el fabricante de la aleación y se presentan en la Tabla 4.4:

Tabla 4.4. Parámetros del Termorociado

<i>Precalentamiento del sustrato (°C)</i>	80
<i>Distancia del Rociado (mm)</i>	380
<i>Tasa de alimentación de los polvos (gr/min)</i>	90
<i>Flujo Gas Transportador N (l/min)</i>	14
<i>Flujo de O₂ (l/min)</i>	705
<i>Flujo de Kerosene (l/min)</i>	3,08
<i>Presión de Kerosene (Mpa)</i>	1,17

Después de aplicado el recubrimiento, los ejes fueron rectificados para llevarlos a la medida final. Por último se aplicó un tratamiento térmico mediante llama oxiacetilénica que consistió en calentar el recubrimiento hasta obtener una superficie con un brillo vidrioso o glaseado característico de estas aleaciones auto-fundentes cuando son calentadas hasta la temperatura de rango sólido – líquido el cual se encuentra entre los 900 y 1100 °C. El tiempo de tratamiento fue de aproximadamente 1 minuto.

A los 4 ejes restantes se les aplicó Soldadura TIG en la muñequilla, con un electrodo E 6-60, cuya composición química se muestra en la Tabla 4.3.

Para la aplicación de la soldadura se utilizó una máquina de Soldadura TIG marca Termal Dynamics. Los parámetros utilizados para la Soldadura fueron los recomendados por el fabricante y se muestran en la Tabla 4.5:

Tabla 4.5. Parámetros utilizados para la Soldadura TIG

<i>Voltaje (vol)</i>	220
<i>Amperaje (A)</i>	100
<i>Presión del Argón (KPa)</i>	120
<i>Tipo de Arco</i>	Pulsado

Dado que no se encontraron los valores del Módulo de Elasticidad y de la Relación de Poisson para la aleación del electrodo E 6-60 utilizado en la Soldadura TIG, se recomendó por parte del Tutor Académico, recubrir la muñequilla de estos ejes con 1,5 mm de espesor de soldadura, así asegurar que los esfuerzos Hertzianos se localicen en el recubrimiento.

Hay que resaltar que en el momento de estar rectificando estos ejes, nos encontramos con un problema ya que parte de la superficie de las muñequillas de los ejes presentaban porosidad, como se observa en la Figura 4.2, por lo que se tomó la decisión de rellenar los poros de todas las muñequillas con soldadura TIG.

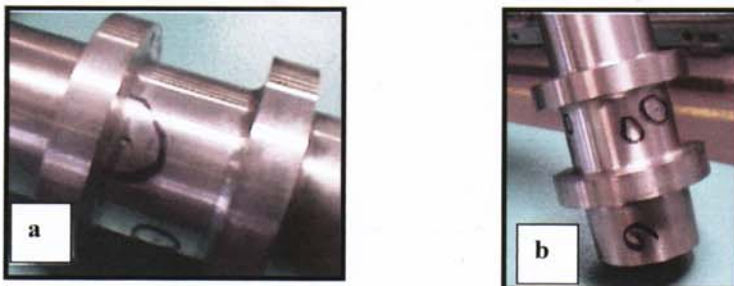


Figura 4.2. a) Poros Superficiales encontrados en una muñequilla. b) Vista General de la muñequilla que presentaba porosidad

Una vez concluido el relleno de los poros, se procedió a rectificar las muñequillas de los ejes, observando de nuevo la porosidad superficial, por lo que tomamos la decisión de eliminar todo el recubrimiento ya existente sobre las muñequillas y rellenarlas de nuevo con Soldadura TIG. Se observaron de nuevo diminutos poros que, a medida que se iba rectificando cada pieza, se iban rellenando dichos poros.

Dos de los ejes a los cuales se le había aplicado soldadura en la muñequilla, fueron sometidos a un tratamiento térmico posterior, específicamente a un alivio de tensiones, el cual consistió en introducir los ejes en un horno, aumentando paulatinamente la temperatura hasta alcanzar los 500 °C aproximadamente, manteniéndola por un período de 5 horas y dejando que se enfriaran hasta la temperatura ambiente.

4.3.- Procedimiento Experimental de los Ensayos de Desgaste por Rodadura:

Como ya se dijo anteriormente, se construyeron 6 ejes para ser ensayados bajo las mismas condiciones para así poder evaluar en forma comparativa el comportamiento de los distintos materiales recubiertos y las diferentes técnicas utilizadas para realizar dichos recubrimientos.

Los 6 eje fueron distribuidos de la siguiente manera:

- 2 ejes Termorrociados con Colmonoy 88 con Tratamiento Térmico.
- 2 ejes con Soldadura TIG sin Tratamiento Térmico.
- 2 ejes sin Soldadura TIG con Tratamiento Térmico.

Para la realización de los ensayos se fijaron los siguientes parámetros:

- Velocidad del Eje: 3600 r.p.m. (constante)
- Velocidad del Motor: 1800 r.p.m. (constante)
- Lubricación: $5,56 \times 10^{-4}$ l/s (lubricación continua)

La carga máxima a la cual debían ser ensayados los ejes era de 21582 N y dado que no contábamos con un instrumento que midiese la magnitud de la fuerza que se le aplicaba a los ejes, usamos un manómetro Tipo Bourdon el cual, mediante el área del pistón del gato hidráulico y la carga máxima aplicada, se calculó la presión máxima a la cual estarían sometidos los ejes.

Según especificaciones del gato hidráulico utilizado, indica que el diámetro del pistón es 26,01 mm (0,02601 m).

Sabemos que:

$$P = \frac{F}{A} \quad (\text{ecuación 4.1})$$

Donde:

P: Presión máxima que se ejerce sobre la muñequilla del eje

F: Fuerza máxima que se ejerce sobre la muñequilla del eje

A: Área del pistón del gato hidráulico

La fórmula para calcular el área de un círculo es la siguiente:

$$A = \frac{\pi * d^2}{4} \quad (\text{ecuación 4.2})$$

Entonces:

$$\Rightarrow A = 5,3106 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Utilizando la ecuación 4.1, calculamos la presión máxima sobre la muñequilla:

$$\Rightarrow P = 40644,067 \text{ KPa } (5898,0039 \text{ psi})$$

Para la realización de los ensayos se estableció aumentar paulatinamente la presión del gato, comenzando desde 1750 KPa (250 psi) e ir

subiendo cada 5 minutos la presión, en intervalos de 1750 KPa (250 psi), hasta llegar a los 41000 KPa (6000 psi). Del mismo modo se determinaría en cada intervalo la temperatura de operación del eje por medio de un Pirómetro.

4.4.- Ensayos de Desgaste por Rodadura:

Los ensayos se realizaron bajo las condiciones descritas anteriormente para los dos ejes recubiertos por Termorrociado y para dos ejes recubiertos con Soldadura TIG (uno sin tratamiento térmico y otro con tratamiento térmico). Para los dos ejes restantes recubiertos por Soldadura TIG, se ensayaron de la siguiente forma debido a que no se pudo continuar con el procedimiento original a consecuencia de las alta temperatura de operación del eje a altas cargas, ya que la gasolina de la mezcla de la lubricación se estaba quemando. En la Figura 4.3. se puede apreciar el humo producido durante un ensayo de desgaste por rodadura:

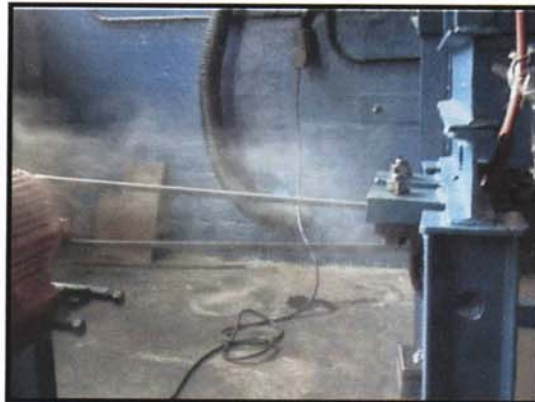


Figura 4.3. Humo producido durante el ensayo

Capítulo IV

Metodología Experimental

Se determinó el tiempo total de acción de las fuerzas máximas que actuaban sobre la muñequilla del cigüeñal, ocurriendo esto durante los primeros 15 ° de giro del cigüeñal, como se puede observar en la Figura 4.4.

La Tabla 4.6 muestra la carga aplicada sobre el cigüeñal en función del ángulo de giro del mismo, tomado de estudios previos (Cadenas^[15]).

Tabla 4.6. Carga aplicada sobre el cigüeñal en función del ángulo de giro del mismo. (Tomado de Cadenas^[15])

Alfa (Grados)	Fuerza Aplicada en el Cigüeñal (N)	Alfa (Grados)	Fuerza Aplicada en el Cigüeñal (N)	Alfa (Grados)	Fuerza Aplicada en el Cigüeñal (N)
0	20218,37	120	5912,746	240	3631,621
5	19814,19	125	5967,755	245	3471,628
10	18681,86	130	6008,821	250	3887,529
15	17028,31	135	6036,905	255	3080,955
20	15110,31	140	6053,564	260	2855,245
25	13160,46	145	6060,816	265	2615,815
30	11346,6	150	6060,907	270	2370,603
35	9765,608	155	6056,15	275	2130,483
40	8456,579	160	6048,756	280	1909,384
45	7419,692	165	6040,733	285	1723,354
50	6632,396	170	6033,737	290	1587,26
55	6061,148	175	6029,02	295	1508,416
60	5669,065	180	6027,359	300	1480,118
65	5420,525	185	4200,598	305	1480,96
70	5283,615	190	4197,006	310	1481,215
75	5231,034	195	4190,043	315	1415,794
80	5240,068	200	4178,285	320	1365,17
85	5292,088	205	4159,831	325	1211,048
90	5731,934	210	4132,386	330	998,0312
95	5467,401	215	4093,348	335	790,4946
100	5568,818	220	4039,966	340	752,9503
105	5668,716	225	3969,487	345	978,5228
110	5761,606	230	3879,32	350	1306,84
115	5843,705	235	3767,246	355	1569,296

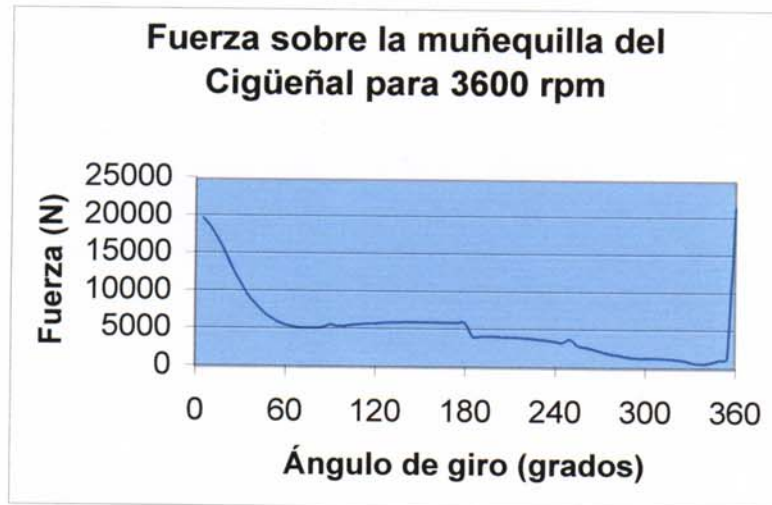


Figura 4.4. Fuerza aplicada sobre los cigüeñales para 3600 r.p.m. Vs. Ángulo de Giro del cigüeñal
(Tomado de Cadenas^[15])

El tiempo total de acción de las cargas para un intervalo de 90 minutos, que fue el tiempo establecido para la duración de los ensayos, resultó ser de aproximadamente 225 seg., que se aplicaría en 10 intervalos de 25 seg. cada uno.

El procedimiento consistió en someter a los ejes a una carga de 20500 KPa (3000 psi) durante un lapso de 8 minutos con 35 seg., para luego aumentarla hasta 41000 KPa (6000 psi) durante 25 seg. Esto se repitió hasta alcanzar el tiempo de duración del ensayo.

4.5.- Pin On Disk:

Se cortaron 2 barras de 2.54 cm (1 pulg.) de diámetro y 3,5 mm de altura, como se observa en la Figura 4.5, para determinar el coeficiente de desgaste de las 2 muestras de soldadura. Vale la pena reasaltar que sólo se maquinaron 2 muestras cilíndricas debido a que los valores de estos ensayos para el Termorrociado con Colmonoy 88 se tomarán de estudios previos (Rodríguez^[24]). El espesor del recubrimiento para cada muestra era de 1,5 mm.

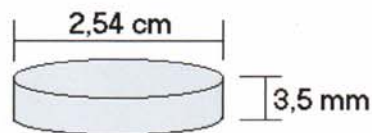


Figura 4.5. Dimensiones de las muestras para los ensayos de Pin On Disk y Microdureza

El ensayo de Pin On Disk se realizó de acuerdo a la norma ASTM G99-95-A^[27] y se realizó en un Tribómetro marca CSEM, modelo 2-115 como lo muestra la Figura 4.6, de simulación de fricción y desgaste con una configuración bola sobre disco.



Figura 4.6. Vista frontal del Tribómetro

Estas muestras fueron sometidas a una limpieza ultrasónica durante 10 minutos en alcohol y luego fueron secadas para eliminar la humedad. Las condiciones de ensayo que se utilizaron se pueden apreciar en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7. Condiciones del ensayo Pin On Disk

<i>Material de la bola</i>	AISI 52100
<i>Diámetro de la bola (mm)</i>	6 ± 0,1
<i>Velocidad de giro (cm/s)</i>	10
<i>Carga aplicada (N)</i>	5,0
<i>Radio de giro (cm)</i>	2,5
<i>Distancia recorrida (m)</i>	500

Las condiciones ambientales constantes medidas fueron de 25 °C y 56% de humedad.

Para calcular el coeficiente de desgaste de cada muestra ensayada en el Pin On Disk, utilizamos la siguiente ecuación:

$$V = \frac{\pi}{6} * \left(3 \frac{d^2}{4} + h^2 \right) = \frac{1}{3} * \pi * r^2 (3r - h) \quad (\text{ecuación 4.3})$$

Donde:

V: Volumen perdido del Pin (mm³)

d: Diámetro promedio de la huella de desgaste del Pin (mm)

r: Radio del Pin (mm)

$$h = r - \sqrt{r^2 - \frac{d^2}{4}} \quad (\text{ecuación 4.4})$$

si: $\frac{h}{r} \leq 1$, entonces:

$$h = \frac{d^2}{8r} \quad (\text{ecuación 4.5})$$

$$V = \frac{\pi * l^4}{64r} \quad (\text{ecuación 4.6})$$

$$K = \frac{V}{SP} \quad (\text{ecuación 4.7})$$

Donde:

K: Coeficiente de desgaste ($\text{mm}^3/\text{N.m}$)

S: Carga nominal utilizada (N)

P: Distancia de deslizamiento (m)

Las muestras se sometieron a estudios de Perfilometría, con la finalidad de analizar la profundidad de la huella producida en la superficie de la muestra después del ensayo de desgaste. Se utilizó para ello el Perfilómetro de Interferometría Óptica marca Sigo, modelo Newview 200, el cual permite, gracias al software instalado, la construcción de gráficos en 3 dimensiones.

Estas muestras cilíndricas fueron evaluadas superficialmente para determinar la dureza de los recubrimientos de acuerdo a la norma ASTM E-384-73^[28]. Para ello se utilizó un Microdurómetro, como se observa en la

Figura 4.7, marca Leco, con un penetrador Vickers (pirámide de diamante con base cuadrada con un ángulo de 136° entre caras) usando una carga de 300 gr.



Figura 4.7. Vista frontal del Microdurómetro

Para este ensayo se disponía de un Software que controlaba la pletina motorizada del equipo de microindentación y de esta forma permitía diseñar una plantilla, la cual reproducirá los puntos de análisis durante el ensayo. La plantilla se elaboró para realizar 8 medidas de carga a una distancia de $200\ \mu\text{m}$ entre cada punto de estudio, luego el Software calculó la medida de las diagonales de cada huella y arrojó el promedio de la dureza Vickers de cada recubrimiento.

4.6.- Microscopía Electrónica de Barrido:

Por último se utilizó un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) marca Phillips, modelo XL 30, con un voltaje de aceleración de 25 KV. Básicamente se utilizaron dos modos de imagen, a saber, electrones secundarios para el estudio de la superficie ensayada y electrones primarios en el análisis de secciones perpendiculares a la superficie. Cabe resaltar que este equipo cuenta con un Software especializado para la realización de mediciones de composiciones químicas sobre la imagen electrónica directamente.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1.- Microscopía electrónica de Barrido

5.1.1.- Microestructura del Recubrimiento depositado con Colmonoy 88 tratada con llama oxiacetilénica:

En la Figura 5.1a se observa la interfase existente entre el recubrimiento y el material base mediante una microscopía en modo de electrones primarios a 30X de la muestra recubierta con Colmonoy 88 tratada con llama oxiacetilénica. Se puede apreciar la buena adhesión del recubrimiento con respecto al sustrato, aunque existe la presencia de surcos producidos probablemente por el arenado del Termorrociado con un diámetro de partículas muy grande. Se observa la escasa porosidad y la ausencia de grietas en el mismo.

La Figura 5.1b corresponde a una magnificación a 1000X de dicho recubrimiento en el cual se puede observar una heterogeneidad de las partículas, así como se aprecian los diferentes tamaños de carburos existentes.

Un análisis de dispersión de energía en rayos X (EDS) realizado en la zona del recubrimiento, indicando la presencia en grandes cantidades de tungsteno, níquel y cromo, así como la presencia pero en pocas cantidades de hierro y manganeso

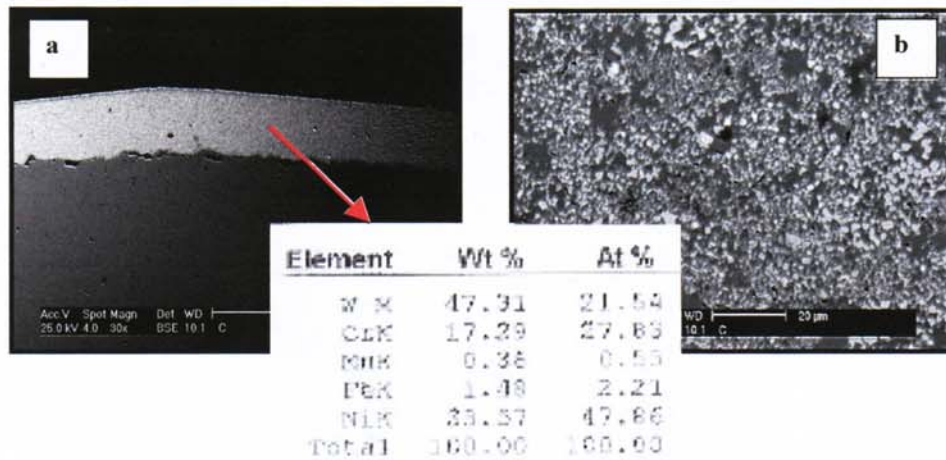


Figura 5.1. Micrografía en modo de electrones primarios de la muestra recubierta con Colmonoy 88 tratada térmicamente a) vista general a 30X b) magnificación a 1000X

5.1.2.- Microestructura del Recubrimiento depositado por soldadura TIG sin tratamiento térmico:

La figura 5.2a corresponde a una microscopía de una muestra recubierta por soldadura TIG sin ser tratada térmicamente en modo de electrones primarios a 30X, observándose la buena adhesión entre el sustrato y el recubrimiento y la distribución homogénea de las fases. Las flechas verdes indican la presencia de diminutos poros sobre la zona del recubrimiento.

En la figura 5.2b se observa una magnificación a 300X del recubrimiento, en la cual se muestra una matriz bastante uniforme y una formación de dendritas debido al rápido enfriamiento de la soldadura. Del mismo modo se realizó un análisis por dispersión de energía en Rayos X

(EDS) en la zona del recubrimiento, indicando la presencia de hierro como elemento mayoritario (65,18%).

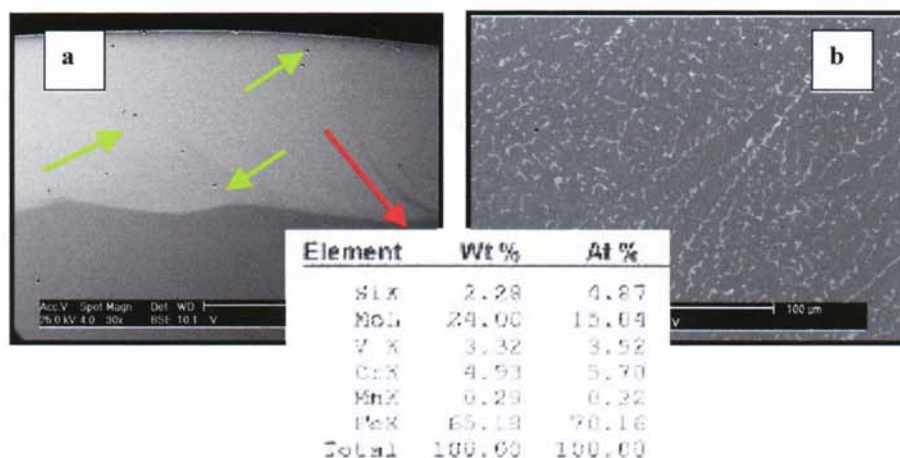


Figura 5.2. Micrografía en modo de electrones primarios de la muestra recubierta por Soldadura TIG sin tratamiento térmico a) vista general a 30X b) magnificación a 300X

5.1.3.- Microestructura del Recubrimiento depositado por soldadura TIG con tratamiento térmico:

En la figura 5.3a y b se observa una microscopía de la muestra recubierta por soldadura TIG tratada térmicamente en modo de electrones primarios, en una vista general a 30X y una magnificación a 3000X respectivamente. Se puede destacar un aspecto muy importante que se aprecia en la Figura 5.3a, ya que como lo indica la flecha azul, el espesor del recubrimiento no es constante debido al tratamiento térmico realizado, ocurriendo un avance del substrato hacia el recubrimiento producto de la

Capítulo V
Resultados y Análisis de Resultados

difusión de éstos originando a su vez picos. Se observa la distribución homogénea y la buena adhesión del recubrimiento. Un análisis por energía dispersiva de Rayos X (EDS) realizado sobre la zona del recubrimiento indicó la presencia de hierro como elemento mayoritario y en pequeñas cantidades manganeso, silicio, molibdeno y vanadio. Como lo señalan las flechas rojas, el recubrimiento presentó cierto grado de porosidad.

La Figura 5.3b muestra una matriz bastante uniforme y una estructura de grano equiaxial apreciándose un engrosamiento de las paredes del grano por la formación de eutécticos, según lo indican las flechas verdes.

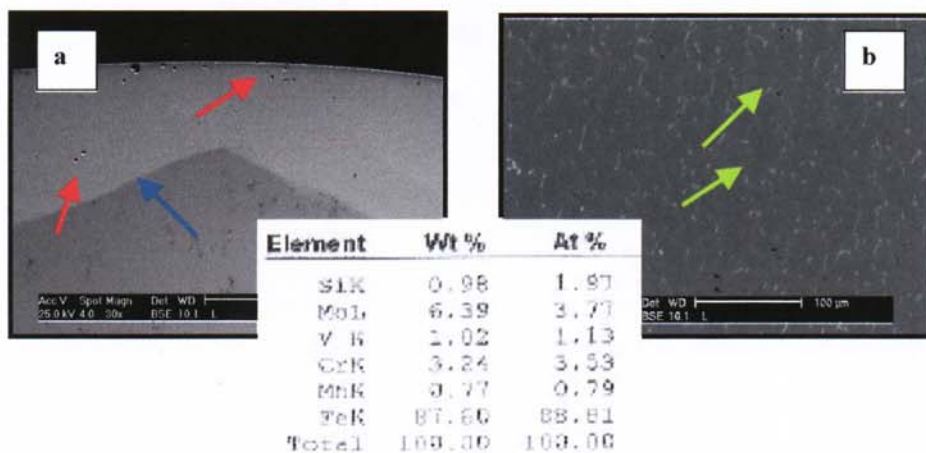


Figura 5.3. Micrografía en modo de electrones primarios de la muestra recubierta por Soldadura TIG tratada térmicamente a) vista general a 30X b) magnificación a 300X

5.2.- Evaluación de los Ensayos de Microdureza:

En la Tabla 5.1 se presentan los valores promedios de Microdureza de cada una de las muestras analizadas, siendo éstos un promedio de 8 indentaciones en cada uno de los casos.

Tabla 5.1. Valores de dureza para cada condición. Muestra 1: Colmonoy 88 tratado con llama.
Muestra 2: Soldadura TIG sin tratamiento, Muestra 3: Soldadura TIG con tratamiento

<i>Tipo de Muestra</i>	<i>Dureza Vickers HV_{0,3} (kg/mm²)</i>	<i>Desviación Estándar</i>
Muestra 1	915,7	28,3
Muestra 2	714,6	12,6
Muestra 3	654,3	6,9

Como se observa en la Figura 5.4 el mayor valor de Microdureza corresponde al recubrimiento Colmonoy 88 tratado con llama oxiacetilénica, el cual es 22% mayor que el valor de la Microdureza del recubrimiento realizado por Soldadura TIG sin tratamiento térmico y un 29% superior al valor de la microdureza del recubrimiento realizado por Soldadura TIG tratada térmicamente. Esto se debió principalmente a dos factores: el primer factor es que el Colmonoy 88 contiene partículas de segunda fase, como carburos y boruros que endurecen la aleación base níquel y el segundo factor es debido al tratamiento térmico con llama oxiacetilénico aplicado, lo cual se puede apreciar al comparar este valor (HV_{0,3} 915,7) con el valor de Microdureza

obtenido por Rodríguez^[24] del Colmonoy 88 en estado como rociado (HV03 720).

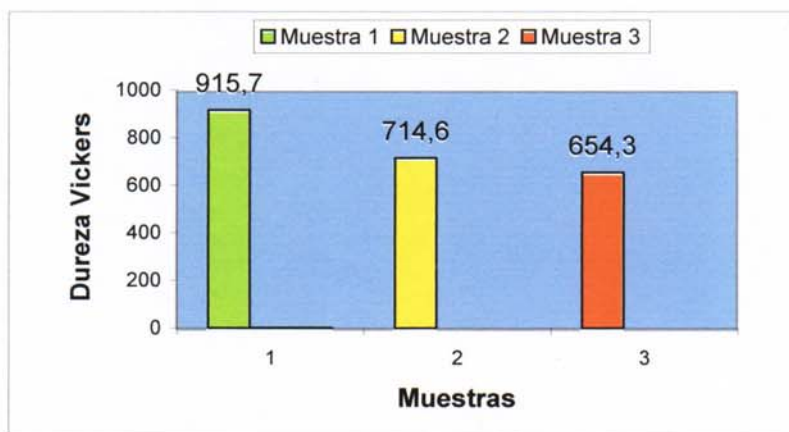


Figura 5.4. Dureza Vickers HV0,3 (kg/mm²). Muestra 1: Colmonoy 88 con tratamiento térmico, Muestra 2: Soldadura TIG sin tratamiento térmico, Muestra 3: Soldadura TIG con tratamiento térmico

El valor de la Microdureza del recubrimiento realizado por soldadura TIG sin tratamiento térmico es superior al valor de la Microdureza del recubrimiento realizado por soldadura TIG tratada térmicamente, debido a la desaparición de las dendritas producto del tratamiento térmico aplicado, el cual modificó la estructura granular del recubrimiento, aumentando el tamaño y los límites del grano, como se puede observar en la Figura 5.5a y b.

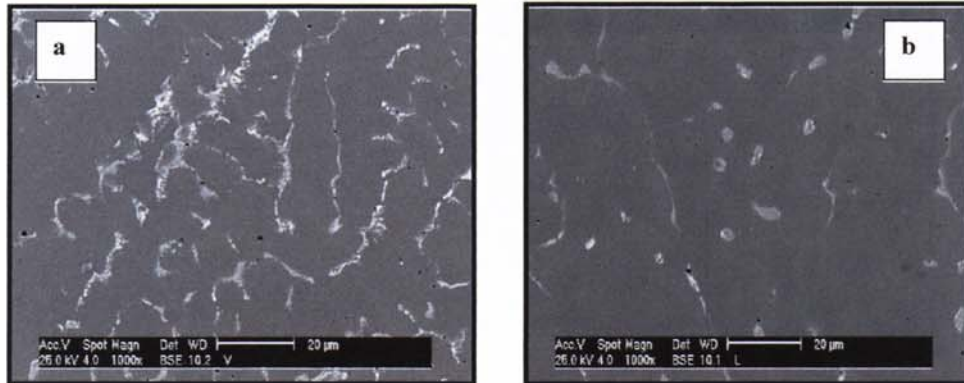


Figura 5.5. a) Micrografía de una muestra recubierta por Soldadura TIG sin tratamiento térmico en modo de electrones primarios a 1000X b) Micrografía de una muestra recubierta por Soldadura TIG con tratamiento térmico en modo de electrones primarios a 1000X

La desviación estándar del recubrimiento por Soldadura TIG tratado térmicamente es menor que la desviación estándar en el recubrimiento por Soldadura TIG sin tratamiento térmico, indicando que dicho tratamiento térmico logró una mejor distribución de las fases blandas disminuyendo así el área de las fases duras.

5.3.- Evaluación de la Resistencia al Desgaste por Rodadura:

En la Tabla 5.2 se presentan los parámetros evaluados durante los ensayos de desgaste por rodadura, mostrando los resultados obtenidos en cuanto a la presión máxima a la cual fue sometido cada eje y el tiempo de duración de cada ensayo.

Tabla 5.2. Resultados obtenidos de los ensayos de desgaste por rodadura

<i>Tipo de Recubrimiento</i>	<i>Presión Máxima (KPa)</i>	<i>Duración del Ensayo (min)</i>
Eje 1	20500	60
Eje 2	24000	70
Eje 3	35000	100
Eje 4*	41000	90
Eje 5*	41000	90
Eje 6	35000	100

Nota: Los ejes que aparecen con un asterisco al lado de su designación, fueron ensayados bajo otro procedimiento con respecto a los demás ejes (ver capítulo 4)

- *Observaciones para el eje 1:* Después de transcurrir 1 hora de ensayo, nos percatamos del aumento del ruido y de las vibraciones del banco, por lo que procedimos a apagar el mismo y verificar el estado de la muñequilla ensayada, observándose desprendimiento del recubrimiento. A través de la Figura 5.6, se puede apreciar la falla producida sobre la muñequilla del eje.



Figura 5.6. Falla producida por el ensayo de desgaste por rodadura en el eje 1

.- Observaciones para el eje 2: Después de haber pasado 1 hora con 10 minutos de haber comenzado el ensayo, notamos el aumento repentino de la temperatura del eje, por lo que decidimos desmontarlo para observar la superficie de la muñequilla, pudiendo percatarnos de un notable desprendimiento del recubrimiento. En la Figura 5.7 podemos observar el desprendimiento, conocido comúnmente como desconche, del recubrimiento de la muñequilla del eje.

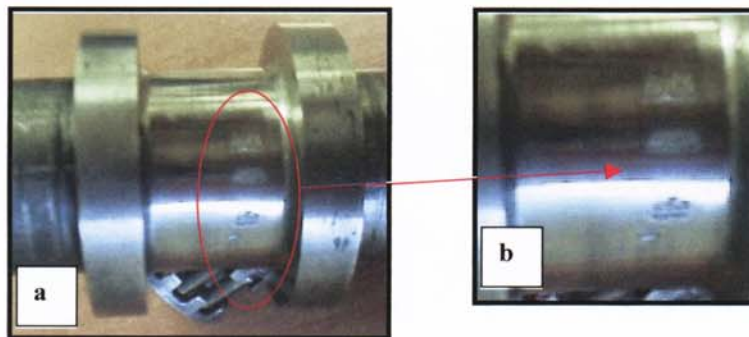


Figura 5.7. a) Vista General del desprendimiento del recubrimiento producido en la muñequilla del eje. b) Vista ampliada de la falla.

Capítulo V
Resultados y Análisis de Resultados

.- Observaciones para el eje 3: Después de 1 hora de ensayo, se procedió a apagar el banco para desmontar el eje y así observar si la muñequilla presentaba alguna falla. Una vez desmontado el eje, no observamos ningún tipo de desprendimiento del recubrimiento, por lo que decidimos montarlo de nuevo en el banco y continuar el ensayo. A casi dos horas de ensayo, nos percatamos del aumento de la temperatura del eje, decidiendo parar el ensayo y verificar el estado de la muñequilla. No observamos ninguna falla, pero nos vimos en la necesidad de cambiar el procedimiento experimental. (ver Capítulo 4)

.- Observaciones para el eje 4: Después de terminar el ensayo, se procedió a desmontar el eje para observar la muñequilla, pero no se apreció ninguna falla.

.- Observaciones para el eje 5: Después de terminar el ensayo, se procedió a desmontar el eje para observar la muñequilla, pero no se apreció ninguna falla. Se repitió el mismo procedimiento que el utilizado para el eje N° 4.

.- Observaciones para el eje 6: Se repitió el mismo procedimiento que el utilizado para el eje N° 3.

5.3.1.- Microscopía electrónica de barrido para las muestras recubiertas con Colmonoy 88 tratadas con llama oxiacetilénica ensayadas por desgaste por rodadura:

La Figura 5.8a corresponde a una micrografía de una muestra recubierta con Colmonoy 88 tratada con llama en modo de electrones primarios a 300X. El círculo azul muestra una serie de grietas producto posiblemente de los esfuerzos de hertzianos ocasionados por el contacto entre el rodamiento de aguja y la superficie de la muñequilla, los cuales producen la fractura del recubrimiento demostrando así la fragilidad del mismo. Podemos destacar que esta modalidad de imagen nos permite apreciar que no ocurre un desprendimiento del recubrimiento como tal, ya que la falla no llega hasta el material base del eje, dado que se observa en la micrografía la misma tonalidad en el recubrimiento y en la zona de fractura del mismo.

Así mismo, la Figura 5.8b muestra una magnificación en modo de electrones secundarios a 300X, en la cual se aprecia la topografía del zurco generado posiblemente por la unión de las múltiples grietas existentes sobre la muñequilla del eje, como lo indica la flecha roja.

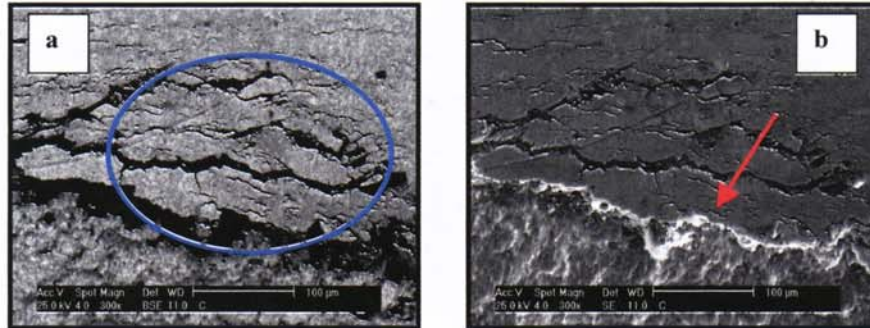


Figura 5.8. Vista general a 300X de la muestra ensayada por desgaste por rodadura recubierta con Colmonoy 88 con tratamiento térmico a) en modo de electrones primarios b) en modo de electrones secundarios

En la Figura 5.9 se observa la micrografía en modo de electrones primarios a 3500X de la muestra recubierta con Colmonoy 88 tratada con llama, mostrando dos tipos de fracturas: en el círculo azul se aprecia una fractura transgranular ya que la grieta atraviesa el carburo, mientras que el círculo rojo encierra una fractura intergranular ya que la grieta bordea a carburo, avanzando por donde se le ofrece menor resistencia.



Figura 5.9. Micrografía a 3500X en modo de electrones primarios de la muestra ensayada por desgaste por rodadura recubierta con Colmonoy 88 tratada térmicamente

La Figura 5.10 corresponde a una microscopía en modo de electrones secundarios a 100X de una muestra recubierta con Colmonoy 88 con tratamiento térmico a llama, en la cual se aprecia dos tonalidades sobre el recubrimiento; la zona oscura indica la superficie del recubrimiento y la zona clara señala la profundidad del mismo. En esta micrografía se puede observar el comportamiento parcial de una grieta que posiblemente se extienda hasta el sustrato, ocasionando en este sentido la fractura del recubrimiento.



Figura 5.10. Micrografía a 100X en modo de electrones secundarios de la muestra ensayada por desgaste por rodadura recubierta con Colmonoy 88 tratada térmicamente

5.3.2.- Microscopía electrónica de barrido para las muestras recubiertas por soldadura TIG sin tratamiento térmico ensayadas por desgaste por rodadura:

La Figura 5.11 corresponde a una micrografía recubierta por Soldadura TIG sin ser tratada térmicamente en modo de electrones secundarios a 1000X, en la cual se observa lo que posiblemente sea un poro sobre la superficie del recubrimiento, como lo indica el círculo rojo, recordando que la aparición de este poro es originado muy probablemente durante la aplicación de la Soldadura. Es importante resaltar que la soldadura no fue de buena calidad

pero aún así fue la que mejor se comportó frente al desgaste por rodadura, determinando que estos poros no influyeron de manera relevante en este ensayo.



Figura 5.11. Vista general a 1000X de la muestra ensayada por desgaste por rodadura recubierta Soldadura TIG sin tratamiento térmico en modo de electrones secundarios

En la Figura 5.12 se aprecia una micrografía a 1000X en modo de electrones secundarios de la muestra recubierta por Soldadura TIG sin tratamiento térmico. En el círculo verde se puede observar lo que posiblemente es un poro relleno por soldadura, ya que, como se explicó en el capítulo 4, a la vez que se realizaba la rectificación de las muñequillas de los ejes se iban rellendo los poros que aparecían sobre el recubrimiento.

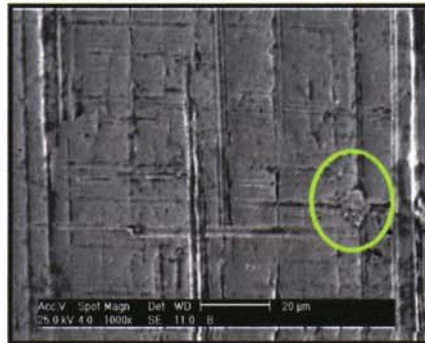


Figura 5.12. Micrografía a 1000X en modo de electrones secundarios de la muestra ensayada por desgaste por rodadura recubierta con Soldadura TIG sin tratamiento térmico

5.3.3.- Microscopía electrónica de barrido para las muestras recubiertas por soldadura TIG con tratamiento térmico ensayadas por desgaste por rodadura:

En la Figura 5.13 tenemos una vista general a 300X en modo de electrones secundarios de la muestra recubierta mediante el proceso de Soldadura TIG tratada térmicamente, en donde las flechas azules indican las huellas producidas por la piedra utilizada en el proceso de rectificación, posiblemente debido a que dicho material de la piedra era muy fuerte para rectificar el material del recubrimiento. Las flechas rojas señalan las huellas ocasionadas probablemente por el deslizamiento del rodamiento de aguja a través de la superficie del eje, ya que existía un juego tanto longitudinal como transversalmente, siendo esto necesario para el conjunto eje – rodamiento.

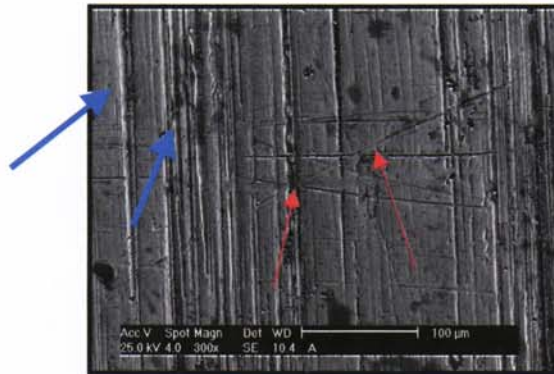


Figura 5.13. Vista general a 300X en modo de electrones secundarios de la muestra ensayada por desgaste por rodadura recubierta con Soldadura TIG tratada térmicamente

La Figura 5.14 corresponde a otra zona de la misma muestra contenida en la Figura 5.13, donde se aprecia en los límites del grano la fase eutectoide, como lo indica la flecha amarilla. Se puede decir que el desgaste en el recubrimiento no fue excesivo, sabiendo que primero se realiza la rectificación de la superficie de las muñequillas, observando la huella de ésta señalada por la flecha verde, y luego se efectúa el ensayo de desgaste por rodadura, apreciando la huella de desgaste por el rodamiento de aguja sobre la superficie del recubrimiento como lo indica la flecha azul, la cual no penetra lo suficiente como para observarse en la huella del rectificado debido a la profundidad de la misma (ver círculo rojo)

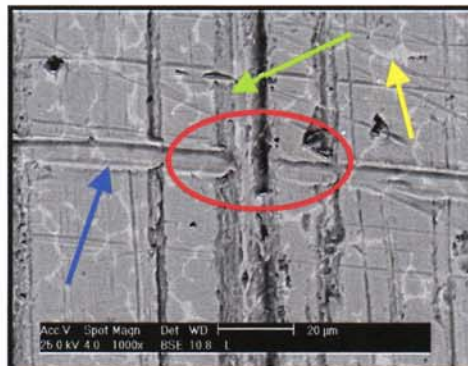


Figura 5.14. Micrografía a 1000X en modo de electrones primarios de la muestra ensayada por desgaste por rodadura recubierta con Soldadura TIG tratada térmicamente

5.4.- Ensayo de Desgaste Deslizante (Pin On Disk):

La Figura 5.15 muestra los resultados obtenidos del coeficiente de fricción Vs. distancia de deslizamiento para los recubrimientos depositados mediante Soldadura TIG sin y con tratamiento térmico. Como se observa, el coeficiente de fricción tiene un comportamiento muy inestable y nunca llega a ser constante para ambas muestras. La muestra tratada térmicamente tiene mayor amplitud en las oscilaciones del coeficiente de fricción, posiblemente originado por la disminución en el valor de la dureza a consecuencia de dicho tratamiento, ocasionando que el pin realice un mayor desgaste sobre el disco.

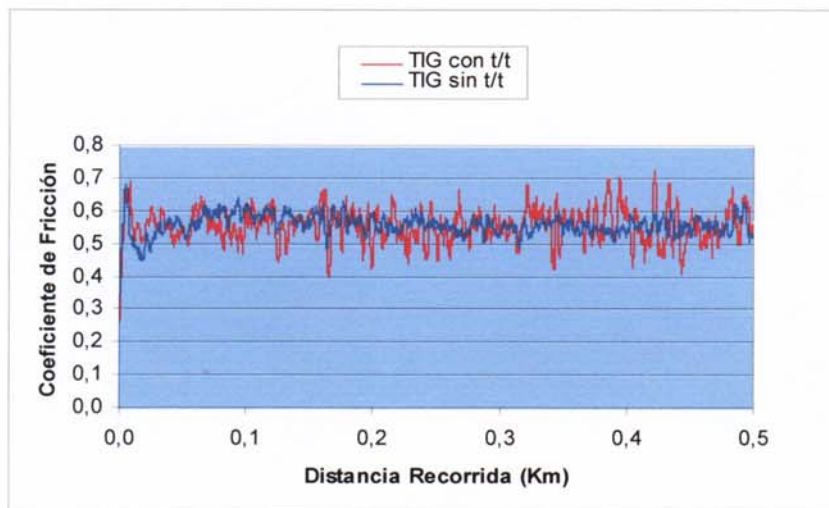


Figura 5.15. Coeficiente de Fricción Vs. Distancia de Deslizamiento para las muestras recubiertas por soldadura.

Una de las razones por la cual el coeficiente de fricción no se estabiliza está relacionada con una baja resistencia de la bola la cual debido al desgaste,

produce una gran cantidad de “debris” durante el proceso de deslizamiento. Estos debris, dada su dureza y morfología producen variaciones en los valores del coeficiente de fricción.

La Figura 5.16 muestra los resultados obtenidos por Rodríguez^[24] del coeficiente de fricción Vs. distancia de deslizamiento para el Colmonoy 88 depositado por Rociado Térmico tratado con llama oxiacetilénica, en donde señala que el coeficiente de fricción no experimenta un brusco aumento en los primeros 25 metros de deslizamiento, el mismo parte de un valor cercano a 0.5 y sube rápidamente a 0.6. Este comportamiento podría estar relacionado con la densificación del recubrimiento como consecuencia del tratamiento térmico lo cual produjo un alisamiento.

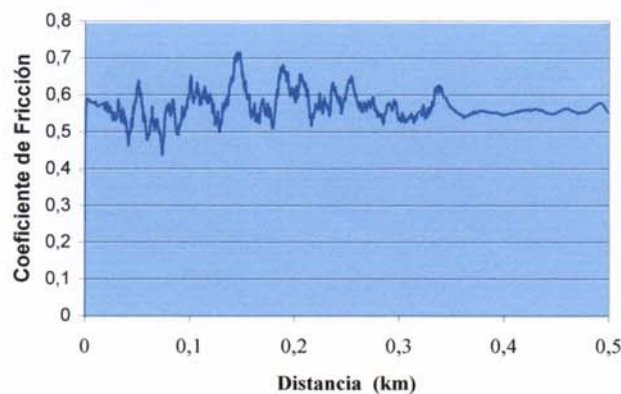


Figura 5.16. Coeficiente de Fricción Vs. Distancia de Deslizamiento para muestra de Colmonoy 88 con Tratamiento Térmico (Tomado de Rodríguez^[28])

Capítulo V
Resultados y Análisis de Resultados

Se puede observar en la Tabla 5.3 los valores del coeficiente de desgaste y la tasa de desgaste de los recubrimientos por Soldadura TIG, en la cual la muestra tratada térmicamente tiene un coeficiente de desgaste 40% mayor que la muestra sin tratamiento térmico, así como también resultó tener una tasa de desgaste 40% mayor.

Tabla 5.3. Valores del coeficiente de desgaste y tasa de desgaste de las muestras recubiertas por Soldadura TIG

<i>Muestra</i>	<i>Coeficiente de Desgaste (mm³/N*m)</i>	<i>Tasa de Desgaste (mm³/m)</i>
TIG sin t/t	2,1547x10E-5	6,34x10E-5
TIG con t/t	3,5813x10E-5	1,054x10E-4

En la Figura 5.17 observamos las pérdidas de volumen de los pines utilizados para los ensayos de desgaste por deslizamiento (Pin on Disk), apreciando que el mejor comportamiento al desgaste por deslizamiento es obtenido por la muestra recubierta por Soldadura TIG tratada térmicamente ya que el pin tuvo un mayor desgaste comparado con el otro pin utilizado.

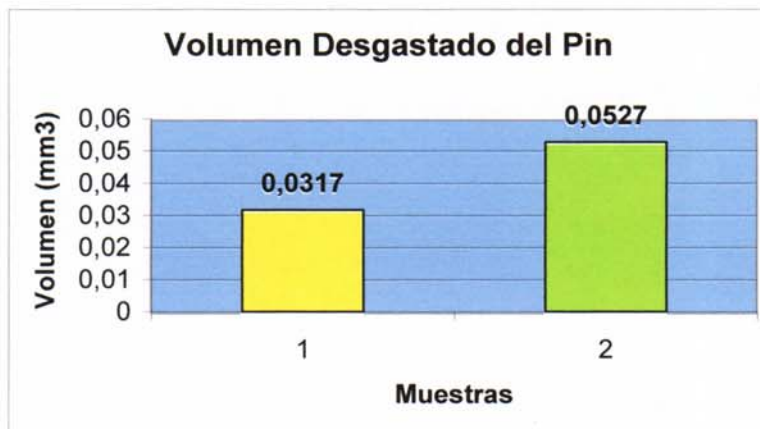


Figura 5.17. Volumen desgastado de los pines del ensayo de Pin On Disk

La Figura 5.18a corresponde a una micrografía de la huella de desgaste sobre el disco producida por la bola utilizada en el ensayo en modo de electrones primarios a 50X. Se puede apreciar un incipiente desgaste adhesivo posiblemente debido a las partículas desprendidas por la bola durante el ensayo, un análisis por energía dispersiva de Rayos X (EDS) realizado en la zona negra, como se aprecia en la figura 5.18b (misma muestra a 300X), indicada por la flecha roja, detectó la presencia de hierro como elemento mayoritario y en pequeña cantidad cromo y manganeso, correspondiente probablemente al material del pin

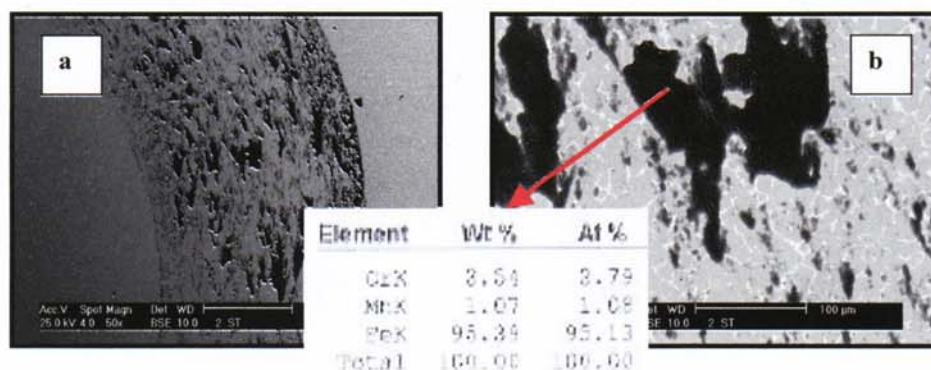


Figura 5.18. Huella sobre el recubrimiento producido por el pin utilizado para la muestra de Soldadura TIG sin tratamiento térmico en modo de electrones primarios a) vista general a 50X b) magnificación a 300X

En la Figura 5.19 correspondiente a la perfilometría de la muestra recubierta por Soldadura TIG sin tratamiento térmico, observamos a través del perfil topográfico en 3D, el perfil superficial y de la morfología de la huella que efectivamente existe material del pin adherido al recubrimiento en el centro de la huella junto con un leve desgaste abrasivo

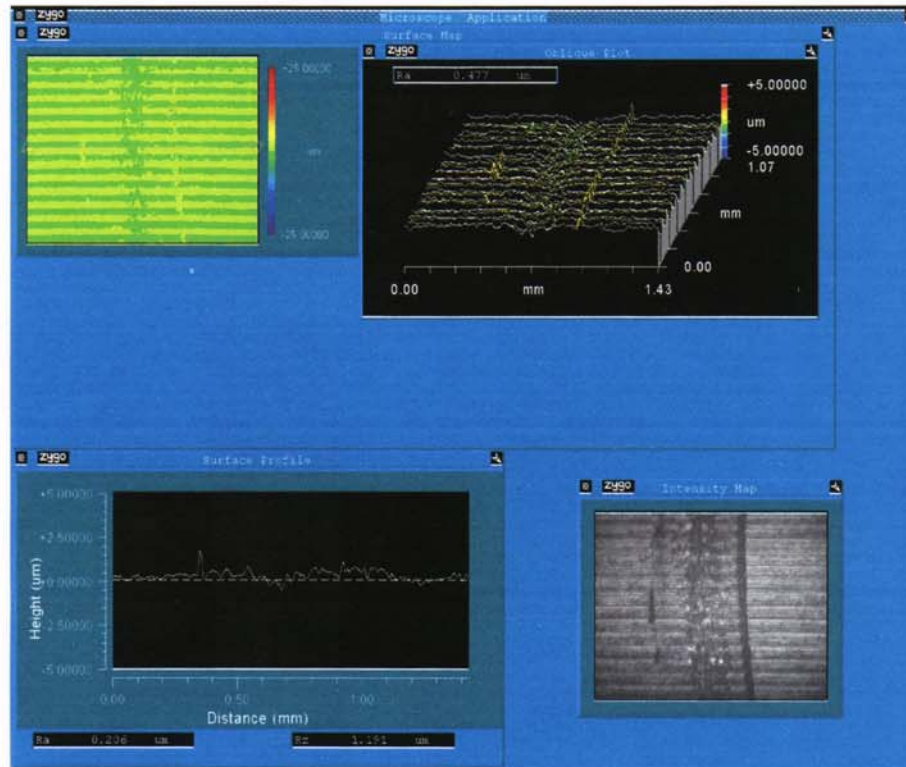


Figura 5.19. Perfilometría de la muestra recubierta por Soldadura TIG sin tratamiento térmico

Se muestra en la Figura 5.20 una microscopía en modo de electrones secundarios a 40X de la bola utilizada en el ensayo de desgaste por deslizamiento para la muestra recubierta con Soldadura TIG sin ser tratada térmicamente, apreciándose el desgaste producido sobre la superficie de éste, producto de la fricción entre el pin y la superficie de la muestra.



Figura 5.20. Micrografía en modo de electrones secundarios del pin utilizado para la muestra de Soldadura TIG sin ser tratada térmicamente a 40X

En la Figura 5.21a se puede apreciar una micrografía a 50X de la huella sobre el recubrimiento producida por la bola durante el ensayo de Pin On Disk, en modo de electrones primarios. En ella se puede apreciar algunas áreas de color oscuro las cuales pueden observarse en la Figura 5.21b correspondiendo a una micrografía de la misma huella a una magnificación de 300X. La fase de color oscuro fue sometida a un análisis por energía dispersiva de Rayos X (EDS), el cual arrojó la presencia como elemento mayoritario al hierro y en menor cantidad cromo y manganeso. Esta fase puede haber sido depositada durante el ensayo por el pin, el cual se desgasta dejando partículas que son aplastadas por las sucesivas pasadas del mismo produciendo el mecanismo de desgaste por adhesión.

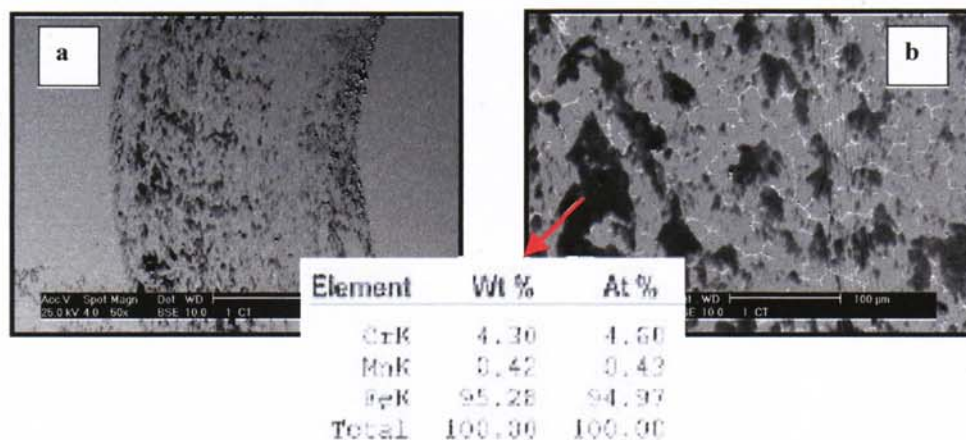


Figura 5.21. Huella sobre el recubrimiento producida por el pin utilizado para la muestra de Soldadura TIG tratada térmicamente en modo de electrones primarios a) vista general a 50X b) magnificación a 300X

En la Figura 5.22 se muestra una fotografía arrojada por el perfilómetro donde se observan en la parte superior derecha un diagrama topográfico en tres dimensiones de la superficie de la muestra, donde se ve claramente la huella formada por el pin en el recubrimiento, en la parte inferior izquierda se observa el perfil superficial de la huella, el cual indica que hubo desgaste de tipo abrasivo en el centro y desgaste adhesivo en los bordes de la huella.

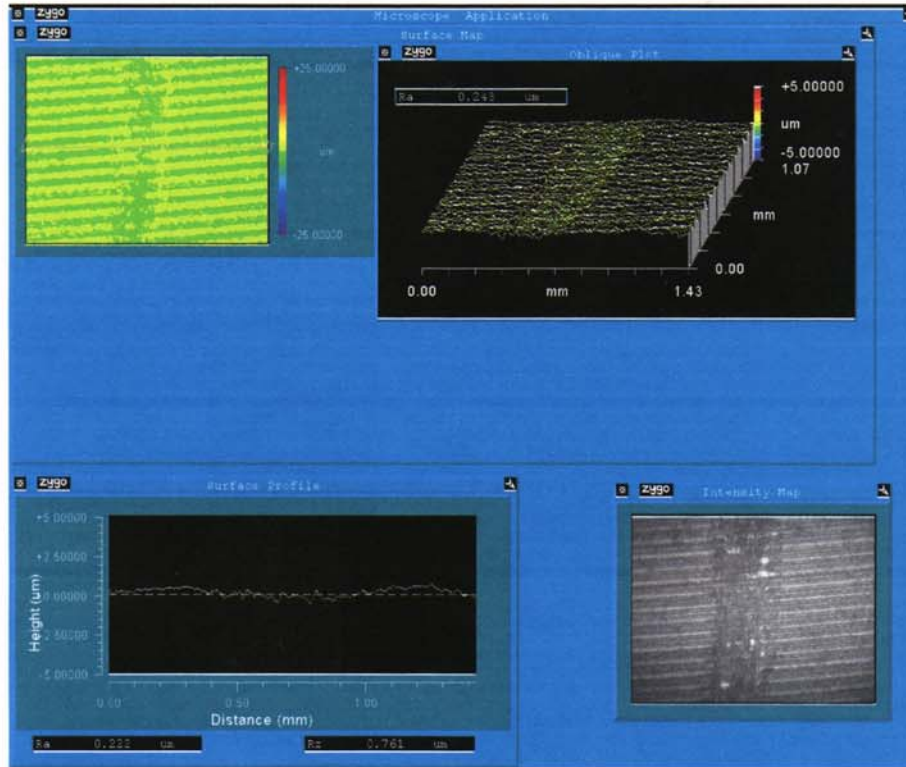


Figura 5.22. Perfilometría de la muestra recubierta por Soldadura TIG tratada térmicamente

La Figura 5.23a corresponde a una micrografía del pin utilizado para el ensayo de la muestra recubierta mediante Soldadura TIG tratada térmicamente en modo de electrones secundarios a 40X, en la cual se aprecia la acumulación de partículas las cuales fueron analizadas por EDS confirmando la presencia de oxígeno y hierro, lo cual indicaría la presencia de óxidos de hierro. Bajo la acción de la carga, esta película de óxidos de hierro puede llegar a fracturarse y las partículas desprendidas se pulverizan

produciendo viruta conocida como “debris”, las cuales se incrustan en el pin produciendo el desgaste abrasivo en el disco.

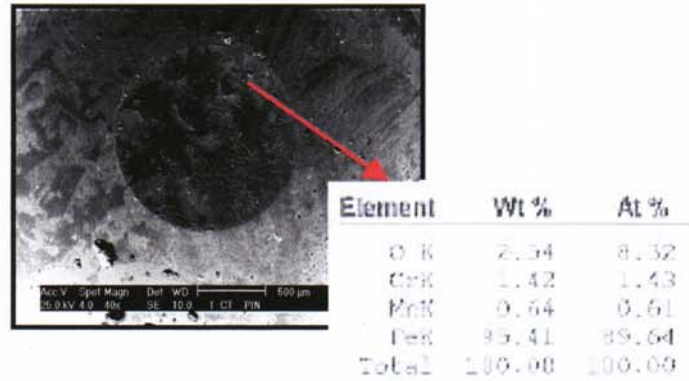


Figura 5.23. Micrografía en modo de electrones secundarios del pin utilizado para la muestra de Soldadura TIG tratada térmicamente a 40X

CONCLUSIONES

El banco de ensayos fue diseñado y construido, funcionando de manera adecuada para evaluar el comportamiento al desgaste por rodadura de los materiales estudiados.

El proceso de Termorrociado Hipersónico, conocido comúnmente como HVOF, proporciona un recubrimiento de muy buena calidad, de una gran adherencia, baja porosidad y gran dureza, pero ésta última propiedad es contrapuedecente ya que a su vez origina un recubrimiento muy frágil para los esfuerzos de contacto a los cuales están sometidos los cigüeñales de motores fuera de borda. En cuanto al proceso de Soldadura TIG, proporciona un recubrimiento muy homogéneo en su microestructura pero a su vez presenta cierto grado de porosidad. Aunque a pesar de que el recubrimiento no fue de buena calidad, aún así se comportó de manera óptima según los experimentos realizados, determinando que estos poros no influyeron de manera relevante en el ensayo.

El tratamiento térmico aplicado a la muestra realizada por soldadura TIG modificó la estructura granular del recubrimiento, obteniendo así una disminución en el valor de la Microdureza con respecto a la muestra que no fue tratada térmicamente.

A la luz del ensayo de microdureza, el tratamiento térmico con llama aplicado al Colmonoy 88 le permitió tener el mejor comportamiento ante las otras dos muestras realizadas por soldadura TIG.

El material recubierto mediante Soldadura TIG resultó tener un mejor comportamiento bajo las condiciones de desgaste por rodadura que el material recubierto a través del Rociado Térmico.

El material utilizado para el Termorociado no es apto para la reconstrucción de las muñequillas de los cigüeñales de motores fuera de borda bajo las condiciones depositadas ya que las muestras ensayadas presentaron desprendimiento del recubrimiento, mientras que el material depositado mediante la aplicación de la Soldadura TIG no presentó desprendimiento visible del recubrimiento, sin embargo no se puede concluir que el recubrimiento es apto para la reconstrucción de los cigüeñales de motores fuera de borda, ya que el estudio de desgaste por rodadura fue realizado por medio de un banco de ensayos que aplicaba cargas estáticas y no mediante una simulación de cargas puntuales a las cuales están sometidos los cigüeñales de motores fuera de borda.

No se puede determinar entre las muestras recubiertas por Soldadura TIG sin y con tratamiento térmico cual fue la que tuvo un mejor comportamiento, ya que ambas actuaron de manera similar, soportando las mismas solicitaciones durante el mismo tiempo de ensayo.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar, para este tipo de investigaciones, los ensayos en un banco de pruebas dinámico, es decir, que el banco transmita cargas pulsantes hacia el cigüeñal a estudiar a través de un motor fuera de borda, para así garantizar lo más posible las condiciones reales de operación y obtener resultados mucho más exactos.

- Incorporar al banco de pruebas la instrumentación y/o el equipo necesario que pueda detectar las fallas por desgaste por rodadura para así conocer el momento preciso en que ocurre dicha falla.

- Se recomienda estudiar algún otro tipo de recubrimiento aplicado por Termorrociado, ya que ésta técnica es muy versátil y muy utilizada en el área de reconstrucción de piezas de maquinarias sometidas a altas cargas dinámicas.

- Es recomendable perfeccionar la técnica de aplicación o variar los parámetros de operación de la Soldadura TIG utilizada en este trabajo ya que presentó cierta porosidad la superficie a ensayar, trayendo como consecuencia la nueva ejecución de la soldadura sobre la muñequilla.

Capítulo VI
Recomendaciones

- Se recomienda diseñar mejor el tratamiento térmico a aplicar a las muestras para que de esta forma no se modifique la estructura granular del recubrimiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1.- HELDT, Peter: Motores Rápidos de Combustión. Editada por el Dr. E. F. Pica. Quinta Edición. España. 1956.
- 2.- LOZADA y PAOLILLO: Evaluación de la Capacidad de Carga en Ejes que han sido Termorrociados por medio de Técnicas de Deposición de Arco-Eléctrico y High Velocity Oxy-Fuel (HVOF). Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. U.C.V. 1998.
- 3.- ANDRADE, D y PULE, C: Evaluación de Muñones de Motores Diesel Rociados Térmicamente Bajo Régimen de Lubricación Límite. Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. U.C.V. 2001.
- 4.- BURGOS SOLA, José. Recuperación de Piezas por Soldadura. JIFI. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. 2000.
- 5.- SMITH, Ronald y KNIGHT, Richard. Journal of Materials, U.S.A., 1995.
- 6.- ASM HANDBOOK, Friction Lubrication and Wear Technology, Copyright by ASM International, U.S.A., 1994, Vol. A.18.

Referencias Bibliográficas

- 7.- AWS American Welding Society, Thermal spraying: Practice, Theory and Application, Copyright by ASM International, U.S.A., 1978.
- 8.- ACOSTA, A y CLEMENTE, E: Estudio Comparativo de la Resistencia al Desgaste de Babbitt Termorrociados y Soldados por el proceso TIG bajo la Lubricación al Límite. Tesis de grado. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. U.C.V. 1999.
- 9.- GROOVER, Mikell: Fundamentos de Manufactura Moderna. Editorial Prentice Hall. Segunda Edición. México. 1997.
- 10.- HORWITZ, Henry. Soldadura: Aplicaciones y Práctica. Editorial Alfaomega. México. 1997.
- 11.-IGNOTO, Vicente: Soldadura para Ingenieros. Universidad Central de Venezuela. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Los Materiales. 2003.
- 12.- ASM HANDBOOK, Welding Brazing and Soldering. Copyright by ASM International, U.S.A. 1994, Vol. A.6.
- 13.- PATTON, W.J. Ciencia y Técnica de la Soldadura. Editorial Urmo. España. 1982.

Referencias Bibliográficas

- 14- RIVAS, Beatriz: Recuperación de ejes de Equipos Rotativos mediante Soldadura. Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Metalúrgica. U.C.V. 1997.
- 15.- CADENAS, Pedro y MACHADO, Salvador. Evaluación del desgaste por rodadura de materiales Termorrociados usados para cigüeñales de motores fuera de borda. Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. U.C.V. 1992.
- 16.- SHIGLEY, Edward. Diseño en Ingeniería Mecánica. Editorial McGraw Hill. Quinta Edición. México. 1994.
- 17- LANGER, A y MÉNDEZ, L: Influencia del Termorrociado Sobre la Resistencia a la Fatiga de un Acero empleado para la Construcción de Cigüeñales. Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. U.C.V. 1990.
- 18.- MAZUR, CRISTALINAS Y KUBIAK: Reparación por soldadura de carcasas de alta, media e intermedia presión de turbinas de vapor, fabricadas con aceros al Cr – Mo y al Cr – Mo – V. Revista de Soldadura. España. 1996.
- 19.- WAGNER W, FIALA P, BARBEZAT G: “Microestructure – Wear and Corrosion Relationships for Thermally Sprayed Metallic Deposits”.

Referencias Bibliográficas

- 20.- SIEGMANN S, BRANDT O, MARGADANT N: "Tribological Requirements of Thermally Sprayed Coatings for Wear Resistant Applications".
- 21.- FERRARA, S y PÉREZ, R: Evaluación de la Resistencia al Desgaste de un recubrimiento depositado por Rociado Térmico. Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. U.C.V. 2001.
- 22.- GALÁRRAGA, M y GONZÁLEZ, F: Evaluación de la Resistencia al Desgaste Abrasivo y Erosivo de recubrimiento tipo Cermet depositados por HVOF. Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. U.C.V. 2002.
- 23.- Catálogo General de Rodamientos SKF. 1998.
- 24.- RODRÍGUEZ, María de Los Ángeles. Evaluación de los Recubrimientos Base Níquel depositados por la técnica HVOF con Tratamiento Térmico posterior. Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. U.C.V. 2002.
- 25.- Catálogo de Electrodo para Mantenimiento, Reparaciones y Construcción en General. Mecer Griesheim de Venezuela. 1991.
- 26.- Colmonoy Hard Surfacing & Thermal. Wall Colmonoy Corporation. 1990.

Referencias Bibliográficas

- 27.- Standard Test Method for Wear Testing with a Pin On Disk Apparatus. Norma ASTM G99-95-A
- 28.- Standard Test Method for Microhardness of Materials. Norma ASTM E384-73
- 29.- BACHMANN, Albert: Dibujo Técnico. Editorial Labor. Cuarta Edición. España. 1994.

APÉNDICE

Apéndice

A.- Reporte de los resultados obtenidos durante los Ensayos de Desgaste por Rodadura:

Eje N° 1

Proceso de Recubrimiento: Termorrociado por HVOF

Tipo de Recubrimiento: Colmonoy 88

Tratamiento Térmico: Llama Oxiacetilénica

Temperatura ambiente: 29 °C

Tabla A.1. Reporte de los valores obtenidos del ensayo para el eje N° 1

<i>Tiempo [min]</i>	<i>Carga aplicada [psi]</i>	<i>Temperatura del eje [°C]</i>
0 - 5	250	30
5 -10	500	41
10 -15	750	49
15 - 20	1000	57
20 - 25	1250	64
25 - 30	1500	70
30 - 35	1750	68
35 - 40	2000	69
40 - 45	2250	71
45 – 50	2500	73
50 – 55	2750	74
55 – 60	3000	83

Eje N° 2

Proceso de Recubrimiento: Termorrociado por HVOF

Tipo de Recubrimiento: Colmonoy 88

Tratamiento Térmico: Llama Oxiacetilénica

Temperatura ambiente: 28 °C

Tabla A.2. Reporte de los valores obtenidos del ensayo para el eje N° 2

<i>Tiempo [min]</i>	<i>Carga aplicada [psi]</i>	<i>Temperatura del eje [°C]</i>
0 – 5	250	32
5 –10	500	46
10 -15	750	54
15 - 20	1000	61
20 - 25	1250	61
25 - 30	1500	64
30 - 35	1750	64
35 - 40	2000	68
40 - 45	2250	70
45 - 50	2500	74
50 - 55	2750	81
55 – 60	3000	84
60 – 65	3250	88
65 – 70	3500	98

Eje N° 3

Proceso de Recubrimiento: Soldadura TIG

Tipo de Recubrimiento: Electrodo E 6 - 60

Sin tratamiento térmico

Temperatura ambiente: 32 °C

Tabla A.3. Reporte de los valores obtenidos del ensayo para el eje N° 3

<i>Tiempo [min]</i>	<i>Carga aplicada [psi]</i>	<i>Temperatura del eje [°C]</i>
0 - 5	250	38
5- 10	500	48
10 - 15	750	54
15 - 20	1000	66
20 - 25	1250	72
25 - 30	1500	72
30 - 35	1750	70
35 - 40	2000	72
40 - 45	2250	71
45- 50	2500	73
50 - 55	2750	74
55 – 60	3000	75
60 – 65	3250	58
65 – 70	3500	64
70 – 75	3750	67
75 – 80	4000	69
80 – 85	4250	70
85 – 90	4500	73
90 - -95	4750	79
95 – 100	5000	88

Eje N° 4

Proceso de Recubrimiento: Soldadura TIG

Tipo de Recubrimiento: Electrodo E 6 - 60

Sin tratamiento térmico

Temperatura ambiente: 31 °C

Tabla A.4. Reporte de los valores obtenidos del ensayo para el eje N° 4

<i>Tiempo [min]</i>	<i>Carga aplicada [psi]</i>	<i>Temperatura del eje [°C]</i>
0 - 8:35	3000	33
8:35 – 9:00	6000	36
9:00 - 17:35	3000	41
17:35 – 18:00	6000	43
18:00 – 26:35	3000	47
26:35 – 27:00	6000	47
27:00 – 35:35	3000	51
35:35 – 36:00	6000	52
36:00 – 44:35	3000	56
44:35 – 45:00	6000	56
45:00 – 53:35	3000	58
53:35 – 54:00	6000	59
54:00 – 62:35	3000	61
62:35 – 63:00	6000	60
63:00 – 71:35	3000	63
71:35 – 72:00	6000	65
72:00 – 80:35	3000	64
80:35 – 81:00	6000	66
81:00 – 89:35	3000	67
89:35 – 90:00	6000	71

Eje N° 5

Proceso de Recubrimiento: Soldadura TIG

Tipo de Recubrimiento: Electrodo E 6 - 60

Con tratamiento térmico

Temperatura ambiente: 28 °C

Tabla A.5. Reporte de los valores obtenidos del ensayo para el eje N° 5

<i>Tiempo [min]</i>	<i>Carga aplicada [psi]</i>	<i>Temperatura del eje [°C]</i>
0 - 8:35	3000	32
8:35 - 9:00	6000	39
9:00 - 17:35	3000	43
17:35 - 18:00	6000	48
18:00 - 26:35	3000	51
26:35 - 27:00	6000	55
27:00 - 35:35	3000	56
35:35 - 36:00	6000	61
36:00 - 44:35	3000	63
44:35 - 45:00	6000	69
45:00 - 53:35	3000	71
53:35 - 54:00	6000	74
54:00 - 62:35	3000	77
62:35 - 63:00	6000	84
63:00 - 71:35	3000	86
71:35 - 72:00	6000	91
72:00 - 80:35	3000	94
80:35 - 81:00	6000	96
81:00 - 89:35	3000	101
89:35 - 90:00	6000	112

Eje N° 6

Proceso de Recubrimiento: Soldadura TIG

Tipo de Recubrimiento: Electrodo E 6 - 60

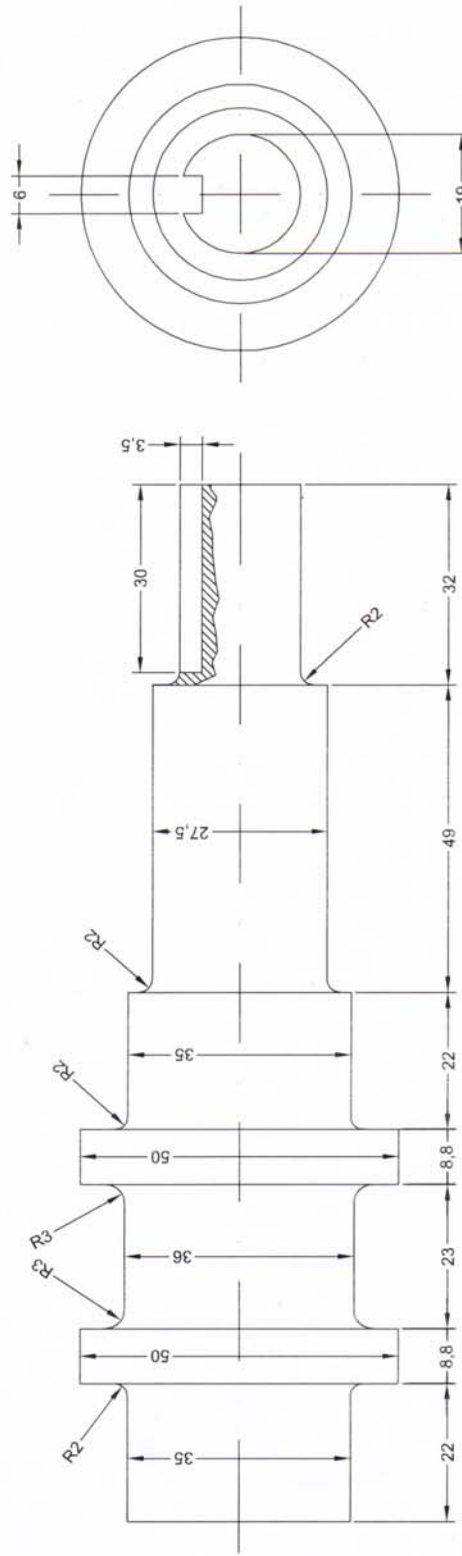
Con tratamiento térmico

Temperatura ambiente: 26 °C

Tabla A.6. Reporte de los valores obtenidos del ensayo para el eje N° 6

<i>Tiempo [min]</i>	<i>Carga aplicada [psi]</i>	<i>Temperatura del eje [°C]</i>
0 – 5	250	29
5- 10	500	33
10 – 15	750	36
15 – 20	1000	41
20 – 25	1250	43
25 – 30	1500	45
30 – 35	1750	48
35 – 40	2000	52
40 – 45	2250	53
45- 50	2500	56
50 – 55	2750	60
55 – 60	3000	63
60 – 65	3250	67
65 – 70	3500	66
70 – 75	3750	69
75 – 80	4000	71
80 – 85	4250	74
85 – 90	4500	81
90 - -95	4750	95
95 – 100	5000	99

ANEXOS



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIBUJO: MARCANO A. VAZQUEZ F.		EJE	
NORMAS: DIN	FECHA: OCTUBRE 2003	UNIDADES: mm	HOJA N°: 1
REVISADO:	ESCALA: 1:1		

COLMONOY[®] technical data sheet



Wall Colmonoy Corporation, 30261 Stephenson Hwy., Madison Heights, MI 48071-1650
Tel 313-585-6400 Fax 313-585-7960

No. Ni.-1.1B

COLMONOY NO. 6

A Nickel-Base Hard-Surfacing Alloy Containing 10% Chromium Boride Crystals
Hardness RC 56-61

NOMINAL COMPOSITION

Carbon	- 0.65%	Silicon	- 4.35
Chromium	- 13.50	Iron	- 4.00
Boron	- 3.00	Nickel	- Balance

PHYSICAL PROPERTIES

Specific Gravity: 7.8
Density: 0.28 lbs. per cu. in.
Melting Range:
Solidus - 1740°F (950°C)
Liquidus - 1900°F (1040°C)
Modulus of Elasticity: 32,000,000 psi (tension and compression)
Ultimate Compressive Strength: 300,000 psi (average)
Tensile Strength: 30,000 psi (average)
Charpy Impact Strength: Average value of 1.5 lbs.
(Special specimens having 1/2" radius notch, and polished to remove all possibility of stress concentrations, as referenced in Metal Progress, May, 1959, "Impact Testing for Calculating Tool Steels")
Magnetic Permeability: 1.005
Coefficient of Friction: 0.10 (6-micro-inch surface finish)
Average Coefficient of Thermal Expansion 122-1202°F (50-650°C): 8.14×10^{-6} in./in./Deg.
Thermal conductivity, Btu/ft²/in./°F/hr - 104
Specific heat, Btu/lb/°F (77-212°F) - 0.190
Heat Treatability, Forgeability, Toxicity: None
Electrical Resistivity is similar to Inconel alloy 600.

Hardness (Rockwell C) of oxyacetylene rod deposit*:

Room Temperature	600°F	800°F	1000°F	1200°F
	315°C	425°C	540°C	650°C
	56-61	55	52	48
				44

*These hardnesses also apply to Sprayweld deposits and castings. Deposits by electric arc, TIG (GTAW) and PTA processes have lower hardnesses, depending on extent of base metal dilution.

DESCRIPTION

Colmonoy No. 6 is the original nickel-base hard-surfacing alloy. It was the success it was largely because it contained chromium boride crystals, which have a hardness of DPH 4100. They are created through a proprietary two-stage exothermic process. The chemistry has been duplicated by others, but



Photomicrograph identifying the constituents listed below. 480X

Microstructural Constituents and Microhardness:

1. Chromium Boride	4100 DPH
2. Chromium Carbide	2500 DPH
3. Primary Solid Solution	450 DPH
4. Secondary Solid Solution	800 DPH
5. Eutectic	1000 DPH

none have duplicated the peculiar microstructure with its diamond-like chromium borides.

Colmonoy No. 6 is rated excellent in resistance to abrasion, corrosion, and galling and good on impact. It has excellent red hardness and has no peer in weldability. A very stable alloy, it does not anneal. Its low coefficient of friction makes it excel in metal-to-metal wear. It can be hot-formed while in the plastic condition (between the solidus and liquidus temperatures).

AVAILABLE FORMS

Sprayweld[®] Powder
Plasma Transferred Arc (PTA) Powder
Bare Rod
Castings
Ingot

APPLICATION METHODS

With the Sprayweld Process:

This method combines the controlled application of metal spraying and the metallurgical bonding of welding.

Prepare the surface to be sprayed by grit blasting. This ensures the mechanical bonding of the sprayed overlay, to prevent separation during fusing.

GRIDUR 7

DIN 8555: E 6-60

POSICIONES: Todas, excepto Vertical Descendente

CORRIENTE: Alterna o Continua Polo Positivo.

CARACTERISTICAS:

Ideal para recargues donde se necesita una alta resistencia a la abrasión e impacto. Cuando sea necesario el aplicar varias capas, una sobre otra. Se puede usar en aceros generales, aceros fundidos y aceros duros al manganeso.

INDICACIONES:

Sólo en caso de un material base con un porcentaje más alto de carbono, se recomienda un precalentamiento de 200-300 °C.

APLICACIONES:

Muy útil en: Siderúrgicas, fábricas de cemento, molinos, canteras, areneras, picadoras de piedra, dragas, etc.

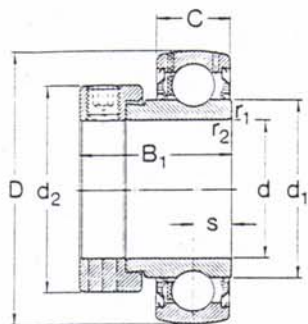
COMPOSICION QUIMICA:

C. 0.5% Mn. 0.4% Si. 1.5% Cr. 9.0%

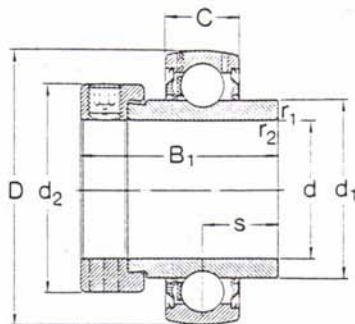
DUREZA ROCKWELL: 58 HRC

(mm)	(Pulg.)	(mm) Largo	Amperaje	Peso por pqte. Kg.	Peso por caja Kg.
3.25	1/8	350	80-100	5	30
4.0	5/32	450	100-130	6	36
5.0	3/16	450	130-180	6	36
6.0	1/4	450	180-220	6	36

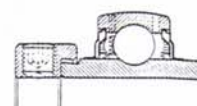
Rodamientos Y con anillo de fijación excéntrico
d 12-60 mm



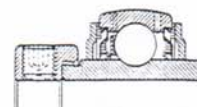
Serie YET 2



Serie YEL 2
sin esparcidores



Serie YEL 2-2F
con 2 esparcidores



Serie YEL 2-2FF
con 2 esparcidores
floccados

Dimensiones									Capacidad de carga		Carga límite de fatiga P_u	Masa Rodamiento	Designaciones		
d	d ₁	d ₂	D	B ₁	C	s	r _{1,2} min		dinám. C ¹⁾	estát. C ₀			Rodamientos sin esparcidores	con 2 esparcidores	con 2 esparcidores floccados
mm									N		N	kg	-		
12	24,2	28,6	40	28,6	12	6,5	0,3		7 350	4 750	140	0,13	YET 203/12	-	-
15	24,2	28,6	40	28,6	12	6,5	0,3		7 350	4 750	140	0,12	YET 203/15	-	-
17	24,2	28,6	40	28,6	12	6,5	0,3		7 350	4 750	140	0,11	YET 203	-	-
	24,2	28,6	40	37,3	12	13,9	0,3		7 350	4 750	140	0,13	YEL 203	YEL 203-2F	YEL 203-2FF
20	28,2	33	47	31	14	7,5	0,6		9 800	6 550	196	0,16	YET 204	-	-
	28,2	33	47	43,7	14	17,1	0,6		9 800	6 550	196	0,19	YEL 204	YEL 204-2F	YEL 204-2FF
25	33,7	37,4	52	31	15	7,5	0,6		10 800	7 800	232	0,18	YET 205	-	-
	33,7	37,4	52	44,4	15	17,5	0,6		10 800	7 800	232	0,23	YEL 205	YEL 205-2F	YEL 205-2FF
30	39,7	44,2	62	35,7	18	9	0,6		15 000	11 200	335	0,30	YET 206	-	-
	39,7	44,2	62	48,4	18	18,3	0,6		15 000	11 200	335	0,36	YEL 206	YEL 206-2F	YEL 206-2FF
35	46,1	55,6	72	38,9	19	9,5	1		19 600	15 300	455	0,49	YET 207	-	-
	46,1	55,6	72	51,1	19	18,8	1		19 600	15 300	455	0,55	YEL 207	YEL 207-2F	YEL 207-2FF
40	51,8	60,3	80	43,7	21	11	1		23 600	19 000	560	0,62	YET 208	-	-
	51,8	60,3	80	56,3	21	21,4	1		23 600	19 000	560	0,70	YEL 208	YEL 208-2F	YEL 208-2FF
45	56,8	63,5	85	43,7	22	11	1		25 500	21 600	640	0,65	YET 209	-	-
	56,8	63,5	85	56,3	22	21,4	1		25 500	21 600	640	0,74	YEL 209	YEL 209-2F	YEL 209-2FF
50	62,5	69,9	90	43,7	22	11	1		27 000	23 200	695	0,73	YET 210	-	-
	62,5	69,9	90	62,7	22	24,6	1		27 000	23 200	695	0,89	YEL 210	YEL 210-2F	YEL 210-2FF
55	69,1	76,2	100	48,4	25	12	1		33 500	29 000	865	0,98	YET 211	-	-
	69,1	76,2	100	71,4	25	27,8	1		33 500	29 000	865	1,20	YEL 211	YEL 211-2F	YEL 211-2FF
60	75,6	83,7	110	77,8	26	31	1,5		40 500	36 000	1 060	1,60	YEL 212	YEL 212-2F	YEL 212-2FF

