



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARACTERIZACIÓN DEL DESGASTE DE UN
RECUBRIMIENTO Cr-Ni-Fe-Si-B, GENERADO POR EL
PROCESO DE ROCIADO TÉRMICO.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO
DE INGENIERO MECÁNICO

P R E S E N T A N :
GABRIEL FLORES VELÁZQUEZ
SILVERIO ALBERTO RAMÍREZ GARIBAY

DIRECTOR DE TESIS:
MI. EDUARDO GARDUÑO

CD. UNIVERSITARIA

OCTUBRE 2007





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ÍNDICE

Introducción	I	
Objetivo	I	
Capitulo 1	Generalidades del proceso de rociado térmico.	
1.1	Introducción al rociado térmico.	1
1.2	Materiales usados para recubrimientos por rociado térmico.	2
1.3	Tratamientos previos al rociado térmico.	12
1.4	Técnicas de rociado térmico.	19
1.5	Aplicaciones de los recubrimientos obtenidos por rociado térmico.	30
Capitulo 2	Generalidades de las pruebas de desgaste.	
2.1	Tribosistemas.	34
2.2	Propiedades tribológicas de los de los recubrimientos.	36
2.3	Mecanismos de desgaste.	37
2.4	Desgaste adhesivo.	39
2.5	Desgaste por abrasión.	41
2.6	Desgaste por fatiga superficial.	43
2.7	Desgaste por oxidación o desgaste triboquímico.	45
2.8	Resistencia al desgaste.	47
Capitulo 3	Generación del recubrimiento con el rociado térmico automatizado.	
3.1	Maquinado de probetas.	50
3.2	Preparación de la superficie a recubrir.	51
3.3	Proceso del recubrimiento.	52
3.4	Características óptimas del recubrimiento.	56
Capitulo 4	Desarrollo experimental.	
4.1	Método de prueba pin-on-disk.	59
4.2	Equipo utilizado para realizar los ensayos de desgaste.	61
4.3	Proceso de desgaste.	66
4.4	Evaluación de desgaste.	68
Capitulo 5	Presentación de resultados	70
Conclusiones		86
Anexo A		a
Anexo B		y
Referencias bibliográficas.		

OBJETIVO

Destacar cargas, velocidades y distancias recorridas, de los ensayos de desgaste realizados por deslizamiento en seco del recubrimiento Metco 12C, y obtener graficas representativas de su comportamiento al desgaste por medio de la razón de desgaste y de su pérdida de peso.

INTRODUCCIÓN

La ingeniería de superficie, rama multidisciplinaria de la ingeniería, mediante un análisis de los fenómenos de desgaste y de la ciencia de materiales, permite optimizar las superficies expuestas a desgaste a objeto de prolongar significativamente su duración en servicio. El estudio del desgaste es un fenómeno trascendental debido a la interacción existente entre elementos mecánicos, ya que reduce la eficiencia de las máquinas, provocando cambios dimensionales o daños superficiales y por ende incrementando el costo de operación. Ningún elemento de máquina es inmune al desgaste. Por esta razón es muy importante poner atención al acabado superficial, propiedades físicas, mecánicas, estructura de la superficie y las condiciones en que pueda cambiar o alterar las condiciones iniciales de la superficie en contacto.

Los recubrimientos son métodos tecnológicos para incrementar la resistencia al desgaste y la vida útil de los elementos de máquina, entre muchos otros fines. En lo referente al rociado térmico disminuye apreciablemente los costos de operación y no hay un apreciable calentamiento de las piezas. Si bien los recubrimientos obtenidos por rociado térmico tienen un gran abanico de aplicabilidad, aún no existen grandes referencias que estudien las propiedades tribológicas de estos recubrimientos, por lo tanto existe un gran vacío en el estudio de las propiedades mecánicas de dichos recubrimientos.

El presente trabajo, pretende destacar cargas, velocidades y distancias recorridas para los ensayos de desgaste por deslizamiento en seco del recubrimiento metco 12C, y obtener graficas representativas de su comportamiento al desgaste (por medio de la razón de desgaste y de su pérdida de peso). El análisis se efectuó en probetas de un acero comercial (AISI 1018), con un recubrimiento generado por proyección térmica automatizado, dichas probetas se sometieron a desgaste con un método conocido como pin-on-disk, que fue aplicado bajo la norma G99 de la ASTM, en donde se aplicaron diferentes cargas y velocidades para estudiar su comportamiento al desgaste.

Además de hacer ensayos de desgaste del recubrimiento 12C, también se analizo el comportamiento al desgaste del material base (AISI 1018) con las mismas variables de operación, para tener una base de comparación, dado que no se tenían referencias del recubrimiento en estudio.

La simulación de los procesos de desgaste se deben hacer lo mas cercano posible a la realidad, pues una de las aplicaciones de la tribología es precisamente observar el comportamiento de un material en condiciones de trabajo y poder analizarlo antes, y no después de que entre en operación, como muchas veces se realiza.

Capítulo 1

Generalidades del proceso de rociado térmico.

1.1 INTRODUCCIÓN AL ROCIADO TÉRMICO

A pocos años de haberse cumplido un siglo de su descubrimiento (1902, M. U. Schoop), la proyección térmica se sigue conceptualizando cómo en sus orígenes: un líquido (Material fundido debido a una fuente de calor) que es proyectado a altas presiones como un rocío sobre una superficie preparada, construyendo una nueva capa.

Los recubrimientos obtenidos por proyección térmica tienen un gran rango de aplicabilidad por ejemplo: combatir la corrosión, prevenir la oxidación a altas temperaturas, reconstruir y aprovechar componentes desgastados, minimizar el desgaste, proveer de características eléctricas específicas (como la conducción) a un material grueso, pueden utilizarse como barreras térmicas, entre otras muy variadas y extensas aplicaciones.

Aún no existe una extensa bibliografía que estudie las propiedades tribológicas de estos recubrimientos. Y generalizando existe un importante vacío en el estudio de las propiedades mecánicas para los recubrimientos obtenidos por proyección térmica.

Dada la propia naturaleza de este tipo de recubrimientos y sus espesores, hace que sus propiedades mecánicas sean difíciles de determinar. Además la remoción del recubrimiento, sin utilizar métodos químicos que podrían dañar el recubrimiento, es relativamente difícil por lo que ello dificulta adicionalmente dicha evaluación. La determinación de propiedades mecánicas es útil a la hora de comparar las condiciones de proyección y permite seleccionar mejor un recubrimiento para una aplicación concreta

Los procesos de rociado térmico por su aplicabilidad y versatilidad han tenido un notable desarrollo en las últimas décadas que van desde el métodos desarrollados en los años 60 hasta el atomizado del arco según tecnología de los años 90's con el cual, la adherencia de la capa metalizada es varios órdenes superior respecto a los métodos anteriores, además disminuye apreciablemente los costos de operación y no hay un apreciable calentamiento de las piezas entre sus ventajas principales. Si bien este nuevo método de metalización está siendo usado con éxito en el mundo desarrollado aún no tiene una completa comprensión de los procesos metalúrgicos que tienen lugar durante el rociado térmico del arco para los metales de soporte a los que se le aplica el recubrimiento debido básicamente a que estos se forman por la unión partícula - partícula del metal aportado, resultando en una capa superficial cuya estructura es altamente anisotrópico, y una valoración de sus propiedades físicas y mecánicas resulta complejo. Además, una variación de los parámetros tecnológicos del rociado térmico del arco afectan factores del recubrimiento tales como: el tamaño y distribución de la porosidad, contenidos de óxidos, tensiones residuales, agrietamientos a escalas tanto macro como microscópicas, los cuales tienen una incidencia directa en la durabilidad y calidad de los recubrimientos por metalización.

1.2 MATERIALES USADOS PARA RECUBRIMIENTOS POR ROCIADO TÉRMICO.

Los materiales usados para recubrimiento por rociado son principalmente los polvos, barras y alambres. Metales o aleaciones son usados solamente para los procesos de rociado por arco(AS) y rociado por flama (FS- alambre)

Los cerámicos también son aplicados por proyección térmica, el proceso fue patentado en 1980, pero su uso es mucho menos extenso que el de los polvos.

La razón es la corta duración del sinterizado de las barras, la cuál es rociada en unos pocos minutos; para continuar el proceso de deposición hay que introducir una nueva barra en la pistola de proyección.

La inevitable interrupción del proceso nos lleva a cambios microestructurales en la vecindad donde el rociado esta siendo iniciado y reiniciado. está es la razón por la cuál el uso de éste proceso debe evitarse en la deposición de superficies de piezas largas

También existen otros materiales para recubrimiento mediante rociado térmico como son cintas y recubrimientos mediante selladores (epóxicos o resinas de silicona).

La manufactura y el procesamiento de los materiales comúnmente utilizados en el proceso de recubrimiento por rociado térmico serán descritos en la siguiente sección.

Una buena selección del material a proyectar, así como su proceso de manufactura influye directamente en la calidad y el costo del recubrimiento. Esto principalmente en los polvos, puesto que es importante tomar en cuenta su composición química y tamaño de partícula, entre otras características.

Existen materiales para el rociado térmico con especificaciones muy similares, por ello se debe tomar en cuenta varios factores para su selección:

- Es importante diferenciar sustancialmente las características para el rociado térmico de cada material (diferente deposición ,eficiencias , rangos de rociado)
- Tomar en cuenta las grandes diferencias de precio.
- Hacer un balance entre "materiales aceptables vs. recubrimientos inaceptables"

En los materiales manufacturados de diferente forma pero nominalmente con la misma composición y forma (ya sea polvo, barra o alambre), se debe hacer énfasis en mostrar las diferencias del material, las propiedades físicas y su diferente desempeño; siempre que la deposición sea bajo condiciones idénticas.

Si se logra diferenciar entre las semejanzas se puede hacer posible que se cubran los límites tecnológicos del proceso.

1.2.1 Clasificación de acuerdo a la naturaleza química de los materiales usados en el proceso de rociado térmico.

Las diferentes categorías de materiales usados en el proceso de rociado térmico como son; los metales y sus aleaciones, cerámicos, materiales compuestos y los polímeros son usadas para

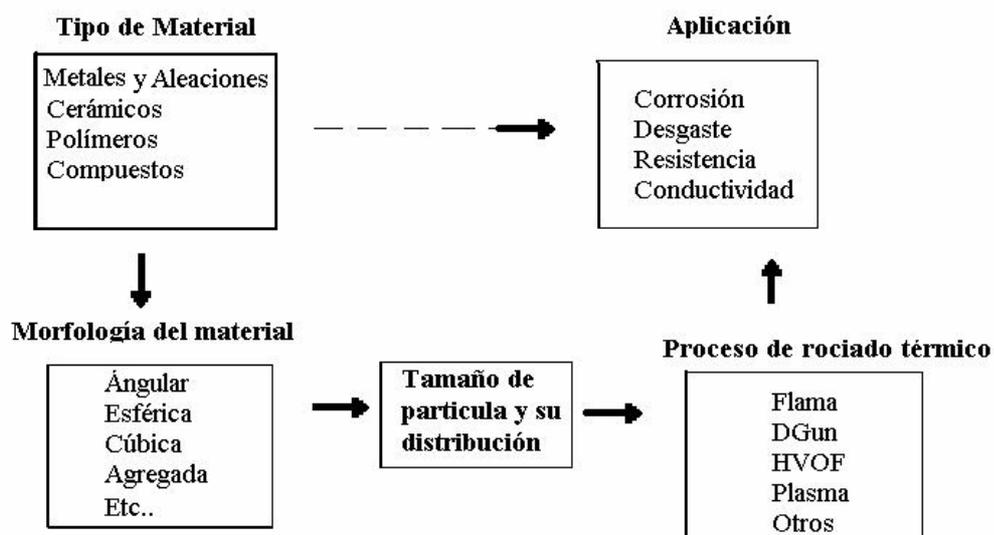
diferentes campos de aplicación. La definición de cerámico debe tomarse en un amplio contexto y deben incluirse cerámicos clásicos como la alúmina, materiales de alta tecnología como la zirconia y materiales refractarios basados en carburos.

- **Metales y aleaciones:** Por ejemplo, aluminio, aluminio-zinc, cobre, molibdeno, aleaciones de níquel-aluminio, y níquel-cromo (NiCrAlY, Ni-Al)
- **Cerámicos:** Por ejemplo, Óxido de aluminio (Alúmina Al_2O_3), óxido de cromo (Cr_2O_3), Hidroxiapatita (HA, $10 Ca \cdot [OH] \cdot 6 [PO_4]$), Óxido de titanio (TiO_2), zirconia, Carburo de tungsteno-Cobalto (WD-Co)
- **Polímeros:** Por ejemplo, Nylon, Poliéster, Polietileno, etc.
- **Intermetálicos:** Por ejemplo, NiAl, Ni_3Al , y $NiAl_3$
- **Compuestos:** Por ejemplo, aluminio/silicón/Poliéster, molibdeno-níquel-cromo-boro-silicón, níquel-grafito, y bentonita-NiCrAl

La combinación entre los metales y los cerámicos son llamados **cermets** y pueden ser clasificados como materiales compuestos.

Es importante señalar que las aplicaciones de los recubrimientos son consecuencia directa de las características esenciales del material proyectado y que este a su vez puede ser alimentado en varios estados físicos. Por ejemplo el aluminio, zinc, y aleaciones de aluminio-zinc son usados para la protección de la corrosión. El carburo de tungsteno y aleaciones de cobalto son usados para aplicaciones de resistencia particularmente a altas temperaturas. Y desde los años 90's el uso de los polímeros en recubrimientos y compuestos se ha ido incrementando notablemente debido a su sensibilidad térmica.

Relación entre el tipo de material y su posible aplicación



Como ya se mencionó; las propiedades del recubrimiento dependen directamente del material usado en el proceso. Pero el recubrimiento no necesariamente mantiene las propiedades esenciales de este material proyectado porque el proceso de rociado térmico muy frecuentemente modifica las propiedades del material original.

La aplicación de un recubrimiento debe ser delimitado por sus propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas. La adhesión del recubrimiento al sustrato es también importante, porque es crucial que el recubrimiento permanezca unido durante su tiempo de servicio.

El tamaño, distribución y la morfología de la partícula son características semejantes que deben diferenciarse plenamente en un material a proyectar. Puesto que estas características no solamente influyen en los parámetros de rociado térmico sino también en el desempeño del recubrimiento.

Las consideraciones para el material a proyectar deben incluir sus métodos de manufactura. El proceso de producción de mayor interés es el de materiales en forma de polvo, ya que estos tienen una extensa diversidad y aplicación.

Los materiales proyectados en forma de barra y alambre si bien son muy aplicados en el proceso de rociado térmico, no serán mencionados en este trabajo debido a que su morfología no es altamente variable y sus métodos de producción no son particulares y exclusivos del proceso de rociado térmico.

1.2.2 Métodos para la producción de polvos

Los métodos industriales de fabricación de polvos dependen principalmente del tipo de material que se va a utilizar.

- Los metales y aleaciones usualmente se preparan mediante alguno de los métodos de atomización y en otras ocasiones por sinterizado.
- Los óxidos y los cerámicos son manufacturados por fusión o sinterizado seguido por presión, pero también por métodos de calcinación.
- La composición de polvos se puede hacer por medio de una técnica conocida como la técnica de revestido.

1.2.2.1 Atomización

La atomización implica la conversión de un metal fundido en una nube de pequeñas gotas que se solidifican formando polvos. Es el método más popular para producir polvos metálicos en la actualidad, y aplicable a casi todos los metales, aleaciones o metales puros.

1.2.2.1.1 Atomización con gas.

Hay muchas maneras de crear el rocío de metal fundido. Dos métodos se basan en la atomización con gas en los cuales se utiliza una corriente de gas a alta velocidad (aire o gas inerte) para atomizar el metal líquido.

El gas fluye a través de una boquilla de expansión, succionando el metal líquido de la fusión que se encuentra debajo y rociándolo en un recipiente. Las gotitas se solidifican en forma de polvo.

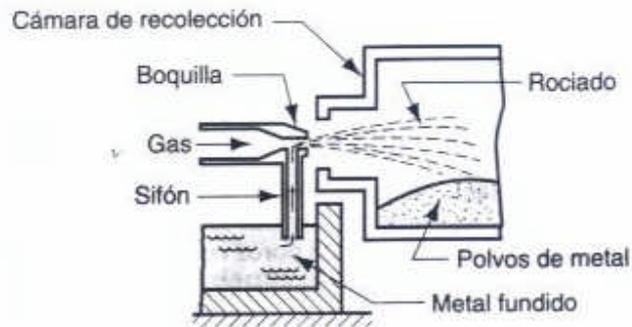


Fig. 1.1 Atomización con gas¹.

En un método parecido, el metal fundido fluye a través de una boquilla y se atomiza inmediatamente por chorros de aire. Los polvos metálicos resultantes se recolectan en una cámara situada debajo.

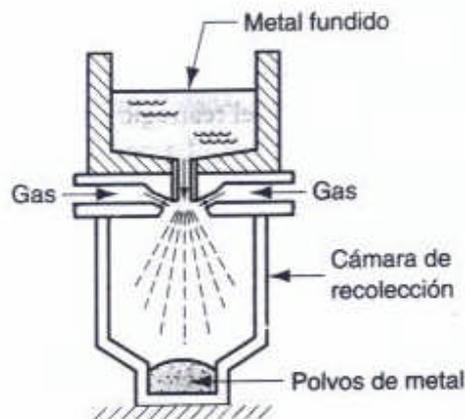


Fig. 1.2 Atomización por aire².

1.2.2.1.2 Atomización con agua

Este método es similar al anterior, excepto que se utiliza una corriente de agua a alta velocidad en lugar de aire. Éste se conoce y es el más común de los métodos de atomizado, particularmente apropiado para metales que funden después de 1600 ° C. El enfriamiento es más rápido y la forma del polvo resultante es más irregular que esférica. La desventaja de usar agua es la oxidación en la superficie de las partículas. Una reciente innovación usa aceite sintético en lugar de agua para reducir la oxidación.

En ambos procesos de atomizado con aire o agua, el tamaño de las partículas se controla en gran parte por la velocidad de la corriente de fluido; el tamaño de partícula está en relación inversa con la velocidad.

^{1,2} Groover, Mikell P. Fundamentos de manufactura moderna. Editorial Prentice Hall 1a Edición, México 1997.

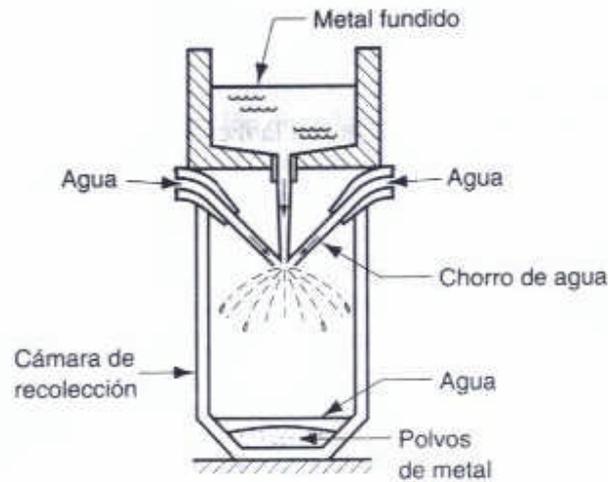


Fig. 1.3 Atomización con agua.³

1.2.2.1.3 Atomizado centrífugo.

Varios métodos se basan en el método de disco rotatorio, donde se vacía una corriente de metal líquido en un disco que gira rápidamente y que rocía el metal en todas direcciones pulverizándolo.

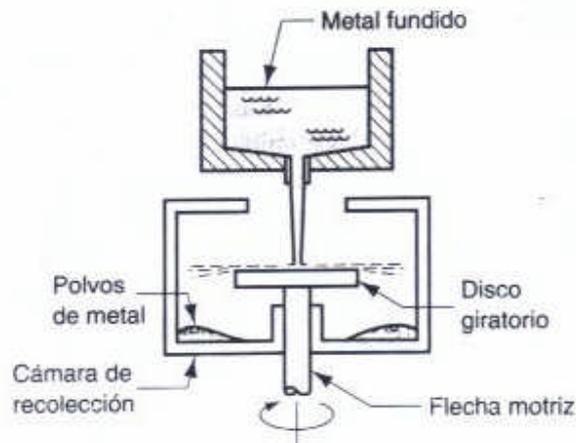


Fig. I.4 Atomizado centrífugo.⁴

1.2.2.2 Procesos de reducción química

1.2.2.2.1 Métodos de precipitación y electrólisis.

La reducción química comprende una serie de reacciones químicas que reducen los compuestos metálicos a polvos metálicos elementales. Un proceso común consiste en la liberación de los metales de sus óxidos mediante el uso de agentes reductores como hidrógeno o monóxido de carbono. El agente reductor se produce para combinarlo con el oxígeno del compuesto y

^{3,4} Groover, Mikell P. Fundamentos de manufactura moderna. Editorial Prentice Hall 1a Edición, México 1997.

liberar el elemento metálico. Por este método se producen polvos de hierro, de tungsteno y de cobre. Otro proceso químico para polvos de hierro implica la descomposición del pentacarbonilo de hierro para producir partículas esféricas de alta pureza.

Otros procesos químicos incluyen la precipitación de elementos metálicos de sus sales disueltas en agua. Los polvos de cobre, níquel y cobalto se pueden producir por este método.

En la electrólisis se prepara una celda electrolítica en la cual la fuente del metal a pulverizar es el ánodo. El ánodo se disuelve lentamente por la acción del voltaje aplicado, se mueve a través del electrolito y se deposita en el cátodo, El depósito se retira, se lava y se seca, obteniéndose un polvo metálico de alta pureza. Esta técnica se usa para obtener polvos de berilio, cobre, hierro, plata, tantalio y titanio.

1.2.2.2 Rociado en seco

Probablemente el método de fabricación de polvos más versátil es el rociado en seco que contiene pequeñas partículas de cierto material, que se mantienen unidas en un aglomerado esférico con unión o enlace orgánico. Los polvos preparados de esta forma pueden mejorar su densificación mediante el sinterizado. Algunas veces, para modificar la composición del polvo, las partículas preparadas por alguno de los métodos anteriormente mencionados son mezcladas.

1) combinación y mezclado de los polvos, el mezclado se refiere a la mezcla de polvos de la misma composición química, pero posiblemente con diferentes tamaños de partícula. La *combinación* se refiere a la mezcla de polvos de diferente composición química

2) compactación, en la cual se prensan los polvos para obtener la forma deseada.

3) sinterizado, que implica calentamiento a una temperatura por debajo del punto de fusión para provocar la unión de las partículas en estado sólido y el fortalecimiento de la parte.

Estos tres pasos que algunas veces se aluden como operaciones primarias de la metalurgia de polvos. En ocasiones también se ejecutan operaciones secundarias destinadas a mejorar la precisión dimensional, incrementar la densidad y para otros propósitos.

- Operaciones secundarias
- Densificación y dimensionamiento
- Impregnación e infiltración
- Tratamiento térmico y acabado

1.2.2.3 Polvos comúnmente usados en la actualidad:

- Los metales (molibdeno) y aleaciones (aleaciones auto fundentes. Ni, 16 wt. % Cr, 3.5wt. % Si, 4.5wt. % Fe, 1 wt. % C).
- Óxidos cerámicos (Al_2O_3).
- Mezclas cerámicas - metálicas (grafito revestido de Ni o WC aglomerado con 12 wt. % Co).
Carburos (Cr_23C_6).
- Otros polvos por ejemplo, aleaciones aluminio - silicio aglomerado con 47 wt. % poliamida.

Tablas donde se muestran qué polvos son fabricados por dichos procesos.

Polvo	Composición Química (wt. %)	Medio de Enfriamiento	Tamaño de grano (μm)	Nombre comercial
Metales	Al Ni	Gas Gas	-48+5	Amdry 3033 Valco 2120
Aleaciones	BAl. Ni 20 Cr BAl.Ni 15 Cr, 4.5 Si, 4Fe 3B	Agua Gas inerte		Amperit 250 CSM N60

Tabla 1.1. Polvos típicos producidos a partir del método de atomización

Polvos	Composición Química (wt.%)	Método de producción	Tamaño de grano (μm)	Nombre comercial
<i>Óxidos</i> Óxido de cromo	99.5	Fusión y triturado		Amperit 704
	BAl. Cr_2O_3 , 5Si O ₂ , 3TiO ₂	Sinterizado y triturado	-120+45	Metco 136 CP
Óxido de aluminio con Óxido de titanio	BAl. Al_2O_3 , 3 TiO ₂	Fusión y triturado	-45+22	Amdry 6204
<i>Cementados</i> Carburo de tungsteno con cobalto	BAl. WC, 12Co BAl. WC, 10Co	Fusión y triturado sinterizado y triturado	-74+45	Valco 5101 Al-1071
<i>Carburos</i> Carburos de cromo	Cr_2C_3	Fusión y triturado	-106+30	Amdry 304

Tabla 1.2 Producción de polvos típicos usando la fusión (sinterizado) y triturado

Polvo	Densificado	Composición Química (wt%)	Tamaño de grano	Nombre comercial
<i>Metálico</i> Molibdeno	Sinterizado	Mo		Amperit 102
<i>Cerámicos</i> Cromo- Silice		BAI. Cr ₂ O ₃ , 5SiO ₂	-63+15	
Zircónia-ytria	Plasma RF	BAI. Zr O ₂ , 8 Y ₂ O ₃		Amdry 6610
<i>Cementados</i> Carburo de tungsteno con cobalto		BAI. WC 12Co		Valco 5104

Tabla 1.3 Polvos comúnmente producidos usando el método de Aglomerado y densificación

Polvo	Composición química (wt. %)	Tipo de recubrimiento	Tamaño de grano(μm)	Nombre comercial
Níquel aluminio	BAI. Ni, 4.5 Al	Poroso	-88+45	Metco 450
Al 12Si con poliamida	BAI. AlSi, 47 poliamida,	Poroso		Amdry
Ni- grafito	6 Enlace BAI. Ni, 40 Grafito	Denso		Amperit 2000

Tabla1.4 Polvos típicos revestidos

1.2.2.4 Métodos de caracterización de polvos

Los parámetros más importantes de los métodos de caracterización son: tamaño de grano, composición química de fases, forma, porosidad interna (correlacionada con densidad aparente) y grado de fluidez.

1.2.2.4.1 Características geométricas

La geometría de los polvos individuales se puede definir mediante los siguientes atributos tamaño de grano y su distribución, 2) forma y estructura interna de las partículas y 3) superficial.

1.2.2.4.1.1 Tamaño de grano

El tamaño de las partículas se refiere a las dimensiones de los polvos individuales. Si la forma de la partícula es esférica, una sola dimensión es adecuada. Para otras formas, se necesitan dos o más dimensiones. Se dispone de varios métodos para obtener datos sobre el tamaño de las partículas. El método más común usa cribas de diferentes tamaños de malla. Se usa el término número de malla para referirse al número de aberturas por pulgada lineal de la criba. Un número de malla 200 significa que hay 200 aberturas por pulgada lineal. Como la malla es cuadrada, la cuenta es la misma en ambas direcciones, y el número total de aberturas por pulg² es $200^2 = 40,000$. En consecuencia, un número alto de malla indica menor tamaño de partícula.

El tamaño de grano a seleccionar para el análisis se realiza por medio de los siguientes métodos:

- Análisis mecánico por tamizado
- Rayos X
- Dispositivo para dispersión de rayos láser

Número de malla (ASTM)	Tamaño de grano (tamaño de tamiz) (μm)	Número de designación DIN	Tamaño de grano (μm)
100	150	0	-22.4+5.6
120	125	1	-45+22.4
140	106	2	-90+45
200	74	3	-45+5.6
230	63	4	-63+16
325	44	5	-106+32
400	37	6	-125+45

TABLA 1.5. Equivalencias entre tamaños de mallas, números de normas ASTM: B214-86 y DIN 32529

1.2.2.4.1.2 Distribución de elementos

Las partículas aglomeradas o polvos recubiertos contienen diferentes fases (elementos) y pueden ser de importancia si están distribuidas de forma homogénea o no en la partícula (polvos aglomerados) o si el recubrimiento cubre la superficie correctamente y en su totalidad. Para obtener esta información es necesario la obtención de un estudio metalográfico de la sección transversal de las partículas de polvo. La distribución en 2D de los elementos se puede obtener mediante la dispersión de rayos X (espectroscopia) (WDS). Estas técnicas de análisis son opcionales para muchos microscopios electrónicos de barrido (SEM).

1.2.2.4.1.3 Morfología de los granos

La observación de la forma de los granos permite reconocer la técnica de fabricación. Para obtener información completa sobre la composición del polvo, es necesario observar los granos externos así como los internos. Lo anterior se puede hacer con especímenes preparados por encapsulado del polvo en resina y sucesivamente rectificado y pulido. Los especímenes son observados con un microscopio óptico.



Fig. 1.5 Varias formas (ideales) de partículas en metalurgia de polvos.

Morfología externa		Morfología interna	
Granos	Técnica	Granos	Técnica
Esferas con superficie densa	Atomización por gas	Esferas sin poros	Gas Atomizador
Esferas con superficie rugosa	Aglomerado y densificado, Sol-gel	Esferas porosas	Sol-gel
Periferia irregular	Rociado-secado	Esferas huecas	Aglomerado
	Atomización Agua		Aglomerado ó aglomerado y densificación
Bloque angular	Fusión y triturado	Bloque angular denso	Fusión y triturado
	Sinterizado y triturado	Bloque angular poroso	Sinterizado y triturado
	Triturado	Recubrimiento con revestimiento denso	Calcinación
	Calcinación	Recubrimiento con revestimiento denso	Revestimiento denso
		Recubrimiento con revestimiento poroso	Revestimiento poroso

Tabla1.6 Correlación entre morfologías internas y externas de grano y método de producción de polvos

1.2.2.4.2 Otras características

1.2.2.4.2.1 Análisis químico de fases

Los usuarios de polvos están interesados en especial en la siguiente información:

La composición química promedio de varias partículas, la distribución de elementos dentro de las partículas de polvo y fases cristalinas presentes en los polvos.

1.2.2.4.2.2 Composición química

La composición química de los polvos se puede determinar con el uso de variadas técnicas analíticas. La más común es la llamada emisión de plasma por espectroscopia (ICPES) o la técnica de espectroscopia por fluorescencia de R-X.

1.2.2.4.2.3 Análisis de fase

El análisis de las fases presentes se puede conocer mediante difracción de rayos X. Los equipos modernos están computarizados y equipados con un catálogo de fases cristalinas, lo que facilita la identificación.

1.2.2.4.2.4 Densidad aparente y facilidad de flujo

Las mediciones de densidad aparente y fluidez están normalizadas por las normas ASTM B 329-76 y B 213-83, respectivamente. La medida de densidad consiste en un muestreo con pesos y volúmenes calibrados en un tazón (0.25 cm³) y la medición de fluidez consiste en medir el tiempo necesario en que fluye una muestra de 50 gr. de una porción de polvo a través de una boquilla calibrada en un tubo de 2.54 mm. de diámetro.

1.3 TRATAMIENTOS PREVIOS AL ROCIADO TÉRMICO.

Para que un sistema de recubrimiento protector mediante el rociado térmico tenga éxito, es esencial una preparación adecuada de la superficie. Nunca se insistirá suficientemente sobre la importancia que tiene la eliminación del aceite, la grasa, los recubrimientos antiguos y los contaminantes superficiales (como restos de laminación y óxido en el acero)

El rendimiento de cualquier recubrimiento depende directamente de la preparación correcta y cuidadosa de la superficie antes de su aplicación. Si la preparación de la superficie es incorrecta o incompleta, incluso el sistema de protección más cara y tecnológicamente más avanzada, fracasará.

A continuación, se describen algunos de los distintos métodos de preparación de las superficies más comunes:

- Desengrasado (usando solventes orgánicos comunes, acetona o algunas veces vapor como desengrasante (especialmente para piezas grandes).

- Formado de la pieza (si es necesario), para ser posteriormente cubierta y luego rectificada hasta obtener la medida deseada.
- Mascarilla, previa a la preparación de superficies rugosas.
- Rugosidad, preparación de superficies que serán recubiertas.
- Mascarilla, previa al rociado térmico.

La mascarilla previa a la preparación de superficies rugosas se hace con el uso de diferentes tipos de mascarillas. Sólo el silicón o teflón se puede usar como mascarilla para superficies rugosas o para ciertos procesos de recubrimientos por rociado térmico. Es importante cuidar que la temperatura de la superficie a tratar se mantenga constante si el rociado térmico es lento.

La mascarilla previa a la rugosidad es comúnmente hecha con telas, caucho o plástico.

La mascarilla previa al rociado térmico se hace con metales o cintas de fibra de vidrio, que se cortan a las dimensiones deseadas. También existen líquidos compuestos disponibles en el mercado, que previenen la adhesión de partículas calientes durante el rociado térmico y se pueden disolver con agua después del proceso. Los barrenos y las ranuras en la pieza rociada térmicamente se pueden proteger con teflón o insertos metálicos.

Las técnicas de preparación de superficie más comunes incluyen lo siguiente:

- **La macro rugosidad**, que consiste en cortar hilos en V o cortar ranuras en espiral. Esta técnica podría ser aplicada si el granallado no es recomendable para obtener una buena adherencia del recubrimiento en superficies grandes. En este caso la macro rugosidad es seguida de continuo granallado de acabado áspero.

- **Preparación de superficie rugosa por agentes químicos**, que no es muy frecuente en laboratorios externos debido a la incompatibilidad de fabricación en otros talleres. Usa rociadores para recubrir las piezas. Se ha recomendado un agente compuesto de una parte por volumen del 20% de ácido sulfúrico y tres partes por volumen del 10% de ácido nítrico para cada superficie de cobre a preparar antes del rociado. Los tiempos de preparación de la superficie rugosa por acción química son de 10 horas. Los aceros inoxidable pueden prepararse usando un agente de dos partes por volumen de ácido nítrico al 40% y tres partes por volumen de ácido clorhídrico al 20%. El tiempo del proceso debe de ser de 10 min.

1.3.1 Granallado.

El granallado es un método que sirve para la preparación de superficies removiendo todo tipo de revestimiento y contaminantes como puede ser pinturas viejas, laminillas, arenas de fundiciones etc. Simultáneamente a la remoción de contaminantes da perfil de rugosidad para mejorar tanto sea el aspecto visual de la pieza tratada como así también dar un anclaje (rugosidad) a la superficie antes de aplicar el recubrimiento por medio de la técnica de rociado térmico.

La rugosidad que logra el granallado dependerá del tipo de abrasivo utilizado como además de la dureza de la superficie a tratar permitiendo lograr rugosidades desde 5 micrones hasta mas de 150 / 200 micrones.

El sistema, al dejar la superficie limpia y seca, elimina totalmente todo tiempo de secado, que se requiere para que un recubrimiento pueda ser aplicado.

Los tipos de abrasivos más usados son:

- Granos de acero o hierro fundido
- Esferas metálicas
- Arenas cerámicas como sílice, alumina o carburo de silicio



Fig. 1.6 Proceso de granallado

Una línea más completa de abrasivos para granallado o arenado cubriendo las necesidades específicas es:

- Granalla de Acero al Carbono esférica y angular
- Granalla de Alambre Cortado
- Granalla de Alambre Cortado Redondeado
- Granalla de Acero inoxidable
- Granalla de aluminio
- Micro esfera de vidrio
- Oxido de aluminio
- Silicato de Aluminio
- Cuarzo
- Cáscara de nuez
- Abrasivos minerales - Garnet
- Escoria de cobre

El tamaño del abrasivo depende tanto del espesor de la pieza a granallar como también del tipo de rugosidad para el área a granallar. Cabe mencionar que la arena sílica fina generalmente se usa para acabados finos y la alúmina para acabados burdos. Otro punto importante es la reducción del tamaño del abrasivo debido al proceso de granallado. El abrasivo debe de ser cambiado con frecuencia dependiendo de la presión, fuerza de impacto y de la

dureza de las piezas a granallar. En la tabla 1.7 se muestran algunas propiedades de diferentes tipos de abrasivos para el granallado.

La obtención del óxido de aluminio abrasivo consiste en la fusión de la bauxita, triturada y calcinada y mezclada con un pequeño porcentaje de coque, hierro, además de Ti y MgO₂. La fusión ocurre a una temperatura de 1900° C a 2000° C en un horno eléctrico a arco por un periodo de 36 horas, mientras que el enfriamiento puede ser de hasta una semana. El bloque formado es posteriormente fracturado y triturado.

El Óxidos de Aluminio convencional (Al₂O₃) este grano es extremadamente robusto y su forma de cuña permite una penetración rápida en materiales duros sin fracturarse o desgastarse excesivamente. Es usado en materiales de alta resistencia a la tracción como acero y sus aleaciones, hierro fundido nodular y maleable y también para materiales no ferrosos.

Abrasivo	Forma	Dureza (MOHS) (Rockwell Rc)	Densidad (Lbs/ft³)	Típica presión de trabajo (Psi)	Número de usos Recomendables	Tamaño (Malla)
Óxido de aluminio	angular	8-9 (40-66)	125	20-90	3-5	12-325
Arena de acero	angular	8-9 (40-66)	230	20-90	50-100	10-325
Garnet	angular	8	130	30-80	3-5	16-325

Tabla 1.7. Propiedades de algunos abrasivos

La preparación de las piezas rugosas debe hacerse con mucho cuidado. El granallado de acabado áspero puede crear esfuerzos en la superficie, en consecuencia la pieza sufre deformación después del tratamiento. Debido a lo anterior se recomienda en muchas ocasiones el uso de abrasivo fino y baja presión. El abrasivo es alimentado a la boquilla por gravedad o por succión (ver figura 1.3.1-A). El aire que proviene del compresor (3) se introduce en la cámara (2), donde se descomprime. Al pasar el aire por la cámara, genera una presión de vacío que succiona el abrasivo (5) del contenedor (4) y lo transporta a través de la manguera (6) hasta la salida de la boquilla (1). Al salir por la boquilla ésta se impacta al substrato o pieza.

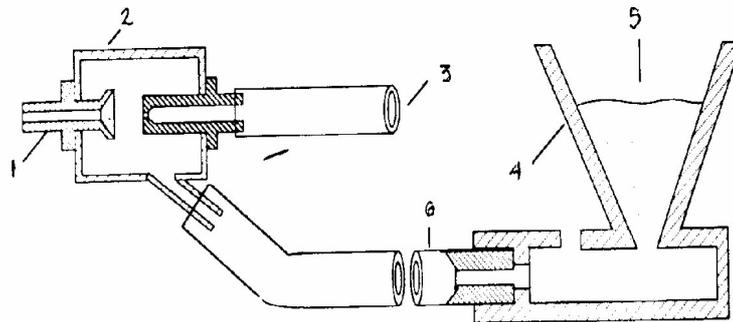


Fig. 1.7 El sistema de succión de granalla; 1. Boquilla; 2. Cámara de descompresión; 3. Entrada de aire comprimido; 4. Contenedor de abrasivo; 5. Abrasivo; 6. Manguera

1.3.1.1 Principales sistemas de granallado

Existe una alta gama de equipos para el granallado de todo tipo de piezas adaptándose a las más variadas necesidades de trabajo, tanto sea de grandes volúmenes como son granallado de barcos, granallado de tanques de petróleo, granallado de vagones de ferrocarril, o de pequeños tamaños como son granalladora de tornillos o granalladora de marcos de lentes. Existe una infinidad de granalladoras desarrolladas en los últimos años para la industria metalúrgica., pero los más utilizados son los portátiles, las cabinas y los tipos cuartos.

Las granalladoras por turbinas centrífugas o por aire comprimido además de ser procesos económicos, rápidos y de simple operación, tienen la enorme ventaja de ser un circuito cerrado, por lo tanto evita la contaminación ambiental sin ningún riesgo para los operarios ni el medio ambiente.

1.3.1.1.1 Granalladoras de cinta rotativa

Las granalladoras de cinta rotativa son las más universales dentro de la familia de equipos de granallado ya que por su concepción permiten granallar piezas de distinto tamaño a granel.

En general los equipos de granallado de cinta rotativa van desde 20 y 60 litros de capacidad hasta los 130 a los 900 litros de capacidad de carga.

Los equipos de granallado de cinta rotativa son muy simples de operar. El trabajo comienza con la carga de las piezas sobre la cinta rotativa, pudiéndose realizar manualmente o por medio de un cargador de piezas



Fig. 1.8 Equipo de granallado de cinta rotativa



Fig. 1.9 Granalladoras de Cinta Rotativa para cargar a granel

1.3.1.1.2 Granalladoras de tambor rotativo

Las granalladoras de tambor rotativo son utilizadas para el tratamiento de fundiciones donde se requiera en forma simultánea al granallado realizar un tamboreo que vaya desprendiendo rebabas que pudieran tener las piezas fundidas.



Fig. 1.10 Granalladoras de tambor rotativo



Fig. 1.11 Granalladora con sistema de succión que se utilizará en este trabajo.

Es recomendable que el granallado se haga en un área abierta ya que la acumulación de polvo en un espacio cerrado es dañino para la salud. Sin embargo, para piezas grandes (como coronas o rollos de anilox), se usan boquillas dobles. Estas boquillas tienen dos salidas donde la primera boquilla expulsa el abrasivo y la segunda sirve como recuperador (ver figura 1.12).

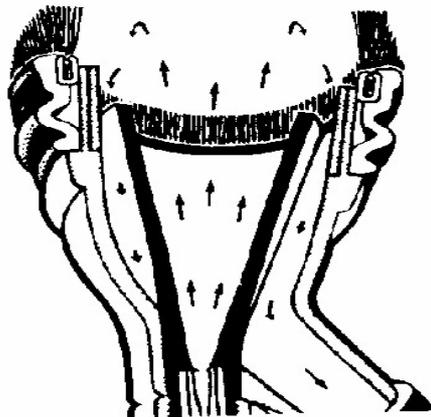


Fig. 1.12 Esquema de una boquilla con recuperación de abrasivo en el granallado abierto.

Actualmente, los sistemas de granallado están automatizados para producción en serie. Los parámetros que intervienen en el granallado son entre otros: tiempo, presión y ángulo de granallado depositado en la superficie rugosa del substrato. Algunos resultados obtenidos recientemente (Granallado de Inconel 718 con sistema de vacío y abrasivo de alúmina). El parámetro de la rugosidad de la superficie (R_a) máxima se obtuvo después de un corto tiempo de granallado. El granallado prolongado no genera necesariamente superficies más rugosas. De forma similar, el granallado sólo permite ángulos menores a 90° para obtener una superficie rugosa en un corto tiempo. Finalmente, el R_a crece linealmente con el incremento de presión de granallado.

Los resultados de no adherencia son algunas veces contradictorios. Se han reportado adherencias para el aluminio rociado térmicamente en acero dulce con un máximo valor de 25 MPa si se usa abrasivo de alúmina aplicado con un ángulo menor de 25°. Pero una comparación directa de estos resultados no es posible debido a que los autores utilizaron diferentes parámetros en la investigación del ángulo de granallado (Wigren - Rugosidad, Apps - adherencia), debido a que el abrasivo de alúmina puede tener diferentes morfologías y las condiciones de aplicación no siempre son las mismas. La distancia entre la boquilla y la pieza de trabajo no influye en la rugosidad de la superficie hasta un valor dado. La distancia de inicio (250 mm - Wigren) permite que la rugosidad disminuya. Finalmente, es importante mantener la rugosidad y proceso de granallado dentro de un intervalo de tiempo corto (no más de unas cuantas horas). Si el tiempo es muy largo, se presentará oxidación que puede afectar la adherencia y calidad del recubrimiento.

1.4 TÉCNICAS DE ROCIADO TÉRMICO.

1.4.1 Proceso de rociado Térmico

Los recubrimientos deben ser considerados como una solución de la ingeniería para proteger a las superficies contra el desgaste, corrosión, degradación térmica. Un recubrimiento aceptable es generalmente caracterizado por una buena adhesión, compatibilidad con el sustrato y un bajo nivel de porosidad. La compatibilidad con el sustrato se refiere a tomar en cuenta las semejanzas físicas obligadas del material a proyectar con el sustrato; como la temperatura y geometría.

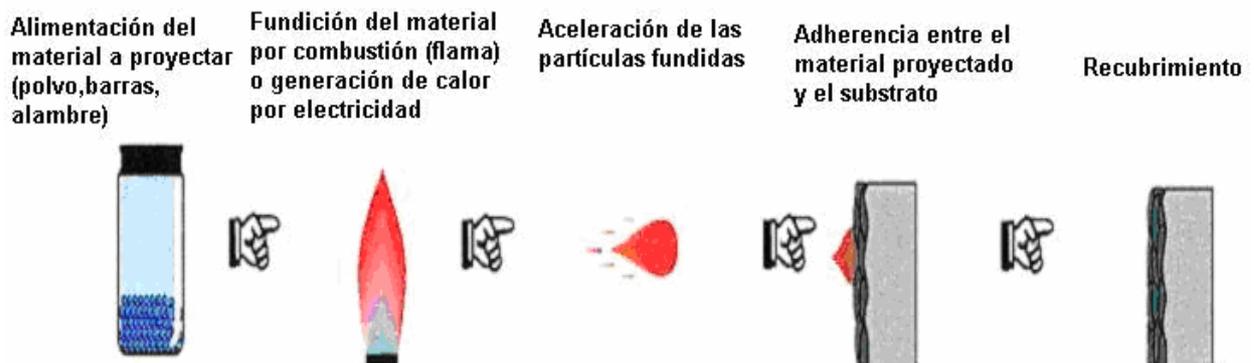


Fig 1.13 Generalidades del proceso de rociado térmico.

Los aspectos claves del proceso de rociado térmico son ejemplificados en la siguiente ilustración; donde se muestran como las partículas impactan una superficie preparada, construyendo una estructura laminar característica del rociado térmico

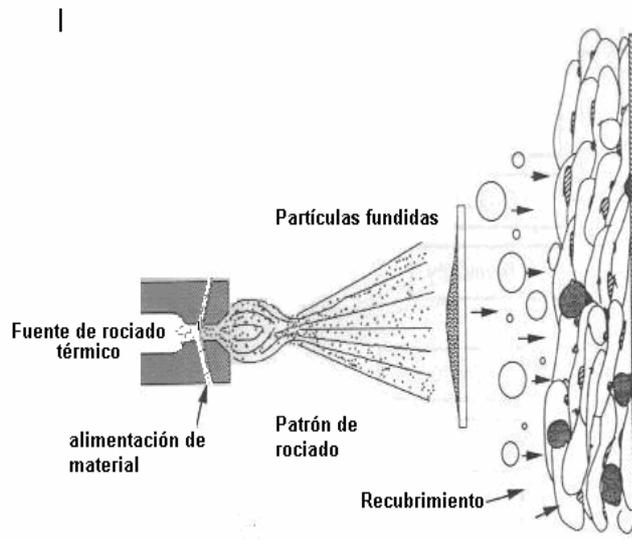


Fig. 1.14 Proceso típico de rociado térmico.⁴

Las partículas o gotas aceleradas generalmente tienen una forma esférica y una vez que son impactadas con el sustrato se desparraman ocupando y llenando los espacios intersticiales del sustrato. El término usado para definir el impacto de una sola partícula proyectada contra el sustrato es **splat**. La estructura del splat forma un tamaño de grano menor a 5 μ m (0.0002 Pulg.). Además en la mayoría de los procesos de rociado térmico se forma una composición homogénea, que es representativa del material proyectado.

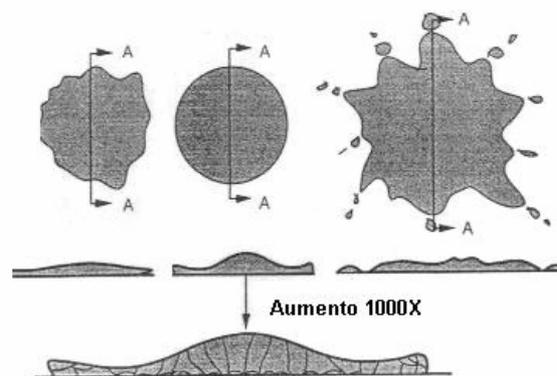


Fig. 1.15 Estructuras típicas del Splat, producidos por el proceso de rociado térmico.⁵

^{4,5} J.R Davis & Associates. Handbook of thermal spray technology. ASM Thermal Spray Society. USA, 2004

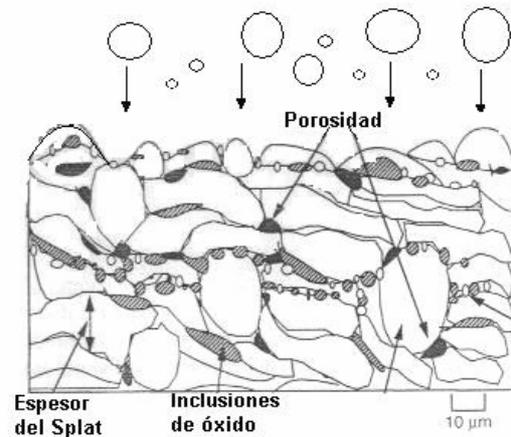


Fig. 1.16 La figura muestra una microestructura de un recubrimiento por el proceso de rociado térmico, mostrando sus elementos comunes.⁶

1.4.2 Clasificación de las técnicas de rociado térmico.

Las técnicas de rociado térmico se clasifican dependiendo del tipo de combustible que utilizan. Existen dos grandes grupos; el de combustión (flama) y el de generación de calor por electricidad, además existe un grupo uno muy pequeño que maneja la energía cinética llamado rociado en frío.

La siguiente descripción de las técnicas de rociado térmico además del tipo de combustible utilizado también se basa en su popularidad en la industria. Es importante señalar que cada uno de estos procesos engloba a varios subprocesos con características propias de temperatura, entalpías y velocidades. Estos atributos y características entorno al desarrollo de su recubrimiento hacen único a cada proceso, en términos simples esto incluye durezas, porosidades, inclusiones (usualmente óxidos), y cohesión.

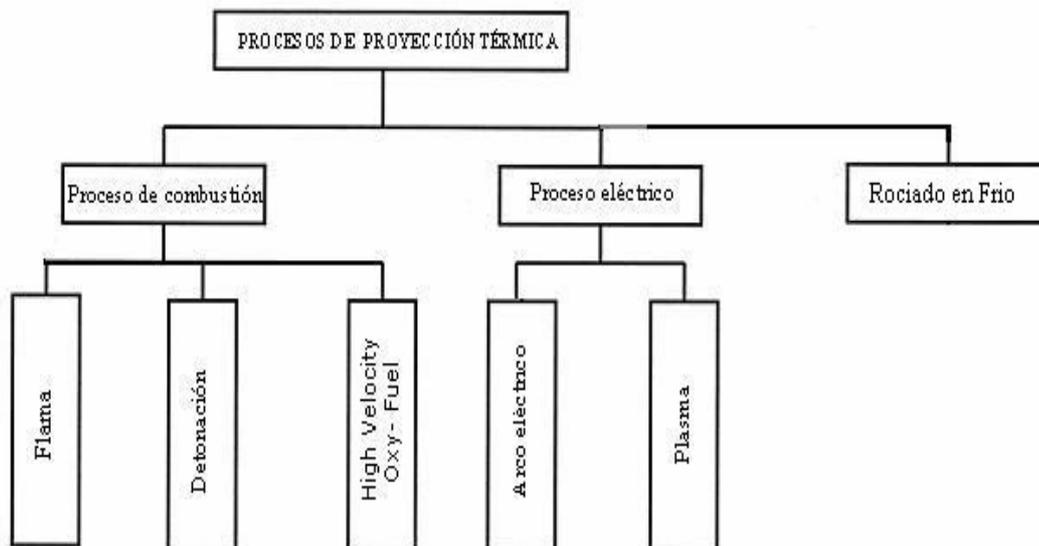


Fig. 1.17 Clasificación de las técnicas de rociado térmico dependiendo del tipo de combustible que utilizan.

⁶ J.R Davis & Associates. Handbook of thermal spray technology. ASM Thermal Spray Society. USA, 2004

1.4.2.1 Proceso de rociado térmico por flama

El proceso de proyección por flama fue utilizado por primera vez en 1902 por el ingeniero suizo M. U. Schoop. Este proceso es el más antiguo de todos.

Procesos de rociado térmico por flama:

- Por combustión de polvos
- Por combustión de alambre
- Por combustión de barras cerámicas

I.4.2.1.1 Proceso de Proyección térmica por flama por combustión de polvos

En este tipo de procesos se utilizan polvos metálicos como material de relleno, el cual se funde por medio de un proceso de combustión en los que se involucran diferentes gases los cuales son: el *oxígeno* como base el cual es utilizado como carburante y se puede utilizar el *acetileno*, *nitrógeno* o *propano* como combustible, esto dependiendo del material a fundir.

El principio fundamental de este proceso es el de llevar a cabo la fundición del material en la punta de la pistola, en la cual el material fundido sale disparado con la ayuda de la inyección de aire comprimido, proyectando con ello el material sobre la superficie de trabajo, la cual preparada previamente y por medio de la rugosidad del material base se logra que se adhiera a ésta entretejiendo de tal forma que se crea una estructura coherente.

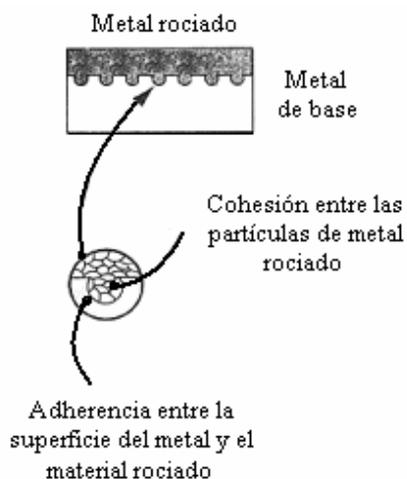


Fig. 1.18 Liga de la superficie

Con este proceso se pueden tratar los materiales a reparar con un punto de fusión por debajo de los 2,750° C (5000° F). Dentro de las piezas de trabajo se pueden reparar madera, plástico, así como otros materiales blandos y metales como el aluminio, ya que gracias a que las partículas de metal rociadas son transportadas por un flujo de aire, esto ayuda como un entorno refrigerante dando como resultado la no alteración de las características físico-térmicas de la pieza a renovar. En la figura 1.19 se muestra un diagrama básico de un equipo de proyección por flama y en la figura 1.20 se muestra la estructura principal de una pistola de proyección.

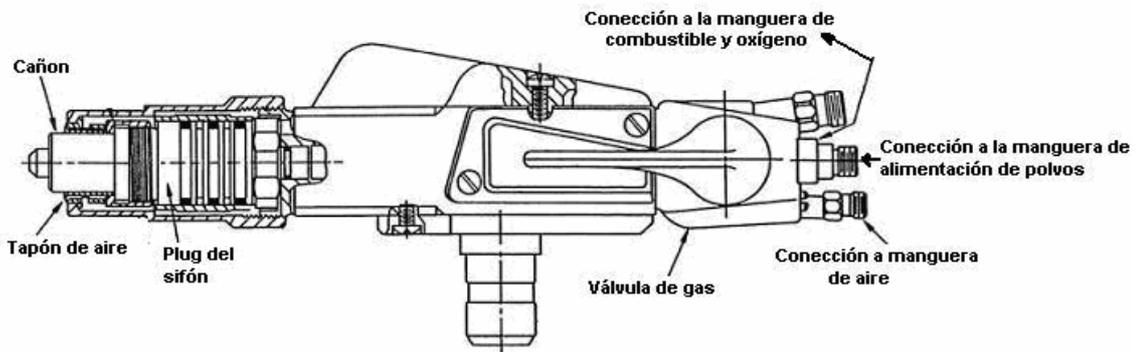


Fig. 1.19 Diagrama de una pistola de rociado térmico por flama por combustión de polvos

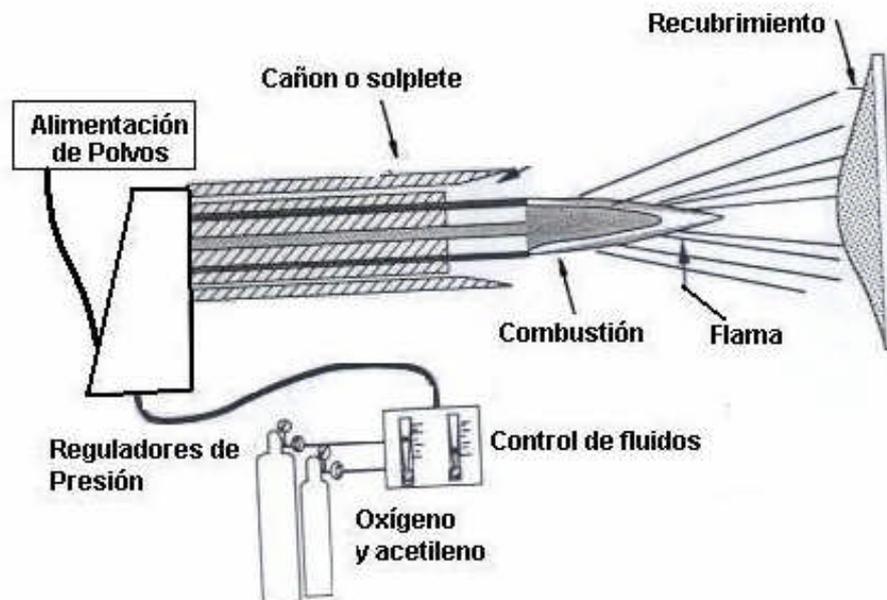


Fig. 1.20 Esquema del rociado térmico por flama por combustión de polvos

Este tipo de proceso es el más comúnmente utilizado en la industria, ya que es empleado en procesos específicos de manufactura minoritaria, dando como resultado bajos costos en la manutención y reparación de piezas de equipos.

1.4.2.1.2 Proceso de proyección de alambre por flama

En este proceso de proyección por flama en el cuál la alimentación está en forma del alambre o de la barra.

Cueste lo que cueste, La pistola de proyección de alambre por flama no ha cambiado radicalmente desde los días de Schoop. Mientras que ha habido cambios en inyector y ventila el diseño del casquillo, reemplazo de la turbina de aire con un motor eléctrico e incluso el uso de modernas válvulas el principio sigue siendo el mismo.

La flama es generada por la combustión de un gas (Por ejemplo acetileno) mezclado con oxígeno. La flama va fundiendo la punta del alambre o barra, y entonces es atomizada por un compresor de aire para formar pequeñas partículas o gotitas fundidas formando un rocío que es proyectado para formar a un adherente que "cubre".

La flama puede alcanzar una temperatura de 3000-3350 K y una velocidad de 80-100 (m/s)

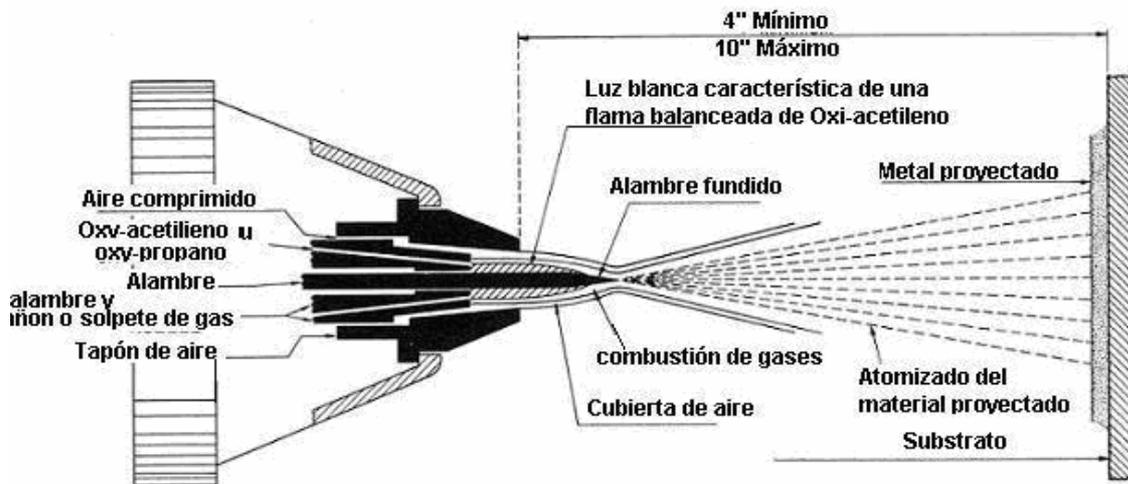


Fig. 1.21 Diagrama del rociado térmico de alambre / barra

1.4.2.2 Detonación.

Tipo de material a proyectar: Polvo

El proceso de detonación y la pistola D-Gun fueron desarrollados en los años 50s. Fue en la antigua Unión Soviética en los años 60s donde este proceso tuvo un mayor crecimiento.

La pistola en D (D-Gun) consiste en un largo cañón de agua enfriada con un diámetro interior de 21-25mm y una longitud de 450-1350 mm.

En operación la mezcla de oxígeno y acetileno es introducido en el cañón junto con una carga de polvos con un tamaño de partícula entre los 5-60 μ m. El gas es prendido y las ondas de la detonación aceleran los polvos por arriba de una velocidad de 750 m/s. Hay de 1-15 detonaciones por segundo, con purgas de Nitrógeno entre ellas. Cada detonación deposita una capa densa y adherente. La repetición del ciclo produce capas más gruesas. Las capas de la detonación se diseñan para aplicar los materiales duros, especialmente carburos, en superficies expuestas a desgaste agresivo

Si se trabaja con la mezcla de acetileno con Oxígeno (D-Gun y Super D-Gun) o propano-butano con Oxígeno; la temperatura máxima es de 4500K con el 45% de acetileno. La velocidad de las ondas de detonación alcanza los 2930 m/s y las partículas proyectadas los 750 m/s en una D-Gun y alrededor de 900 m/s en una super D-gun

La porosidad de un recubrimiento de WC-Co realizado por una D-Gun es de aproximadamente 0.5% y para un recubrimiento de A_2I_3 .

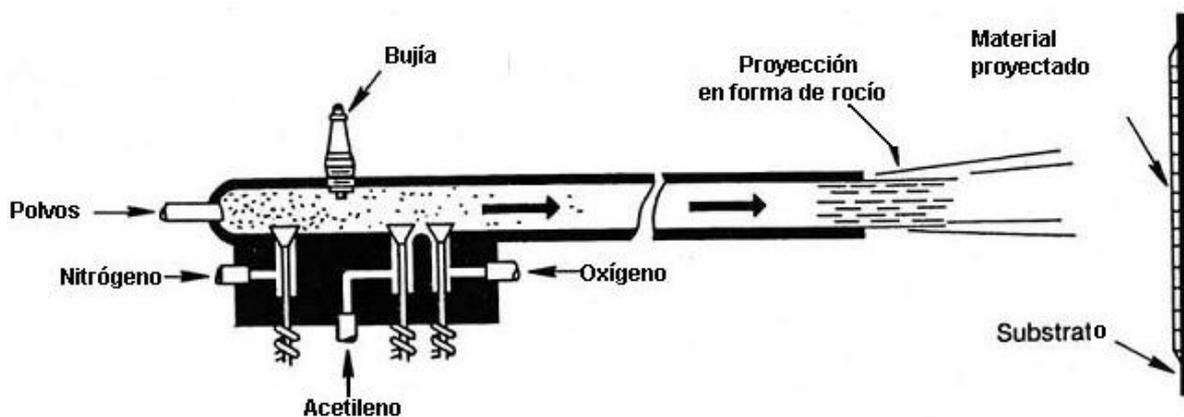


Fig. 1.22 Pistola de detonación.

1.4.2.3 Proceso de rociado térmico por HVOF (High Velocity Oxy-Fuel)

Tipo de material a proyectar: Polvo

Este proceso fue inventado en 1958, pero no se hizo comercial hasta la década de los 80's. La técnica fue referida como Oxy-Combustible de alta velocidad (HVOF) y es un método único de rociar polvos del metal. El proceso de rociado térmico HVOF es similar en algunos aspectos al de detonación. Por ejemplo en los dos procesos se encierra una extendida combustión interna, con la diferencia que el proceso HVOF opera continuamente.

El proceso utiliza una combinación de oxígeno con los varios gases combustibles incluyendo el hidrógeno, el propano, el propileno e incluso el keroseno. En la cámara de combustión, los subproductos ardientes se amplían y se expelen hacia fuera a través de del cañón de la pistola HVOF a velocidades muy altas. A la salida del cañón frecuentemente se producen partículas llamadas "diamantes de choque" como se muestra en la figura 1.23.

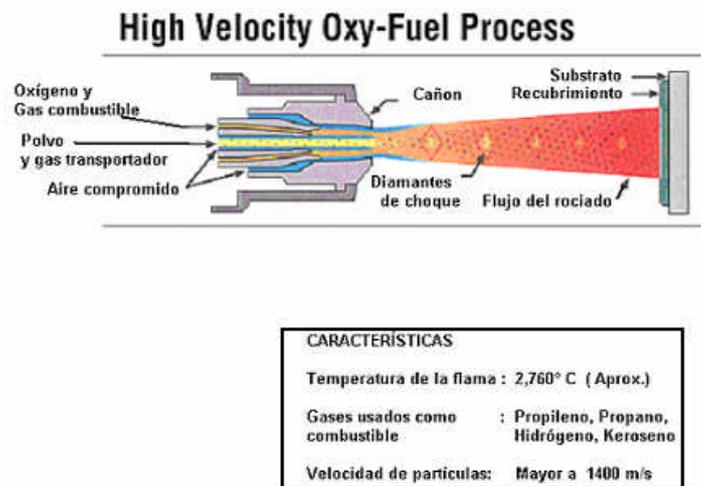


Fig. 1.23 Pistola HVOF

Los polvos que se proyectarán vía HVOF se inyectan axialmente en los gases calientes que se amplían y proyectan contra una superficie para formar una capa. Las velocidades del gas que exceden el Mach 1, con temperaturas que se acercan a los 2300° C. Generalmente, el proceso de rociado térmico por HVOF es usado para deposiciones densas, usualmente de cermets como WC/Co o CR₂C₃ , además de MCrALY entre otros, para obtener recubrimientos muy duros.

Algunas propiedades del recubrimiento obtenidas por el proceso HVOF como la densidad, la adhesión y el contenido de oxido se comparan favorablemente con las obtenidas por el proceso de plasma. La adhesión obtenida generalmente supera la norma ASTM C 633 para adhesión y cohesión, la cuál es limitada por una adhesividad aproximada de 83MPa. En cuanto a la porosidad usualmente se reportan valores menores al 1%. Las desventajas de este proceso incluyen índices bajos de deposición y la oxidación de partículas durante la proyección. Los esfuerzos futuros se centrarán en la aplicación de capas gruesas y de mejoras en control de procesos incluyendo el tiempo de proyección y la exposición al oxígeno atmosférico.

Las desventajas incluyen índices bajos de la deposición y durante el vuelo la oxidación de partículas. Los esfuerzos futuros se centrarán en la aplicación de capas gruesas y de mejoras en control de procesos.

1.4.2.4 Proceso de rociado térmico por plasma.

El plasma es una nube gaseosa ionizada integrada por electrones libres, iones positivos y átomos neutrales. Debido a sus características únicas es comúnmente llamado como "el cuarto estado de la materia". El plasma es producido por la transferencia de energía dentro de un gas hasta que el nivel de energía sea suficiente para ionizar el gas, dejando que los electrones y los iones actúen independientemente uno del otro.

El plasma se puede concebir como el movimiento de electrones libres a través de un gas ionizado.

Se estima que aproximadamente el 98% del universo visible se encuentra en forma de plasma. Y en la tierra el plasma natural ocurre en fenómenos como, la aurora boreal, la aurora australiana y el fuego de san Elmo. Los plasmas comunes manipulados por el hombre son por ejemplo, las lámparas neón y focos fluorescentes.

Los tipos de plasma considerados en este tema son menos comunes, y son parte de una clase llamada "plasmas térmicos". Y se obtienen calentando un gas a altas temperaturas por ejemplo, 5000° C, sus átomos experimentan movimientos al azar muy violentos. Esto da lugar a las colisiones atómicas que hacen algunos electrones (de muy baja masa) llegan a ser separados de sus núcleos debido al choque con la población de iones (partículas de mayor masa); Cuando un gas experimenta esta interrupción resulta ionizado positivamente y la nube que surge se identifica como plasma.

Las fuentes de energía utilizadas por los dispositivos para rociado térmico por plasma usualmente son CD, arcos eléctricos, o RF .Además algunos plasmas térmicos pueden ser generados usando microondas, radiaciones gamma, y arcos eléctricos de corriente alterna. Los gases típicamente usados incluyen el argón, el nitrógeno, el hidrógeno y el helio. Pueden ser utilizados solos o combinados: argón-hidrógeno, argón-helio, nitrógeno-hidrógeno, etc.

En la actualidad se han desarrollado diversos procesos de rociado térmicos usando plasma, por ejemplo:

- Proyección por arco de plasma.
- Proyección de plasma RF (radiofrecuencia).
- Proyección de plasma por atmósfera controlada (CAPS)
- Plasma de alta energía (HEP)
- Proyección de plasma bajo el agua
- Proyección de plasma a baja presión o proyección de plasma al vacío(VPS)
- Etc...

Para fines de este trabajo sólo mencionaremos algunas generalidades de los primeros dos procesos; debido a la complejidad de los procesos mencionados anteriormente.

1.4.2.3.1 Proceso de rociado térmico por arco de plasma.

Tipo de material a proyectar: Polvo

Este concepto fue desarrollado por H. Gerdien en Alemania en los años 1920s. Sin embargo, en aquel momento produjo poco interés pues no había alguna evidente necesidad de tales temperaturas tan altas. Así que fue hasta los años 50's cuando estos sistemas fueron nuevamente introducidos.

Las pistolas de proyección de plasma de la actualidad son suficientemente eficaces para producir temperaturas de 5,000° C a 16,000° C por períodos largos de tiempo. A los generadores del plasma por arco se les denomina como pistolas de proyección térmica por nanotransferencia.

El generador es esencialmente un arco voltaico que trabaja en un espacio estrecho. Dos electrodos, delanteros (ánodo) y posteriores (cátodo), se contienen en un pequeño compartimiento, la diferencia de potencial causa que los electrones sean extraídos del cátodo y acelerados hacia el ánodo. Al insertar un gas en un boquete entre los dos electrodos, los

átomos de este gas comienzan a chocar con los electrones que sobrevienen y con ellos mismos, haciendo un flujo mayor de electrones proyectados hacia el ánodo, mientras tanto los núcleos expulsados de sus electrones se cargan positivamente y se mueven hacia el cátodo. De tal manera el gas contenido en el boquete se ha ionizado, llegando a ser eléctricamente conductor y formando un arco de plasma; el cual sale a través de un orificio en el ánodo como corriente de plasma, a una temperatura que excede los 9000° C. Esta fuente derrita el material a proyectar y lo propulsa hacia el sustrato formando una capa de recubrimiento.

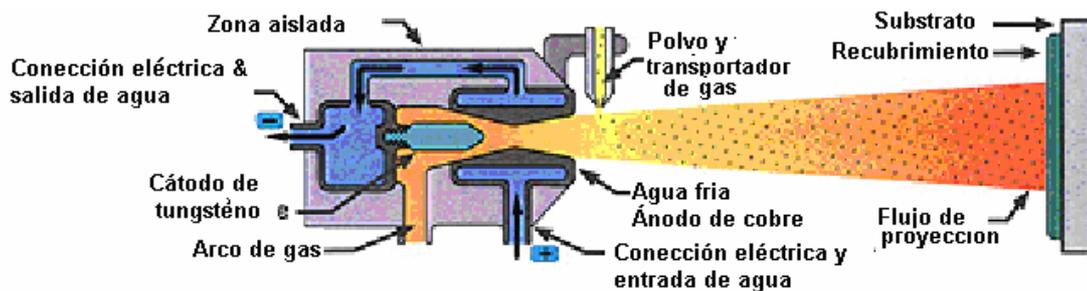


Fig. 1.24 Proceso de rociado térmico por arco de plasma.

Características del proceso:

Temperatura de la flama: Aprox. 6000 – 11,100 ° C

Gases usados: Ar/H₂ , N₂/H₂

Velocidad de las partículas: 240-550 m/s

El recubrimiento obtenido tiene un espesor de 150 a 500µm. Y una porosidad mucho menor al 1%, siendo muy cuidadosos con los parámetros de deposición se puede lograr recubrimientos libres de porosidad.

1.4.2.3.2 Rociado térmico por plasma RF

Tipo de material a proyectar: Polvo

Proyección térmica por plasma de radiofrecuencia (RF), es un sistema que se hizo comercial a finales de la década de los 80's. En este proceso se tiene una bobina de alta frecuencia de inducción, refrigerada por agua y rodeada por una corriente de gas. En la ignición una carga conductora se produce dentro de la bobina de inducción, que se junta al gas, ionizándola para producir un plasma. El polvo es alimentado por un tubo lleno de plasma de este modo se derrite y se proyecta hacia el sustrato.

Las capas producidas usando plasma del RF han demostrado para ser generalmente homogéneas y no porosas. Este método usa atmósferas neutras, y puede depositar los metales reactivos y tóxicos incluyendo el calcio, el uranio, el niobio y el titanio.

1.4.2.3.3 Rociado en frío (Cold Spray)

Este proceso fue desarrollado en un instituto de ciencias de la antigua Unión Soviética a mediados de los 80's, pero ahora es comercializado en Europa y en E.U.A.

Al mencionar Rociado en frío su mismo nombre contradice el concepto de rociado térmico; De cualquier manera este método está siendo de mucho interés en los últimos años. Y se ha clasificado dentro de la larga familia de los procesos de rociado térmico.

El rociado en frío, es un proceso de proyección cinética que utiliza una propulsión supersónica de gas comprimido para acelerar partículas de polvo (de 1-50 μ m de diámetro) a muy altas velocidades que van de 500 a 1500 m/s. Cuando las partículas de polvo se impactan con el sustrato se deforman plásticamente y se unen a este formando un recubrimiento.

El mecanismo por el cual una partícula en estado sólido se deforma y adhiere al sustrato aún no está bien comprendido. La base del proceso de rociado en frío es la aceleración dinámica del gas, y por lo tanto, la energía cinética de las partículas proyectadas produce una deformación y la fusión plástica en estado sólido, cuando impactan con el sustrato para producir capas densas, sin que material proyectado sea significativamente calentado.

En el proceso de rociado en frío el gas (tales como helio o nitrógeno) es introducido en un módulo de control de gas. Después es presurizado y precalentado por una bobina y una resistencia eléctrica; para aumentar su velocidad. Las altas presiones del gas se obtienen al introducirse en inyectores Lavat (divergentes-convergentes). Entonces el gas se acelera a una velocidad sónica en la región del cañón, donde mezcla con el polvo a proyectar que usualmente se introduce por el lado de alta presión. Y el flujo entonces sale disparado a una velocidad supersónica en un rango de 2 a 4 Mach, para impactarse con el sustrato y formar un recubrimiento.

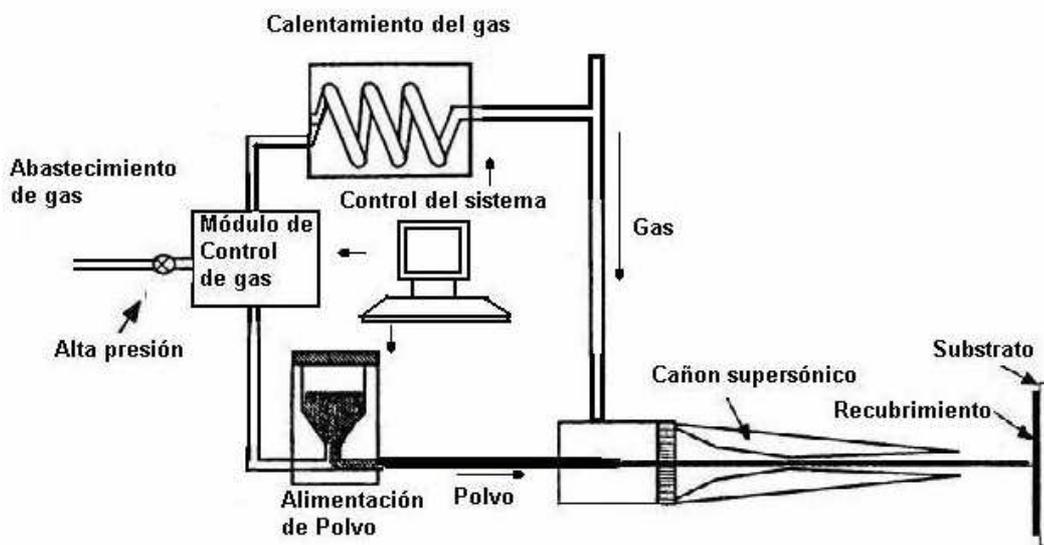


Fig. 1.25 Diagrama esquemático de un proceso de Rociado en frío (Cold Spray).

Rangos típicos de propulsión del gas para rociado en frío.

Presión de propulsión 1-3 MPa.

Temperatura en la propulsión: 0-700 ° C
Consumo de Polvo: 2-8 Kg /h
Distancia de rociado: 10-50mm.
Potencia consumida para calentar el gas: 5-25 KW
Tamaño de partícula: 1-50 μm

Operando con gases como: aire, nitrógeno, helio y sus mezclas.

1.5 APLICACIONES DE LOS RECUBRIMIENTOS OBTENIDOS POR EL PROCESO DE ROCIADO TÉRMICO

Históricamente los procesos de rociado térmico han sido usados como métodos de reparación, reconstrucción y reajuste de elementos de maquinaria, restaurando las dimensiones originales. Así como para proveer de resistencia a la corrosión o resistencia al desgaste a metales usados en diferentes tipos de estructuras tales como puentes, etc.

La falta de comprensión sobre estos tipos de recubrimientos hace que en la industria se recurra a ellos como una última opción. En la actualidad muy pocos elementos de maquinaria son diseñados con recubrimientos obtenidos por rociado térmico.

Pero es importante señalar que puesto que existe un creciente interés y continuidad científica entre la comunidad de los materiales. Y debido a esto el proceso de rociado térmico esta siendo cada vez más aceptada por el sector industrial. El primer sector de manufactura en usar y reconocer el gran valor y utilidad del rociado térmico fue el aeroespacial; y ha sido responsable de su desarrollo y confiabilidad de estos recubrimientos.

En la actualidad los procesos de rociado térmico son usados en diversas industrias por ejemplo:

Uso del rociado térmico en la industria:

- Aeroespacial
- Agricultura
- Marítimo
- Metalurgia
- Fabricación de papel e impresión
- Bombas / motores
- Electrónica
- Computadoras
- Productos petroquímicos
- Geotérmico
- Utilidades / energía /agua /aguas residuales
- Golf
- Militar
- Plataformas costa afuera del aceite
- Refinerías
- Ferrocarril
- Automóviles

Algunos ejemplos de aplicaciones industriales del rociado térmico son:

FUNCIÓN	USO	CAPA
Resistencia de desgaste		
Desgaste adhesivo	Cojinetes, aros del émbolo, mangas hidráulicas de la prensa	Óxido de cromo
Desgaste abrasivo	barras, sellos de bombas, tornillos, mezcladoras de concreto	Carburo de tungsteno, alúmina/Titanio, acero
Fatiga superficial Desgaste	levas, aspas de ventilador (motores de jet), turbinas	Carburo de tungsteno, cobre/níquel/ carburo del cromo
Erosión	extractores, colectores de polvo	Carburo de tungsteno
Resistencia térmica	turbinas de gas, conductos de extractor	Zirconia parcialmente estabilizada
Resistencia de la oxidación	vástagos de la válvula de escape	Aluminio, aleación del níquel/del cromo, Hastelloy
Resistencia a la corrosión	Bombas, tanques de almacenaje, equipo de dirección de alimento	Acero inoxidable (316), aluminio, Inconel, Hastelloy
Conductividad eléctrica	Contactos eléctricos, conectadores de tierra	Cobre
Resistencia eléctrica	Aislamiento para los tubos del calentador, extremidades soldadas	Alúmina, Acero al carbono
Restauración	rodillos, cojinetes de tamaño insuficiente	Acero inoxidable

Fig.1.5.1 Uso de Recubrimientos poliméricos obtenidos por rociado térmico en reemplazo de pinturas.

El rociado térmico de polímeros ha ganado mucha atención en los EE.UU. desde mediados de los 90 ´s, siendo aceptado como reemplazo de pintura.

Algunas ventajas son:

- No se necesita "primer"
- Sólo se necesita una sola pasada
- No se necesita aplicar la capa protectora
- Los componentes orgánicos volátiles son virtualmente cero.
- Añade resistencia al desgaste
- Excelente resistencia al impacto

Protección catódica

Se utiliza éste sistema para la protección de concreto propenso a la corrosión especialmente en puentes. Esto se evita aplicando una capa de zinc por medio de rociado térmico, la cual actuará como un sistema ánodo de sacrificio colocado sobre la superficie del concreto de los puentes, así como a las varillas propensas a la corrosión en donde actuará como un elemento activo frente al acero de la varilla, es decir, se oxida y cede electrones a ésta evitando que se

corroa. Se colocan cables conductores para la unión entre ambos metales. El electrolito es el concreto debido a los iones en él contenidos.

El recubrimiento es usado directamente al concreto (substrato). El sistema de protección galvánica es más efectivo cuando el concreto tiene baja resistividad.



Fig. 1.26 Protección catódica sobre la superficie del concreto de los puentes.

Industria aeronáutica y aeroespacial

Hoy las aplicaciones en los turbo reactores representan gran parte del mercado de rociado térmico (20-40%) del total. El rociado térmico es aplicado en partes de los turbo reactores tales como ventiladores del compresor, alabes de las turbinas, etc.



Fig. 1.27 Aplicación de rociado térmico en turbinas

Aplicaciones Biomédicas

La principal aplicación del rociado térmico en la medicina son las prótesis (ortopedia y dental). Las prótesis son construidas de materiales bio-inertes tales como acero inoxidable, aleaciones de CoCrMo o TiAlV.

Los recubrimientos usados para estos propósitos deben cumplir los siguientes requerimientos.

- Porosidad (20-40%)
- Biocompatibilidad y estabilidad en el cuerpo
- Buena adhesión para la prótesis

El recubrimiento no tiene que ser rechazado después del crecimiento del hueso existen recubrimientos bio-activos que son cerámicos con composiciones muy similares a la estructura del hueso, el material interactúa con el hueso para fomentar su crecimiento al ligar sus interfaces. Estos cerámicos pueden ser rociados por plasma o por HVOF, y usualmente el recubrimiento es de un espesor de 40 a 80 μm . Un ejemplo de este tipo de material es el cerámico Hidroxiapatita que fosfato de calcio (HA), $(\text{Ca}_{10} \cdot [\text{OH}]_6 [\text{PO}_4])$.



Fig. 1.29 La principal aplicación del rociado térmico en la medicina son las prótesis

Construcción de máquinas industriales

El potencial del rociado térmico en la construcción de máquinas industriales (textil, agroalimentaria, construcción de bombas, etc.) fue reconocido desde hace tiempo y muchas de las partes substituidas son ahora reconstruidas.

- Transmisiones y engranes son recubiertos por una capa de molibdeno para reducir la fricción y producir movimientos suaves y parejos.
- La superficie de los pistones. Generalmente es protegida con un recubrimiento cerámico.
- Las válvulas de escape trabajan en un severo ambiente de trabajo, un recubrimiento de Níquel-Cromo-Silicio-Boro aplicado generalmente por rociado térmico por flama las protege del desgaste prematuro y de la corrosión.



Fig.. 1.30 Rociado térmico de elementos mecánicos

Capítulo 2

Generalidades de las pruebas de desgaste

2.1 TRIBOSISTEMAS.

La palabra tribología se deriva del término griego “tribos”, el cual puede entenderse como “frotamiento o rozamiento”, así que la traducción literal de la palabra podría ser, “la ciencia del frotamiento” este término encierra aspectos de vital interés para científicos, ingenieros y aquellos que desarrollen u operen con maquinaria. Dicho concepto fue utilizado por primera vez en el año de 1966 en un informe elaborado por la Comisión del Ministerio de Educación y Ciencia de la Gran Bretaña, desde entonces se le reconoce como una nueva disciplina científica. Por tanto la tribología se define como la ciencia de los mecanismos de fricción, lubricación y desgaste de superficies que interactúan y que están en movimiento relativo.

La importancia económica de la tribología designa su papel a reducir pérdidas de energía, por fenómenos interfaciales en el permanente contacto de dos superficies trabajando una contra otra englobando factores de fricción, lubricación y abrasión.

Para poder realizar una clasificación adecuada de los mecanismos de desgaste se tiene que analizar sistemas que pueden ser usados para identificar los parámetros de interés, estos son los llamados sistemas tribológicos o tribosistemas. Existe un mecanismo diferente de desgaste en cada tribosistema analizado. Este mecanismo de desgaste describe la intensidad y la interacción del material entre los elementos del tribosistema.

El tipo de movimiento relativo entre el contacto de los cuerpos puede ser usado para clasificar los diferentes procesos de desgaste. Existe una gran variedad de técnicas que son aplicadas para diferentes ensayos de desgaste. Y la razón por la cual existe una gran variedad de técnicas y ensayos es por la gran diversidad de sistemas de desgaste que ocurren en la práctica.

El análisis del sistema puede usarse para describir un proceso tribológico, el propósito es la transformación y/o transmisión de entradas en salidas las cuáles son usadas tecnológicamente.

La relación entre el uso de entradas y el uso de salidas puede considerarse como la técnica funcional de un tribosistema.

El uso de entradas y salidas se puede clasificar en:

- Movimiento.
- Trabajo (Mecánico. Hidráulico, Neumático, Químico, etc.)
- Materiales o masa.
- Información.

Para analizar sistemas a partir de un conjunto de elementos mecánicos, o una maquinaria propiamente dicha, se corta por una envolvente a los elementos que están en contacto tribológico. La descripción funcional del tribosistema tiene que ser suplementada por la descripción estructural; la estructura del sistema es determinada por los elementos, sus propiedades y la interacción entre ellos.

Usualmente el sistema consiste en cuatro elementos:

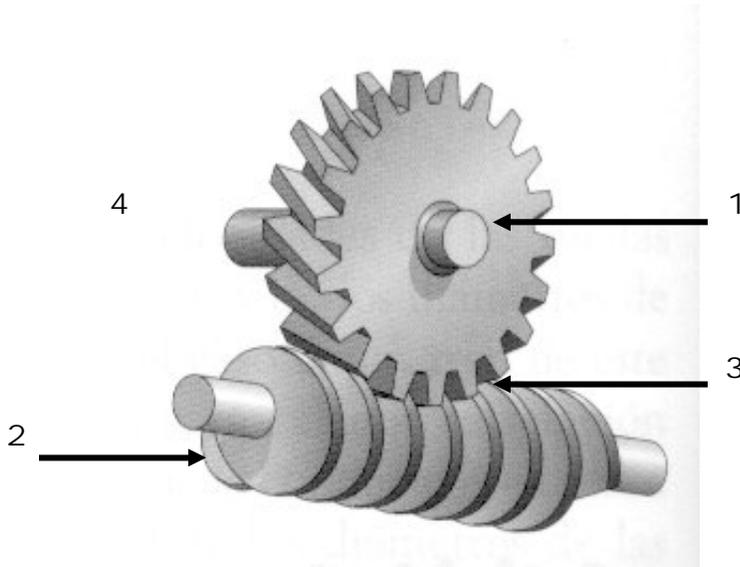


Fig. 2.1 Tribosistema

De la figura 2.1 se entiende que:

1. Cuerpo sólido: Engrane.
2. Cuerpo contrario: Sinfín.
3. Elemento interfacial: Aceite.
4. Medio ambiente: Aire.

El cuerpo contrario puede ser un sólido, un líquido, un gas o una combinación de éstos. La acción de los elementos o la interacción entre ellos pueden variar grandemente, en la figura 2.2 se ve cinemáticamente diferentes tipos de acciones sobre la superficie de un cuerpo sólido.

Concluyendo lo anterior, con respecto a la cinemática del sistema, los procesos de desgaste pueden ser clasificados como sigue:

- 1.-Deslizamiento.
- 2.-Rodamiento.
- 3.-Oscilación.
4. -Impacto.
- 5.-Erosión.

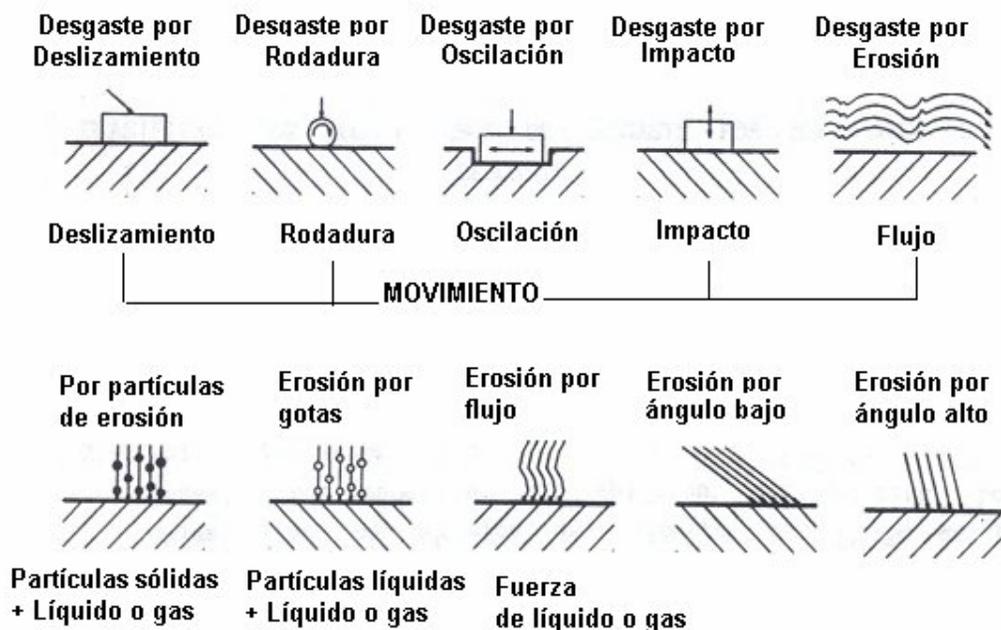


Fig. 2.2 Clasificación por modos de desgaste de los procesos de desgaste

Otra descripción de los procesos de desgaste Incluye el estado físico del cuerpo contrario, por ejemplo, sólido o líquido, o el ángulo de acción. Relacionando al elemento interfacial, los procesos de desgaste pueden ser llamados secos o lubricados. Dependiendo de la estructura del tribosistema, la interacción física y química ocurre entre los elementos que resultan en la separación del material del cuerpo contrario y/o la superficie del cuerpo sólido. La formación de viruta o partículas de desgaste está descrita por los mecanismos de desgaste.

2.2 PROPIEDADES TRIBOLÓGICAS DE LOS RECUBRIMIENTOS.

Los recubrimientos son métodos tecnológicos para incrementar la resistencia al desgaste y la vida útil de los elementos de máquina, El método de selección de uno u otro recubrimiento deberá hacerse mediante un análisis técnico económico, pues no sólo deben valorarse las condiciones concretas de trabajo como un sistema tribomecánico, sino también tener en cuenta el costo del método empleado y su efecto en el incremento de la resistencia al desgaste de las superficies. Esto es fundamental sobretodo en las producciones masivas. Por ejemplo; El cromado incrementa en algunos elementos la vida útil. No obstante para depositar una capa de cromo se necesitan de baños galvánicos y generadores de elevada potencia, lo que puede perjudicar la rentabilidad del proceso en determinadas escalas de producción.

En lo referente al rociado térmico una de sus ventajas principales es que disminuye apreciablemente los costos de operación y no hay un apreciable calentamiento de las piezas entre sus ventajas principales. Si bien este el método de rociado térmico está siendo usado con éxito en el mundo desarrollado, aún no se tiene una completa comprensión de las propiedades tribológicas y una valoración de sus propiedades físicas y mecánicas resulta complejo. Además una variación de los parámetros tecnológicos del rociado térmico afectan factores del recubrimiento tales como: el tamaño y distribución de la porosidad, contenidos de óxidos, tensiones residuales, agrietamientos a escalas tanto macro con microscópicas, los

cuales tienen una incidencia directa en la durabilidad y calidad de los recubrimientos por metalización.

Precisamente el objetivo del presente trabajo es profundizar en las propiedades de adherencia de las partículas tanto en el metal como sustrato, como en las propias capas ya previamente solidificadas a través de pruebas de desgaste.

2.3 MECANISMOS DE DESGASTE

Cuando existe movimiento relativo entre dos cuerpos que soportan una carga, existe una situación potencial de desgaste y se sabe que el movimiento puede ser unidireccional o de vaivén, ya sea deslizante de rodamiento de impacto o giro. Puede existir una combinación de estos o el fenómeno del desgaste puede deberse a un movimiento oscilatorio de pequeñas amplitudes.

Existe un gran número de procesos para referirse a dicho fenómeno, por ello sería conveniente hacer mención de algunas clasificaciones conocidas como lo veremos en la siguiente tabla

Buerwell y Strang	Desgaste por:	Jahamir	Desgaste por:	Godfrey	Desgaste por:
	<ul style="list-style-type: none"> < Abrasion < Adhesión < Fretting < Corrosión < Fatiga de la superficie < Erosión < Cavitación 		<ul style="list-style-type: none"> < Adhesión < Abrasión < Fretting < Delaminación < Erosión < Impacto < Fatiga de la superficie < Corrosión < Difusión < Contacto eléctrico 		<ul style="list-style-type: none"> < Adhesión severa < Adhesión poco severa < Abrasión < Fatiga < Erosión < Delaminación < Corrosión < Electrocorrosión < Fretting corrosión < Daño de cavitación < Descarga eléctrica < Pullido
Rice	Desgaste por:	DIN 50323	Desgaste por:	Wladyslaw	Desgaste
	<ul style="list-style-type: none"> < Adhesión < Abrasion < Fatiga < Corrosión < Eléctrico 		<ul style="list-style-type: none"> < Adhesión < Abrasion < Fatiga de la superficie < Reacción triboquímica 		<ul style="list-style-type: none"> Casiestático < Adhesión < Corrosión < Térmico < Abrasión Dinámico < Descamación (spalling) < Pitting < Fretting < Fatiga

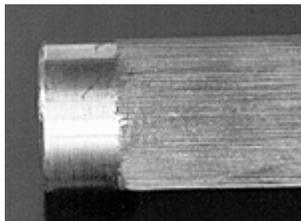
Tabla 2.1 Clasificación de los procesos de desgaste por mecanismos de desgaste.

Esta tesis se basará en la norma alemana DIN 50323 para describir dichos mecanismos; dado que ésta norma enmarca perfectamente los mecanismos más importantes encauzados al desgaste por deslizamiento que es el interés del presente trabajo por el par de desgaste de espiga sobre disco, que se utilizará y del cuál se mencionará con detalle posteriormente.

Algunas manifestaciones físicas típicas de los mecanismos de desgaste de la norma que se basa este trabajo, se describen en la siguiente tabla.

Mecanismo de Desgaste	Manifestación
Desgaste Adhesivo	Soldadura en frío, frotamiento "fretting", raspaduras.
Desgaste Abrasivo	Rayas, surcos, microvirutas, cambios dimensionales y puntos brillantes en herramientas con superficie texturizada.
Por fatiga de la superficie	Grietas transversales y verticales, micropicado (especialmente en contacto basculante).
Reacción Triboquímica	Producto de la reacción (capa, partículas)

Tabla 2.2 Manifestaciones típicas de los mecanismos de desgaste.



ABRASIVO



FATIGA DE LA SUPERFICIE



ADHESIVO



REACCION TRIBOQUIMICA

Fig. 2.3. Manifestaciones físicas de los mecanismos de desgaste

2.4 DESGASTE ADHESIVO

Este tipo de desgaste se lleva a cabo con pequeñas velocidades relativas (hasta máximo 0.2 m/s) y grandes presiones unitarias sobre las áreas de contacto, cuando hay la posibilidad (dependiendo de la distancia entre superficies) de interacción de fuerzas moleculares.



FIG. 2.3 Representación del desgaste adhesivo

Algunos ejemplos comunes en los que se presenta el desgaste por adhesión son: una leva y su seguidor, juego de engrane-piñón, contacto íntimo entre el material y herramienta como se da en el caso de extrusión, también se presenta el fenómeno de adhesión en seguidores, colas de milano, en bujes y en soportes de flecha, etc.

En otras palabras la adhesión se presenta por un deslizamiento relativo entre dos superficies en contacto directo, provocando la formación de uniones y posteriormente la ruptura de las mismas, ocasionando la transferencia del material de una superficie a otra.

El daño se incrementa debido al esfuerzo, la velocidad y la temperatura. Esto también lleva a un gran aumento del coeficiente de fricción y el factor de desgaste de los materiales.

La tendencia a la formación de las uniones por adhesión depende de las propiedades físicas y químicas del material, de los materiales en contacto, los modos y los valores de las cargas y de las propiedades físicas de las superficies en contacto, tales como contaminación o rugosidad. Frecuentemente el contacto entre metales es no metálico, ya que la superficie es cubierta con capas absorbidas, o capas de óxido en el contacto superficial. La adhesión de los metales es causada primeramente por un débil enlace de Van der Waals (por ejemplo la fuerza efectiva bajo la distancia de 10nm). La capa absorbida y la capa de óxido en el contacto superficial pueden ser fracturadas directamente debido a la deformación elástica y plástica de las asperezas. La adhesión en este caso es causada por un enlace metálico o covalente, además un enlace iónico es insignificante para los metales. Debido a que la fuerza de adhesión depende del área real de contacto, ésta es influenciada también por la resistencia de los materiales a la deformación plástica y la estructura cristalina. Sikorski^{9g} observó un incremento de adhesión que va de los materiales de estructura hexagonal compacta, los cúbicos centrados en el cuerpo (bcc) a los cúbicos centrados en la cara (fcc) Figura 2.4

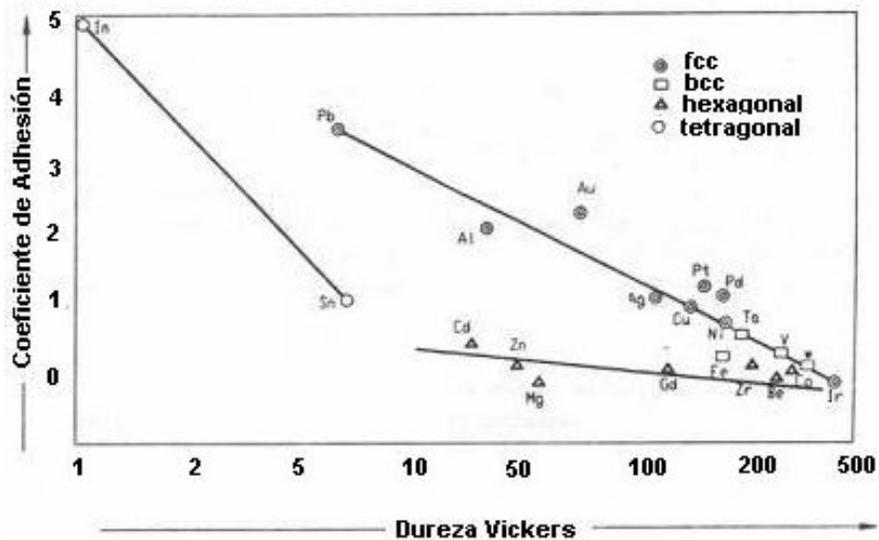


Fig.2.4 Coeficiente de adhesión contra la dureza de los metales.

El coeficiente de adhesión se define como la relación de la fuerza necesaria para romper las uniones adheridas y la fuerza que ejerce la carga normal con la cuál fue iniciada la compresión. De la figura se puede apreciar que cuando existe un aumento de dureza el coeficiente de adhesión disminuye.

Los modelos presentados por Derjaguin, Smillga, Czichos, Ferrante y Smith ¹, describen la influencia de la estructura electrónica de los átomos en la adhesión de las superficies metálicas en contacto con deslizamiento, basándose en el modelo atómico de los átomos en el cual unos ceden y otros aceptan electrones de su última capa formando así un vínculo de adhesión.

Los mecanismos de adhesión son los siguientes:

- Teoría del entrelazamiento.
- Teoría de la difusión.
- Teoría electrónica.
- Teoría de la absorción.
- Teoría química.

Entrelazamiento mecánico.

Se refiere al ensanchamiento de las irregularidades superficiales, por ejemplo, la penetración de un polímero en estado líquido en las microfisuras de una superficie metálica.

Teoría de difusión.

Dice que los átomos o moléculas pueden difundirse a través de la interfase entre dos cuerpos en contacto.

Teoría electrónica.

Propone una transferencia de electrones a través de la interfase de cuerpos en contacto y de diferentes bandas electrónicas. Esta adhesión es causada por efectos de las fuerzas electrostáticas a través de una doble capa eléctrica.

¹ A.D Sarkar, Desgaste de metales , Editorial Limusa , 1990

Teoría de absorción.

Se da por enlaces de tipo secundario como el de Van der Waals, y de hidrógeno.

Teoría química.

Se da en la interfase de cuerpos en contacto por un fuerte enlace químico, también puede ser enlace metálico, iónico o covalente. Estos enlaces son de tipo primario.

Estas teorías dependen en mucho de las características superficiales de los cuerpos en contacto; como la limpieza, la topografía, la carga, la temperatura, condiciones ambientales, microestructura, etc.

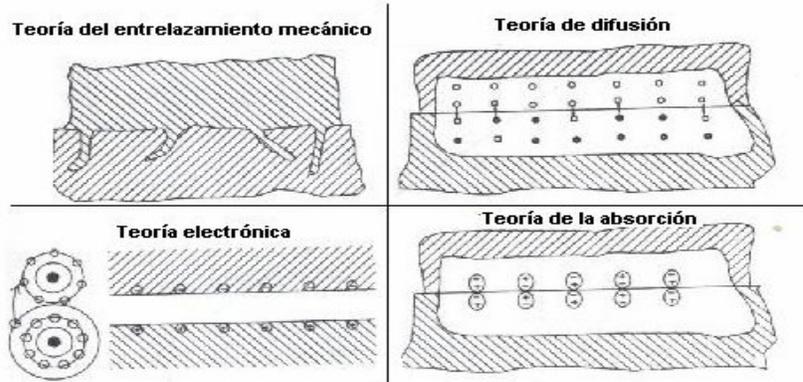


Fig. 2.5 Mecanismos de adhesión

2.5 DESGASTE POR ABRASIÓN

Es característico que durante el deslizamiento, el material destruye intensamente, durante la interacción de dos elementos con una diferencia grande de las durezas superficiales o con asistencia de un medio abrasivo² como son: arena, polvo, restos metálicos, productos de desgaste, etc. En este caso el resultado de la dureza con el número relativo del desgaste de la misma familia de metales es siempre constante.

$$D_{rm} \cdot H = \text{Constante}$$

D_{rm} = desgaste relativo del metal

Esta dependencia se aprecia en la figura.

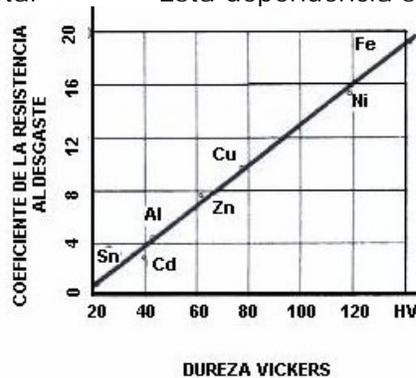


Fig. 2.6 Dependencia de la dureza y la resistencia al desgaste abrasivo de metales de la misma familia

² A.D Sarkar, Desgaste de metales , editorial Limusa , 1990

El desgaste por abrasión también es causado por la presencia de protuberancias duras en una o ambas superficies que están en movimiento relativo, por ejemplo; minerales como la sílica, la alúmina u otros minerales de hierro o fragmentos de desgaste que se endurecen por el mismo trabajo, mientras que las protuberancias pueden ser las asperezas en el maquinado normal las cuales pueden actuar como partículas duras si existe una superficie mucho más dura que la superficie contraria.

De acuerdo con Wahl y Weillinger, Uetz y Föl², el desgaste abrasivo puede ser de un alto o de un bajo nivel dependiendo de la relación de la dureza del abrasivo y de la dureza del material que se está desgastando. Para un material homogéneo y no homogéneo se aprecia en la figura 4.5 la transición de un nivel bajo a un nivel alto de desgaste.

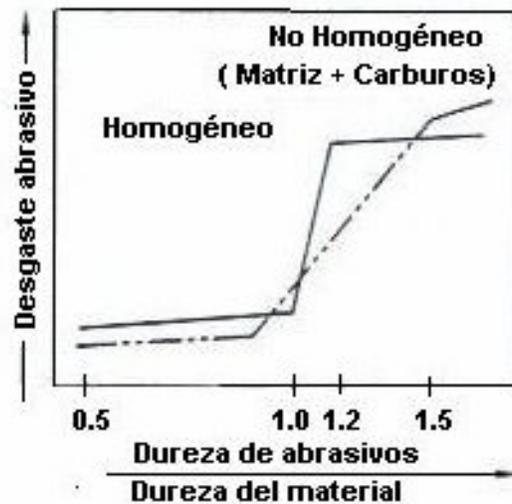


Fig. 2.7 Desgaste abrasivo en función de la relación de la dureza de las partículas y la dureza del material desgastado.

El desgaste abrasivo se puede clasificar por la interacción de dos cuerpos o tres cuerpos, esto se aprecia en la figura 2.8.

En la abrasión de dos cuerpos, las partículas abrasivas se mueven libremente sobre el material, como el deslizamiento de arena que cae por una rampa. En una abrasión de tres cuerpos, las partículas abrasivas actúan como elementos interfaciales entre los cuerpos sólidos en contacto. La abrasión de tres cuerpos es más pequeña que en la abrasión de dos cuerpos, aproximadamente del orden de uno a dos, ya que en la abrasión de tres cuerpos solamente una pequeña proporción de las partículas abrasivas causan desgaste, debido a la variación del ángulo de ataque.



Fig. 2.8 Desgaste abrasivo entre dos y tres cuerpos.

Los microsurcos y los microcortes predominan en materiales dúctiles, y el que aparezca una y otra depende del ángulo de ataque de las partículas de desgaste. Entre mayor es el ángulo de ataque será más factible que aparezca un microcorte, el ángulo de ataque α tiene un valor crítico α_c y este valor depende del material y de las condiciones de la prueba. Teóricamente α_c es el valor de la transición de un microsurco a un microcorte. Esto se ilustra en la figura 2.9

El mecanismo permite conocer la deformación elástica y plástica del material, así como la fractura dúctil y el valor de la fatiga, ya que estos parámetros son importantes para los materiales dúctiles. Las muescas o rayas de los materiales frágiles producidos por las partículas abrasivas pueden ser causa de la formación y la propagación de grietas, estos materiales pueden fluir plásticamente hasta un valor crítico provocando también la propagación de grietas.

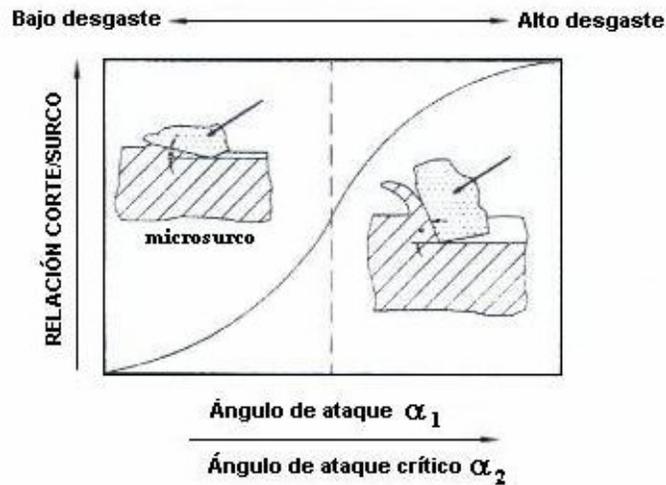


Fig. 2.9 Relación e microcorte / microsurco en función de los ángulos de ataque

2.6 DESGASTE POR FATIGA SUPERFICIAL

Aparece en todos los elementos de máquinas donde hay carga cíclica independiente del tipo de fricción. Se debe entender que el desgaste por fatiga determina la fatiga del material en todo su volumen, esto significa la formación de micro grietas y la eliminación de la pieza en uso. La forma más simple de representación del problema se aprecia en la figura 2.10

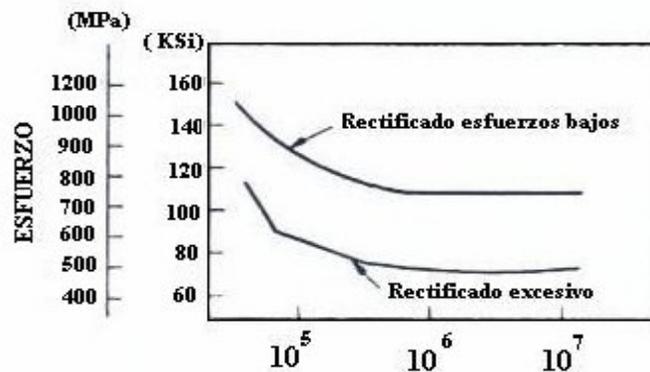


Fig. 2.10 Relación del número de ciclos de trabajo contra el esfuerzo máximo.

En realidad la fatiga superficial no sólo produce grietas sino también se caracteriza por la formación de escamas en la superficie del material. El contacto con rodadura y el contacto con deslizamiento de sólidos o el contacto por impacto de sólidos y/o líquidos puede resultar en un esfuerzo superficial cíclico. La fatiga puede localizarse a escala microscópica debido a la repetición del contacto de asperezas en la superficie de sólidos con movimiento relativo.

La fatiga superficial generalmente se presenta en ruedas de ferrocarril, rodamientos o baleros, rodillos de laminadora, flechas, etc., y la falla procede de la secuencia de la deformación elástica y plástica acompañado de una dureza o ablandamiento por trabajo, lo cual produce la iniciación de grietas y la propagación de las mismas por debajo de la superficie.

Con la formación y la propagación de grietas también se forman picaduras en la superficie del material.

Existen dos modelos para representar la fatiga por contacto con rodadura y fueron propuestos para describir la formación de picaduras en una superficie afectada. Una de las grietas es causada por el esfuerzo de tensión y compresión en el área de contacto. El origen de las grietas en la superficie sólida se apoya por la inclusión superficial, muescas de los procesos de producción, muescas debido al pulido de las partículas de desgaste o cualquier cosa que aumente el esfuerzo en la superficie por la disminución de área. Originalmente, las grietas se propagan en la superficie en dirección inclinada como se ve en la figura 2.11

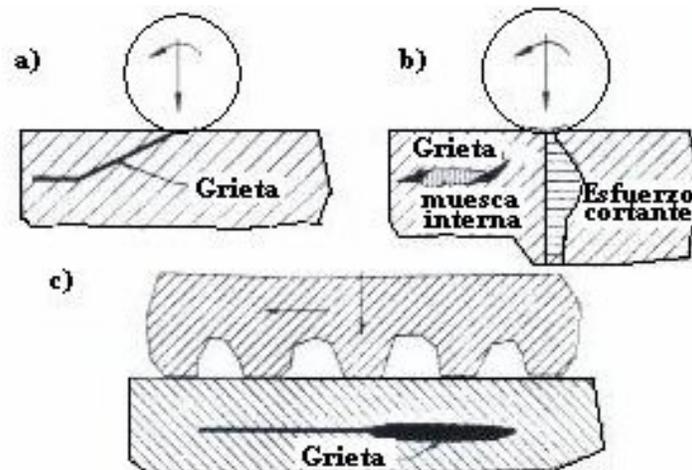


Fig. 2.11 Formación y propagación de grietas en la fatiga de un material.

El esfuerzo cortante alcanza su valor máximo abajo de la superficie, lo que provoca la formación de grietas subsuperficiales. Las grietas superficiales se forman por la interacción mecánica o química o la interacción de la superficie sólida en contacto con el medio ambiente o el elemento interfacial.

³ A.D Sarkar, Desgaste de metales , editorial Limusa , 1990

La fatiga superficial puede ser de mucha importancia si la relacionamos con los mecanismos de adhesión y de abrasión. La repetición del deslizamiento de asperezas duras a través de una superficie sólida puede causar grietas y la propagación de éstas hacia abajo de la superficie con mayor concentración de esfuerzos; de acuerdo con el modelo propuesto por Suh y Coworkers ³ que dice que la propagación de grietas subsuperficiales es paralela a la superficie como se ve cinemáticamente en la figura 2.11 Las partículas de desgaste se generan cuando las grietas subsuperficiales se fracturan a través de la superficie. Generalmente esta superficie se desintegra por delaminación y es debido a la acción simultánea de la adhesión y/o abrasión y la fatiga superficial. La carga cíclica de la superficie con mayor concentración de esfuerzos resulta de la fricción y de la carga normal en el área de contacto. Las fuerzas de fricción se originan de la adhesión y/o abrasión entre las asperezas y la superficie afectada.

Algunas veces el desgaste por erosión debido al impacto de partículas sólidas o líquidas o el desgaste por impacto son tratados como mecanismos de desgaste independientes. Esto es arbitrario ya que el movimiento de partículas puede explicarse de manera simultánea, por ejemplo la acción interior donde se involucran desgaste por adhesión, por erosión y por fatiga superficial. La diferencia principal entre el desgaste por erosión y el desgaste por abrasión es el ángulo de ataque de las partículas; en el primero el ángulo de ataque es muy pequeño, mientras que en el segundo va en dirección a la energía cinética que se trasmite a la superficie con esfuerzos internos. Esto afecta principalmente la deformación elástica y plástica de los sólidos en contacto con deslizamiento.

2.7 DESGASTE POR OXIDACIÓN O DESGASTE TRIBOQUÍMICO.

Aparece cuando existe fricción y deslizamiento, igualmente en la de rodadura, y sucede cuando la intensidad de formación de capas de óxido es mayor que la intensidad de destrucción del material por abrasión.

Es un proceso con absorción de oxígeno, su difusión a las regiones deformadas plástica y elásticamente, y formación de algunas soluciones y uniones químicas del metal propio con oxígeno que facilita mucho la separación de óxidos más frágiles del material mencionado. En materiales ferrosos se forman el Fe_2O_3 , Fe_3O_4 y FeO y con decrecimiento del material de la superficie, esas capas entran en el mismo orden al corazón de la pieza.

La corrosión ambiental puede ser líquida o gaseosa, ésta corrosión ataca a todas las superficies con ajuste mecánico, las cuales están en peligro de sufrir desgaste por reacción triboquímica, por ejemplo; uniones remachadas, sellos, muelles, cadenas, etc.

Los mecanismos de desgaste triboquímico se dividen en cuatro categorías:

- a) Contacto metálico entre las asperezas superficiales las cuáles llevan al traslado del metal debido a la adhesión. Los pequeños escombros de desgaste metálico producido pueden oxidarse, causando posteriormente desgaste por reacción triboquímica.
- b) La reacción química de los metales con el medio ambiente produce una protección de la capa superficial que reduce el contacto metálico.
- c) El rompimiento de la protección de la capa superficial debido a la presión local alta o microfatiga produce escombros de desgaste no metálicos.

- d) Los escombros de desgaste metálico o no metálico pueden actuar como abrasivos y ponen ásperas las superficies de contacto.

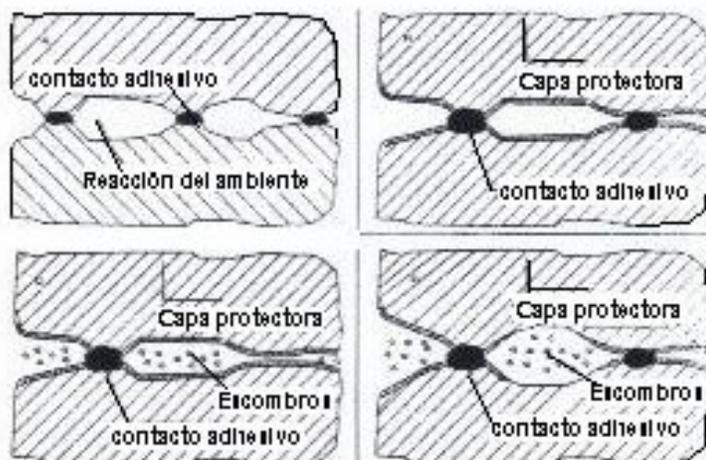


Fig. 2.12 Mecanismos involucrados en el desgaste triboquímico.

El daño de la superficie friccionada y la pérdida de masa de la misma son causados por la presencia de estos diferentes procesos.

Esto nos dice que el desgaste triboquímico está influenciado por la cinética de la formación de las capas superficiales y las propiedades que determinan su resistencia a ser removidas, por ejemplo la ductilidad, la resistencia y adhesión que tienen sobre la subcapa.

Dentro de las condiciones del medio ambiente que rodean a la capa de trabajo pueden encontrarse un lubricante o simplemente el contacto con el oxígeno atmosférico. Estos factores favorecen en gran forma al ataque químico y por consiguiente la formación de la reacción triboquímica. Por lo que se refiere al lubricante, este puede influir mucho para que se anule el desgaste por adhesión pero incremento la posible formación del desgaste triboquímico. En la figura 4.1 1, se ve esquemáticamente la relación entre el desgaste y la reacción química que determina la cantidad y la velocidad de formación de la capa superficial protectora en sistemas lubricados o simplemente en contacto con oxígeno atmosférico.

Concluyendo podemos decir que el desgaste por adhesión se reduce con el aumento de las áreas superficiales protegidas. Las capas superficiales frágiles y fracturadas aumentan cuantitativamente la abrasión de las partículas de desgaste. Aquí se presenta justamente la transición del desgaste por adhesión al desgaste triboquímico y muy posiblemente al desgaste abrasivo por el incremento de la actividad química.

La reacción química necesaria para minimizar el desgaste depende de la severidad del contacto deslizante, tomando como variables la presión de contacto, la temperatura y la calidad de la superficie, o la reacción del espesor del lubricante a las rugosidades de la superficie. La dureza reduce el desgaste triboquímico y también puede incrementarlo debido a la acción abrasiva de sus partículas de desgaste. En sí se deben de considerar

muchas variables, y el saberlas manipular ayudaría para que el desgaste disminuyera considerablemente.

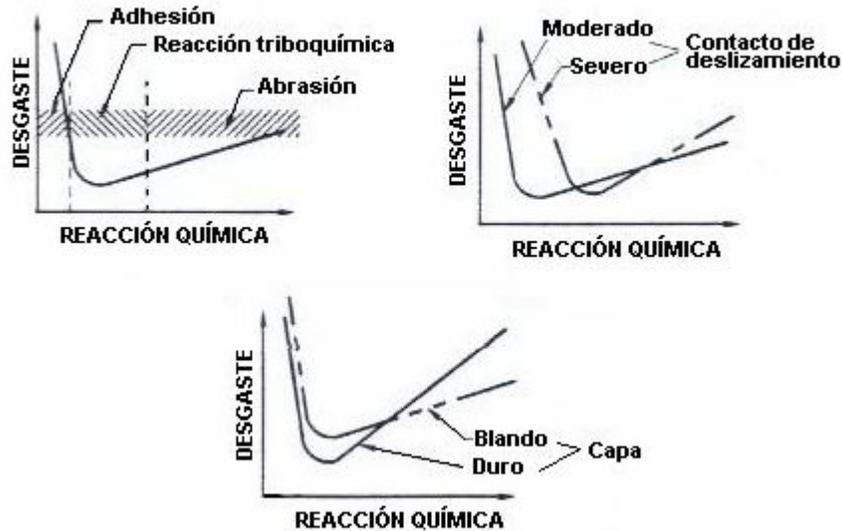


Fig. 2.13 Desgaste en función de la reacción química

En adición a esos principales procesos de desgaste, hay ejemplos de mecanismos especiales, tal es el caso de erosión, aunque en realidad éstos pueden ser descritos en términos de los cuatro mecanismos mayores referidos al principio.

Casi todos los mecanismos de desgaste envuelven más que un simple proceso. Habig realizó una tabla de varios pares de desgaste, en la cual muestra las condiciones de operación y tipos de desgaste en términos del alcance al cual los cuatro mecanismo básicos son involucrados y en los cuales se encuentra el utilizado en la realización de presente trabajo. Tal es el caso del desgaste por deslizamiento en el cual los cuatro mecanismos son involucrados totalmente en un 25%.

En el caso de procesos de rodamiento, el desgaste por fatiga de la superficie es el más importante, mientras que en el caso de desgaste por deslizamiento con partículas abrasivas, particularmente este desgaste es dominante.

2.8 RESISTENCIA AL DESGASTE.

La resistencia al desgaste no es una propiedad intrínseca de los materiales del mismo modo como lo es el módulo de Young o la conductividad térmica, sin embargo estas otras propiedades deben tener bastante efecto en la resistencia al desgaste.

El desgaste puede ocurrir únicamente como resultado de la fricción entre dos superficies en contacto. La cantidad de desgaste dependerá solamente de la fricción en particular y de las condiciones ambientales existentes en la interacción de las superficies.

No existe una relación simple y directa entre la fricción el desgaste. Pero en un par de metales generando baja fricción se generará un bajo desgaste, y esto puede considerarse algo casi verdadero. Pequeños cambios en la fricción podrían indicar grandes cambios en el porcentaje de desgaste. El coeficiente de fricción para el contacto entre metal-metal bajo

condiciones adhesivas y en condiciones de no lubricación sólo varía entre 0.4 a 1.5 en el porcentaje de desgaste.

En ingeniería se puede considerar tanto al desgaste por adherencia como el desgaste por abrasión como la forma más común de desgaste. Siempre que dos superficies entran en contacto existe la probabilidad de adherencia en puntos favorables de la interfase seguida, probablemente, por el desgaste. Es poco probable que la interfase esté libre de areniscas y residuos de desgaste, de manera que en tales casos el mecanismo de desgaste, como en los baleros lisos y las camisas de cilindros, es seguramente una combinación de adherencia y abrasión.

Desgaste en la Industria⁴

Abrasivo	50%
Adhesivo	15%
Erosión	8%
Freeting	8%
Químico	5%

Al diseñar partes a prueba de desgaste, no es recomendable seleccionar un par de metales que presenten solubilidad mutua. De este modo, una flecha de acero que se deslice sobre un balero de acero no es una proposición lógica aunque se ha tenido éxito al deslizar hierro colado sobre sí mismo, quizá por la presencia de grafito. Tanto las leyes del desgaste por adherencia como las del desgaste por abrasión muestran que entre más duro sea un componente, más resistente será al desgaste y esto se confirma en la práctica.

Una de las dificultades con los materiales excesivamente duros es que son susceptibles de sufrir fallas por fractura y, para evitar las fallas mecánicas, el componente debe ser tenaz, lo que es característico de los materiales blandos y dúctiles; por lo tanto para mantener la tenacidad parece necesario sacrificar dureza. Sin embargo, mediante tratamientos superficiales y térmicos de los componentes es posible alcanzar un núcleo tenaz con una superficie dura. En general, si no existe movimiento oscilatorio corrosión ni temperatura elevada, se pueden aplicar los siguientes principios para seleccionar aceros:

- a) Carga de impacto baja: se utilizan carburos duros en la microestructura o se nitrura o carburara el acero, También pueden emplearse hierros y aceros martensíticos.
- b) Carga de impacto alta: el criterio recomendable es utilizar acero austeníticos, inoxidable o el acero Hadfield al manganeso.

Se han hecho tres clasificaciones amplias de los métodos tribológicos para disminuir el desgaste, a saber, el uso de una capa protectora y los principios de conversión v diversificación.

2.8.1 Capa protectora

Sobre todas las superficies se forma inevitablemente una capa de óxidos o gases sorbidos pero sin ésta, muchos casos de deslizamiento en seco, como el caso de las vías de ferrocarril, no resistirían el servicio por un periodo aceptable. Invariablemente, en la

⁴ T.S Eyre. Teasures on materials science and technology VOL 13 . Academic press Inc. Brunell University, England

mayoría de las situaciones se utilizan lubricantes líquidos o sólidos.

En la actualidad hay un renovado interés por evaluar los diversos tipos de tratamientos superficiales antes de poner en servicio los componentes, con el propósito de lograr resistencia al desgaste. Hablando en forma general el tratamiento puede clasificarse en dos tipos, a saber,

- a) Depósito de un metal o un no metal sobre el componente
- b) Tratamiento de difusión

Como ejemplos de depósito están los fosfatos sobre hierro colado y acero o de estaño sobre aluminio. Estos tienen vidas limitadas y protegen las superficies del daño severo durante el arranque inicial. Otras formas de tratamiento por difusión son, la sulfurización, cromación y los recubrimientos electrolíticos. La metalización y rociado térmico o las técnicas de recubrimiento con superficies duras; como el uso de revestimientos soldados también proporcionan películas resistentes al desgaste.

2.8.2 Principio de conversión

El principio de conversión permite el desgaste de una parte del sistema para ofrecer protección a otros componentes más importantes. Un ejemplo es el uso de anillos para pistones de hierro colado que, al desgastarse rápidamente, evitan el rayado de la camisa del cilindro.

2.8.3 Principio de diversificación

El componente menos costoso, por ejemplo un cojinete liso, está diseñado para desgastarse a fin de proteger al tramo de flecha, más caro. Del daño superficial y el desgaste. En las chumaceras, los metales blandos que contienen estaño, plomo, cobre y antimonio proporcionan una superficie blanda de deslizamiento. Sin embargo, si se incrementa la carga y la velocidad, será necesario utilizar superficies más duras en los cojinetes, como las que proporcionan los bronce.

Capítulo 3

Generación del recubrimiento con el rociado térmico automatizado

En este capítulo describiremos el equipo utilizado así como el trabajo realizado para lograr el recubrimiento por el método de rociado térmico automatizado. La generación del recubrimiento, requiere del equipo adecuado, así como del procedimiento de aplicación correcto, de lo contrario no encontraremos las propiedades físicas del recubrimiento deseadas para su aplicación.

3.1 MAQUINADO DE PROBETAS

Es de tener en cuenta una excelente precisión en las probetas a maquinar y asegurar que todas las probetas tengan la misma longitud de espiga, ya que se someterán a desgaste 3 probetas al mismo tiempo, de esta manera se confiara que el contacto sea sobre las tres áreas de las probetas sometidas al ensayo de desgaste.

3.1.1 Equipo para la elaboración de probetas.

Las probetas se maquinaron por control numérico, obteniendo buenos resultados en cuanto a geometría y acabado superficial. El equipo empleado fue el torno CNC tipo industrial con el que contamos en el laboratorio de manufactura de la facultad. (Fig. 3.1)

Torno CNC
Emcotronic 242 TM02
380 V, 3/PE 50/60Hz, 30A
Torreta de 8 herramientas.

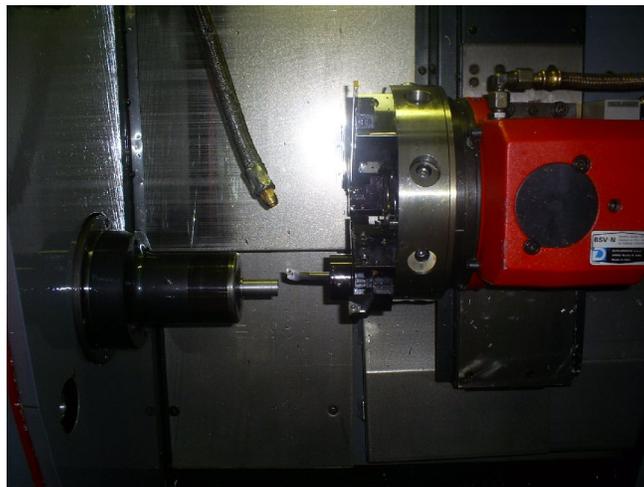


Fig. 3.1 Torno de Control Numérico Emcotronic

El material seleccionado para la fabricación de las probetas fue acero AISI 1018 debido a que los aceros de bajo y medio carbono son comúnmente usados en la industria metalmeccánica nacional, cuya utilización se debe a su bajo costo, pero que son aceros que tienen propiedades mecánicas no muy adecuadas para condiciones de carga y desgaste elevadas.

Norma AISI 1018	
Composición química:	0.15-0.20% C
	0.60-0.90% Mn
	0.04% P
	0.5% S



Fig. 3.2 Probetas de acero AISI 1018

3.2 PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE A RECUBRIR.

El rendimiento de cualquier recubrimiento, depende directamente de la preparación correcta y cuidadosa de la superficie antes de su aplicación, por ende la superficie de las probetas a ser recubiertas deben estar limpias y libre de óxidos, grasas o aceites y simultáneamente a la remoción de contaminantes debe contar con una cierta rugosidad para dar un anclaje a la superficie antes de aplicar el recubrimiento por medio de la técnica de rociado térmico.

Las probetas de acero AISI 1018, se sometieron a un granallado con partículas de óxido de aluminio (Al_2O_3) (Fig. 3.3).

3.2.1 Equipo para el granallado de probetas

El equipo cuenta con una pistola granalladora, (Fig. 3.4) dicha pistola se activa con un compresor (Fig.3.5) capaz de sostener presiones por arriba de los 9 [bar] y para recuperar las partículas que impactaran sobre la superficie de las probetas, se utiliza una caja o panel.



Fig. 3.3 Óxido de Aluminio (Al_2O_3)



Fig. 3.4 Granalladora



Fig. 3.5 Compresor



Fig. 3.6 Manómetro del compresor

3.2.2 Procedimiento del granallado.

Esta técnica de granallado nos dará la preparación de superficie adecuada, con ello removeremos contaminantes y le daremos una necesaria rugosidad para el anclaje del recubrimiento por medio de la técnica de rociado térmico. El procedimiento fue el siguiente:

- a) Instalamos el panel de granallado.
- b) Encendimos el compresor para obtener la presión requerida de 9 [bar]
- c) Colocamos las conexiones de aire para la pistola granalladora.
- d) Vertimos los granos de Óxido de Aluminio (Al_2O_3) al depósito de la pistola granalladora.
- e) Colocamos las probetas en el panel y proyectamos a una distancia de 5 a 10 [cm], por un tiempo aproximado a los 3 minutos, sobre cada probeta, hasta visualizar una porosidad total de la superficie.

3.3 PROCESO DEL RECUBRIMIENTO

En este proceso se decidió aprovechar el equipo automatizado de rociado térmico, ya que nos proporciona la estabilidad de sujeción y rociado uniforme, para obtener un espesor constante en la superficie de estudio.

El recubrimiento sobre este tipo de acero a recubrir (AISI 1018) se empleará para mejorar su funcionalidad, sobre todo cuando se requiera de un endurecimiento superficial para obtener mayor resistencia al desgaste.

3.3.1 Equipo utilizado para realizar el recubrimiento

- Tanques de acetileno y oxígeno con regulador de presiones.
- Pistola (Sulzer Metco 5P-II). y brazo robot (Motoman).

Para el proceso de rociado térmico por flama, la pistola Metco 5P-II quema tanto el acetileno como el oxígeno. Para una aplicación segura, el aire es requerido para enfriar el equipo. Es necesario de una instalación adecuada para el abastecimiento y control del oxígeno.

3.3.1.1 Tanques de acetileno y oxígeno con regulador de presiones.

Los tanques de gas deben estar equipados con su propio manómetro para regular y medir la presión para el correcto funcionamiento de las válvulas. El control de presión de gas y oxígeno consta con un diafragma metálico para la presión alta y un diafragma de diámetro más grande para bajas presiones, esto para una fácil y precisa regulación de la presión de salida.

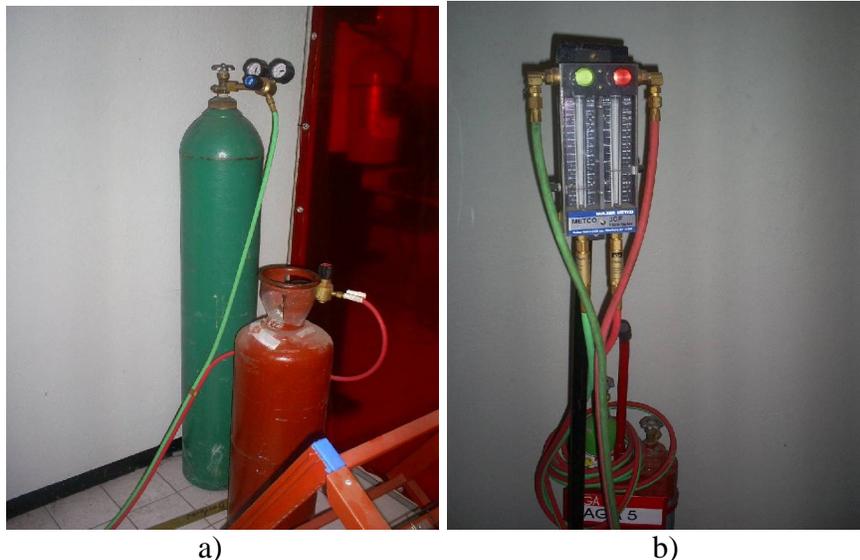


Fig.3.7 a) Tanque de gas acetileno, tanque de gas de oxígeno (Izq)
b) Regulador de presiones marca Metco (Der.).

3.3.1.2 Pistola (Sulzer Metco 5P-II) y brazo robot (Motoman)

Este tipo de pistola mejora notablemente el diseño de las pistolas de proyección de polvos. Y fue especialmente desarrollada para tener resultados óptimos en cuanto a uniformidad del recubrimiento y excelentes ventajas económicas.

Esta pistola usa un sistema único de alimentación y propulsión de polvos. El polvo es alimentado por gravedad a través de una válvula que reduce la presión dentro de la cámara de aspiración. Desde la cámara de aspiración el polvo es propulsado a través de la flama donde es fundido y después depositado sobre la superficie de trabajo.



Fig. 3.8 Pistola Sulzer Metco 5P-II

Existen 3 controles importantes para el funcionamiento de la pistola.

1. La válvula de gas, controla el flujo del de oxígeno y del gas combustible hacia el cañón de la pistola.
2. Válvula para el control del flujo de polvo, ajusta el porcentaje de alimentación de polvo
3. Gatillo, inicia y detiene la corriente de polvo.

El polvo Metco 12C utilizado para el recubrimiento tiene especificaciones de operación recomendadas por el fabricante para la pistola utilizada en este trabajo (5P-II), las especificaciones se muestran en la tabla 3.1.

METCO	VALVULA DE FLUJO	DISTANCIA DE ROCIADO (mm)	PRESION AL ENCENDER (bar)		FLUJOMETRO		CONSUMO X HR		VELOCIDAD (m2/hr)	PESO DEL POLVO (Kg/m2) POR 0.1mm DE ESPESOR	EFICIENCIA DE DEPOSICION %
			OXI.	ACET.	OXI.	ACET.	OXI.	ACET.			
12C	16-18	230-250	1.7	1.0	34	34	1.7	0.93	10.3	0.88	90

Tabla 3.1 Especificaciones de proyección para polvo 12C, utilizadas en este trabajo.¹

La eficiencia de deposición es muy alta, casi tan alta como el 90% en algunos casos. Sólo una poca cantidad de polvo se pierde al ser consumida en la flama. Otra ventaja es la densidad y la uniformidad del recubrimiento rociado lo cual permite mejores acabados y requiere menos operaciones de acabado superficial.

¹ Sulzer metco Type 5P-II Thermospray Gun " Instructions" 1995. pag. 10-8

Diagrama de instalación para rociado térmico

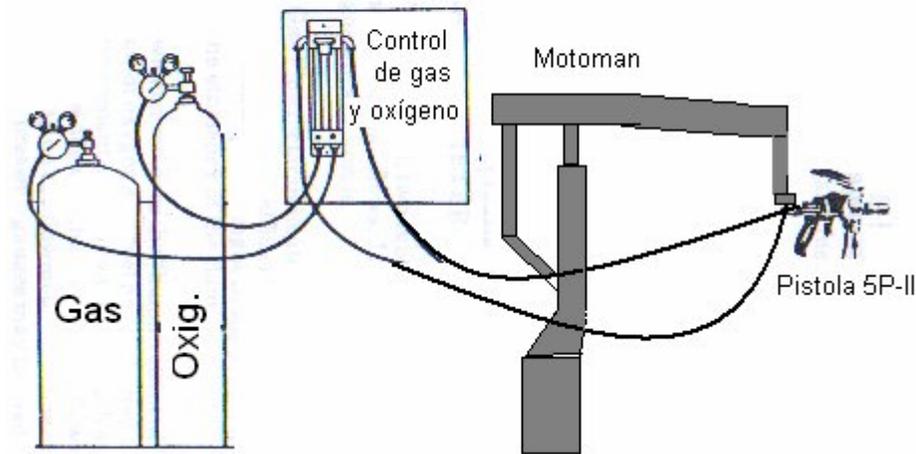


Fig. 3.9 Diagrama de instalación para rociado térmico

3.3.2 Procedimiento para generar el recubrimiento.

Una vez montada la pistola de rociado térmico en el brazo motoman, se procedió a recubrir las probetas. El funcionamiento básico del brazo robot se describe a continuación

- A) La palanca para la apertura de los gases es accionada por un motor que a su vez enciende en un primer término un interruptor que activará la chispa de encendido que nos proporcionará la combustión.
- B) El brazo mecánico (MOTOMAN) se posicionará a cierta distancia (aproximadamente de 20 a 25 cm.) del material base el cual será proyectado.
- C) Una vez posicionado el punto inicial de la aplicación, se procede al accionamiento del gatillo; esto se realiza energizando a la bobina que activará el gancho de disparo, quedando accionado el sistema de rociado.
- D) Empieza a rociar en zigzag por aproximadamente 2 min, sobre 3 probetas para estudio.
- E) Se desenergizará la bobina de accionamiento del gatillo, dando como consecuencia la desactivación del rociado de material de aporte.
- F) En este momento el motoreductor invertirá su sentido y cerrará en su totalidad la válvula de los gases.
- G) Terminado el proceso de rociado se alejará al brazo mecánico a una distancia considerable de la pieza de trabajo, dando con ello el término del ciclo programado del sistema automatizado de rociado térmico.

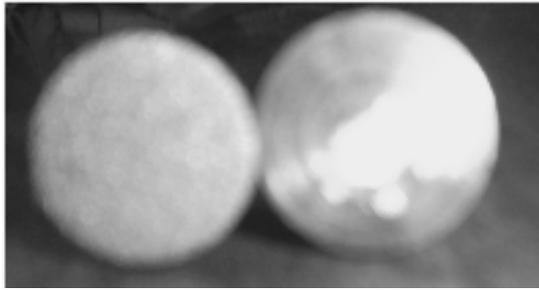


Fig.3.10 A la izquierda superficie de una probeta recubierta y a la derecha superficie de una probeta sin recubrir.

3.4 CARACTERÍSTICAS OPTIMAS DEL RECUBRIMIENTO

El recubrimiento es aplicado a bases de materiales ordinarios tales como hierro, acero y es menos susceptible a fracturarse que otras aleaciones más duras. La dureza teórica del recubrimiento Metco 12C es de 30 – 35 Rc. Y esta recomendado para la resistencia a granos abrasivos, superficies duras, fretting, cavitación y erosión así como para resistir altas y bajas temperaturas hasta 1550° F.

3.4.1 Composición del recubrimiento.¹³

Níquel 82.35%
Cromo 10%
Boro 2.5%
Hierro 2.5%
Silicio 2.5%
Carbón 0.15%
Tamaño típico de grano: -120 + 325 Mesh
Punto típico de fusión: 1010-1065 ° C (1850-1950)



Fig. 3.11 Polvo comercial METCO 12C.

3.4.2 Propiedades del recubrimiento.²

Textura del rociado:	Media
Maquinabilidad:	Muy buena
Macro dureza:	30-35 Rc
Ductilidad:	Menor al 1%
Rango plástico:	Medio
Porosidad:	Esencialmente sin porosidad
Coefficiente térmico de expansión:	6×10^{-6}
Coefficiente de fricción:	Bajo
Densidad del polvo fundido:	8.2 g /cm ³
Resistencia a la corrosión:	Similar a las del acero inoxidable
Limitaciones de espesor:	.050-.070" Puede desprenderse

3.4.3 Resistencia del recubrimiento para algunas aplicaciones.²

Función del recubrimiento	Aplicación típica
Resistencia a granos abrasivos (Bajas temperaturas)	Industria del aceite
Resistencia a granos abrasivos (Altas temperaturas)	Pernos mandriladores
Resistencia a superficies duras (Bajas temperaturas)	Dados de extrusión
Resistencia a superficies duras (Altas temperaturas)	Dados de formado en caliente
Resistencia al fretting (Bajas temperaturas)	Cilindrado
Resistencia a la cavitación.	Bombas
Resistencia a partículas erosionadoras (Bajas temperaturas)	Válvulas de descarga
Resistencia a partículas erosionadoras	Escapes

² Sulzer metco 12C " Specifics" 1995.

3.4.4 Equipo utilizado para medir dureza.

Para medir la dureza de las probetas recubiertas antes y después del desgaste, así como la dureza del disco seleccionado para ensayos de desgaste, se utilizó un durómetro, (ver figura 3.12).

Durómetro digital

Marca: Mitutoyo

Escalas: Rockwell B, Rockwell C, Brinell.



Fig. 3.12 Durómetro digital Mitutoyo

Capítulo 4

Desarrollo experimental

4.1 METODO DE PRUEBA "PIN-ON-DISK"

Este método está basado en la norma G99 de la ASTM y describe el procedimiento a seguir en el laboratorio para determinar el desgaste de materiales por deslizamiento, usando una maquina o equipo pin on disk.

El método puede aplicarse a una gran variedad de materiales. El único requisito es que las probetas tengan dimensiones específicas para que puedan resistir las cargas aplicadas durante el ensayo. Los materiales a ser probados deberán tener una detallada descripción en cuanto a dimensiones, acabado superficial, tipo de material, forma, composición, microestructura, tratamientos térmicos y dureza.

4.1.1 Principio de funcionamiento pin on disk.

Un equipo pin on disk consiste en un posicionador de un pin, el cual es colocado perpendicularmente respecto a un disco; dicho pin de diámetro (d), permanece fijo mientras que el disco gira provocando un deslizamiento relativo en el área de contacto entre ambos elementos, formando una trayectoria circular en la superficie del disco, dicha trayectoria es provocada por la acción de un motor que nos proporciona la velocidad de giro (w). Como se puede ver en la fig 4.1, la probeta en forma de pin se encuentra localizado a un radio (R) del centro del disco, esta probeta se presiona sobre el disco a una carga específica (F), la cual se encuentra usualmente sujeta a un brazo con contrapesos.

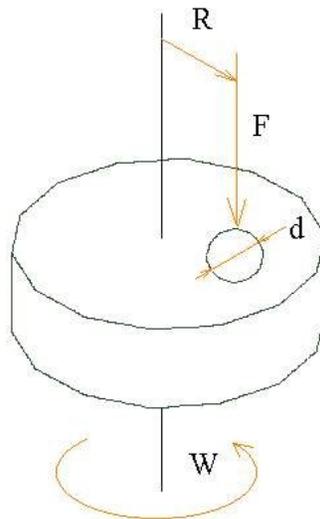


Fig.4.1 Distribución del PIN y el DISCO en un proceso de ensayo de desgaste

La probeta "pin" típica es un cilindro o una pequeña esfera, los cuales deben tener un diámetro de 2 a 10 mm. Los discos deberán tener un diámetro entre 30 y 100 mm, con un espesor que varía entre 2 y 10 mm.

El acabado superficial deberá presentar una rugosidad máxima de 0.8 μm .

4.1.2 Parámetros del ensayo:

Carga: Valores de la fuerza de contacto. (Kg)

Velocidad: La velocidad relativa entre las superficies de deslizamiento. (RPM)

Distancia: La distancia acumulada de deslizamiento. (m)

Temperatura: La temperatura en las dos probetas en cercanía a la superficie de contacto.

Atmósfera: La atmósfera (aire del laboratorio, humedad relativa, etc.) alrededor de la superficie de contacto.

La cantidad de desgaste de cualquier sistema dependerá en general del número de factores del sistema como son, las características de la máquina y propiedades del material y cabe destacar que jamás se duplicara un valor en una prueba de pin-on-disk por las condiciones experimentales del ensayo, como por ejemplo, área de contacto, cantidad de partículas removidas y presencia de un ambiente corrosivo.

4.1.3 Procedimiento de la norma:

a) Antes de medir la pérdida de peso en una probeta, lo primero que se tiene que realizar es el lavado y la limpieza de los especímenes. Hay que tener cuidado de limpiar todo tipo de mugre sobre la superficie; para ello, se debe utilizar solventes que no formen películas y que no sean a base de cloro.

b) Se deberá insertar el disco en el dispositivo de sujeción de transmisión, de tal manera que el disco se encuentre perpendicular al eje de rotación (+-1 grado de desviación).

c) Insertar la probeta o pin en su dispositivo de sujeción, de tal manera que quede perpendicular al disco (+-1 grado de desviación), con el propósito de mantener las condiciones de contacto necesarias.

d) Aplique la carga apropiada al pin, de acuerdo a las condiciones de desgaste que se quieren medir.

e) Prenda el motor y ajuste la velocidad hasta el valor deseado.

f) Ajuste el contador de revoluciones con el valor deseado. Inicie el ensayo con las probetas en contacto sometidas a carga. La prueba se detendrá cuando se hayan completado el número de revoluciones programadas. La prueba no deberá ser reiniciada o interrumpida.

g) Extraiga las probetas y límpielas de cualquier partícula presente. Observar la presencia de protuberancias, desplazamientos de metal, decoloración, microfracturas o anomalías superficiales.

h) Se deberá medir nuevamente las probetas en cuanto a dimensiones y peso. Esta prueba se debe repetir varias veces con el propósito de tener suficientes datos que estadísticamente produzcan resultados significativos.

i) Las mediciones de desgaste deberán ser reportadas como pérdida de volumen, es decir la cantidad de desgaste mediante la medición apropiada del peso de las probetas antes y después del ensayo. La pérdida de masa por desgaste se puede convertir en pérdida de volumen mediante la utilización de adecuados valores de densidad.

4.2 EQUIPO UTILIZADO PARA REALIZAR LOS ENSAYOS DE DESGASTE.

Dada la importancia que tiene el equipo de desgaste pin on disk para simular condiciones prácticas, describiremos a detalle el proceso utilizado para evaluar las condiciones del desgaste sobre recubrimientos, en este caso desgaste por deslizamiento.

Para realizar las pruebas de desgaste se utilizo una máquina para estudios de tribología Cygnus II disc pins Modelo 1985, (fig. 4.2) la cual dividiremos en dos sistemas para su descripción:

1.-Sistema de Sujeción-Carga

- Probeta-disco.
- Portamuestras.
- Brazo de carga.

2.- Sistema de transmisión

- Motor.
- Variador de velocidad.
- Lector de velocidad.



Fig. 4.2 Máquina para estudios de tribología Cignus II

4.2.1 Sistema de sujeción-carga.

Este sistema se encuentra en la parte superior de la máquina y tiene la tarea de sujetar la probeta "pin" y al mismo tiempo aplicar la carga dispuesta sobre el disco, para que se presente el fenómeno del desgaste, dicho mecanismo lo podemos ver en la figura 4.3



Fig. 4.3 Mecanismo de sujeción-carga.

4.2.1.1 Probeta-Disco

La probeta "pin" es la pieza que estará en este caso de estudio en constantes mediciones de pérdidas de peso es de forma cilíndrica de aproximadamente 25 mm de diámetro y que ya se ha descrito con detalle en el capítulo anterior.

El disco es una pieza de aproximadamente 110 mm de diámetro y que en el centro consta de un agujero para la sujeción del mismo, esta fabricado de un acero para fleje llamado C-75 además esta templado, para garantizar mayor dureza que la probeta "pin". Dichos elementos se pueden ver en fig. 4.4

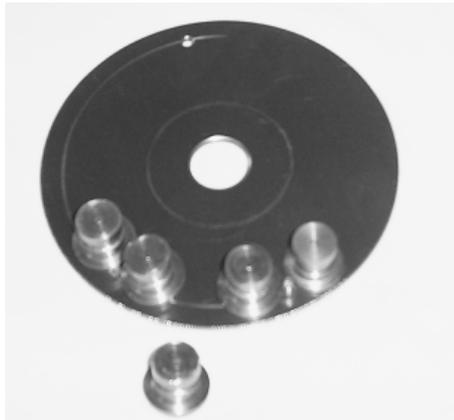


Fig. 4.4 Probetas sobre el disco de desgaste

4.2.1.2 Porta muestras.

El dispositivo deberá tener como condición la adecuada sujeción de las probetas, para garantizar la perpendicularidad para con el disco (± 1 grado de desviación), con el propósito de mantener las condiciones de contacto necesarias.

Este elemento fue modificado del original, dado que se necesitaban probetas de mayor diámetro, para una mejor aplicación del recubrimiento en estudio, el dispositivo cuenta con tres orificios para sujetar mismo número de probetas "pin". El eje del dispositivo cuenta con

las adaptaciones necesarias para asentar debidamente sobre el disco y en la parte superior para transmitir la carga dispuesta para el ensayo de desgaste.



Fig. 4.5 Porta muestras modificado

4.2.1.3 Brazo de carga.

El implemento de la carga axial se ubica en la parte superior del sistema sujeción-carga y consta de un brazo de acero; en un extremo del brazo se ubica un plato para colocar los discos con diferentes pesos, desde 100 gr. hasta 1000 gr. En el otro extremo tiene un contrapeso para hacer balance. En la parte central del brazo se encuentra una espiga formando una especie de T y en la parte inferior de esta se encuentra un asentamiento, el cual se centra en un punto con otra pieza que resulta ser el portamuestras, el centrado de estas dos piezas se realiza con la ayuda de un nivel de gota, para garantizar que la carga sea axial.

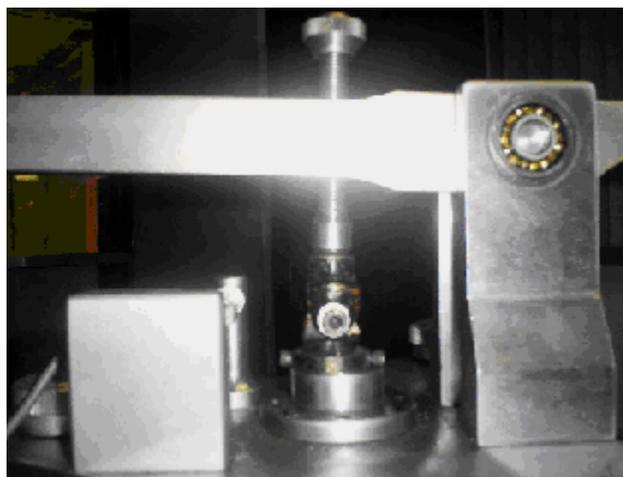


Fig. 4.6. Perspectiva de la carga axial

4.2.2 Sistema de transmisión.

Este sistema se encuentra en la parte inferior de la máquina y tiene como fin transmitir el movimiento unidireccional del motor a el disco para llevar a cabo el fenómeno de desgaste.

Dicho sistema no se encontraba en funcionamiento, el motor original no funcionaba, y los circuitos de la máquina estaban totalmente desactivados; por lo que se hicieron algunas adaptaciones para el funcionamiento total del sistema de transmisión.

Las adaptaciones fueron:

- a) Instalación de un nuevo motor.
- b) Instalación de un control de velocidad externo para el motor.

4.2.2.1 Motor.

La norma a la que está apegado estas pruebas que se ha mencionado con anterioridad recomienda que la máquina debe estar equipada con un motor de velocidad variable, capaz de mantener la velocidad seleccionada constante (con una variación de $\pm 1\%$ de la máxima velocidad del motor). El motor debe estar montado de tal manera que las vibraciones no afecten las pruebas. Las velocidades de rotación más usadas se encuentran en el rango 60 a 600 rpm.

El motor que se adaptó es un motor de 1 HP, de corriente directa de 12 A. y una máxima de 2700 RPM, cubriendo las recomendaciones de la norma.



Fig. 4.7 Motor de imán permanente adaptado

4.2.2.2 Control de velocidad.

Para el control de las RPM del motor descrito anteriormente se instaló un control o variador de velocidad con las siguientes características:

Marca: Baldor

Modelo NEMA BC140

Voltaje de entrada: 115V ò 230 V

Voltaje de salida: 90-130 VDC a 180VDC

Potencia: 1HP-115V 2HP-230V

Corriente de entrada: 12.0 A

Corriente de salida: 8.0 A

El panel tiene un interruptor para la activación del mismo y una perilla graduada en función al porcentaje de velocidad máximo para accionar el motor, como se muestra en la fig. 4.8

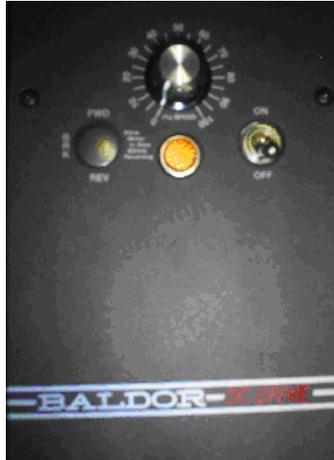


Fig. 4.8 Controlador de velocidad NEMA BC140

4.2.2.3 Lector de velocidad.

Para la medición de las revoluciones por minuto en el motor se uso un tacómetro digital externo Fig. 4.9. Este dato es importante ya que en base a el mismo, se obtiene la distancia recorrida de la muestra cuando es sometida a desgaste.



Fig. 4.9 Foto tacómetro digital de luz infrarroja

4.2.3 Balanza analítica.

Siguiendo la recomendación de la norma que nos dice que cualquier balanza utilizada para medir la pérdida de masa en las probetas deberá tener una sensibilidad de por lo menos

0.001 gr. Y en casos de poco desgaste se necesitan mayores sensibilidades de hasta 0.0001 gr. Para nuestro caso de estudio antes y después de cada evento o ensayo de desgaste se utilizó una balanza analítica, con la siguiente descripción:

Marca: Explorer
Equipada con panel (parabrisas) y platillo de 3.5"
Alcance máximo: 62 gr.
Resolución: 0.0001 gr.



Fig. 4.10 Balanza analítica

4.3 PROCESO DE DESGASTE

En este proceso se llevaron a cabo los ensayos de desgaste pin-on-disk, basados en la norma G99 de la ASTM, en donde se utilizaron, probetas con el recubrimiento en estudio y probetas sin recubrir, es decir solo con el material base (AISI 1018), esto con el propósito de comparar los resultados de desgaste con y sin recubrimiento.

El procedimiento de los ensayos, fue el mismo para ambos casos es decir se trataron de dar los mismas variantes controladas (numero de repeticiones, tiempo de ensayo y RPM).

4.3.1 Procedimiento del ensayo.

1.- Lo primero que se realizó fue la limpieza de las probetas "pin". Se utilizó alcohol para limpiar las mismas, antes de empezar todos los ensayos.

2) Se colocó el disco de desgaste en el dispositivo de sujeción de la transmisión, de tal manera que el disco se encontrara perpendicular al eje de rotación.

3) Antes de colocar las probetas "pin" en el dispositivo de sujeción se marcaron y se pesaron en la balanza analítica y se anotaban los datos.

4) Se montaban tres probetas "pin" en su dispositivo de sujeción, de tal manera que quedaría perpendicular al disco con el fin de mantener las condiciones de contacto sobre el disco.

- 5) Se aplicó la carga primero de 150 gr. Después de 300 y 600 gr. en diferentes eventos.
- 6) Se prendió motor con controlador de velocidad y se ajusto primero a 470 RPM con ayuda del tacómetro digital externo para los primeros eventos con 150. 300 y 600 gr. Después se ajustaría a 900 RPM para las mismas cargas.
- 7) Se inició el ensayo con las probetas en contacto sometidas a carga y RPM seleccionados. Se evaluó la duración de los ocho eventos por cada carga con un cronometro externo y con dichos datos se calculo después la distancia recorrida. La prueba se detenía después de completar 3 minutos, por cada evento.
- 8) Se extraían las probetas "pin" y se limpiaban de cualquier partícula presente.
- 9) Se pesaban nuevamente en la balanza analítica y se anotaban los datos.

Este procedimiento se repetía desde el punto 4 al 9 en ocho ocasiones por cada una de las tres cargas (150,300 y 900 gr) y a su vez por cada velocidad (470 y 900 RPM). En total se hacían 48 eventos para las tres probetas "pin" con recubrimiento y también sin recubrimiento. La secuencia se puede observar en la fig. 4.11.

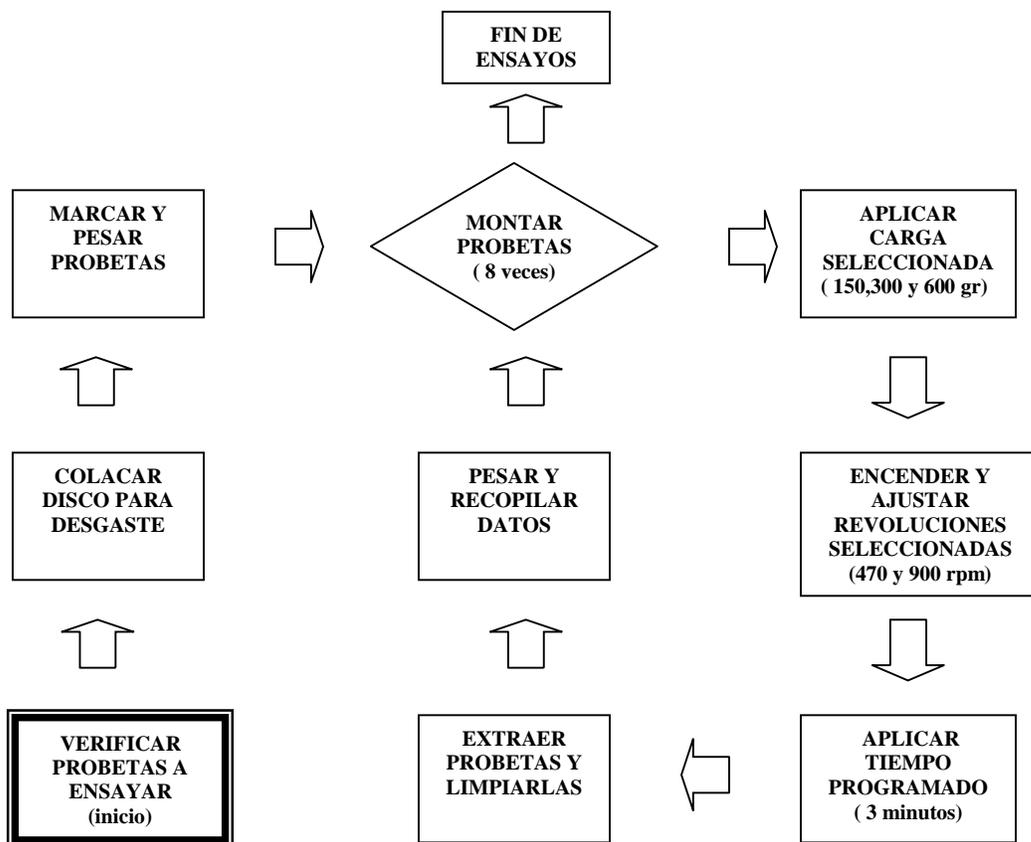


Fig. 4.11 Mapa de procedimiento, del ensayo pin-on-disk para el caso de estudio.

4.4 EVALUACIÓN DE DESGASTE EN LAS PROBETAS.

Tomando en cuenta que se tienen las siguientes variables:

Propiedades del material:

H= Dureza del material
P= Densidad del material
V= Volumen de desgaste

Propiedades de prueba:

RPM= Revoluciones x minuto a la cual gira la muestra
L= Carga axial (Kg)
t= tiempo de ensayo (min)
S₀ = Distancia de deslizamiento (m)

4.4.1 Distancia de deslizamiento.

Tomando el arreglo del porta muestras en donde se localizan los tres barrenos para montar las probetas "pin" en donde existe un diámetro de trayectoria de 6.5 cm y tomando las lecturas de las RPM junto con el tiempo de ensayo, proseguimos con los siguientes cálculos:

$$\text{Si : } 1 \text{ Rev} = \pi\theta = \text{Perímetro}$$

$$\frac{\text{rev}}{\text{min}} \frac{(\theta\pi(\text{cm}))}{\text{rev}} = \frac{\text{cm}}{\text{min}}$$

Entonces

$$S_0 [\text{cm}] = (\text{RPM})(\theta(\pi))(t)$$

Donde:

t= tiempo de ensayo {min.}
RPM= Revoluciones x minuto a la cual gira la muestra.
 θ = Diámetro en el cual se encuentran las muestras.

4.4.2 Pérdida de peso.

Para obtener la pérdida de peso, utilizamos una balanza analítica con una sensibilidad de hasta diezmilésimas de gramo, para pesar las probetas antes y después de los ensayos.

$$TP = P_i - P_f [Kg]$$

Donde:

TP= Pérdida de peso

P_i= Peso inicial

P_f= Peso final

4.2.3 Razón de desgaste

Para la razón de desgaste, dependerá de la pérdida de peso, respecto a la distancia recorrida, es decir analizaremos la pérdida de peso de las probetas en estudio dependiendo de la distancia recorrida sobre el disco de desgaste.

$$q = \frac{TP}{S_0}$$

Donde:

TP= Pérdida de peso.

S₀= Distancia de deslizamiento.

Capítulo 5

Presentación de resultados

En este capítulo se presentan y analizan los resultados más destacados e importantes encontrados en el trabajo experimental.

Es importante resaltar algunos parámetros y cuidados que deben tomarse en cuenta para obtener mejores resultados en el proceso de rociado térmico. En este proceso se decidió aprovechar el equipo automatizado de rociado térmico, ya que nos proporciona la estabilidad de sujeción y rociado uniforme, para obtener un espesor constante en la superficie de estudio.

Cabe destacar que con el equipo utilizado se tiene estabilidad de sujeción, la adecuada programación en tiempo y ruta de proyección para cubrir toda el área a proyectar, esto es prioritario ya que de lo contrario se tienen diferentes niveles de grosor en la probeta. Lo anterior lo pudimos constatar en las primeras pruebas de proyección en las probetas, como se aprecia en la figura 5.1.



Fig.5.1 Probeta con 1.5 minutos de proyección, con mala distribución en proyección térmica.
8X (vista lateral)

Una vez que se ha cuidado la adecuada distribución de material en toda el área a proyectar, se tendrá atención en el tiempo de proyección, ya que en base a dicho tiempo obviamente dependerá el grosor del recubrimiento y la adecuada distribución de material en toda el área a proyectar. En la tabla 5.1 se observa los diferentes tiempos de proyección, que se le dieron a las probetas y los grosores obtenidos.

PROBETAS RECUBIERTAS METCO 12C				
<i>PROBETA</i>	<i>TIEMPO DE ROCIADO (min.)</i>	<i>ESPESOR DE RECUBRIMIENTO (mm)</i>	<i>DUREZA HRC</i>	<i>SUPERFICIE DEL RECUBRIMIENTO</i>
1	0.5	0.4	28.6	REGULAR
2	1.5	1.3	29.4	BUENA
3	3	2.8	29.7	MALA

Tabla 5.1 Comparación de grosores y durezas en probetas proyectadas.

Después de comparar grosores, dureza y aspecto superficial en las probetas, se eligieron probetas con tiempo de rociado de 1.5 minutos por tener las mejores condiciones de aspecto superficial y rango del grosor recomendado por el fabricante (1.2 – 1.7 (mm)). Cabe destacar que las probetas con tiempo de rociado de 3 minutos, presentaron desprendimiento, como se puede ver en la fig. 5.2.



Fig. 5.2 Probeta con tiempo de rociado de 3 min. 10X
(Vista lateral enfocando desprendimiento del recubrimiento)

Habiendo elegido las probetas de 1.5 minutos como ya se había mencionado, se tuvo que asegurar la misma altura de espiga de las tres probetas con recubrimiento que se someterían a las pruebas de desgaste, para ello se carearon dichas probetas en un torno paralelo convencional; con ello se obtuvo un mismo plano de desgaste así como la mayor área posible de contacto de las tres probetas sobre el disco de desgaste.

En la fig. 5.3 se puede observar una de las probetas con un solo plano en la superficie a desgastarse y con la misma altura en espiga, que requirió el arreglo de las tres probetas sometidas a desgaste.

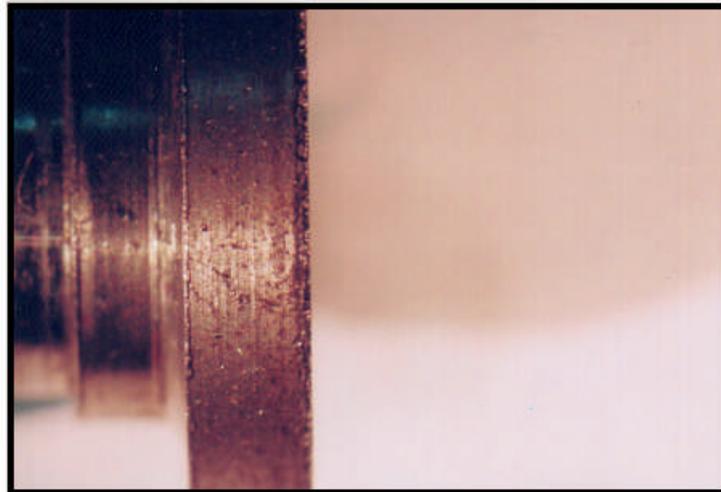


Fig. 5.3 Probeta 2, con recubrimiento, tiempo de rociado =1.5 minutos, careada 6.3X (Vista lateral).

Antes de someter el arreglo de probetas a los ensayos de desgaste se midieron grosores de dichas probetas, estas mediciones se efectuaron también después de los ensayos para verificar si existía un cambio significativo en su grosor, estos datos los muestra la tabla 5.2.

PROBETAS RECUBIERTAS METCO 12C "CAREADAS"			
<i>PROBETA</i>	<i>SUPERFICIE DEL RECUBRIMIENTO</i>	<i>ESPEJOR DEL RECUBRIMIENTO ANTES DE ENSAYOS (mm)</i>	<i>ESPEJOR DEL RECUBRIMIENTO DESPUES DE ENSAYOS (mm)</i>
1	MUY BUENO	0.30	0.15
2	MUY BUENO	0.30	0.20
3	MUY BUENO	0.30	0.20

Tabla 5.2 Condiciones de espesores en arreglo de probetas sometidas a desgaste.

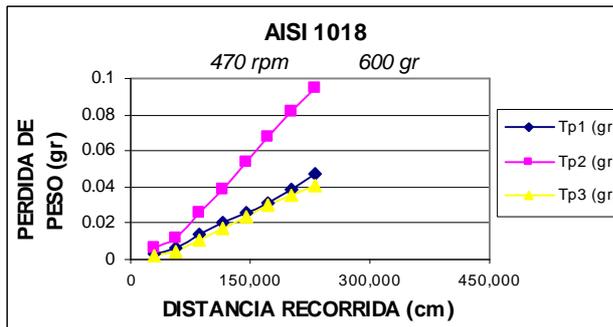
Al tener probetas con las mejores condiciones de proyección y misma altura de espiga, se reunieron las condiciones necesarias para tener resultados confiables en los ensayos de desgaste. Los resultados en pérdida de peso y razón de desgaste son de las tres probetas en el arreglo de las pruebas. El tener 3 probetas con las mismas condiciones de prueba o ensayo es de gran utilidad para tener un rango de resultados confiable, es decir para una prueba con las mismas condiciones de velocidad y carga tendremos tres resultados que no necesariamente serán los mismos; así se ubica el menor y mayor valor de cada prueba.

En la tabla 5.3 y 5.4 se presentan rangos de resultados máximos de pérdida de peso a las distancias recorridas para ambos materiales con recubrimiento Metco 12C así como el del material base sin recubrir AISI 1018.

AISI 1018			
	So=230,341 (cm) 470 rpm	So=220,539 (cm) 900 rpm	So=441,079 (cm) 900 rpm
Carga (gr)	Pérdida de peso máximo (gr)		
150	0.0040 - 0.0126	0.0037 - 0.0130	0.0099 - 0.0220
300	0.0258 - 0.0808	0.0030 - 0.0119	0.0076 - 0.0259
600	0.0408 - 0.0948	0.0084 - 0.0103	0.0120 - 0.0300

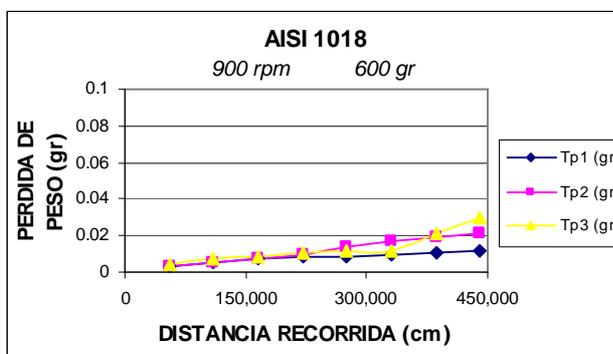
Tabla 5.3 Pérdida de peso máximo para probetas sin recubrir.

Los resultados de pérdida de peso de las probetas sin recubrimiento muestran que con una carga de 600 (gr.) y 470 RPM se presentan valores máximos de pérdida de peso a los 230,341 (cm), si comparamos a una distancia recorrida cercana (220,539 (cm)) y carga aplicada (600 (gr.)), pero a 900 RPM resulta que está por debajo de los valores máximos obtenidos a 470 RPM, por lo menos 9 veces menos. Esto se nota con mayor detalle en la gráfica 5.1 con las condiciones de prueba en donde se manifestaron las máximas de pérdidas de peso comparándolas con la gráfica 5.2 en donde cambia únicamente la velocidad a 900 RPM.



Gráfica 5.1

En la gráfica 5.1 se observa la tendencia positiva de las tres probetas, el rango máximo es de 0.0408 (gr.), para la probeta 3 mientras la probeta 2 es de 0.0948 (gr.) a los 230,341 (cm) recorridos.



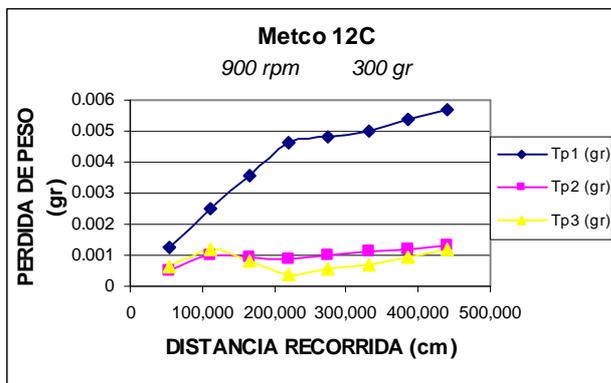
Gráfica 5.2

En la gráfica 5.2 se observa el comportamiento de las tres probetas, el rango máximo es de 0.0120 (gr.), para la probeta 3 mientras la probeta 1 es de 0.0300 (gr.) a los 441,079 (cm) recorridos. Cabe destacar que, ni con el doble de distancia recorrida se alcanzan los valores máximos que en las condiciones de 470 (RPM), están por lo menos 3 veces por debajo.

Metco 12C			
	So=230,341 (cm) 470 rpm	So=220,539 (cm) 900 rpm	So=441, 079 (cm) 900 rpm
Carga (gr)	Perdida de peso maximo (gr)		
150	0.0008 - 0.0012	0.0007 - 0.0011	0.0015 - 0.0025
300	0.0004 - 0.0010	0.0004 - 0.0046	0.0012 - 0.0057
600	0.0008 - 0.0012	0.0003 - 0.0005	0.0006 - 0.0026

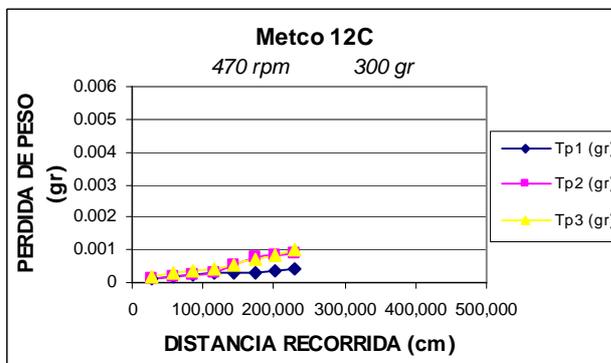
Tabla 5.4 Pérdida de peso máximo para probetas con recubrimiento.

Los resultados de pérdida de peso de las probetas con recubrimiento, muestran que con una carga de 300 (gr.) y 900 RPM se presentan valores máximos de pérdida de peso a los 220,539 (cm), si comparamos a una distancia recorrida cercana (230,341 (cm)) y carga aplicada (300 (gr.)), pero a 470 RPM resulta, que esta por debajo de los valores máximos obtenidos a 900 RPM, por lo menos 4 veces menos. Lo anterior se puede observar con más detalle en las siguientes gráficas:



Gráfica 5.3

En la gráfica 5.3 se observa que la probeta 1 destaca en la pérdida de peso mientras que las otras ganan peso, de esta forma se tiene que a los 220,539 (cm) recorridos, el rango de pérdida de peso es de 0.0004 a 0.0046 (gr), para el doble de distancia recorrida (441,079(cm.)) tenemos que su pérdida de peso es de 0.0012 a 0.0057 (cm). Estos datos son los máximos de todas las condiciones de experimentación.



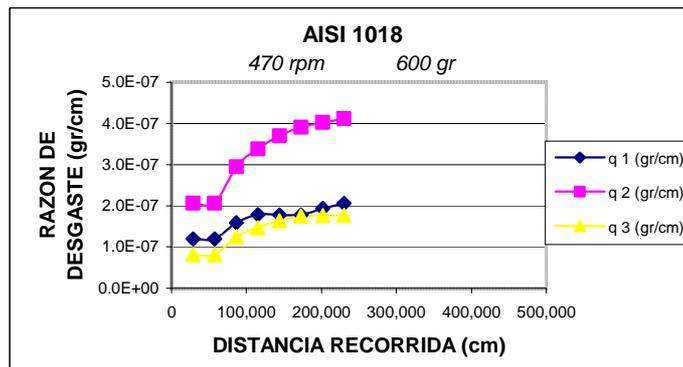
Gráfica 5.4

En la gráfica 5.4 se puede apreciar la tendencia positiva de pérdida de peso de las tres probetas y se incrementa en las probetas 2 y 3 a partir de 143,963 (cm) en donde el rango máximo de pérdida de peso es de 0.0004 a 0.0010 (gr) a los 230,341 (cm) recorridos. Dichos valores son menores que los obtenidos en la gráfica 5.3 a una distancia recorrida cercana (220,539 (cm)).

A diferencia de las probetas sin recubrir en donde se obtuvieron las máximas pérdidas de peso a menores revoluciones y mayor carga, las probetas con recubrimiento manifestaron las máximas de pérdida de peso a mayores revoluciones y carga media (300 gr).

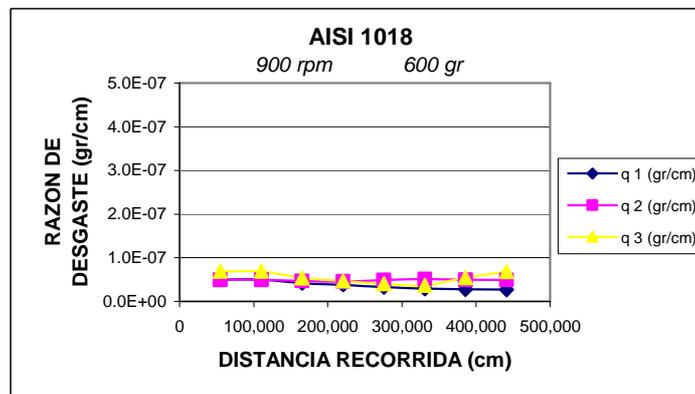
Para la razón de desgaste observaremos las gráficas para las mismas condiciones donde se presentaron los máximos valores de pérdida de peso.

Las gráficas 5.5 y 5.6 muestran el comportamiento de razón de desgaste para las probetas AISI 1018, en las mismas condiciones que en la pérdida de peso ya mostradas



Gráfica 5.5

En la gráfica 5.5 se puede apreciar la tendencia positiva de razón de desgaste de las tres probetas en donde la máxima, es de 1.8×10^{-7} a 4.1×10^{-7} (gr) a los 230341 (cm) recorridos.

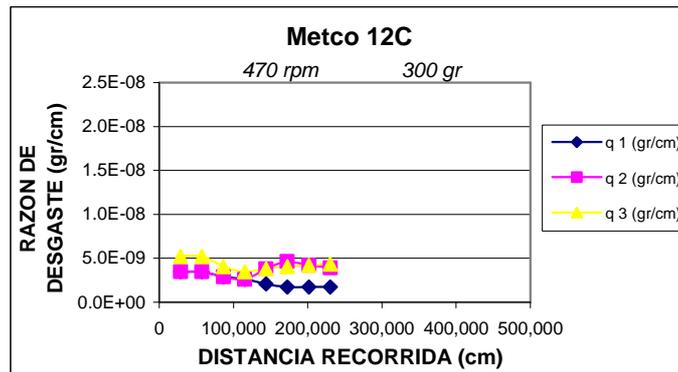


Gráfica 5.6

En la gráfica 5.6 se puede apreciar la tendencia negativa de razón de desgaste de las tres probetas en donde la máxima, es de 5.0×10^{-8} a 6.9×10^{-8} (gr) a los 55135 (cm) recorridos.

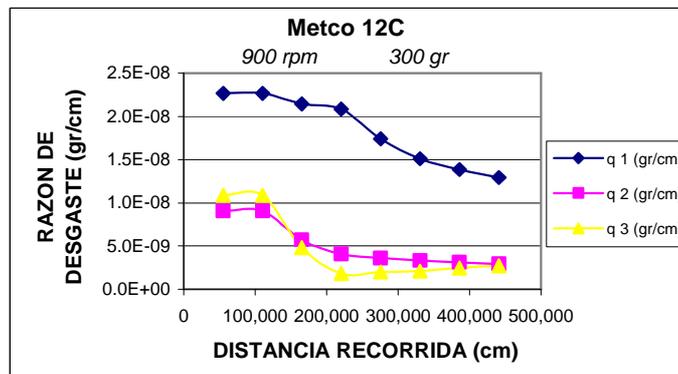
Las gráficas 5.7 y 5.8 muestran el comportamiento de razón de desgaste para las probetas recubiertas, en las mismas condiciones que en la pérdida de peso ya mostradas.

Para un mayor entendimiento de los comportamientos (pérdida de peso y razón de desgaste) manifestados en todos los ensayos, revisar el Anexo A. Ahí se proporcionan tablas y gráficas más detalladas.



Grafica 5.7

En la gráfica 5.7 se puede apreciar la tendencia de razón de desgaste de las tres probetas en donde la máxima, es de $3.5E-09$ a $5.2E-09$ (gr) a los 28,792 (cm) recorridos es decir en el primer intervalo de tiempo o lectura.



Grafica 5.8

En la gráfica 5.8 se puede apreciar la tendencia negativa de razón de desgaste de las tres probetas en donde la máxima, es de $9.1E-09$ a $1.1E-08$ (gr) a los 55,135 (cm) recorridos en el primer intervalo de tiempo o lectura.

Se obtuvieron imágenes de las probetas sometidas a desgaste en un macroscopio de marca Wild Photo macrosk modelo M400 de resolución 6.3 - 32 X. para poder justificar el tipo de desgaste manifestado en los ensayos.



Fig. 5.4 Macroscopio M400.

Imágenes de probetas sin recubrir AISI 1018

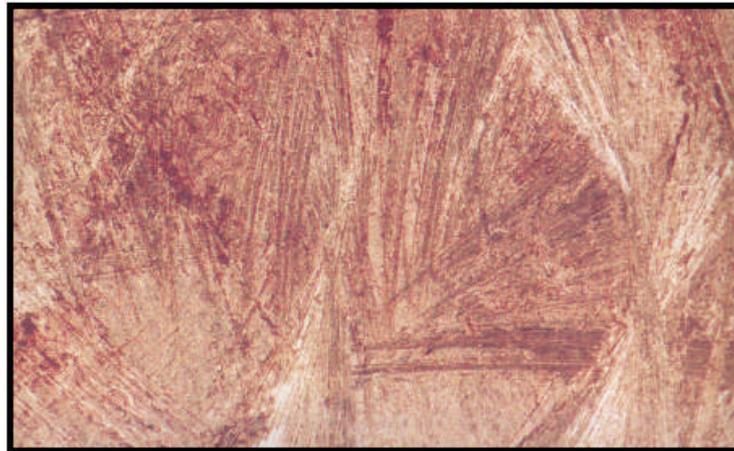


Fig. 5.5 Probeta 1 sin recubrir con desgaste 8X, en la imagen se observan las marcas del desgaste de tipo abrasivo

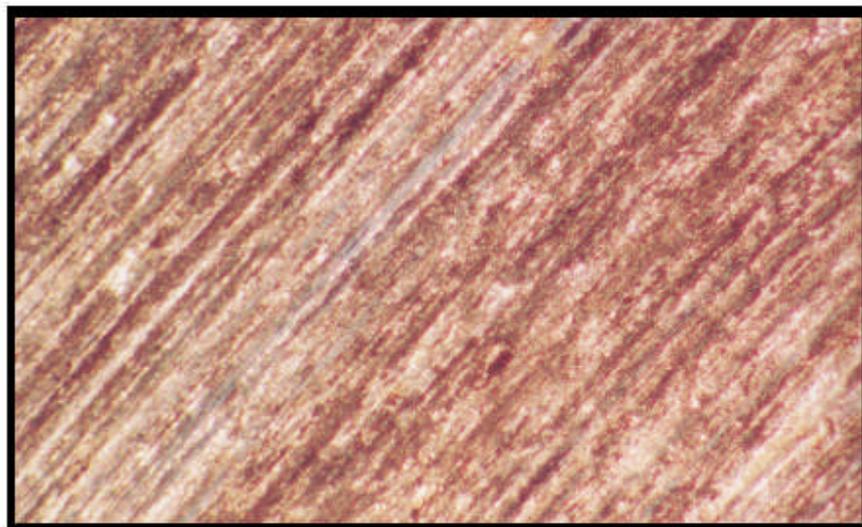


Fig. 5.6 Probeta 1 sin recubrir con desgaste 32X, en la imagen se observan las marcas del desgaste de tipo abrasivo, en la misma dirección debido al rodaje.

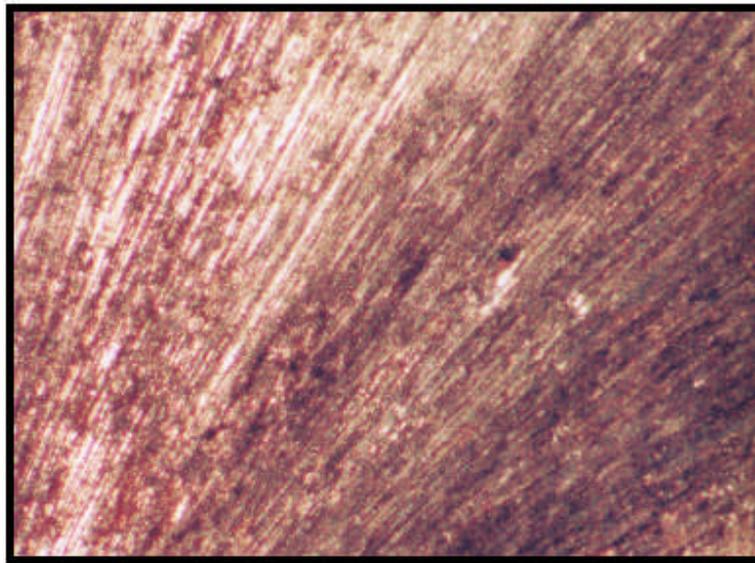


Fig. 5.7 Probeta 2 sin recubrir con desgaste 32X, en la imagen se observan las marcas del desgaste de tipo abrasivo, en la misma dirección debido al rodaje.

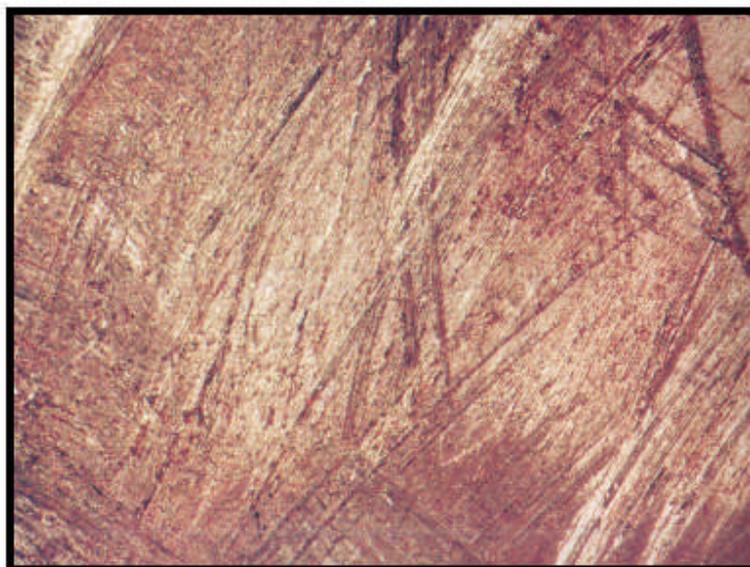


Fig. 5.8 Probeta 3 sin recubrir con desgaste 8X, en la imagen se observan las marcas del desgaste de tipo abrasivo, con diferentes planos de desgaste.

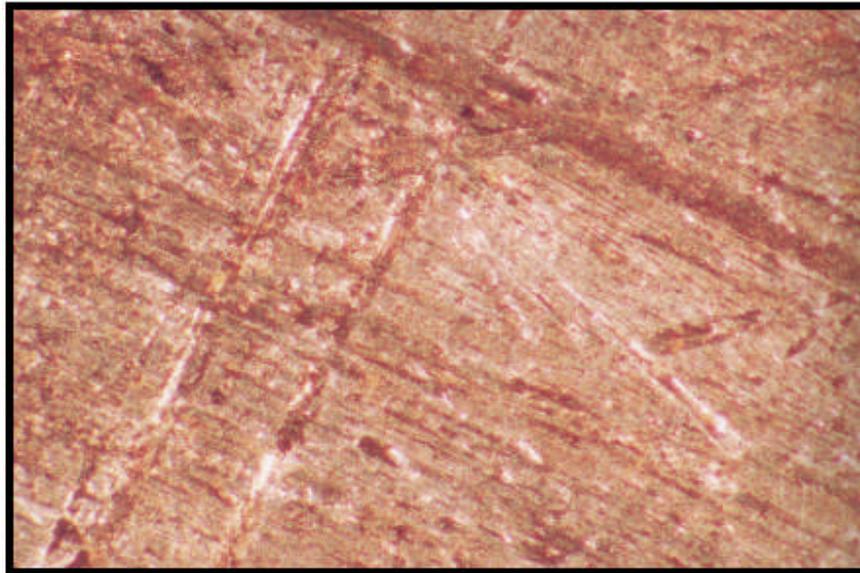


Fig. 5.9 Probeta 3 sin recubrir con desgaste 32X, en la imagen se observan claramente los surcos característicos del desgaste de tipo abrasivo, con diferentes planos de desgaste.

Imágenes de probetas recubiertas Metco 12C

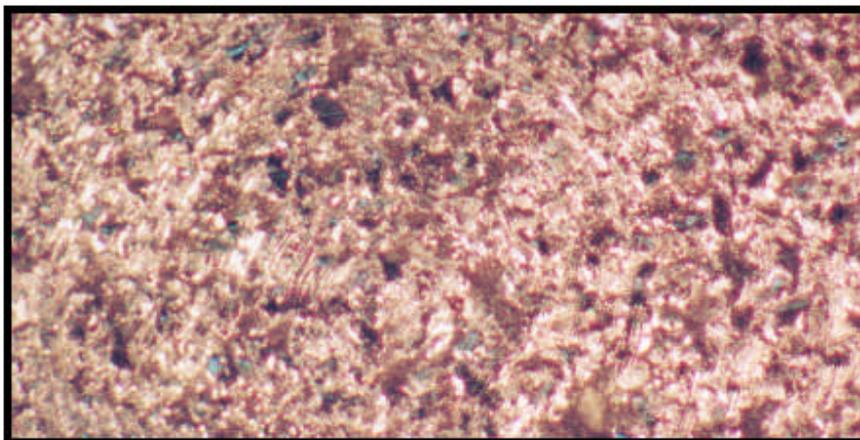


Fig. 5-10 Probeta 1 c/ recubrimiento t. de rociado =1.5 min. careada c/ desgaste 32X
En la imagen se observan las marcas concéntricas del careado, las huellas del desgaste abrasivo son casi imperceptibles para esta probeta.

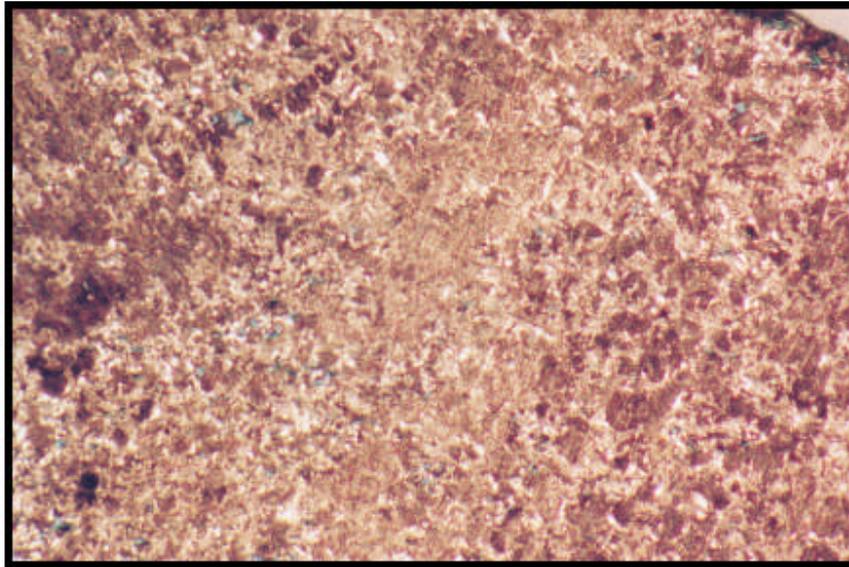


Fig.5.11 Probeta 1 c/ recubrimiento t. de rociado =1.5 min, careada c/ desgaste 20X
En la imagen se observan las huellas del desgaste abrasivo.

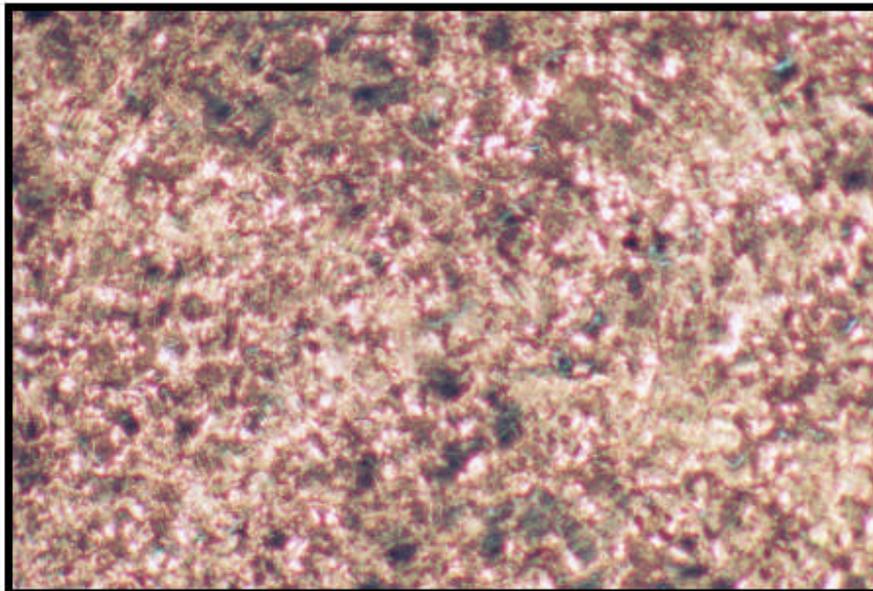


Fig. 5.12 Probeta 2 c/ recubrimiento t. de rociado =1.5 min careada con desgaste 32X
En la imagen se observan las marcas concéntricas del careado, las huellas del desgaste abrasivo son casi imperceptibles para esta probeta.

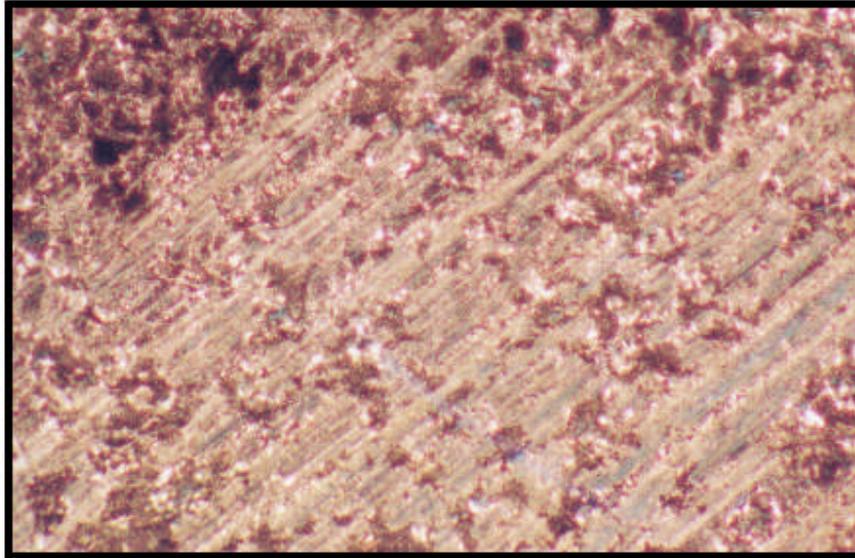


Fig. 5.13 Probeta 3 c/ recubrimiento t. rociado =1.5 min, careada c/ desgaste 32X
En esta imagen se hizo un acercamiento a la zona con mayor desgaste en la probeta. Y se observan claramente las líneas y surcos característicos del desgaste de tipo abrasivo.

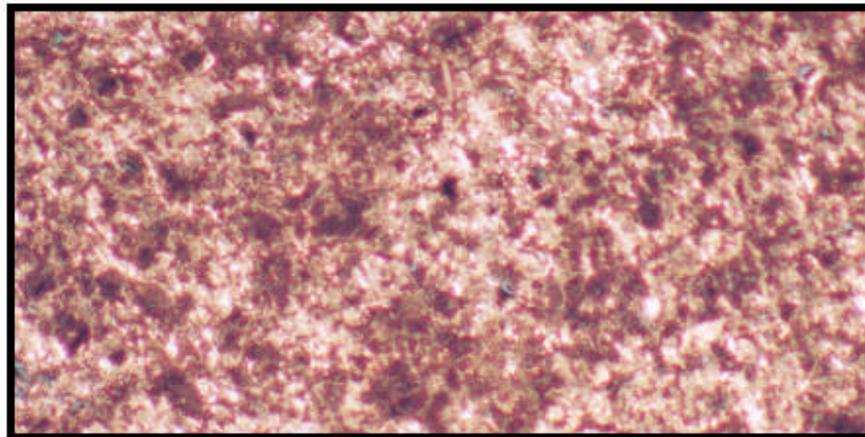


Fig. 5.14 Probeta 3 c/ recubrimiento t. rociado =1.5 min. careada c/ desgaste 32X
En esta imagen se hizo un acercamiento a la zona con menor desgaste en la probeta.



Fig.5.15 Probeta con recubrimiento, tiempo de rociado =1.5 min. sin desgaste

La imagen corresponde a una micrografía superficial tomada por medio de microscopía electrónica BSE a 20 kV y 200X. En la imagen se puede apreciar la microestructura del material, las zonas negras corresponden a la porosidad. Con claridad podemos apreciar las pequeñas gotas solidificadas denominadas "SPLATS"

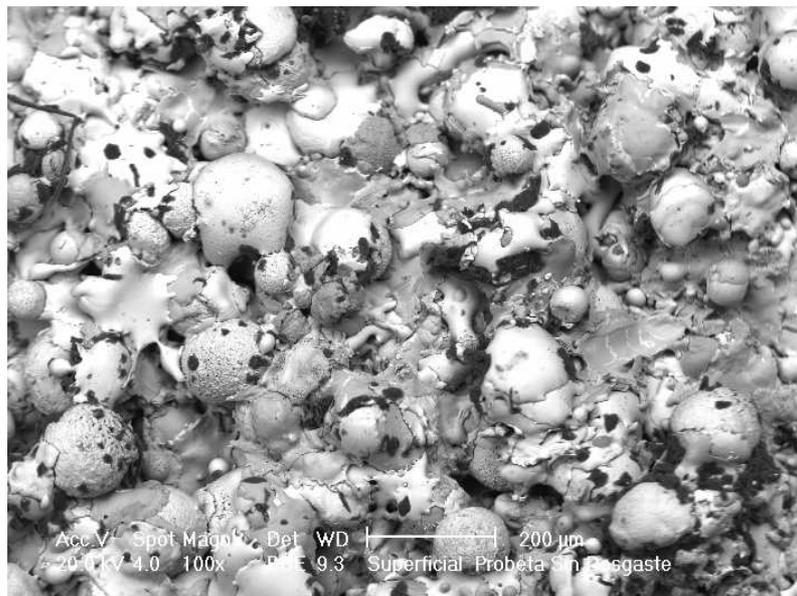


Fig.5.16 Probeta con recubrimiento, tiempo de rociado =1.5 min. Sin desgaste

La imagen corresponde a una micrografía superficial tomada por medio de microscopía electrónica BSE a 20 kV y 100X. Se pueden apreciar las microestructura del material y la densidad de los denominados "SPLATS"

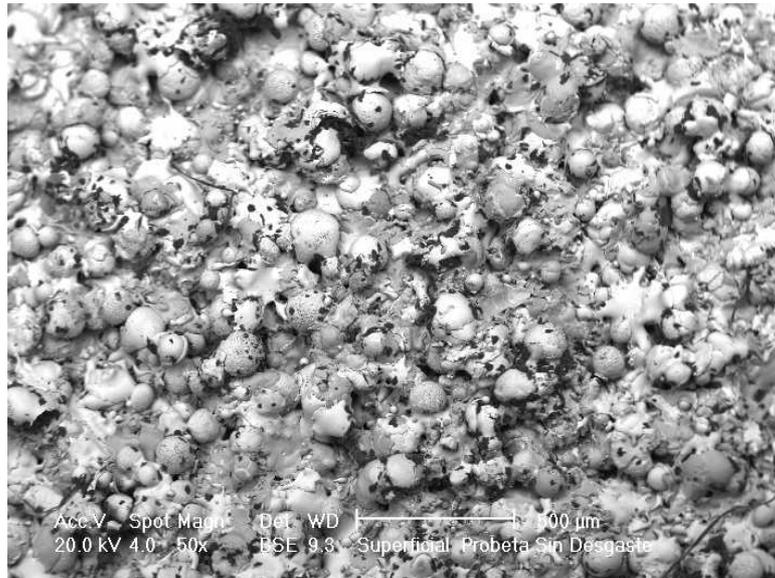


Fig.5.17 Probeta con recubrimiento, tiempo de rociado =1.5 min. Sin desgaste

La imagen corresponde a una micrografía superficial tomada por medio de microscopía electrónica BSE a 20 kV y 50X. Se pueden apreciar las microestructura del material y la densidad de los denominados "SPLATS"

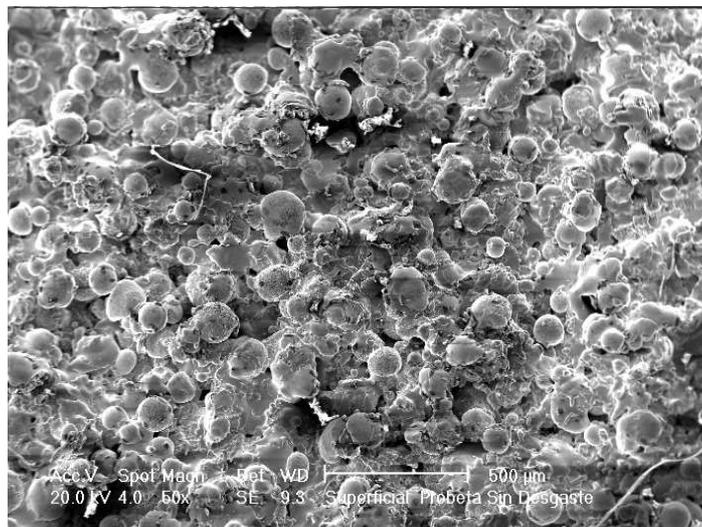


Fig.5.18 Probeta 3 con recubrimiento, tiempo de rociado =1.5 min. Sin desgaste.

La imagen corresponde a una micrografía superficial tomada por medio de microscopía electrónica SE a 20 kV y 50X. Se puede apreciar las microestructura del material y la densidad de los denominados "SPLATS"

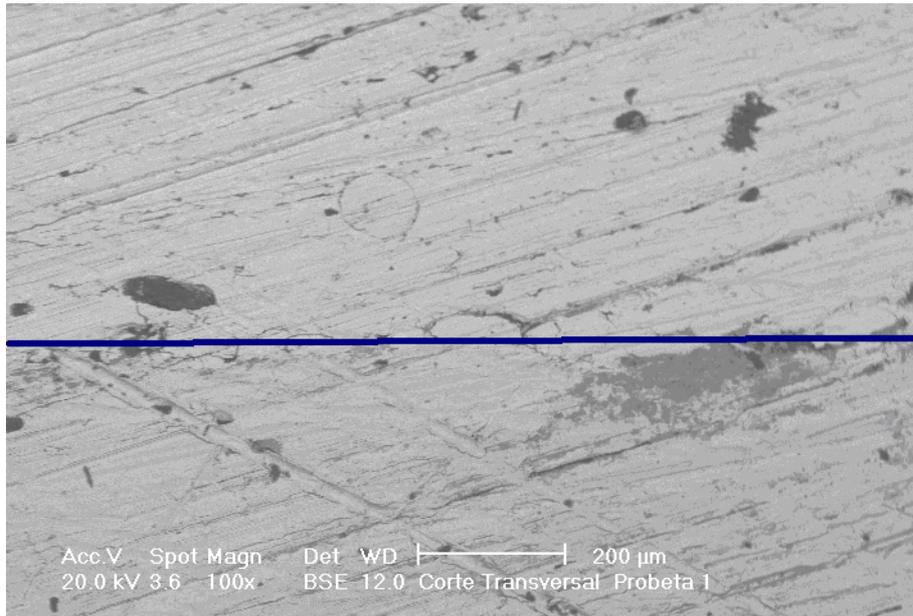


Fig.5.19 Probeta 3 con recubrimiento, tiempo de rociado =1.5 min. Sin desgaste

La imagen corresponde a una micrografía de corte transversal tomada por medio de microscopía electrónica BSE a 20 kV y 25X. Se pueden apreciar el sustrato de acero AISI 1018 por debajo de la línea, así como la estructura del recubrimiento de Cr,Ni,Fe,Si,B por arriba de la misma.

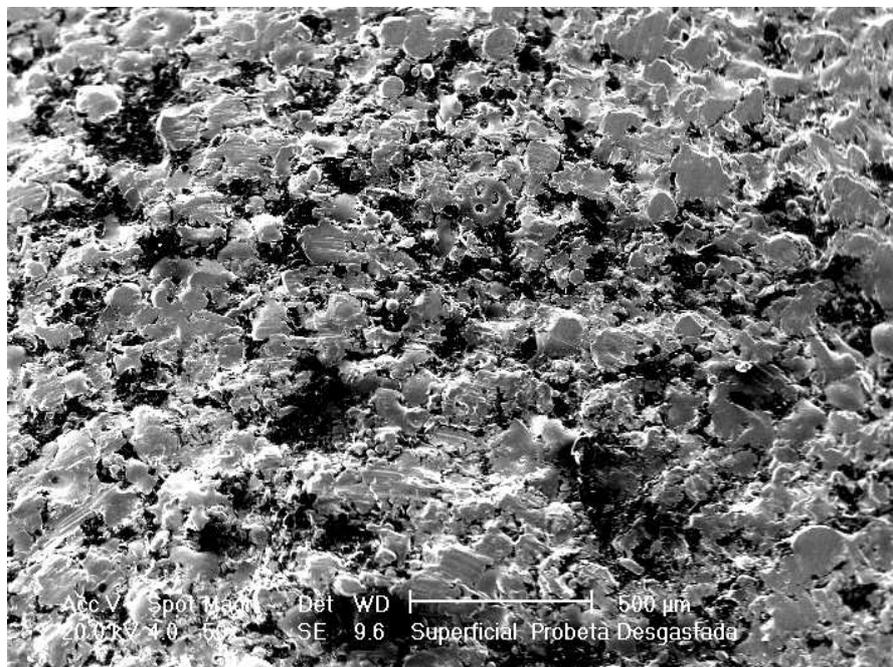


Fig. 5.20 Probeta 3 c/ recubrimiento t. rociado =1.5 min., careada c/ desgaste 50X
En la imagen se observan las huellas del desgaste abrasivo.

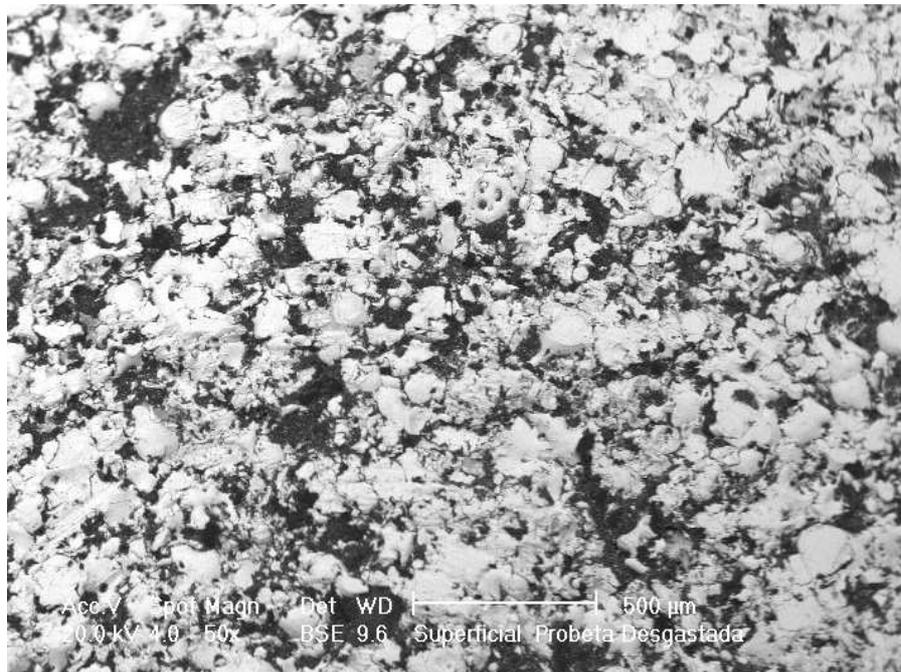


Fig. 5.21 Probeta 3 c/ recubrimiento t. rociado =1.5 min, careada c/ desgaste 50X
En la imagen se observan las huellas del desgaste abrasivo.

CONCLUSIONES

La cantidad de desgaste en un sistema en general, depende del número de factores que intervienen en dicho sistema; como la carga, características de la máquina, velocidad de deslizamiento, área de desgaste, el medio ambiente y las propiedades del material.

En este trabajo podemos concluir puntualmente lo siguiente:

- El tiempo óptimo de rociado térmico automatizado es de 1.5 minutos con un grosor de 1.3 mm. Ya que en este tiempo se presentan las mejores características de homogeneidad y espesor del recubrimiento. No se debe exceder de 3 minutos puesto que el recubrimiento será defectuoso y se desprenderá.
- Como se esperaba, el recubrimiento Metco 12C, redujo el desgaste del material base (AISI 1018) en por lo menos 70 veces en condiciones máximas experimentales (470 rpm y 600 gr.), la mayor resistencia a el desgaste en nuestro recubrimiento se debe, a las propiedades mecánicas del mismo, comenzando por su dureza (29 HRC), resistencia a mecanismos de desgaste, tales como el adhesivo, por fatiga, principalmente el abrasivo y desde luego, su resistencia a la corrosión.
- Podemos destacar que para los parámetros establecidos de experimentación, las condiciones críticas de desgaste del recubrimiento en estudio (metco 12C) son a mayor velocidad y carga media (900 RPM Y 300 gr.).
- Los mecanismos de desgaste que dan lugar a los distintos tipos de desgaste, se presentan de manera conjunta y no aislada. Aunque es difícil reconocer el tipo de desgaste, se puede concluir por el tipo de huellas dejadas en las probetas y la perdida o aumento de masa durante el deslizamiento.
- Los valores obtenidos en estas pruebas de desgaste son aproximaciones relativas para las condiciones establecidas en la experimentación. Puesto que en el método PIN ON DISK, jamás se podrán duplicar las condiciones siquiera entre dos ensayos que teóricamente serían iguales.
- El método PIN O DISK intenta simular condiciones de trabajo reales en la industria, pero sus limitaciones son demasiado grandes puesto que las condiciones reales en la industria, no serán siquiera similares a las de un laboratorio; un verdadero acercamiento a estas condiciones mencionadas deberían tomar en cuenta la temperatura ambiente, temperatura de trabajo del elemento mecánico, ambiente corrosivo, vibraciones mecánicas, cargas, velocidades de trabajo, condiciones de lubricación, etc.

Observaciones y Recomendaciones.

Como ya se ha mencionado a lo largo de esta Tesis, la dificultad para obtener resultados confiables en pruebas mecánicas de desgaste es muy grande aún y cuando se cuente con el equipo, asesoría, métodos sofisticados y modernos. La tribología esta en pleno desarrollo e ir a la vanguardia, al parecer como en la mayoría de las disciplinas, es tarea de los países de primer mundo.

En este trabajo se tienen serias limitaciones en cuanto a las condiciones anteriormente mencionadas, hacer funcionar la máquina para pruebas de desgaste fue una tarea complicada. Así que una recomendación importante es actualizar o renovar el equipo.

Sugerencias para trabajos a futuro.

Una caracterización de un material es una tarea larga y exhaustiva, este trabajo sólo involucro la problemática del desgaste en este tipo de recubrimientos. Por lo cual a continuación se presenta una propuesta de posibles trabajos a futuro:

- Pruebas de Adhesión.
- Pruebas de Corrosión.
- Pruebas de Estabilidad Termomecánica.
- Pruebas destructivas (Impacto, Compresión, etc.)
- Pruebas no destructivas (emisiones acústicas, ultrasonido, microtomografías. etc.)
- Determinación de esfuerzos residuales.

Anexo A

Tablas y graficas detalladas de ensayos de desgaste

Se presentan resultados detallados de perdida de peso y razón de desgaste contra distancia recorrida, para ambos materiales, con recubrimiento metco 12C, así como del material base sin recubrir AISI 1018, después se hacen comparaciones de los mismos.

De acuerdo a los ensayos realizados, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Perdida de peso

Cabe destacar que el rango de las graficas de cada material es el mismo para todas las graficas, esto con el fin de hacer notar la diferencia en la perdida de peso de las probetas en sus diferentes condiciones de prueba. Los resultados en cada grafica, son de tres probetas con las mismas condiciones de recubrimiento, así mismo de las condiciones de desgaste en los ensayos.

Probetas sin recubrir AISI 1018 (Tp)

A condiciones de 470 RPM y 150 gr de carga.

So (cm)	Tp1 (gr)	Tp2 (gr)	Tp3 (gr)
28792.7	0.0009	0.0023	0.0008
57585.4	0.0018	0.0046	0.0015
86378.1	0.0018	0.0058	0.0020
115170.8	0.0018	0.0070	0.0025
143963.5	0.0023	0.0084	0.0041
172756.2	0.0028	0.0098	0.0058
201548.9	0.0034	0.0112	0.0075
230341.6	0.0040	0.0126	0.0091

Tabla A.1

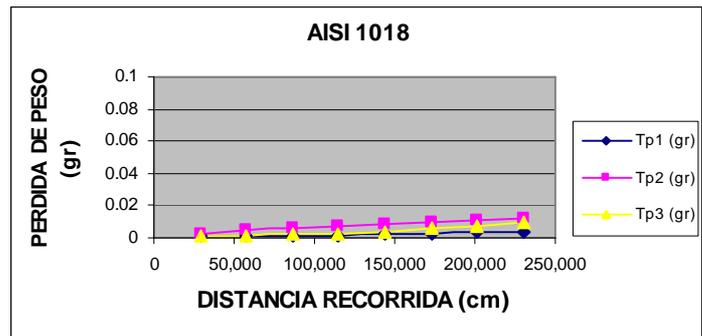
En la grafica A.1, la máxima de perdida de peso, es de un rango de 0.0040 a 0.0126 (gr) a los 230,341 (cm) recorridos. Su comportamiento es lineal., es decir a mayor distancia mayor perdida de peso.

A condiciones de 470 RPM y 300 gr de carga.

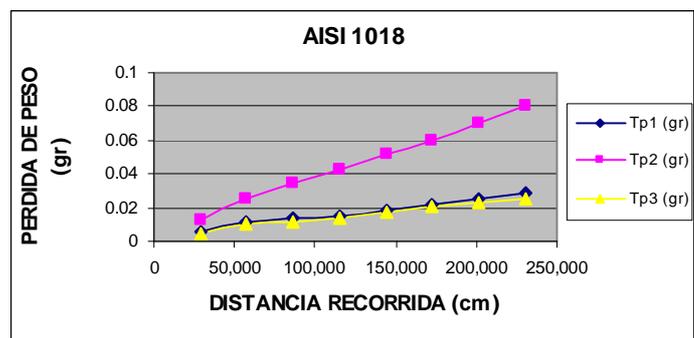
So (cm)	Tp1 (gr)	Tp2 (gr)	Tp3 (gr)
28792.7	0.0060	0.0128	0.0051
57585.4	0.0120	0.0255	0.0102
86378.1	0.0137	0.0342	0.0119
115170.8	0.0155	0.0429	0.0135
143963.5	0.0190	0.0512	0.0172
172756.2	0.0224	0.0595	0.0209
201548.9	0.0258	0.0702	0.0234
230341.6	0.0292	0.0808	0.0258

Tabla A.2

En la grafica A.2, la tendencia positiva de perdida de peso es máxima en un rango de 0.0258 a 0.0808 (gr) a los 230,341 (cm) recorridos.



Grafica A.1



Grafica A.2

A condiciones de 470 RPM y 600 gr de carga.

So (cm)	Tp1 (gr)	Tp2 (gr)	Tp3 (gr)
28792.7	0.0035	0.0060	0.0023
57585.4	0.0069	0.0119	0.0047
86378.1	0.0137	0.0255	0.0108
115170.8	0.0206	0.0390	0.0169
143963.5	0.0256	0.0533	0.0236
172756.2	0.0307	0.0676	0.0303
201548.9	0.0390	0.0812	0.0356
230341.6	0.0474	0.0948	0.0408

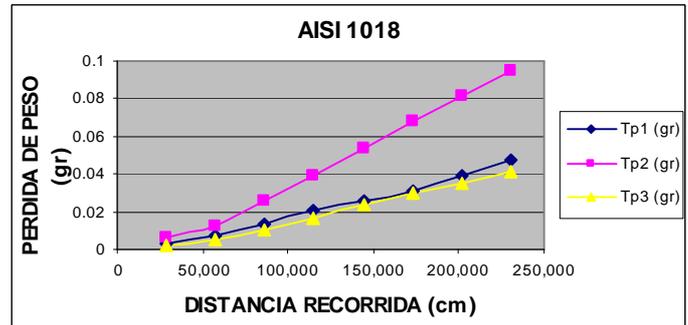


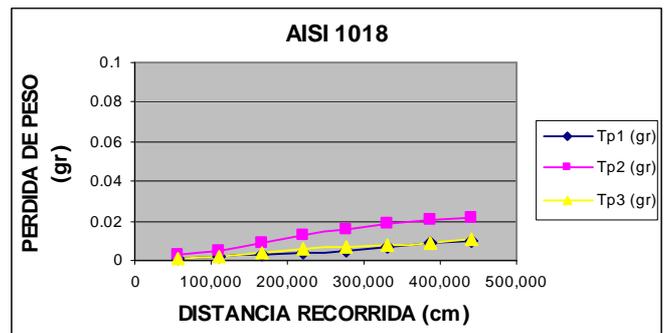
Tabla A.3

Tabla A.3

En la grafica A.3 se nota la tendencia positiva de perdida de peso de las tres probetas, en donde la máxima del material en perdida de peso esta en rango de 0.0408 a 0.0948 (gr) a los 230,341 (cm) recorridos. Se observa que con estas condiciones, se tiene 7 veces más perdida de peso que con las condiciones de la grafica A.1.

A condiciones de 900 RPM y 150 gr de carga.

So (cm)	Tp1 (gr)	Tp2 (gr)	Tp3 (gr)
55135.0	0.0012	0.0025	0.0010
110269.9	0.0024	0.0050	0.0021
165404.9	0.0030	0.0090	0.0038
220539.8	0.0037	0.0130	0.0054
275674.8	0.0053	0.0158	0.0064
330809.7	0.0068	0.0185	0.0074
385944.7	0.0083	0.0203	0.0090
441079.6	0.0099	0.0220	0.0105



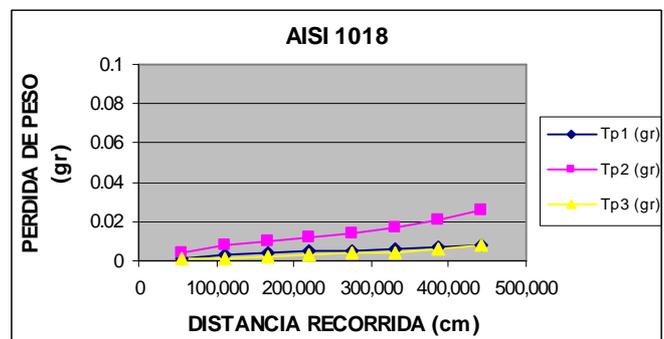
Grafica A.4

Tabla A.4

En la grafica 5.4 y las siguientes tres, las distancias recorridas se incrementan casi al doble, se puede observar que a la distancia de 220,539 (cm) la máxima de perdida de peso, es en un rango de 0.0037 a 0.0130 (gr), si los comparamos con los rangos máximos de la grafica y tabla A.1, se observa que con 9,802 (cm) menos de distancia recorrida se rebasa el máximo de perdida de masa de aquellas condiciones.

A condiciones de 900 RPM y 300 gr de carga.

So (cm)	Tp1 (gr)	Tp2 (gr)	Tp3 (gr)
55135.0	0.0012	0.0039	0.0006
110269.9	0.0025	0.0079	0.0012
165404.9	0.0037	0.0099	0.0021
220539.8	0.0049	0.0119	0.0030
275674.8	0.0053	0.0142	0.0037
330809.7	0.0058	0.0164	0.0044
385944.7	0.0070	0.0212	0.0060
441079.6	0.0082	0.0259	0.0076



Grafica A.5

Tabla A.5

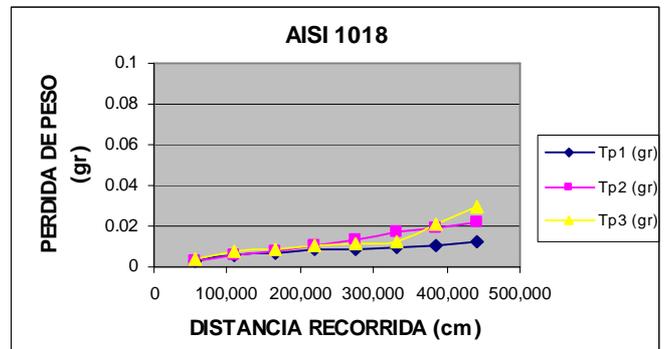
En la grafica A.5 la máxima de perdida de peso, es de 0.0076 a 0.0259 (gr) a los 441,079 (cm) de distancia recorrida.

A condiciones de 900 RPM y 600 gr de carga.

So (cm)	Tp1 (gr)	Tp2 (gr)	Tp3 (gr)
55135.0	0.0027	0.0027	0.0038
110269.9	0.0055	0.0055	0.0076
165404.9	0.0070	0.0078	0.0089
220539.8	0.0084	0.0101	0.0103
275674.8	0.0090	0.0135	0.0112
330809.7	0.0096	0.0169	0.0122
385944.7	0.0108	0.0192	0.0211
441079.6	0.0120	0.0215	0.0300

Tabla A.6

En la grafica A.6 se observa la tendencia de las tres probetas, el rango máximo es de 0.0120 a 0.03 (gr) en los 441,079 (cm) recorridos.



Grafica A.6

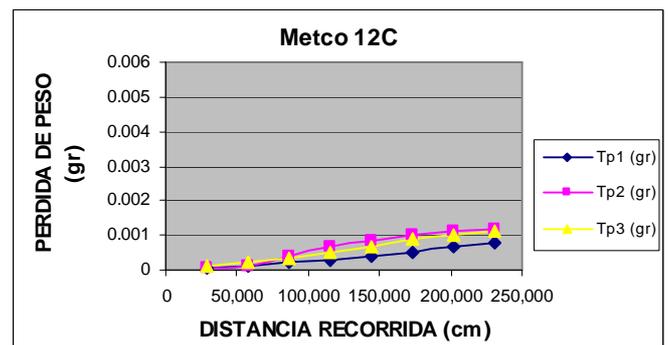
Probetas recubiertas Metco 12C

A condiciones de 470 RPM y 150 gr de carga.

So (cm)	Tp1 (gr)	Tp2 (gr)	Tp3 (gr)
28792.7	0.0000	0.0000	0.0001
57585.4	0.0001	0.0001	0.0002
86378.1	0.0002	0.0004	0.0003
115170.8	0.0003	0.0007	0.0005
143963.5	0.0004	0.0009	0.0007
172756.2	0.0005	0.0010	0.0009
201548.9	0.0007	0.0011	0.0010
230341.6	0.0008	0.0012	0.0011

Tabla A.7

En la grafica A.7 se puede apreciar la tendencia positiva casi lineal de perdida de peso de las tres probetas en donde la máxima de perdida de peso, es de 0.0008 a 0.0012 (gr) a los 230,341 (cm) recorridos.

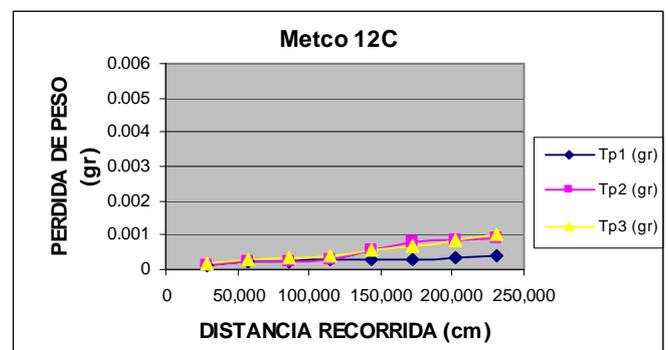


Grafica A.7

A condiciones de 470 RPM y 300 gr de carga.

So (cm)	Tp1 (gr)	Tp2 (gr)	Tp3 (gr)
28792.7	0.0001	0.0001	0.0001
57585.4	0.0002	0.0002	0.0003
86378.1	0.0002	0.0002	0.0003
115170.8	0.0003	0.0003	0.0004
143963.5	0.0003	0.0005	0.0006
172756.2	0.0003	0.0008	0.0007
201548.9	0.0003	0.0008	0.0008
230341.6	0.0004	0.0009	0.0010

Tabla A.8



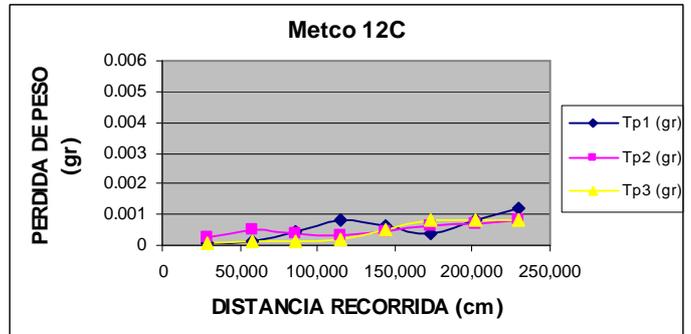
Grafica A.8

En la grafica A.8 se puede apreciar la tendencia positiva de perdida de peso de las tres probetas y se incrementa en las probetas 2 y 3 a partir de 143,963 (cm), en donde el rango maximo de perdida de peso, es de 0.0004 a 0.0010 (gr) a los 230,341 (cm) recorrido.

A condiciones de 470 RPM y 600 gr de carga.

So (cm)	Tp1 (gr)	Tp2 (gr)	Tp3 (gr)
28792.7	0.0000	0.0003	0.0001
57585.4	0.0001	0.0005	0.0001
86378.1	0.0004	0.0004	0.0002
115170.8	0.0008	0.0003	0.0002
143963.5	0.0006	0.0005	0.0005
172756.2	0.0004	0.0006	0.0008
201548.9	0.0008	0.0007	0.0008
230341.6	0.0012	0.0008	0.0008

Tabla A.9



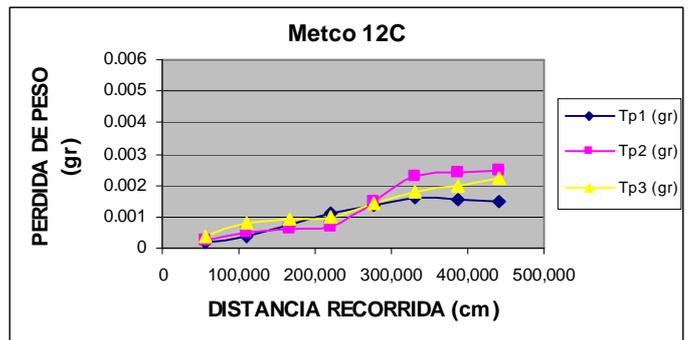
Grafica A.9

En la grafica A.9 se observa que el comportamiento ya no es lineal de principio a fin y se tiene perdidas de peso así como aumento de peso y el rango máximo de perdida de peso, es de 0.0008 a 0.0012 (gr) a los 230,341 (cm) recorridos. Las perdidas de peso máximas son iguales a las condiciones de la tabla 5.7 es decir con 150 gr.

A condiciones de 900 RPM y 150 gr de carga.

So (cm)	Tp1 (gr)	Tp2 (gr)	Tp3 (gr)
55135.0	0.0002	0.0003	0.0004
110269.9	0.0004	0.0005	0.0008
165404.9	0.0008	0.0006	0.0009
220539.8	0.0011	0.0007	0.0010
275674.8	0.0013	0.0015	0.0014
330809.7	0.0016	0.0023	0.0018
385944.7	0.0015	0.0024	0.0020
441079.6	0.0015	0.0025	0.0022

Tabla A.10



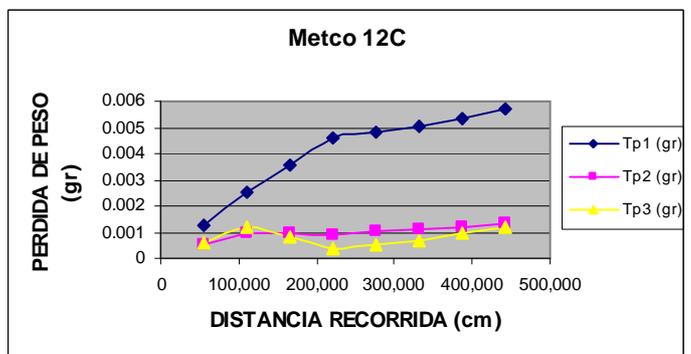
Grafica A.10

En la grafica A.10 se puede apreciar la tendencia positiva de perdida de peso de las tres probetas en donde la máxima de perdida de peso, a los 220,539 (cm) recorridos, es de 0.0007 a 0.0011 (gr) y a el doble de distancia recorrida es de 0.0015 a 0.0025 (gr).

A condiciones de 900 RPM y 300 gr de carga.

So (cm)	Tp1 (gr)	Tp2 (gr)	Tp3 (gr)
55135.0	0.0012	0.0005	0.0006
110269.9	0.0025	0.0010	0.0012
165404.9	0.0036	0.0009	0.0008
220539.8	0.0046	0.0009	0.0004
275674.8	0.0048	0.0010	0.0006
330809.7	0.0050	0.0011	0.0007
385944.7	0.0053	0.0012	0.0009
441079.6	0.0057	0.0013	0.0012

Tabla A.11



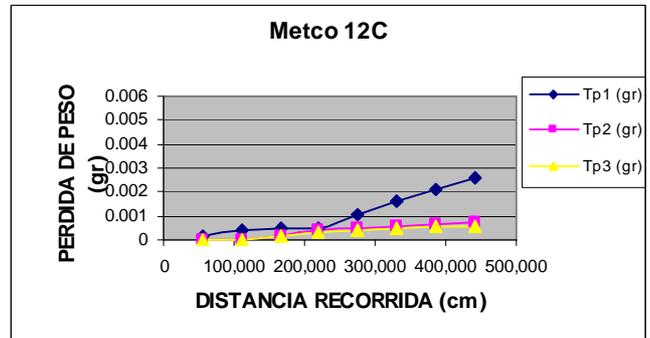
Grafica A.11

En la grafica A.11 se observa que la probeta 1 destaca en la perdida de peso mientras que las otras ganan peso de esta forma se tiene que a los 220,539 (cm) recorridos, la perdida de peso se manifiesta de 0.0004 a 0.0046 (gr) y a el doble de distancia recorrida (441,079 (cm)) es de 0.0012 a 0.0057 (cm). Estos datos son máximos, en todas las condiciones de experimentación.

A condiciones de 900 RPM y 600 gr de carga.

So (cm)	Tp1 (gr)	Tp2 (gr)	Tp3 (gr)
55135.0	0.0002	0.0000	0.0000
110269.9	0.0004	0.0000	0.0000
165404.9	0.0004	0.0002	0.0001
220539.8	0.0005	0.0004	0.0003
275674.8	0.0010	0.0005	0.0004
330809.7	0.0016	0.0006	0.0005
385944.7	0.0021	0.0007	0.0006
441079.6	0.0026	0.0007	0.0006

Tabla A.12



Grafica A.12

En la grafica A.12 se puede apreciar la tendencia positiva de perdida de peso de las tres probetas en donde la máxima de perdida de peso, a los 220,539 (cm) recorridos, es de 0.0003 a 0.0005 (gr) y a el doble de distancia recorrida es de 0.0006 a 0.0026 (gr).

Razón de desgaste.

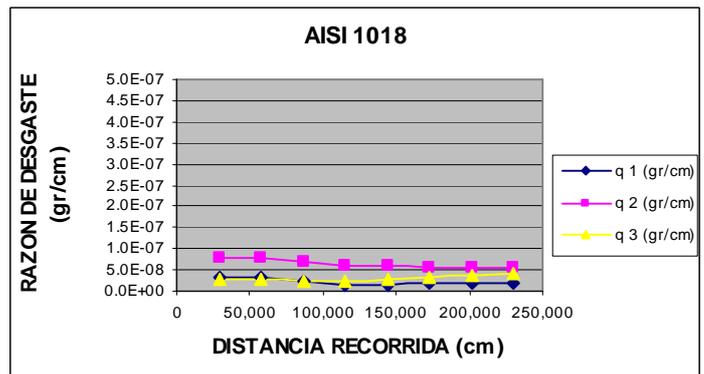
El rango de las graficas de cada material es el mismo para todas las graficas para hacer notar la diferencia en la razón de desgaste de las probetas con las diferentes condiciones a las que fueron sometidas a los ensayos.

Probetas sin recubrir AISI 1018 (q).

A condiciones de 470 RPM y 150 gr de carga.

So (cm)	q1(gr/cm)	q2 (gr/cm)	q3 (gr/cm)
28792.7	3.1E-08	8.0E-08	2.6E-08
57585.4	3.1E-08	8.0E-08	2.6E-08
86378.1	2.1E-08	6.7E-08	2.3E-08
115170.8	1.6E-08	6.1E-08	2.2E-08
143963.5	1.6E-08	5.8E-08	2.9E-08
172756.2	1.6E-08	5.7E-08	3.4E-08
201548.9	1.7E-08	5.6E-08	3.7E-08
230341.6	1.7E-08	5.5E-08	4.0E-08

Tabla A.13



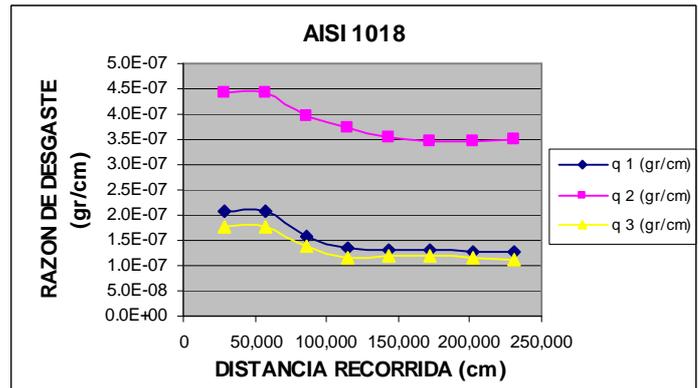
Grafica A.13

En la grafica A.13 se puede apreciar la tendencia de razón de desgaste de las tres probetas en donde la máxima, es de 2.6E-08 a 8.0E-08 (gr) a los 28792 (cm) recorridos y desciende conforme avanza la distancia recorrida.

A condiciones de 470 RPM y 300 gr de carga.

So (cm)	q1 (gr/cm)	q2 (gr/cm)	q3 (gr/cm)
28792.7	2.1E-07	4.4E-07	1.8E-07
57585.4	2.1E-07	4.4E-07	1.8E-07
86378.1	1.6E-07	4.0E-07	1.4E-07
115170.8	1.3E-07	3.7E-07	1.2E-07
143963.5	1.3E-07	3.6E-07	1.2E-07
172756.2	1.3E-07	3.4E-07	1.2E-07
201548.9	1.3E-07	3.5E-07	1.2E-07
230341.6	1.3E-07	3.5E-07	1.1E-07

Tabla A.14



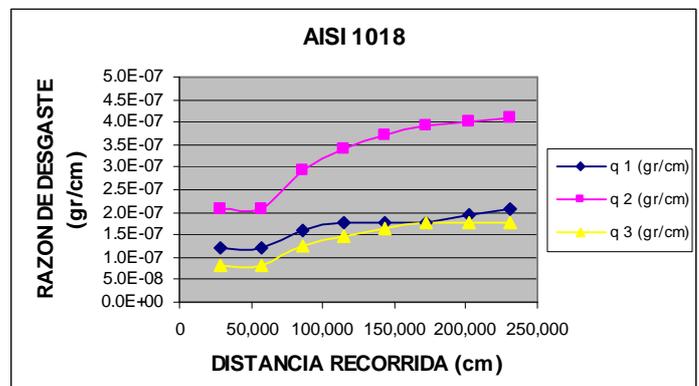
Grafica A.14

En la grafica A.14 se puede apreciar la tendencia de razón de desgaste de las tres probetas en donde la máxima, es de 1.8E-07 a 4.4E-07 (gr) a los 28792 (cm) recorridos y desciende conforme avanza la distancia recorrida.

A condiciones de 470 RPM y 600 gr de carga.

So (cm)	q1 (gr/cm)	q2 (gr/cm)	q3 (gr/cm)
28792.7	1.2E-07	2.1E-07	8.2E-08
57585.4	1.2E-07	2.1E-07	8.2E-08
86378.1	1.6E-07	2.9E-07	1.3E-07
115170.8	1.8E-07	3.4E-07	1.5E-07
143963.5	1.8E-07	3.7E-07	1.6E-07
172756.2	1.8E-07	3.9E-07	1.8E-07
201548.9	1.9E-07	4.0E-07	1.8E-07
230341.6	2.1E-07	4.1E-07	1.8E-07

Tabla A.15



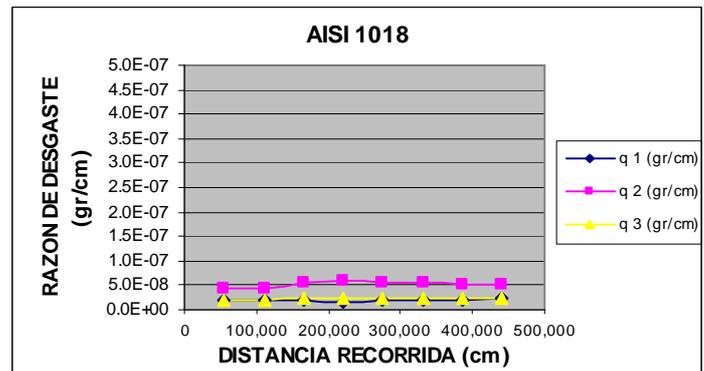
Grafica A.15

En la grafica A.15 se puede apreciar la tendencia de razón de desgaste de las tres probetas en donde la máxima, es de 1.8E-07 a 4.1E-07 (gr) a los 230341 (cm) recorridos.

A condiciones de 900 RPM y 150 gr de carga.

So (cm)	q1(gr/cm)	q 2(gr/cm)	q 3(gr/cm)
55135.0	2.2E-08	4.5E-08	1.9E-08
110269.9	2.2E-08	4.5E-08	1.9E-08
165404.9	1.8E-08	5.4E-08	2.3E-08
220539.8	1.7E-08	5.9E-08	2.4E-08
275674.8	1.9E-08	5.7E-08	2.3E-08
330809.7	2.1E-08	5.6E-08	2.2E-08
385944.7	2.2E-08	5.2E-08	2.3E-08
441079.6	2.2E-08	5.0E-08	2.4E-08

Tabla A.16



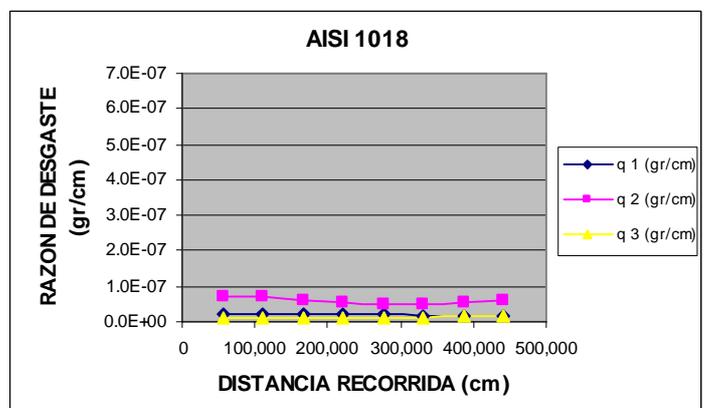
Grafica A.16

En la grafica A.16 se puede apreciar la tendencia de razón de desgaste de las tres probetas en donde la máxima, es de 1.7E-08 a 5.9E-08 (gr) a los 220539 (cm) recorridos.

A condiciones de 900 RPM y 300 gr de carga.

So (cm)	1(gr/cm)	q2 (gr/cm)	q3 (gr/cm)
55135.0	2.3E-08	7.2E-08	1.1E-08
110269.9	2.3E-08	7.2E-08	1.1E-08
165404.9	2.2E-08	6.0E-08	1.3E-08
220539.8	2.2E-08	5.4E-08	1.4E-08
275674.8	1.9E-08	5.1E-08	1.3E-08
330809.7	1.8E-08	5.0E-08	1.3E-08
385944.7	1.8E-08	5.5E-08	1.6E-08
441079.6	1.9E-08	5.9E-08	1.7E-08

Tabla A.17



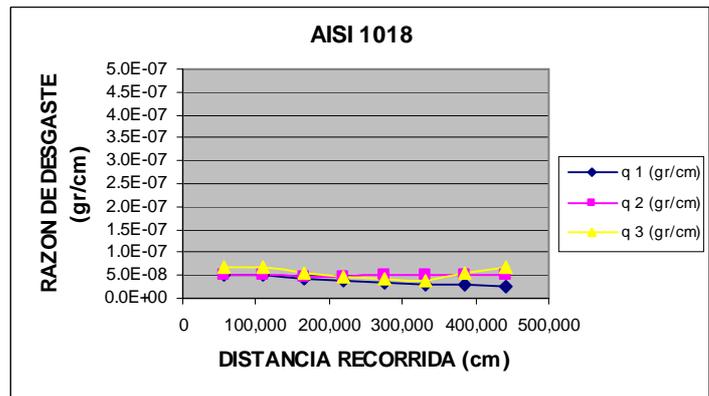
Grafica A.17

En la grafica A.17 se puede apreciar la tendencia de razón de desgaste de las tres probetas en donde la máxima, es de 1.1E-08 a 7.2E-08 (gr) a los 55135 (cm) recorridos.

A condiciones de 900 RPM y 600 gr de carga.

So (cm)	q1(gr/cm)	q2 (gr/cm)	q3 (gr/cm)
55135.0	5.0E-08	5.0E-08	6.9E-08
110269.9	5.0E-08	5.0E-08	6.9E-08
165404.9	4.2E-08	4.7E-08	5.4E-08
220539.8	3.8E-08	4.6E-08	4.7E-08
275674.8	3.3E-08	4.9E-08	4.1E-08
330809.7	2.9E-08	5.1E-08	3.7E-08
385944.7	2.8E-08	5.0E-08	5.5E-08
441079.6	2.7E-08	4.9E-08	6.8E-08

Tabla A.18



Gráfica A.18

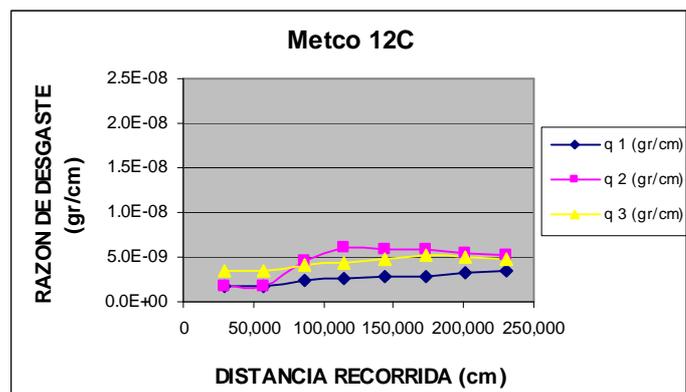
En la grafica A.18 se puede apreciar la tendencia de razón de desgaste de las tres probetas en donde la máxima, es de 5.0E-08 a 6.9E-08 (gr) a los 55135 (cm) recorridos.

Probetas recubiertas Metco 12C (q).

A condiciones de 470 RPM y 150 gr de carga.

So (cm)	q1(gr/cm)	q2 (gr/cm)	q3 (gr/cm)
28792.7	1.7E-09	1.7E-09	3.5E-09
57585.4	1.7E-09	1.7E-09	3.5E-09
86378.1	2.3E-09	4.6E-09	4.1E-09
115170.8	2.6E-09	6.1E-09	4.3E-09
143963.5	2.8E-09	5.9E-09	4.9E-09
172756.2	2.9E-09	5.8E-09	5.2E-09
201548.9	3.2E-09	5.5E-09	5.0E-09
230341.6	3.5E-09	5.2E-09	4.8E-09

Tabla A.19



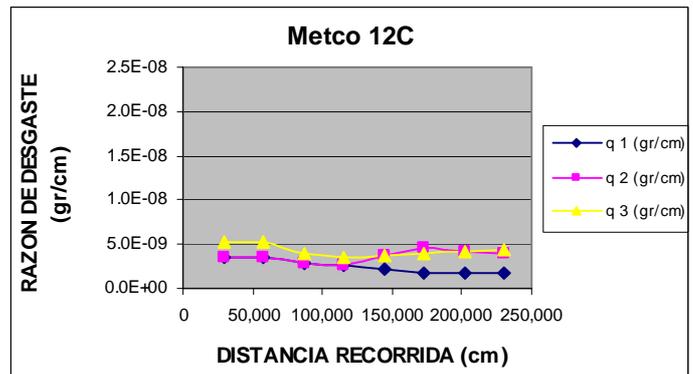
Gráfica A.19

En la grafica A.19 se puede apreciar la tendencia de razón de desgaste de las tres probetas en donde la máxima, es de 2.6E-09 a 6.1E-09 (gr) a los 11570 recorridos.

A condiciones de 470 RPM y 300 gr de carga.

So (cm)	q1(gr/cm)	q 2(gr/cm)	q 3(gr/cm)
28792.7	3.5E-09	3.5E-09	5.2E-09
57585.4	3.5E-09	3.5E-09	5.2E-09
86378.1	2.9E-09	2.9E-09	4.1E-09
115170.8	2.6E-09	2.6E-09	3.5E-09
143963.5	2.1E-09	3.8E-09	3.8E-09
172756.2	1.7E-09	4.6E-09	4.1E-09
201548.9	1.7E-09	4.2E-09	4.2E-09
230341.6	1.7E-09	3.9E-09	4.3E-09

Tabla A.20



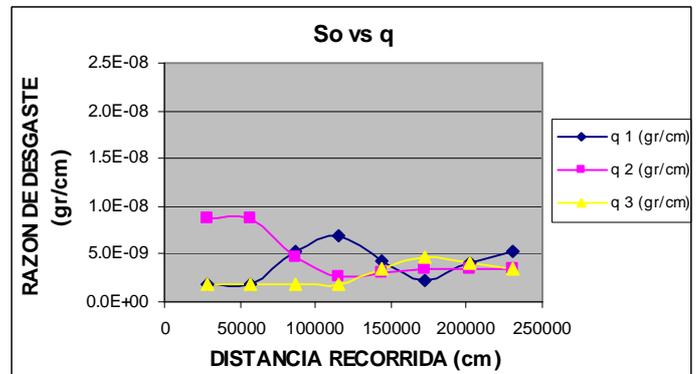
Grafica A.20

En la grafica A.20 se puede apreciar la tendencia de razón de desgaste de las tres probetas en donde la máxima, es de 3.5E-09 a 5.2E-09 (gr) a los 28792 recorridos.

A condiciones de 470 RPM y 600 gr de carga

So (cm)	q1(gr/cm)	q 2(gr/cm)	q 3(gr/cm)
28792.7	1.7E-09	8.7E-09	1.7E-09
57585.4	1.7E-09	8.7E-09	1.7E-09
86378.1	5.2E-09	4.6E-09	1.7E-09
115170.8	6.9E-09	2.6E-09	1.7E-09
143963.5	4.2E-09	3.1E-09	3.5E-09
172756.2	2.3E-09	3.5E-09	4.6E-09
201548.9	4.0E-09	3.5E-09	4.0E-09
230341.6	5.2E-09	3.5E-09	3.5E-09

Tabla 5.21



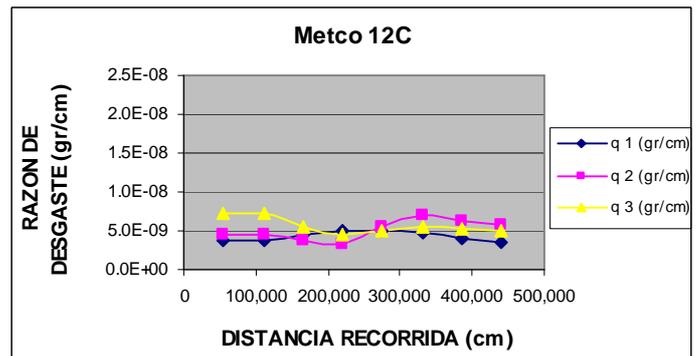
Grafica 5.21

En la grafica A.21 se puede apreciar la tendencia de razón de desgaste de las tres probetas en donde la máxima, es de 1.7E-09 a 8.7E-09 (gr) a los 28792 recorridos.

A condiciones de 900 RPM y 150 gr de carga

So (cm)	q1(gr/cm)	q 2(gr/cm)	q 3(gr/cm)
55135.0	3.6E-09	4.5E-09	7.3E-09
110269.9	3.6E-09	4.5E-09	7.3E-09
165404.9	4.5E-09	3.6E-09	5.4E-09
220539.8	5.0E-09	3.2E-09	4.5E-09
275674.8	4.9E-09	5.4E-09	5.1E-09
330809.7	4.8E-09	7.0E-09	5.4E-09
385944.7	4.0E-09	6.2E-09	5.2E-09
441079.6	3.4E-09	5.7E-09	5.0E-09

Tabla A.22



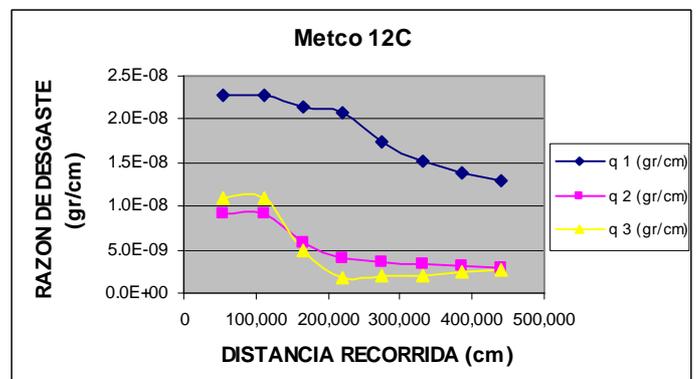
Grafica A.22

En la grafica A.22 se puede apreciar la tendencia de razón de desgaste de las tres probetas en donde la máxima, es de 3.6E-09 a 7.3E-09 (gr) a los 55135 recorridos.

A condiciones de 900 RPM y 300 gr de carga.

So (cm)	q1(gr/cm)	q 2(gr/cm)	q 3(gr/cm)
55135.0	2.3E-08	9.1E-09	1.1E-08
110269.9	2.3E-08	9.1E-09	1.1E-08
165404.9	2.1E-08	5.7E-09	4.8E-09
220539.8	2.1E-08	4.1E-09	1.8E-09
275674.8	1.7E-08	3.6E-09	2.0E-09
330809.7	1.5E-08	3.3E-09	2.1E-09
385944.7	1.4E-08	3.1E-09	2.5E-09
441079.6	1.3E-08	2.9E-09	2.7E-09

Tabla A.23



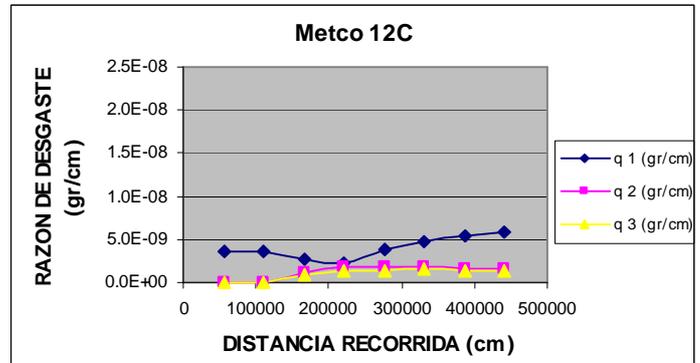
Grafica A.23

En la grafica A.23 se puede apreciar la tendencia de razón de desgaste de las tres probetas en donde la máxima, es de 9.1E-09 a 1.1E-08 (gr) a los 55135 recorridos.

A condiciones de 900 RPM y 600 gr de carga.

So (cm)	q1(gr/cm)	q 2(gr/cm)	q 3(gr/cm)
55135.0	3.6E-09	0.0E+00	0.0E+00
110269.9	3.6E-09	0.0E+00	0.0E+00
165404.9	2.7E-09	1.2E-09	9.1E-10
220539.8	2.3E-09	1.8E-09	1.4E-09
275674.8	3.8E-09	1.8E-09	1.5E-09
330809.7	4.8E-09	1.8E-09	1.5E-09
385944.7	5.4E-09	1.7E-09	1.4E-09
441079.6	5.9E-09	1.6E-09	1.4E-09

Tabla A.24

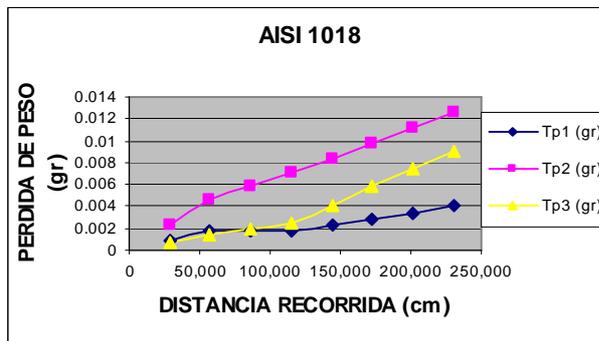


Grafica A.24

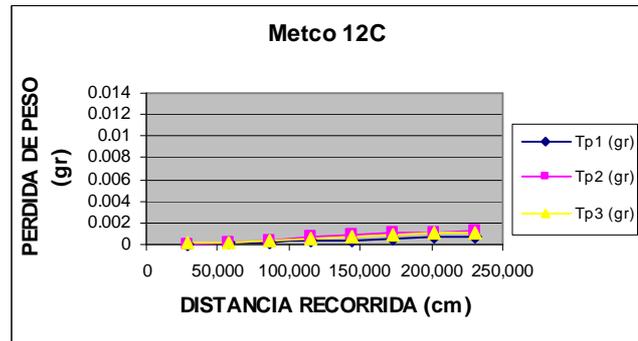
En la grafica A.24 se puede apreciar la tendencia de razón de desgaste de las tres probetas en donde la máxima, es de 5.4E-09 a 1.4E-08 (gr) a los 441079 recorridos.

Comparación de perdida de peso (Tp).

A condiciones de 470 RPM y 150 gr de carga.

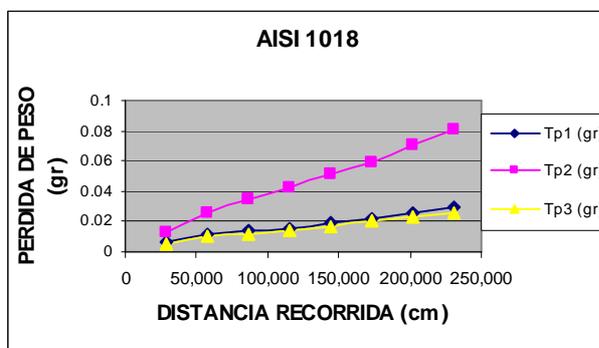


Grafica A.25

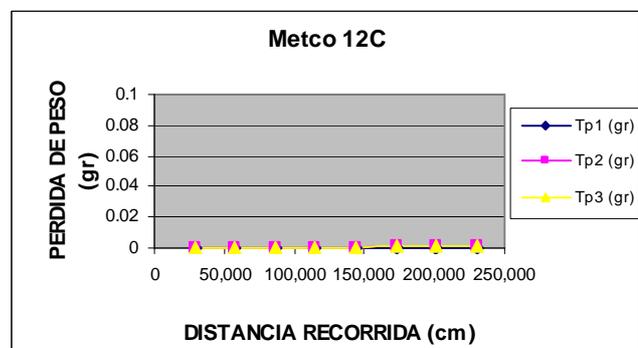


Grafica A.26

A condiciones de 470 RPM y 300 gr de carga.

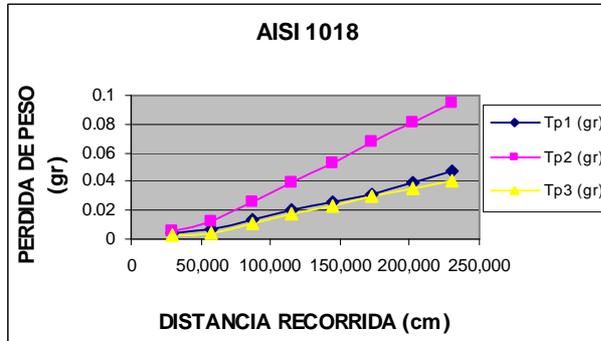


Grafica A.27

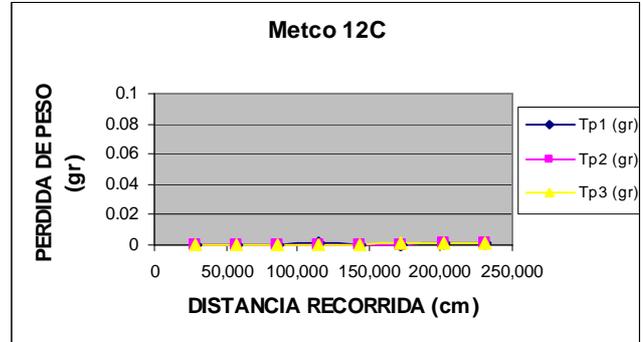


Grafica A.28

A condiciones de 470 RPM y 600 gr de carga.

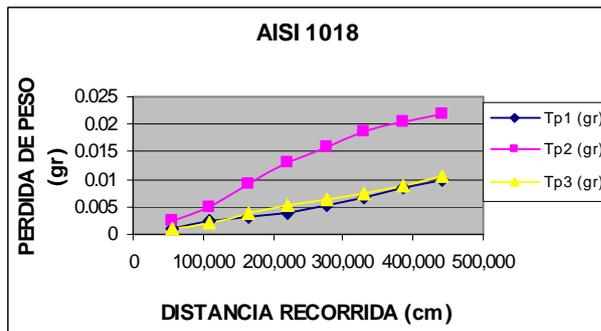


Grafica A.29

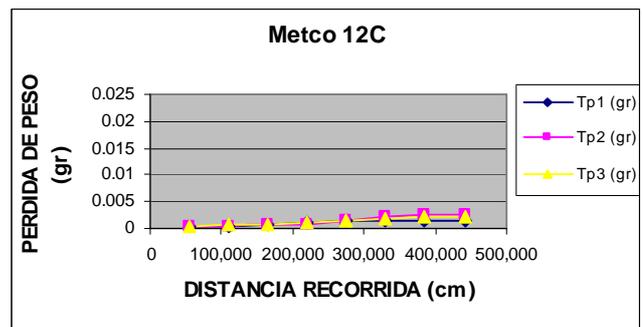


Grafica A.30

A condiciones de 900 RPM y 150 gr de carga.

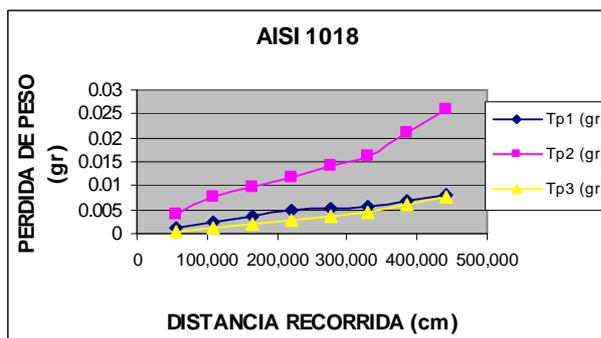


Grafica A.31

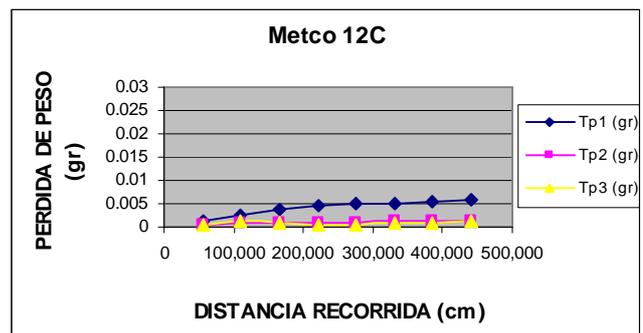


Grafica A.32

A condiciones de 900 RPM y 300 gr de carga.

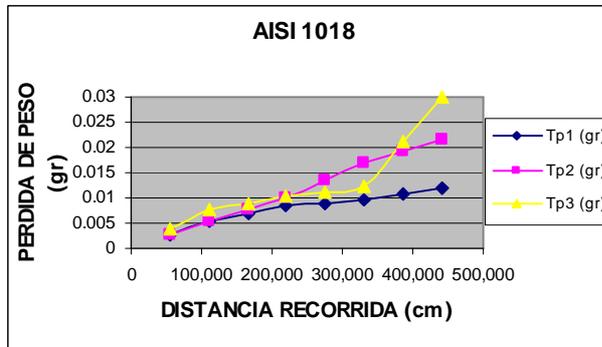


Grafica A.33

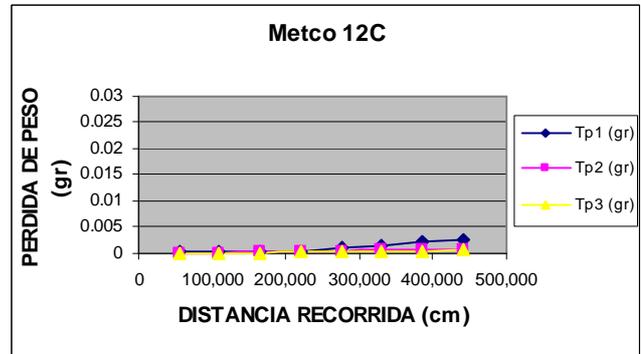


Grafica A.34

A condiciones de 900 RPM y 600 gr de carga.



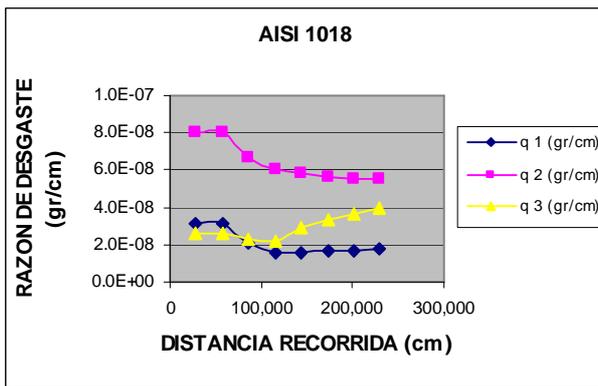
Grafica A.35



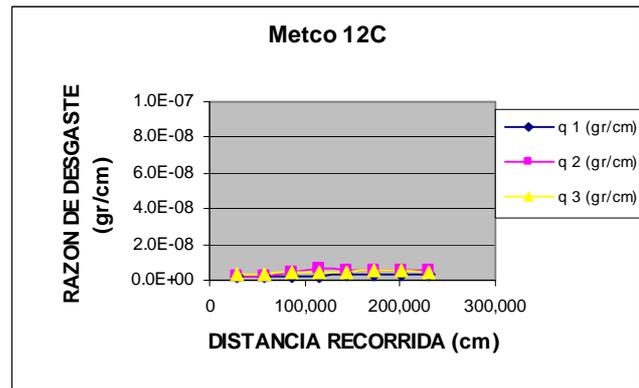
Grafica A.36

Comparación de razón de desgaste (q).

A condiciones de 470 RPM y 150 gr de carga.

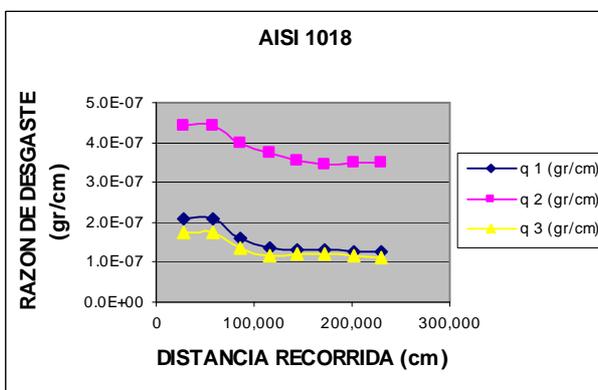


Grafica A.37

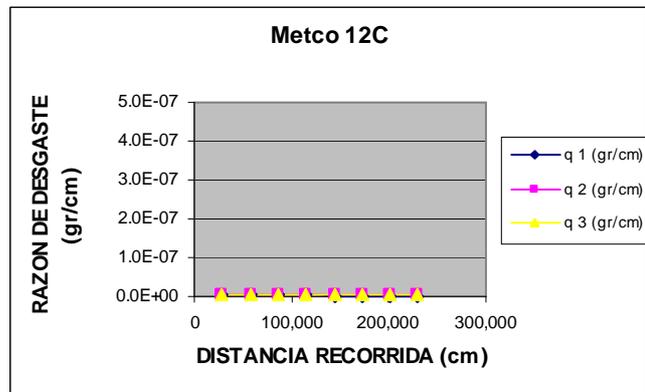


Grafica A.38

A condiciones de 470 RPM y 300 gr de carga.

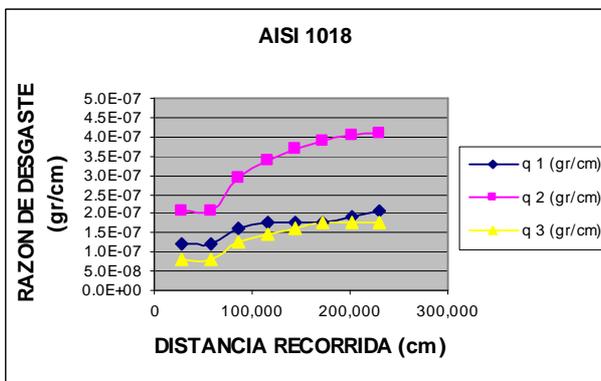


Grafica A.39

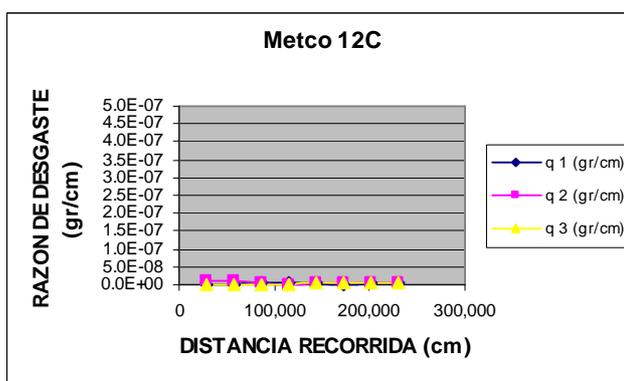


Grafica A.40

A condiciones de 470 RPM y 600 gr de carga.

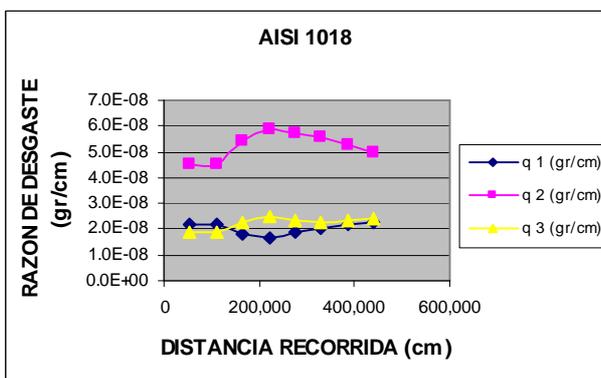


Grafica A.41

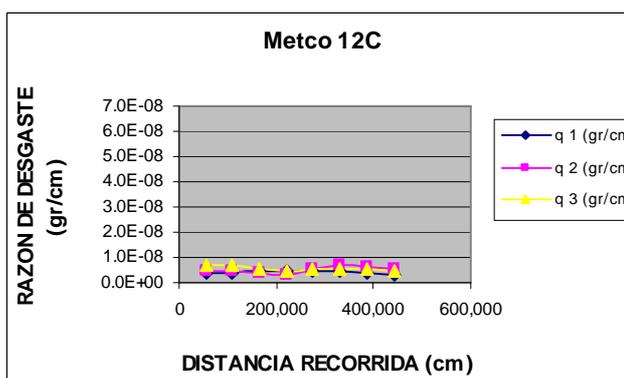


Grafica A.42

A condiciones de 900 RPM y 150 gr de carga.

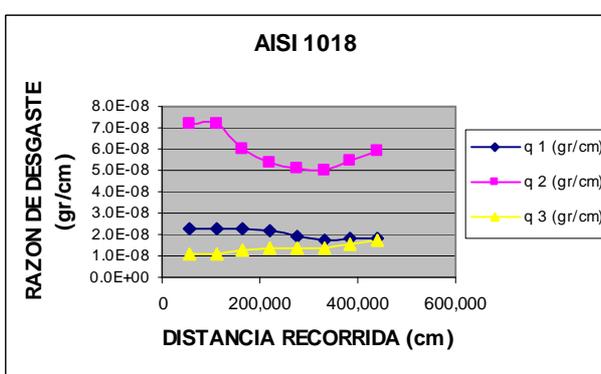


Grafica A.43

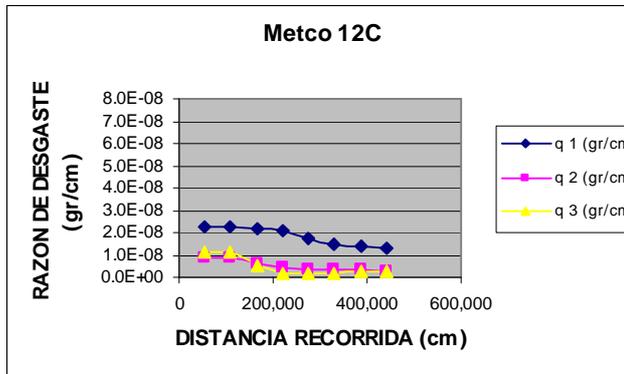


Grafica A.44

A condiciones de 900 RPM y 300 gr de carga.

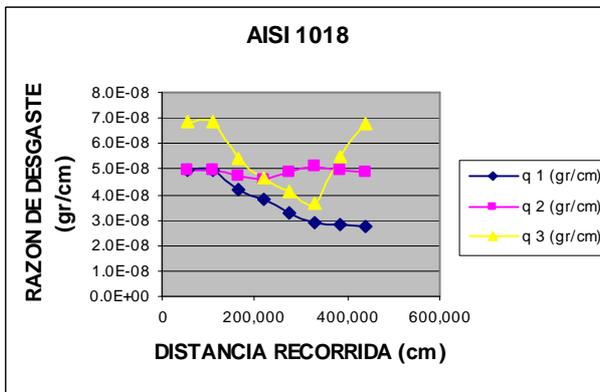


Grafica A.45

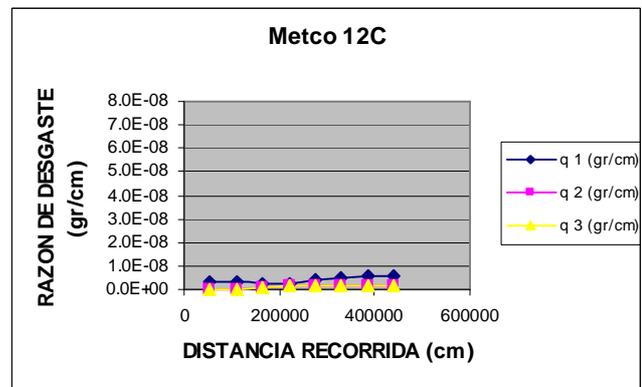


Grafica A.46

A condiciones de 900 RPM y 600 gr de carga.



Grafica A.47



Grafica A.48

Imágenes

Las imágenes que se presentan fueron tomadas en un microscopio de 6.3 – 32 X y son imágenes de las probetas sometidas a los ensayos de desgaste y probetas sin recubrir.

Imágenes de probetas recubiertas Metco 12C

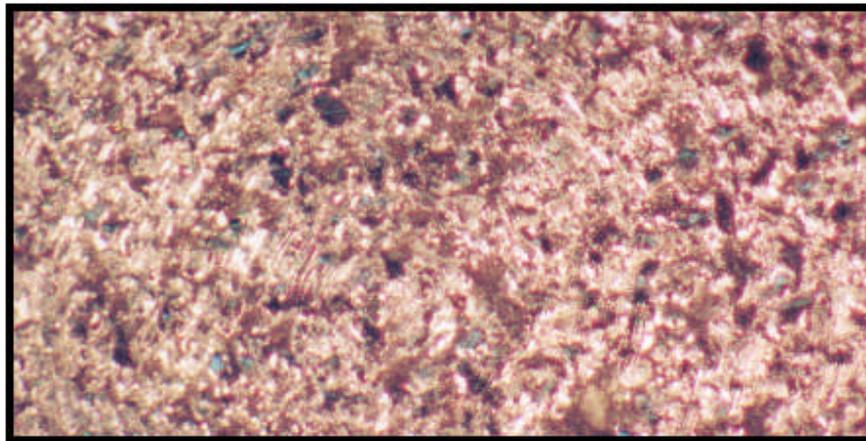


Fig. A.1 Probeta 1 c/ recubrimiento t. de rociado =1.5 min, careada c/ desgaste 32X

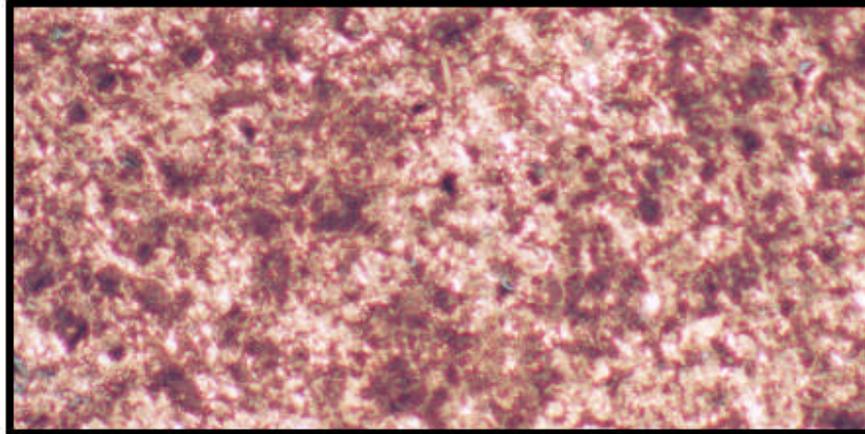


Fig. A.2 Probeta 3 c/ recubrimiento t. rociado =1.5 min, careada c/ desgaste 32X
(Zona con poco desgaste)



Fig. A.3 Probeta con recubrimiento sin desgaste t. rociado=0.30seg sin careado 8X



Fig. A.4 Probeta con recubrimiento sin desgaste t. rociado=0.30seg sin careado 25X

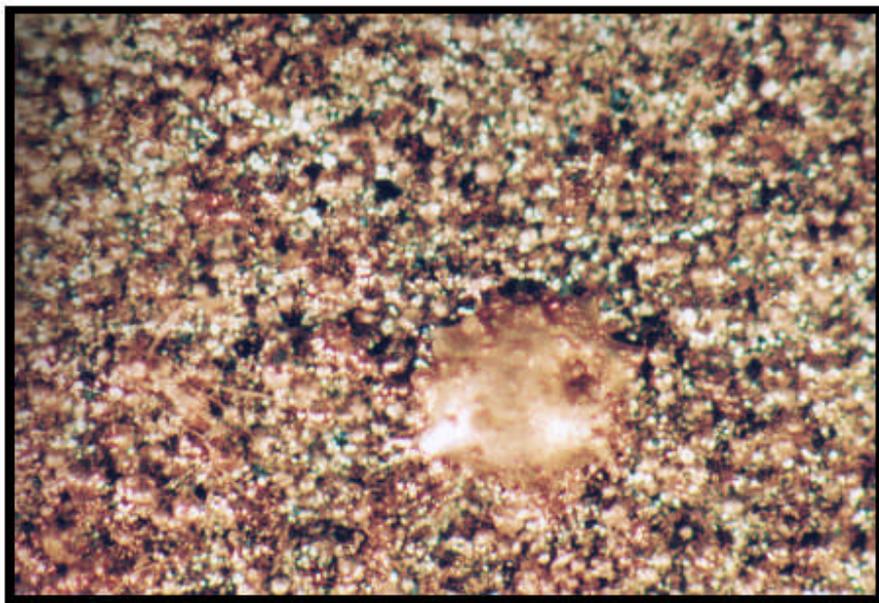


Fig. A.5 Probeta con recubrimiento sin desgaste t. rociado=0.30seg sin careado 20X "grumo"

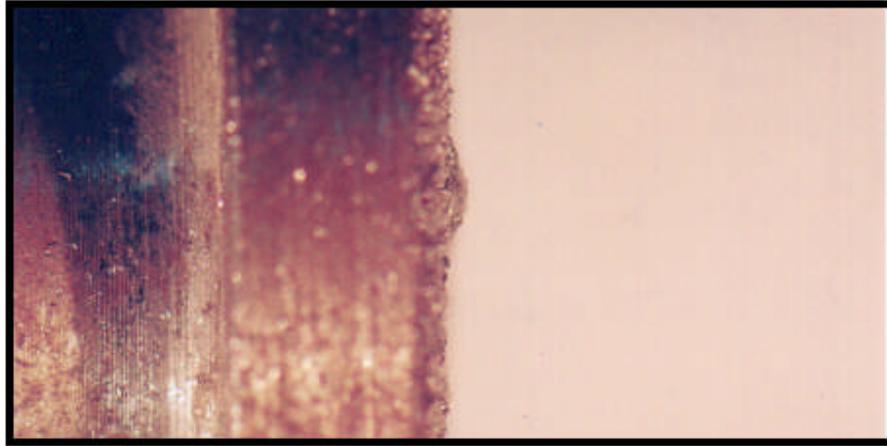


Fig. A.6 Probeta con recubrimiento sin desgaste t. rociado=0.30seg sin careado 8X "grumo"
(Vista lateral)



Fig. A.7 Probeta 2 c/ recubrimiento T. rociado=1.5 min sin carear c/ desgaste 8X
(vista lateral)

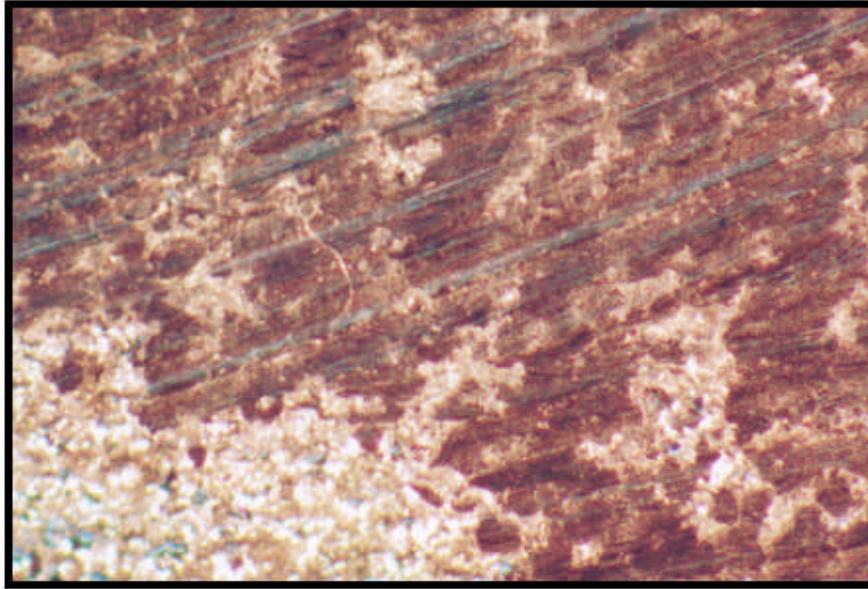


Fig. A.8 Probeta 1 c/ recubrimiento T. rociado =1.5 min. sin carear c/ desgaste 32X.

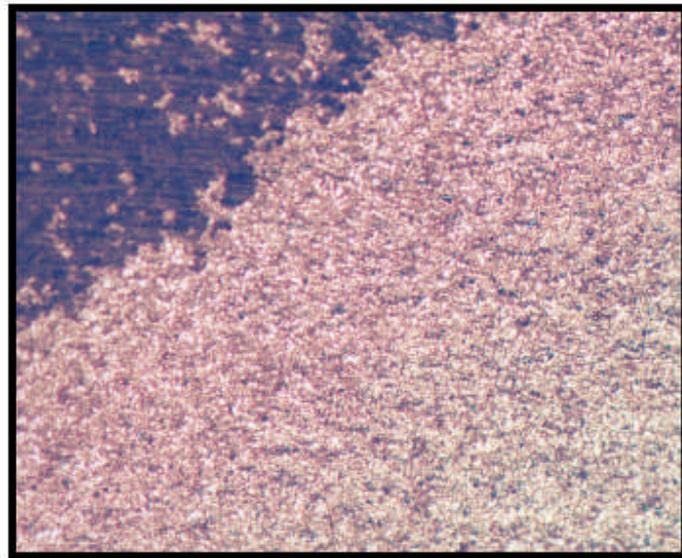


Fig. A.9 Probeta 1 c/ recubrimiento T. rociado =1.5 min. sin carear c/ desgaste 25X

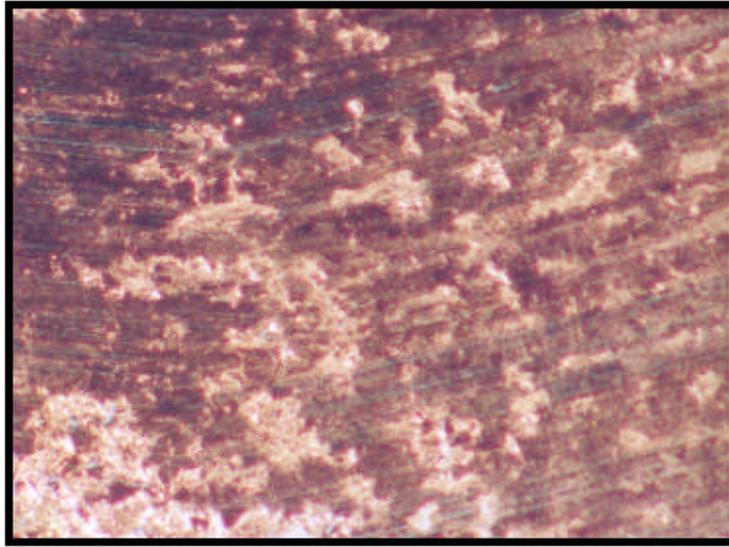


Fig. A.10 Probeta 1 c/ recubrimiento T. rociado =1.5 min. sin carear c/ desgaste 25X
(acercamiento a la zona desgastada)

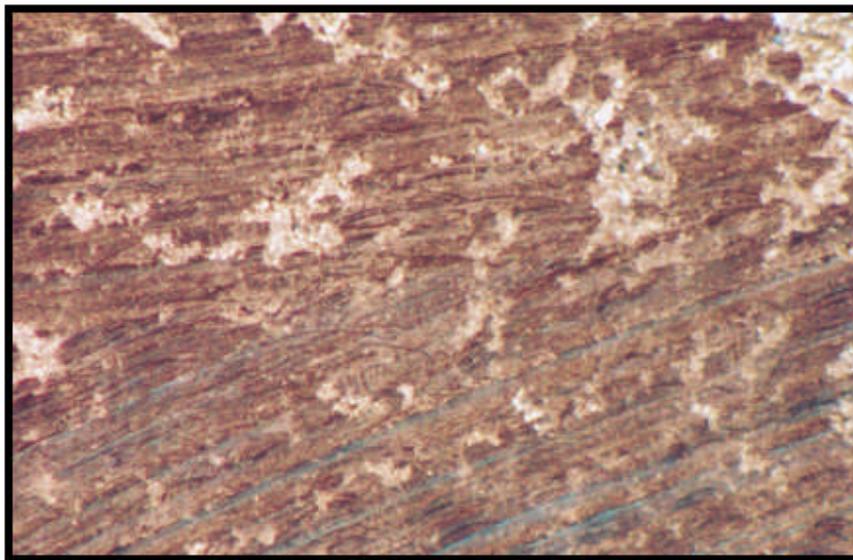


Fig. A.11 Probeta 1 c/ recubrimiento T. rociado =1.5 min. sin carear c/ desgaste 25X
(acercamiento a la zona desgastada)

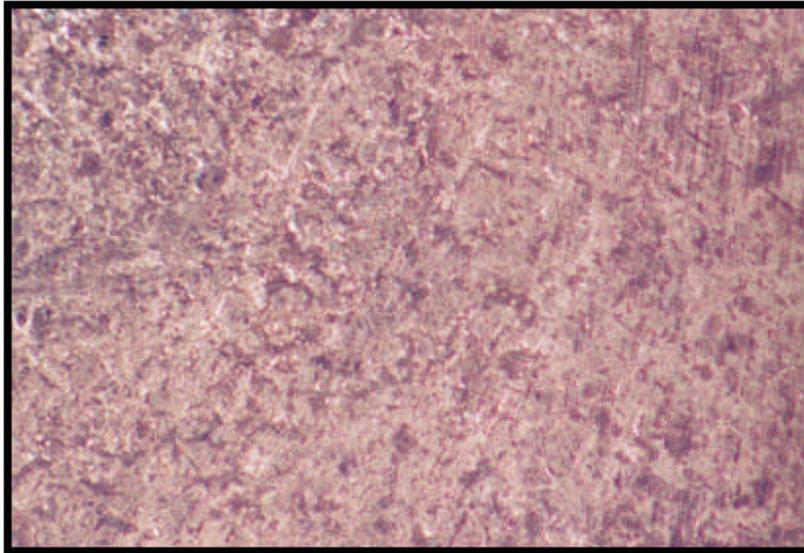


Fig. A.12 Probeta 2 c/ recubrimiento T. rociado=1.5 min sin carear c/ desgaste 8X

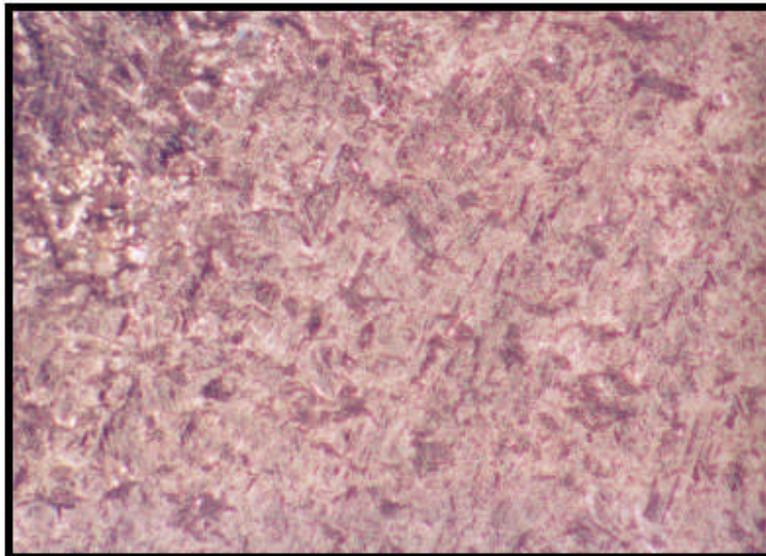


Fig. A.13 Probeta 2 c/ recubrimiento T. rociado=1.5 min sin carear c/ desgaste 32X
(acercamiento a la zona desgastada)



Fig. A.14 Probeta sin recubrir "granallada" 8X

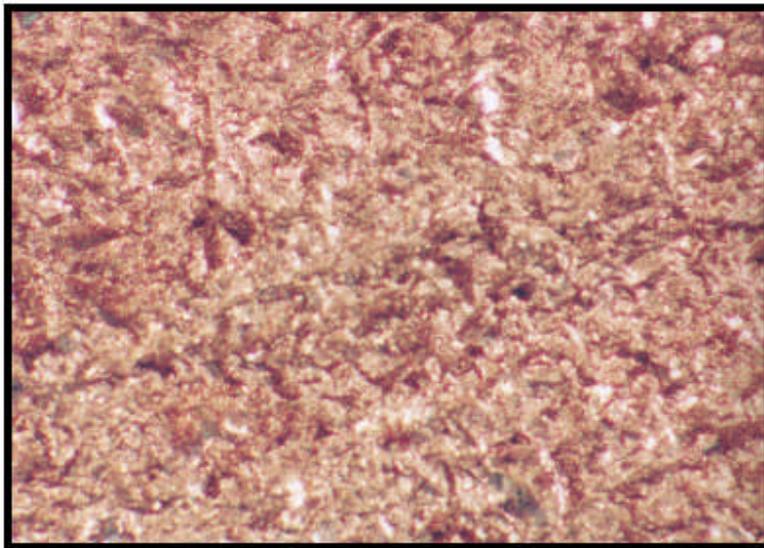


Fig. A.15 Probeta sin recubrir "granallada" 32X

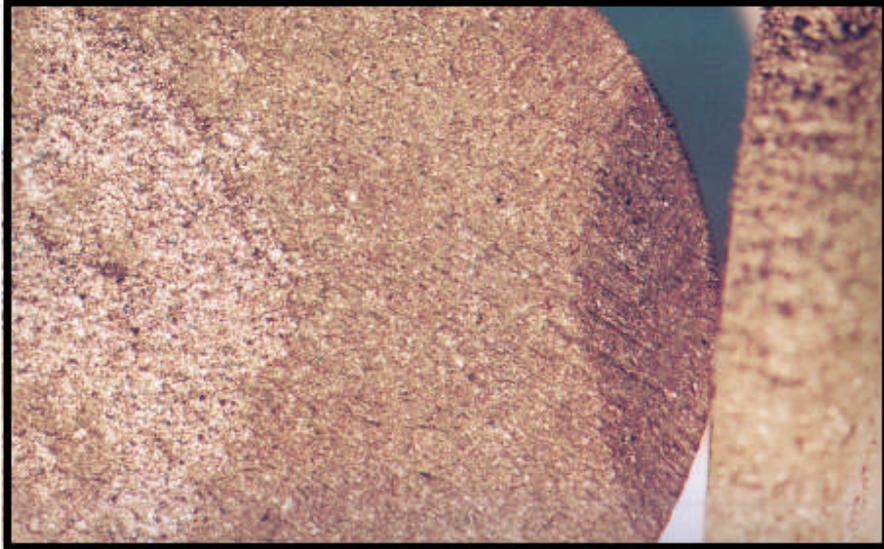


Fig. A.16 Probeta c/ recubrimiento t. de rociado=3 min con recubrimiento desprendido a un costado.

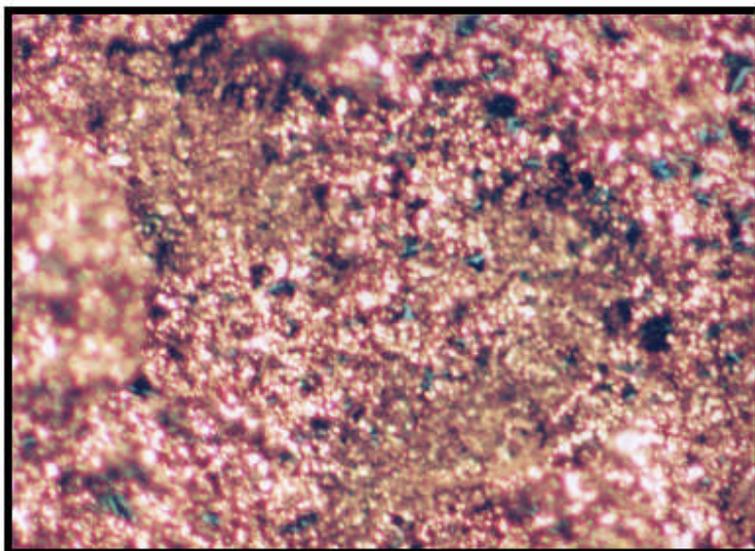


Fig. A.17 Probeta c/ recubrimiento t. de rociado=3 min con recubrimiento desprendido 32X

Bibliografía

1. J.R Davis & Associates. Handbook of thermal spray technology. ASM Thermal Spray Society. USA, 2004
 2. Lech Pawloski. The science and engineering of thermal spray coatings. British Library Cataloguing. England,1995
 3. Groover, Mikell P. Fundamentos de manufactura moderna. Prentice Hall 1a Edición, México, 1997.
 4. William D. Calliester Jr. Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Editorial Reverté, 5a reimpression, Bracelona 2001.
 5. Donald R. Askeland. La ciencia e ingeniería de los materiales. Grupo Editorial Iberoamérica, México, 1987
 6. Francisco Martínez Perez. La tribología ciencia y técnica para el mantenimiento. Editorial Limusa, México,1996.
 7. Sangines Franchini Maria. Desgaste de Metales. Editorial Limusa, México,1990
 8. T.S Eyre. Teasures on materials scince and technology VOL 13 . Academic press Inc. Brunell University, England
 9. Budinski, J.G "Needs and aplications measurement and monitoring of wear" Journal of testing and evaluation", JTVA, VOL 25, No.2 March 1997.
 10. G99- 90 standar tests method for wear testing with pin o disk , Anual ASTM publication 2001
 11. M.P Andres. "Desgaste mecancio : aspectos metalúrgicos y modo de acción en engranes y piezas de automovil" Revista Metal CENIM VOL 17,1981
 12. Sulzer metco Type 5P-II Thermospray Gun "Instructions" 1995.
 13. Sulzer metco 12C "Specifics" 1995.
 - 14 <http://www.gordonengland.co.uk>
 15. [http://www. disagroup.com](http://www.disagroup.com)
 16. <http://www.sciencedirect.com/engineering> tribology/Publication.
 17. http://www.tesisenxarxa.net/tesis_ub/available/0517107-h0032//00mgb_previo.pdf.
-