

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

MICRO-ABRASION DE NITRURO DE TITANIO (TiN) DEPOSITADO POR EL METODO DE PLASMA

Presentado Ante la Ilustre
Universidad Central de
Venezuela para optar el Título
de Ingeniero Metalúrgico
por la Br. Castro Torrealba, Angela Cristina

Caracas, 2002

ACTA

Quienes suscriben, miembros del jurado designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, para examinar el Trabajo especial de Grado intitulado:

**“ MICRO-ABRASIÓN DE NITRURO DE TITANIO (TiN)
DEPOSITADO POR EL MÉTODO DE PLASMA”**

presentado ante la ilustre **Universidad Central de Venezuela** por la Br. **Angela C. Castro T.**, dejan constancia de lo siguiente:

Hemos leído este trabajo y participado en su discusión, encontrado que el mismo es suficiente en contenido, calidad y extensión para cumplir con todos los requerimientos establecidos para optar al título de Ingeniero Metalúrgico.

En fe de lo cual se levanta la presente acta en Caracas a los cuatro días del mes de Noviembre del año dosmil dos.

Prof. Mariana Staia
Tutora

Prof. Maribel Suarez
Jurado

Prof. Anna Di Prinzio
Jurado

DEDICATORIA

A DIOS Padre todo poderoso

A la memoria de mi Padre

A la memoria de mi tía Ysnalda

A la memoria de mi amigo Eduardo Hernandez (gracias por todo)

A mi madre

A mis hermanos

A mis primos especialmente Emma y Sergio

A mi tía Melquíades

A la profesora Mariana Staia

A ti Manuel mi alma Gemela

A todos Ustedes dedico este trabajo

AGRADECIMIENTO

Deseo expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que contribuyeron desinteresadamente en la elaboración de este trabajo:

Al Fondo Nacional de Investigaciones Científica y Tecnológica (FONACIT) a través del proyecto G-2000001591.

Al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico CDCH.

A la profesora Mariana Staia por su apoyo incondicional como profesora y como amiga en la realización de este trabajo.

Al profesor Eli Saul Puchi por su apoyo y colaboración en el desarrollo de este trabajo.

Al Dr, A. Millan por su valiosa colaboración como mi médico.

A la profesora Maribel Suarez por su apoyo incondicional,

A la profesora Anna Di Prinzio por su apoyo.

A mis compañeros de CENMACOR y CITALA: Yucelys Santana, Marlon Cruz, Mariela, Carlos sanchez, profesor Edwuin Carrasquero, Katherine Silva y especialmente a Eduardo Ramos por su colaboración en este trabajo.

A Lebjulet mi amiga espiritual.

A mis compañeros del grupo Antena.

Y a todas las personas que contribuyeron en la realización de este trabajo.

GRACIA

RESUMEN

En este trabajo se determinó, el comportamiento a la abrasión de dos recubrimientos de nitruro de titanio (TiN) depositados por dos métodos industriales de PVD diferentes: el método de bombardeo iónico (magnetron sputtering) y el método de arco catódico, usando un ensayo de micro-abrasión.

Las pruebas de micro-abrasión para determinar las constantes de desgaste del recubrimiento (K_c) y del sustrato (K_s) respectivamente se llevaron a cabo en el equipo llamado "CALOTEST modificado", empleando una carga de 0.68 N, una velocidad de 1.11 m/s y diferentes distancias de recorrido. La caracterización morfológica del recubrimiento así como la determinación del mecanismo de desgaste predominante se hicieron mediante la técnica de microscopia electrónica de barrido (MEB).

Se determinó que el recubrimiento depositado por el método de bombardeo iónico presentó una mejor resistencia al desgaste con respecto al recubrimiento depositado por el método de arco catódico. Los valores obtenidos para K_c y K_s difieren en un amplio margen.

Los resultados obtenidos de la caracterización morfológica de las huellas de desgaste mediante la técnica de microscopia electrónica de barrido (MEB), indican que el mecanismo predominante de desgaste es el abrasivo.

INDICE

1 INTRODUCCION	1
2 FUNDAMENTO TEORICO	3
2.1 PVD	3
2.1.1 Deposición por bombardeo ionico	4
2.1.1.1 Magnetron desbalanceado	6
2.1.1.2 Sistema multimagnetron de campo cerrado	6
2.1.1.3 Deposición por bombardeo ionico aplicado en la industria	7
2.1.2 Deposición por arco catódico	12
2.1.3 Parámetros del arco catódico	14
2.1.3.1 Tipos de arco	14
2.1.3.2 Duración del arco	15
2.1.3.3 Polaridad catódica	15
2.1.3.4 Ignición del arco	16
2.1.3.5 Control de la localización del arco	16
2.1.3.6 Transporte del plasma	17
2.1.3.7 Macroparticulas	17
2.1.3.8 Transporte de plasma y filtrado magnetico	17
2.1.3.8 Crecimiento de la pelicula	17
2.1.4 Deposición por arco catódico aplicado en la industria	18
2.14.2 Caracteristica del sistema de recubrimiento	18
2.2 Desgaste abrasivo	19
2.2.1 Tipos de desgaste abrasivo	20

2.2.1.1 Abrasión penetrante	20
2.2.1.2 Abrasión pulverizante	20
2.2.1.3 Abrasión por erosión	20
2.3 Control de la barsi3n	21
2.3.1 Efecto de la dureza	21
2.3.1.1Dureza Vicker	21
2.3.1.2 Dureza Knoop	22
2.3.1.3 Efectos del material del substrato sobre la microdureza	23
2.3.2 Efecto de la superficie	24
2.3.3 Efecto de la rugosidad	24
2.3.4 Efecto de la temperatura	25
2.3.5 Efecto del tama3o de part3cula	25
2.4 T3cnicas para mejorar la abracci3n	25
2.5 Comportamiento ante el desgaste de los recubrimientos delgados	25
2.5.1 Resistencia ante el desgaste	26
2.6 M3todo para obtener la constante de desgaste	33
2.7 Determinaci3n de la carga	33
3 PROCEDIMIETO EXPERIMENTAL	42
3.1 Elaboraci3n y obtenci3n de las probetas	42
3.2 Medici3n de la rugosidad	42
3.3 Caracterizaci3n del recubrimiento de TiN.....	43
3.3.1 Medici3n del espesor del recubrimiento	43

3.3.1.1 Procedimiento para la medición del espesor	44
3.3.2 Medición de la dureza compuesta	46
3.3.3 Caracterización morfológica	47
3.3.31 Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)	47
3.4 Determinación del ensayo de micro-abrasión	47
3.4.1 Procedimiento para la determinación del ensayo de micro-abrasión	47
3.4.1.1 Preparación de la mezcla abrasivo- lubricante	49
3.4.1.2 Posición de la probeta y bola de rodamiento	49
3.4.1.3 Determinación de la carga	51
3.4.1.4 Determinación de la distancia de recorrido	52
3.4.1.5 Determinación de la velocidad del ensayo	53
3.4.1.6 Dosificación de la mezcla abrasivo-lubricante	54
3.5 Obtención de la huella o crater en la probeta	56
3.6 Registro de datos	57
3.7 Determinación de las constantes	58
4 RESULTADOS Y DISCUSION	59
4.1 Rugosidad en el acero 316L y probetas recubiertas	59
4.2 Espesor	62
4.3 Resultados de dureza compuesta	63
4.4 Caracterización morfológica	64
4.4.1 Morfología del recubrimiento	64
4.4.2 Mecanismo de desgaste predominante	65
4.5 Dosificación de la mezcla avrasivo-lubricante	67

4.6 Carga	67
4.7 Velocidad	68
4.8 Ensayo de micro-abrasión	68
4.8.1 Ensayo de micro-abrasión para el acero 316L	68
4.8.2 Ensayo de micro-abrasión para las probetas recubiertas por bombardeo ionico 73	
4.8.3 Ensayo de micro-abrasión para las probetas recubiertas por arco catódico	78
4.9 Discusión sobre las constantes	83
5 CONCLUSIONES	85
6 RECOMENDACIONES	86
7 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	87

INTRODUCCION

El presente trabajo tiene como objetivo determinar el comportamiento a la abrasión de dos recubrimientos de nitruro de titanio (TiN) depositado por el método de plasma, bombardeo ionico (magnetron sputtering) y arco catódico usando un ensayo de micro-abrasión.

El nitruro de titanio (TiN) es un recubrimiento cerámico comercial usado sobre herramientas de corte, se utilizan ampliamente en la industria metalúrgica con el objeto de mejorar las propiedades mecánicas y tribológicas de la superficie como son la resistencia al desgaste y a la corrosión, mejorar la lubricación y bajar la fricción. Los recubrimientos deben tener buena estabilidad química y buena adhesión, de esa manera se reduce el desgaste y se puede aumentar hasta más del doble de la vida útil de las herramientas.

El desgaste es el producto de la acción proporcional promedio de ciertos mecanismos en la remoción de material a cierta tasa. Existen cuatro mecanismos principales mediante los cuales ocurre el desgaste y ellos son : desgaste adhesivo, desgarre superficial, y reacciones químicas tribológicas (tribo-oxidación) con resultados de efectos abrasivos.

Este trabajo esta orientado hacia el estudio del desgaste de tipo abrasivo. Se han ideado diferentes métodos experimentales para conocer el comportamiento de un material frente a situaciones de desgaste, entre los cuales se pueden mencionar como el ensayo: Taber, Pin-On Disc (pin sobre disco) y el de la Rueda Abrasiva, como los más utilizados. Estos ensayos permiten determinar el mecanismo de desgaste predominante, la cantidad, tipo y proporción del desgaste presente. Además, cuando el material a ensayar no es homogéneo, como lo es en el caso de los materiales recubiertos existe gran dificultad para distinguir entre las contribuciones hechas por el sustrato y el recubrimiento en el resultado final del ensayo.

Este problema ha sido enfocado de una manera novedosa y original en la Universidad de Uppsala por un equipo de investigadores dirigidos por A. Kassman. Para realizar ensayos

de desgaste emplearon un equipo llamado Dimple-Grinder, que normalmente es utilizado para la preparación de muestras a ser observadas en el microscopio electrónico de transmisión (TEM).

Basado en los resultados obtenidos por estos investigadores en el Laboratorio de Nuevos Materiales se adaptó el equipo llamado Calotest, utilizado normalmente para medir espesores delgados ($1\mu\text{m}$ - $10\mu\text{m}$), para hacer ensayos de desgaste abrasivo en materiales no homogéneos.

Teniendo en cuenta que en un ensayo de desgaste depende de las condiciones específicas del mismo, condiciones de deposición del recubrimiento, la importancia de este método radica en que es capaz de distinguir las contribuciones hechas por el sustrato y el recubrimiento al comportamiento general, frente a una determinada situación de desgaste.

2.- FUNDAMENTO TEORICO

2.1 PVD

PVD (Physical Vapour Deposition-Deposición Física en fase de Vapor) es junto al CVD (Chemical Vapour Deposition- Deposición Química en fase de Vapor) una de las técnicas más utilizadas en la generación de recubrimientos finos, especialmente cerámicos sobre herramientas de corte.

La diferencia entre los procesos PVD y CVD está dada fundamentalmente en el mecanismo para generar y transportar el vapor del material, y la forma en que luego será depositado sobre el sustrato. Los procesos PVD puros utilizan medios físicos para obtener directamente las especies de un material denominado blanco, evaporarlas y depositarlas sobre el sustrato, es decir no hacen falta reacciones químicas para sintetizarlas de algún otro compuesto gaseoso como el proceso CVD. El proceso PVD un proceso que demanda menos temperatura ($200\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 600\text{ }^{\circ}\text{C}$) que el CVD ($800\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$), se aplica fundamentalmente a materiales que no pueden estar expuestos a altas temperaturas para no experimentar un cambio de fase inconveniente (como lo es el acero rápido, por ejemplo). Como el transporte de las especies se realiza por medios físicos es necesario un alto vacío para que el camino libre medio de los átomos y moléculas supere la distancia blanco-sustrato y las dimensiones de la cámara de trabajo.

Las técnicas PVD asistido por plasma han significado un aumento importante de la eficiencia de las técnicas tradicionales debido fundamentalmente a la condición de no equilibrio del plasma que permite generar especies reactivas a relativamente bajas temperaturas y aumentar la velocidad de deposición, debido a la presencia de iones que pueden ser acelerados eléctricamente hacia el sustrato [1].

Hoy en día, se investiga a nivel experimental y se desarrollan industrialmente una serie de técnicas de PVD, que permiten la obtención de recubrimientos necesarios para ser aplicados en condiciones severas de trabajo. El presente estudio permitirá la descripción del comportamiento frente al desgaste de muestras de acero recubiertas empleando dos métodos de PVD:

- Deposición por bombardeo iónico
- Deposición por arco catódico

2.1.1 Deposición por bombardeo iónico.

El sputtering o bombardeo iónico se realiza en una cámara al vacío, en presencia de un gas, generalmente hidrógeno, que permite la formación de un plasma en donde los átomos neutros o iones altamente energéticos son acelerados hacia el blanco para que en el momento del choque con la superficie de esta, liberen átomos o moléculas por medio de la transferencia de momento (ver Figura 1).

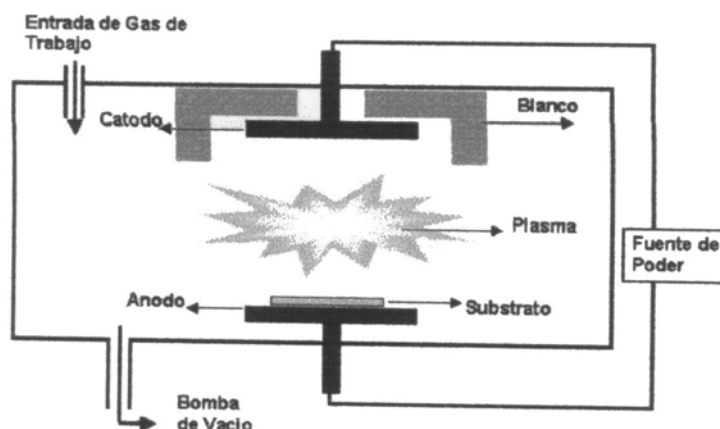


Figura 1. Concepto del bombardeo iónico

La variante más importante de este método de deposición es la adición de un campo magnético en el blanco metálico con el fin de hacer local la acción del plasma en el blanco, liberar una mayor cantidad de átomos y acelerar el proceso de deposición. Esto puede ocurrir debido a que el movimiento del electrón en presencia del campo eléctrico del campo

magnético es igual al producto vectorial de ambos campos; es decir, en una trayectoria perpendicular a las dos direcciones de los campos, en este caso el electrón se moverá en una trayectoria helicoidal en las cercanías de la superficie del blanco, como se puede ver en la Figura 2.

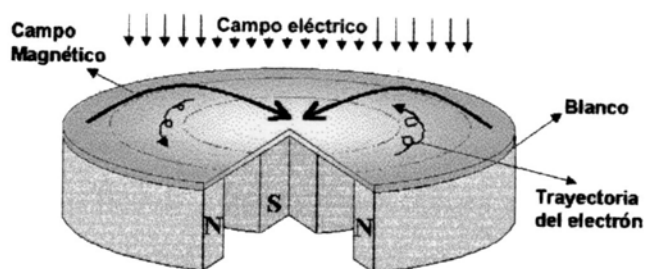


Figura 2. Magnetron sputtering

Luego, se desarrollaron dos nuevas variaciones del proceso, la primera fue la de formar un magnetron desbalanceado y un "Sistema multimagnetron de campo cerrado" [2].

2.1.1.1. Magnetron desbalanceado.

En un magnetron desbalanceado, el anillo extremo se halla reforzado con respecto al polo central. En este caso no todas las líneas de campo se encuentran cerradas entre el polo central y el polo externo del magnetron, sino que algunas están dirigidas hacia el sustrato, y algunos electrones secundarios pueden seguir estas líneas de campo. En consecuencia el plasma ya no está tan fuertemente confinado a la región del blanco, sino que además puede fluir hacia el sustrato. Por tanto se pueden extraer altas corrientes iónicas del plasma sin necesidad de acometer el sustrato. Estudios anteriores demostraron que en algunos diseños de magnetron no todas las líneas de campo se cerraban sea debido a la existencia de muy pocos magnetrones, están totalmente balanceados).

Fueron Window y Saavides [3] que apreciaron la importancia de este efecto cuando variaron sistemáticamente la configuración magnética de un magnetron, de otra forma diferente a la convencional. Ellos al igual que otros investigadores, han demostrado que para densidades de corriente ionica a través de un sustrato de 5 mA/cm^2 y superiores (aproximadamente un orden de magnitud al de magnetrones convencionales) pueden ser generadas de forma rutinaria empleando un magnetron desbalanceado.

La corriente de iones dirigidas al sustrato es directamente proporcional a la corriente del blanco. La tasa de deposición es también directamente proporcional a la corriente del blanco. Como resultado, a diferencia de otros procesos de implantación de iones la tasa de llegada de iones a los átomos del sustrato permanece constante al aumentar la tasa de deposición.

Mediante pruebas de impedancia con corriente alterna se demostró que las temperaturas a los que estos recubrimientos reaccionaban espontáneamente en el aire eran dependientes del área superficial efectiva de las películas.

2.1.1.2. Sistema Multimagnetron de Campo Cerrado.

La otra variación del proceso es que se puede generar un campo magnético cerrado en el interior de la cámara, el cual es denominado como "Sistema multimagnetron de campo cerrado" [2], se puede ver claramente en un corte transversal del reactor cilíndrico en la Figura 3. El gran aporte de esta variación es que permite que éste proceso de deposición no es necesario tener una cara de la muestra paralela al blanco, debido a que el plasma envuelve todo lo que se encuentra dentro del reactor y es posible recubrir muestras de geometría muy compleja.

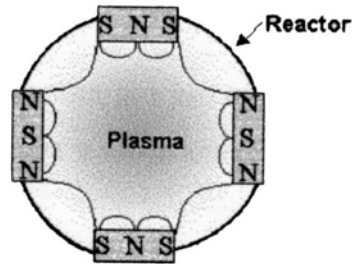


Figura 3. Sistema de multimagnetron de campo cerrado

2.1.1.3. Deposición por bombardeo iónico aplicado en una compañía comercial.

El magnetron sputtering se utiliza en esta compañía (Empresa diseñadora del equipo) para producir actualmente recubrimientos de alta calidad disponible por esta técnica. Estos recubrimientos tienen excelente adhesión a las piezas y poseen un rango de propiedades adecuadas a la demanda actual en las aplicaciones ingenieril.

El magnetron sputtering es una técnica útil y flexible, la cual puede ser usada para cubrir completamente cualquier pieza con un amplio rango de materiales, ya sea en forma de metal sólido o aleación, y/o una variedad de componentes. Para recubrir una pieza en el magnetron sputtering primero se realiza una pre-limpieza,. Este tiene una cámara de acero inoxidable equipadas con bombas necesarias para producir un alto vacío, un porta muestra, un equipo de rotación, y las fuentes para el recubrimiento del material conocida como magnetrons ver Figura 4.

Camara de vacio

Magnetrons

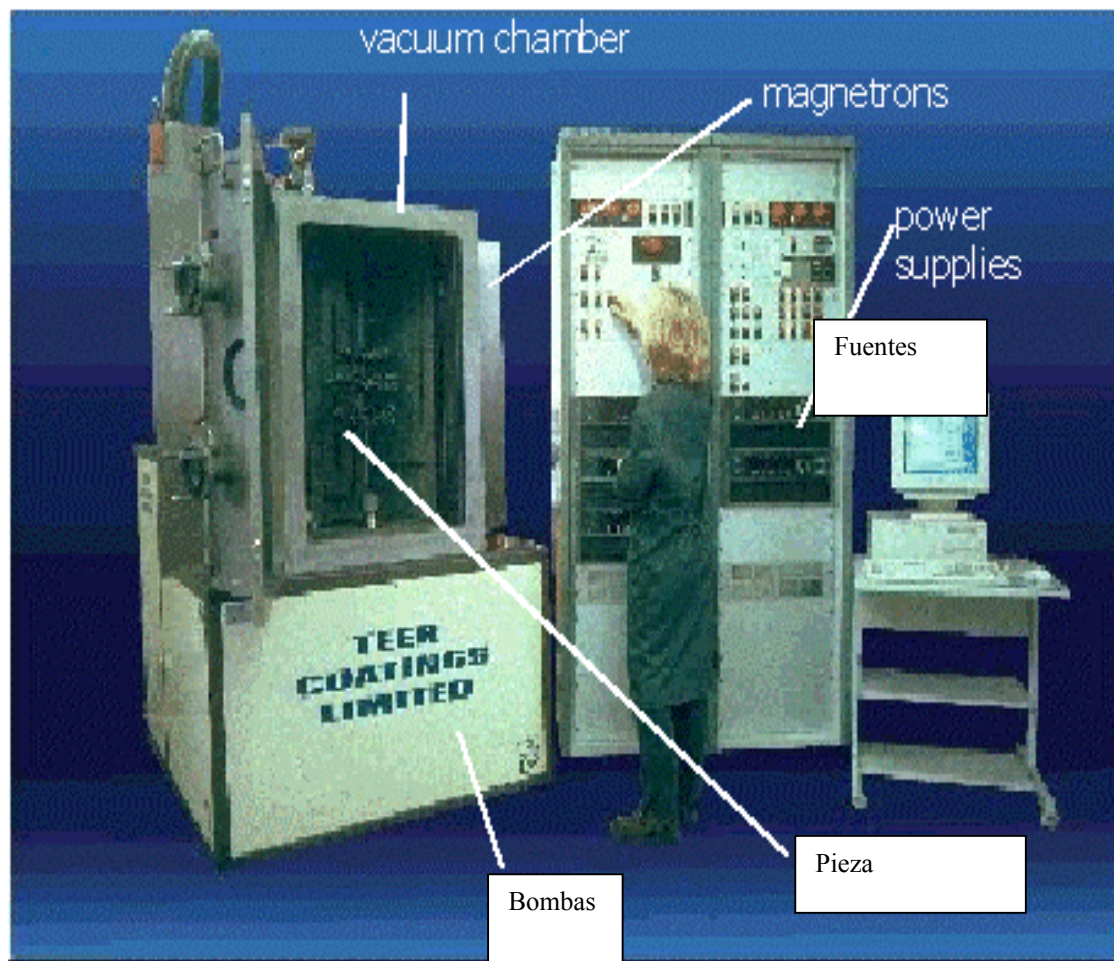


Figura 4. Equipo para recubrimiento por bombardeo ionico

El proceso requiere de 30 minutos de bombeo para obtener un vacío suficiente para comenzar el proceso de deposición del recubrimiento, a una presión menor de una diez millonésima parte de una atmósfera. Para este paso existe un control estricto de flujo de argón. En el proceso se introduce el gas inerte con las bombas aún trabajando. Esto permite un aumento de la presión en el anillo a niveles que se necesita para operar los magnetrons, aunque este se encuentre a un poco de diez milésima de una atmósfera. La combinación de bombeo y la continuidad de material del proceso de gas aseguran que las condiciones del recubrimiento sean limpia y reproducible.

Un magnetron consiste de una placa o lamina del material del cual el recubrimiento será llevado acabo (llamado el blanco), con magnetos arreglados, de tal manera que crean un campo magnético para intercambio de partículas tales como iones de argón en frente de la zona del blanco.

Cuando los iones de argón golpean la superficie del blanco se producen dos procesos importantes:

- Los átomos son dirigidos sobre la superficie del blanco y se genera un bombardeo. Estos átomos desprendidos no presentan una carga eléctrica positiva o negativa, lo que hace que ellos viajan dirigidos el campo magnético hacia la pieza a recubrir contribuyendo así a la formación del recubrimiento.
- La superficie bombardeada también libera electrones, que cargados negativamente. Estas partículas son retenidas en el campo magnético y debido a su energía participan en colisiones con otros átomos contribuyendo así para producir más iones de argón. De esta manera los iones que son atraídos a la superficie se reabastescan continuamente), y el magnetron pueda operar continuamente.

El bombardeo también genera un calentamiento en la zona del blanco, por lo cual el magnetron tiene incorporados canales de enfriamiento con agua, según se puede observar en la Figura (5).

Plasma

Campo magnético

Blanco

Enfriamiento
con agua

Magnetos

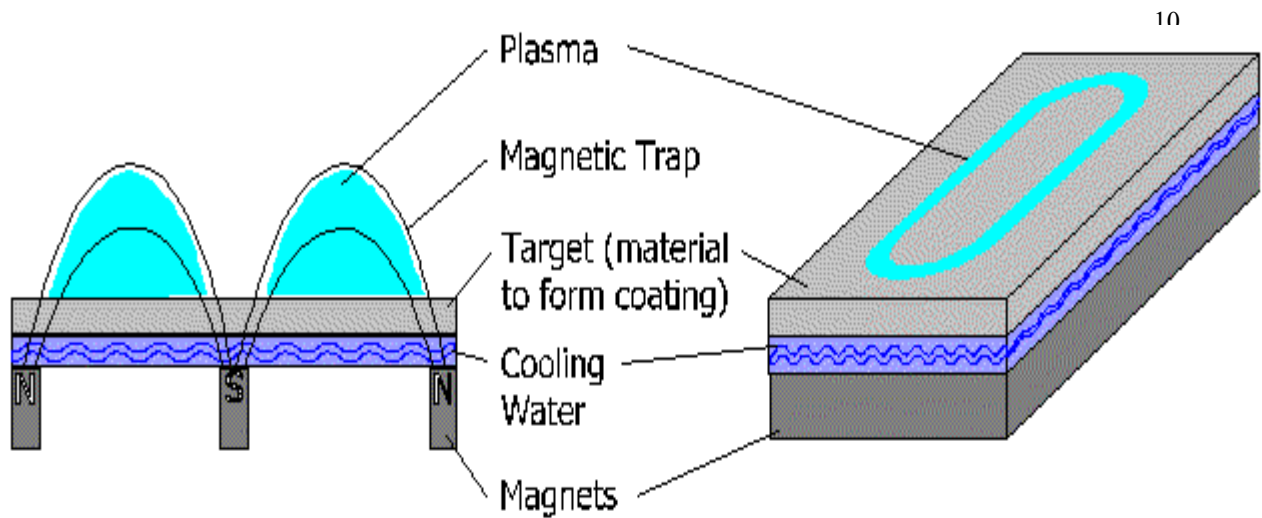


Figura 5. Canales de enfriamiento

Después el sistema de vaciar y la alimentación del argón se procede a la limpieza de la muestra a recubrir. Durante esta etapa del proceso, el magnetron opera con un bajo valor de potencia, los cuales ionizan (cargas eléctricas) los átomos del argón que producen un leve bombardeo del sustrato.

Cuando la pieza se ha polarizado a -500 Voltios o más se produce la atracción de los iones de argón que bombardean la superficie con una gran energía permitiendo la remoción de cualquier especie removiendo, la contaminación de la superficie microscópica a nivel molecular. Ver figura 6.

Cuando la limpieza ionica finaliza el valor del voltaje de polaridad sobre la pieza se reduce y la potencia del magnetron se incrementa para que ocurra la deposición del recubrimiento.

Un ion de argón golpea la superficie del blanco bombardeando un átomo del metal y liberando electrones

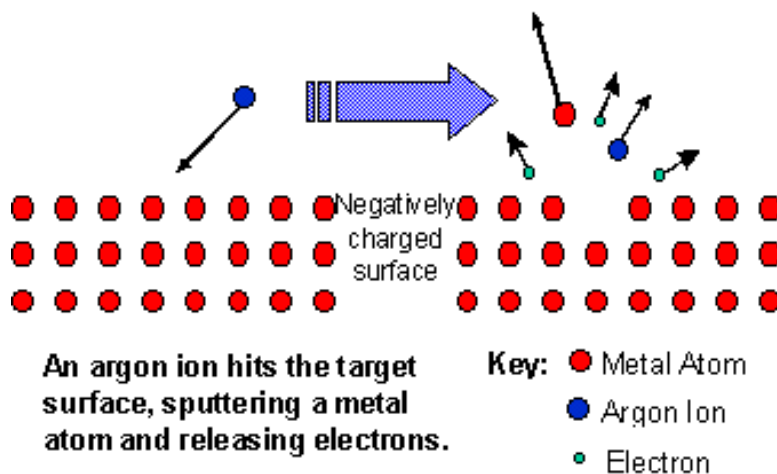


Figura 6.

Cuando se observa un magnetron en operación (a través de una ventana en la pared de la cámara) el espacio interior de la cámara se hace incandescente o iluminado, con áreas brillantes, particularmente en los campos magnéticos en frente de cada magnetron. Este fenómeno se debe a la interacción de los electrones con el gas argón, causándose un estado de excitación que después decaen a su estado original. Esta masa incandescente de partículas cargadas se conoce como plasma.

La forma del campo magnético, las conexiones entre los campos y la posición de los magnetrones adyacentes se han diseñado cuidadosamente. Ajustando la intensidad y tamaño de los magnetos, no influye considerablemente el proceso de bombardeo.

Esta compañía ha desarrollado y patentado un sistema magnetron de campo cerrado asimétrico conocido por sus siglas como CFUBMSIP. El uso de este sistema especial produce magnetrons que permite la generación de un plasma denso que envuelve la pieza la pieza. Es importante destacar que con menos de diez voltios aplicados a la pieza durante el recubrimiento se pueden atraer los iones que están fuera del plasma con suficiente energía contribuyendo así a la densificación del recubrimiento y a la mejora de su adhesión , sin que se pierda gran cantidad de energía en el bombardeo del recubrimiento.

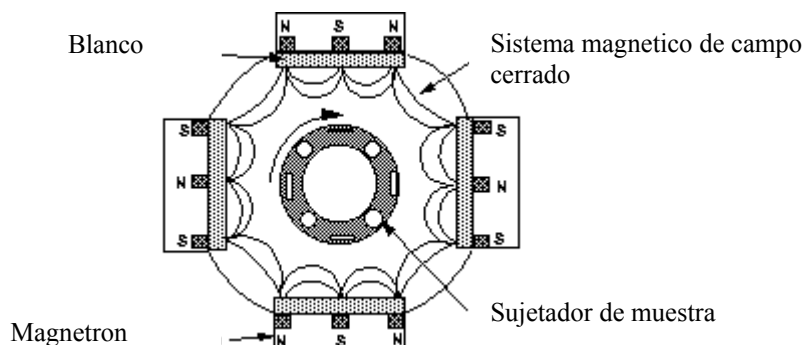


Figura 7. Magnetron de campo cerrado asimétrico (CFUBMSIP)

Con el bombardeo de un gran número de iones de baja energía se crean en el recubrimiento propiedades excepcionales. El uso de esta tecnología ha alcanzado la calidad requerida en los recubrimientos. La naturaleza adherente de cada recubrimiento también se combina con altos valores de dureza, bajos coeficiente de fricción y excepcional resistencia al desgaste [4].

2.1.2 Deposición por arco catódico

El proceso de arco catódico es un método de deposición de películas con espesores entre 1-10 μm de materiales duros con un extenso rango de aplicaciones, este va desde las necesidades automotrices y espaciales. Este proceso es caracterizado por un alto nivel de ionización permitiendo el control de la emisión del plasma. En contraste al magnetron sputtering, el proceso de arco es mucho más dinámico y sujeto a menos envenenamiento del blanco lo que permite cambiar rápidamente condiciones de deposición para la producción de recubrimientos de múltiples capas y multicomponentes [5].

La deposición por arco catódico es una de las técnicas más utilizadas entre los métodos de deposición por evaporación que existen actualmente. La evaporación consiste en producir un vapor (por medio del calor) sobre una superficie sólida o líquida dentro de una cámara al vacío y entonces el flujo de átomos evaporados se condensará sobre el sustrato para formar el recubrimiento.

El equipo típico para la deposición por arco catódico se muestra en la Figura 8. Esta deposición se realiza a altas condiciones de vacío con gases inertes o gases reactivos pero, en cada caso, se necesita iniciar la formación del arco, usualmente causando que una pieza, en contacto con tierra, se junte con la superficie del cátodo, hasta que la descarga se sustente por sí sola.

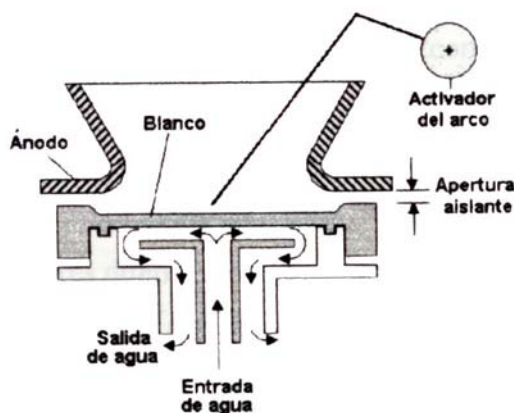


Figura 8. Proceso de deposición por arco catódico

La última modificación realizada a este proceso es el añadir un solenoide a la cámara de evaporación para generar un plasma y direccionarlo a la superficie del sustrato, tal como se muestra en la Figura 10 [2].

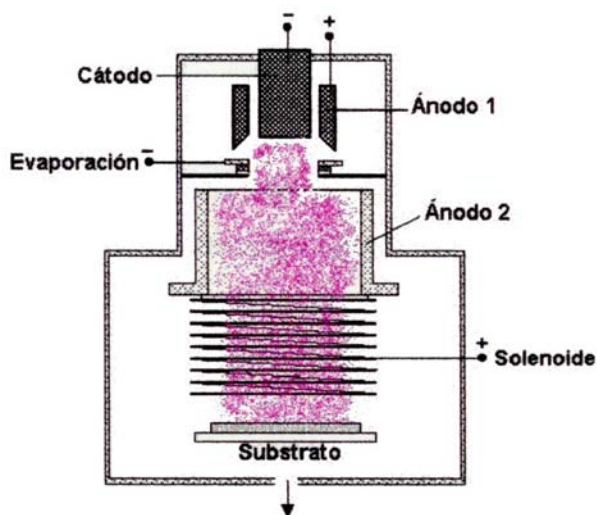


Figura 10. Arco catódico asistido por plasma

2.1.3 Parámetros del arco catódico.

2.1.3.1 Tipos de arco

Existen dos tipos de arco: Discreto y Distribuido

2.1.3.1.1 El arco discreto es el más común debido a que se forma en la superficie del cátodo frío, permitiendo que ocurran una serie de igniciones de corta duración. El proceso es rápido dando la impresión que el arco está en movimiento y ocurre a altas densidades de corriente. Cuando hay ausencia del campo magnético se mueve alrededor de la superficie del cátodo en un ángulo, que está formado por la intersección de la línea del campo magnético y la superficie del cátodo.

2.13.1.2 Arco distribuido. El arco en este caso se forma por un flujo de átomos desde un electrodo rugoso. La principal ventaja es la distribución del arco, debido a que permite la formación de micropartículas debido a las bajas densidades de corriente (10^5 A/m^2). La desventaja de este tipo de arco es que requiere, el calentamiento del electrodo y solo se produce para un número limitado de composiciones. El electrodo se funde y se necesita un contenedor que haga que puedan producirse reacciones no deseadas. El ion formado por este tipo de arco tiene una carga en el orden de 1ev. [7].

2.1.3.2. Duración del arco. El uso de un arco continuo o de uno pulsado depende de la duración del proceso de deposición. El arco continuo en general provee velocidades de deposición mayor, pero este requiere mucho cuidado en el proceso de enfriamiento y control del cátodo y control en la localización de estos.

Se usa para cubrir áreas grandes y cuando no se requiere reducción o eliminación de macropartículas que generan defectos posteriormente e influyen negativamente sobre las propiedades como resistencia a la corrosión. En el arco pulsado la velocidad de deposición es más pequeña debido a una razón del tiempo de duración del ciclo pulsado pero sobrepasa al de los equipos convencionales.

Este arco permite controlar las propiedades de las películas, tiene la ventaja que opera con diferentes materiales de varios tamaños. El recubrimiento obtenido mediante el uso del método de arco pulsado tiene diferente estructuras y propiedades que el obtenido el método de arco continuo debido a la serie de interrupciones durante el proceso de deposición .

2.1.3.3. Polaridad catódica - anódica. Corriente alterna.

El arco catódico discreto genera iones cuya naturaleza son determinados por la composición del cátodo y generalmente presentan grandes voltajes. Estos iones energéticos contribuyen a una excelente adhesión y densidad del recubrimiento. Los arcos anódicos, que normalmente son distribuidos, no generan macropartículas. La ionización ocurre como un resultado del bombardeo de electrones del material evaporado por el ánodo, debido a la alta corriente.

La energía iónica del ion correspondiente al arco anódico es normalmente menor que la correspondiente a la energía del ion correspondiente al arco catódico discreto.

2.1.3.4. Ignición del arco

El arco al vacío pueden iniciarse de muchas formas:

- De forma mecánica, mediante un toque de un electrodo con potencial anódico con el cátodo.
- Mediante una caída eléctrica de un recubrimiento conductivo depositado aislado entre el ánodo y el cátodo.
- Introduciendo un gas a través de un tubo el cual sirve como electrodo temporal en una descarga de alto voltaje

2.1.3.5. Control de la localización del arco.

Esto se presenta cuando se trabaja en sistemas de arco discreto que se desea controlar la localización en el cátodo. Esto se puede lograr con nitruro de boro que sirve como aislante por tener una baja emisión electrónica. Para un mejor control del arco se usan campos magnéticos.

2.1.3.6. Transporte de plasma.

Una de las ventajas de los procesos de arco catódico es la formación de una gran cantidad de iones de material del cátodo. A diferencia de otras técnicas de deposición física en estado de vapor, tales como magnetron sputtering y evaporación por emisión de electrones, donde las especies depositadas que forma el recubrimiento son principalmente átomos neutros.

2.1.3.7. Macropartículas.

Estas son frecuentemente producidas por arco catódico discreto como un resultado de las altas densidades de corrientes inducidas. La presencia de las macropartículas son indeseables porque generan defectos y por tal motivo, se han desarrollado muchas

estrategias para minimizar o removerlas. Algunas estrategias seguidas se basan en suprimir la emisión de macropartículas por el arco cátodico en la etapa evaporación, filtrar el flujo del plasma para eliminar las macropartículas durante su transporte al inicio del proceso de deposición recubrimiento [7].

2.1.3.8. Transporte de plasma y filtrado magnetico.

Recientes estudios mostraron que la eficiencia de guiar al plasma puede estar influenciada por la geometría de los filtros y la configuración de los campos magnéticos, así como del potencial eléctrico aplicado par guiar el plasma.

Recientemente, Anders mostro [6] que la combinación optima de la geometría del filtro, de la configuración del campo magnético y eléctrico están fuertemente relacionados a la descarga del arco y las características del plasma (corriente del arco, material del cátodo).

2.1.3.9. Crecimiento de la película

Thornton y Messier [6] predicen que la micro-estructura del recubrimiento esta determinada por la competencia entre la velocidad con que los átomos llegan a la superficie del recubrimiento y la velocidad con que estos átomos son reorganizados ellos mismos antes que nuevos átomos lleguen. De acuerdo a esto, una alta la densidad del recubrimiento resulta para un proceso en el cual existe una velocidad lenta de deposición y una alta temperatura del sustrato, tales condiciones aportan más tiempo y energía permitiendo así que los átomos de recubrimiento se difundan para formar la micro-estructura del recubrimiento en todo el volumen del material. En este contexto; la energía de los iones producidos por arco catódico permite densificar el recubrimiento y disminuir la temperatura de deposición.

Hubler and Spragne [6] proponen otro mecanismo del crecimiento de la película ellos consideran que el bombardeo de los iones sobre la superficie recubierta influye en la absorción de gases y esto incrementa el coeficiente de unión de los gases (por ejemplo el

nitrogeno) y cambia la naturaleza de los sitios de absorción (por ejemplo, sitios de baja energía fisi-absorción cambian a sitios de alta energía de quimi-absorción). Este concepto permite explicar porque los procesos de arco catódico son tan efectivos en la formación de nitruros.

2.1.4. Recubrimientos por arco catódico aplicado en una compañía comercial.

La tecnología del arco catódico es utilizada en la industria de herramientas, principalmente por su simplicidad, fácil implantación y condiciones de producción bastante económicas. Su mayor limitación es con respecto a la calidad y reproducibilidad, que no son obtenidos completamente. Los requerimientos básicos como una alta estabilidad del arco; mantenimiento por largo tiempo de la velocidad de evaporación, bajo emisión de gotas y formación homogénea del plasma han sido cumplidos por algunas compañías a nivel industrial.

El envenenamiento del blanco tiene un efecto sobre la tecnología del sputtering. Esto se presenta generalmente con el método de arco, en procesos que involucran gases reactivos tales como CH_4 o C_2H_2 . Este envenenamiento trae como consecuencia descontrol de la velocidad de deposición, arco inestable, descontrol estequiométrico del recubrimiento duro, distribución heterogénea y polvos indeseables en la formación del recubrimiento.

2.1.4.2. Característica del sistema de recubrimiento.

Los nuevos sistemas de recubrimientos han sido diseñados desde el punto de vista para ser usados bajo condiciones industriales :

- Fácil operación (no necesita operadores especializados)
- Alta calidad del recubrimiento combinados a alta productividad.
- Control completamente automático.
- Sistema altamente modular
- Fácil acceso al exterior como a los componentes interiores interiores.

- Tiempos estándar entre corridas (carga-descarga), reducidos a 5 min. fuera de la cámara.
- Velocidad de deposición automatizadas para diferentes aplicaciones (3-6 $\mu\text{m/h}$) y se mantiene una calidad estándar de la película o capa.
- Tiempo de renovación del cátodo 3 min.
- Operación manual o automática la cual permite el diseño de una gran variedad de estructuras de recubrimiento [8].

2.2 El Desgaste Abrasivo

De acuerdo a la American Society for Testing and Materials (ASTM), el desgaste abrasivo, algunas veces denominado simplemente abrasión, se puede definir, como el desgaste debido a partículas o protuberancias duras que son forzadas contra una superficie sólida y unidas a lo largo de la misma [9].

El desgaste abrasivo también puede definirse como el desgaste producido por partículas duras que penetra en una superficie ocasionando deformaciones plásticas y arrancando virutas. Se considera que este tipo de desgaste puede tomar dos formas extremas: una, en la cual la deformación plástica es lo más importante y, la otra, en la cual la fractura con deformaciones plásticas limitadas es lo que predomina. Las partículas abrasivas pueden ser inclusiones de una superficie o bien partículas sueltas. Este tipo de desgaste se presenta en equipos de perforación de suelos, trituradoras, molinos de bolas, en algunos casos en cuerpos de contactos deslizantes etc.[10].

2.2 Tipos de desgaste abrasivo

El desgaste por abrasión puede dividirse en tres categorías principales: abrasión penetrante, de alto esfuerzo o abrasión pulverizante y abrasión ligera, de bajo esfuerzo por rayado o por erosión. Las tres categorías pueden presentarse simultáneamente en una pieza desgastada pero, por lo general, puede reconocerse el tipo predominante.

2.2.1 Abrasión penetrante

Este tipo de desgaste se caracteriza por altos esfuerzos (generalmente causados por impacto) y da como resultado una considerable microdeformación de la superficie. Como el abrasivo suele tener buen apoyo, su acción penetrante puede compararse a la de una herramienta de corte.

2.2.2 Abrasión pulverizante o de alto esfuerzo

Este tipo de abrasión ocurre cuando dos superficies de desgaste se frotan entre sí en un medio arenoso con suficiente fuerza para producir trituración de las partículas de mineral o en otros abrasivos atrapados entre las dos superficies. Las cargas normales sobre las superficies generalmente son bajas.

2.2.3 Abrasión por erosión (abrasión de bajo esfuerzo)

Los principales factores que ocasionan el desgaste por erosión son la velocidad y el bajo impacto cuando el movimiento es paralelo a la superficie. Por lo común, este desgaste depende de la dureza de las partículas y en muchas ocasiones también de los filos que éstas presentan. Las partículas abrasivas pueden estar suspendidas o conducidas por un fluido (agua o aire) o pueden fluir por su propio peso (canal de arena).

Los esfuerzos que intervienen en el desgaste por erosión sólo en raras ocasiones son lo bastante intensos para romper los granos abrasivos [11].

2.3 Control de la abrasión

El desgaste abrasivo es un fenómeno complejo y hay un número de factores que pueden influenciarlo. Para un adecuado funcionamiento en servicio es necesario el control de muchos de los factores que lo afectan y que se enumeran a continuación:

2.3.1 Efecto de la dureza.

La dureza de un material puede definirse como su resistencia a una deformación plástica superficial localizada producida por otro material más duro (indentador). La dureza de un recubrimiento es una propiedad importante por cuanto condiciona su comportamiento tribológico (desgaste, fricción, etc) y está determinada principalmente por la magnitud de las fuerzas de unión interatómicas del material y por su microestructura [12].

Hay dos métodos para medir la dureza que se han difundido extensamente para recubrimientos delgados, los cuales son: microdureza Vickers y Knoop.

2.3.1.1 Dureza Vickers.

En el ensayo Vickers el indentador tiene la forma de una pirámide simétrica, con un ángulo de 136° entre sus caras opuestas. El valor de la dureza se obtiene dividiendo la carga aplicada entre el área o superficie de la huella. Esto es realizado midiendo las diagonales de la indentación. Luego mediante la fórmula siguiente:

$$H_v = \frac{P}{A} = \left[\frac{2P \sin\left(\frac{136}{2}\right)}{d} \right] = \frac{1.8544P}{d} \quad \{1\}$$

Donde:

H_v = Microdureza Vickers [Kgf/mm^2]

P = Carga aplicada [Kgf]

d = Longitud de la diagonal (promedio) [mm].

2.3.1.2 Dureza Knoop.

En el ensayo Knoop el indentador tiene forma de pirámide pero con las diagonales asimétrica. Esta asimetría entre sus diagonales tiene una relación entre sus diagonales largas y cortas de 7:1. La siguiente relación permite calcular la microdureza Knoop (Hk):

$$Hk = \frac{P}{A} = \frac{P}{dc} = \frac{14.229}{d} \quad \{2\}$$

Donde:

Hk = Microdureza Knoop [Kgf/mm²]

P = Carga aplicada [Kgf]

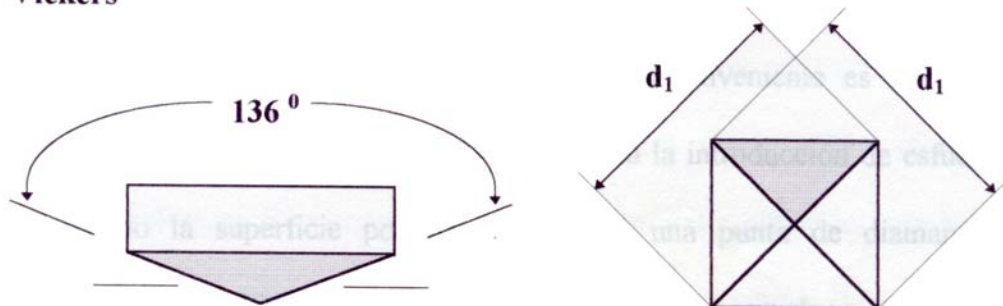
D = Longitud de la diagonal larga [mm]

C = Constante del indentador relativa al área de indentación y la diagonal.

Es importante destacar que en el ensayo Vickers la profundidad de indentación se encuentra

Vickers

a



Knoop

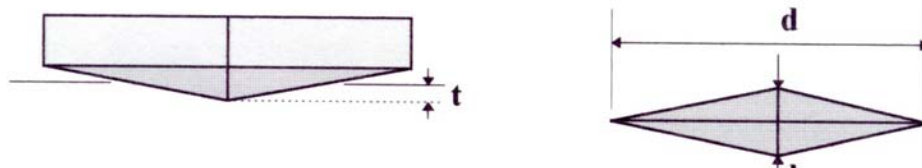


Figura 11. Muestra las pirámides de diamante para los ensayos Vickers y Knoop

2.3.1.3 Efectos del material del sustrato sobre la microdureza :

La indentación produce un efecto perturbador tanto en el recubrimiento como en el sustrato, cuya profundidad es del orden de diez (10) veces la profundidad de la impronta.

En Vickers, la profundidad de impronta δ es:

$$\delta = d/2^{3/2} \tan \alpha / 2 \approx d/7$$

- ◆ Profundidad total afectada: 14 d.
- ◆ Espesor del recubrimiento > 14 d.

Si se tiene: espesor menor y recubrimiento duro sobre sustrato blando, la dureza será menor a la real.

La influencia del sustrato en el valor de dureza para cargas ensayadas se determina mediante la relación h/t , donde h es la profundidad de indentación Vickers ($h \sim d/7$) y t es el espesor del recubrimiento. Si $h/t \leq 0,1$ el valor de microdureza es característico del recubrimiento sin influencia del sustrato, mientras que $h/t \geq 0,1$ (recubrimiento delgado) implica un valor de microdureza compuesto [12].

2.3.2. Efecto de la superficie

El mayor control de la resistencia al desgaste se ha hecho mediante la sustitución del material. Sin embargo, en un campo más amplio, particularmente en el diseño de máquinas, el uso de materiales duros puede ser costoso y por lo tanto injustificado y aunque se ha adaptado la morfología superficial como método para aumentar la dureza de un acero de bajo costo.

2.3.3.- Efecto de la rugosidad.

Es interesante destacar que la rugosidad también puede tener influencia considerable sobre el desgaste de los materiales. Una alta rugosidad generalmente produce mucho desgaste mientras que una rugosidad moderada le confiere capacidad a la superficie de retener lubricantes. Por otra parte, una rugosidad excesivamente alto puede favorecer fenómenos adhesivos y empeorar la pérdida de volumen por desgaste.

2.3.4.- Efecto de la temperatura

Generalmente, el desgaste aumenta con la temperatura debido a los incrementos en la ductilidad de las asperezas y del crecimiento resultante de las juntas metálicas. Sin embargo, se han encontrado temperaturas de transición por encima de las cuales se producen notables reducciones en la velocidad de desgaste. Este fenómeno ha sido asociado a la formación de óxidos con muy buenas propiedades lubricantes; pero es de advertir que la oxidación puede tener efectos opuestos, ya que una alta tasa de oxidación alta puede proporcionar un aumento en la velocidad de desgaste.

2.3.5.- Efecto de tamaño de partícula

El tamaño de partícula, abrasivo y su concentración son dos factores que influyen en el desgaste abrasivo, a mayor tamaño del abrasivo se ha encontrado mayor desgaste abrasivo. Una posible explicación de esto es que las partículas abrasivas no solo cortan o forman canales en la superficie de la herramienta, como en el caso de aceros rápidos, sino que ellos también rompen granos de carburos o conglomerados de granos enteros [14].

2.4.- Técnicas para mejorar la resistencia a la abrasión

Entre las para mejorar la resistencia a la abrasión se pueden citar las siguientes:

Aumentos de dureza, aumentos del contenido de carburos y otros compuestos duros, como por ejemplo nitruros, control de la relación entre la dureza de la superficie y del abrasivo,

disminución del tamaño de las partículas abrasivas, formas de las partículas, disminución de la velocidad y la disminución de las cargas aplicadas [10].

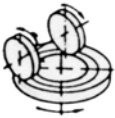
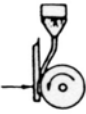
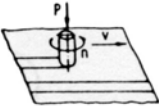
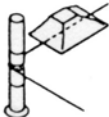


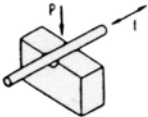
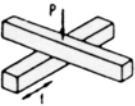
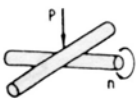
2.5 Comportamiento ante el desgaste de los recubrimientos delgados

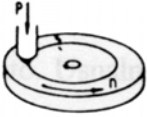
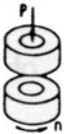

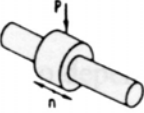

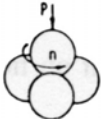
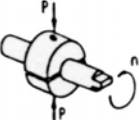
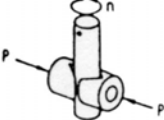

El empleo de recubrimientos resistentes al desgaste para recubrir herramientas de corte así como diferentes componentes para la ingeniería se ha hecho cada vez más amplio. Sin embargo, uno de los principales problemas tanto para el fabricante de recubrimientos, como para el usuario, es la evaluación de las propiedades mecánicas y tribológicas de los recubrimiento en una aplicación dada, y por tanto, la estimación del tiempo de vida y la predicción de su desempeño.

Los recubrimientos depositados mediante las técnicas PVD y CVD resistentes al desgaste normalmente tienen un espesor de 1 a 10 μm , lo que dificulta la evaluación tribológica intrínsecas del recubrimiento o del sustrato. En muchos métodos experimentales, tanto el recubrimiento como el sustrato contribuirán con el desempeño tribológico del sistema usualmente en una forma compleja difícil de predecir [15].

2.5.1. Resistencia al desgaste

La resistencia al desgaste de un recubrimiento puede ser determinado sometiendo a este a cualquiera de los siguientes ensayos que se muestran a continuación en las figuras (12 a y 12b) [16].

TIPO DE ENSAYO	GEOMETRIA	DESCRIPCION
Taber		2 ruedas en contacto plano sobre el disco con movimiento de rodadura
Rueda Abrasiva		Pieza de ensayo plana, ruedas de goma, arena y deslizamiento
Papel abrasivo		Papel abrasivo en contacto con cilindro en rotación+deslizamiento
Hilo		Barra, hilo de nylon, alumina, movimiento lineal con rotación
LFW1		Anillo y bloque, movimiento lineal rotación oscilante del anillo
Optimol SRV		Rodillo cilíndrico/anillo de acero contacto lineal y mov. oscilatorio
Corrosión Fretting		Barra sobre bloque con contacto puntual o lineal, mov. oscilatorio
Corrosión Fretting		2 barras rectangulares en contacto puntual o lineal, mov. oscilatorio
Cilindros cruzados		2 cilindros cruzados con contacto puntual en rotación

TIPO DE ENSAYO	GEOMETRIA	DESCRIPCION
Pin sobre disco		Bola/pin en contacto puntual sobre disco, acción de deslizamiento
Anular		2 anillos planos en contacto para una acción de deslizamiento
Amsler		2 ruedas en contacto lineal con movimiento deslizante e impacto
Collar de desgaste		Barra en deslizamiento con collar, sup. plana en mov. oscilatorio
Ajuste a presión		Collar y pin, sup. plana en mov. de deslizamiento
Cuatro esferas		4 bolas $D=12.2\text{mm}$, 3 contactos puntuales acción deslizante
Almen-Wieland		1 eje, 2 zapatas, contacto lineal
Falex		1 eje, 2 bloques en V de acero, contacto lineal, acción deslizante
Lubrimeter		1 eje, 2 chavetas, contacto lineal, acción de deslizamiento

La necesidad de un método de caracterización, rápido, simple y sencillo de la resistencia al desgaste abrasivo para recubrimientos delgados es evidente. En 1991, Kassman y otros presentaron un método para determinar la tasa de desgaste intrínseco por abrasión en recubrimientos delgados. La prueba se conoce hoy como "crater grinder test " y ha estado en servicio en la Universidad de Uppsala, División de Ciencia de los Materiales desde que fue presentado. En la Figura (13) se muestra un esquema del equipo. Este equipo generalmente se emplea en la preparación de muestras para ser observadas en el Microscopio Electrónico de Transmisión. El disco abrasivo gira alrededor de un eje de un eje horizontal. La muestra es adherida con pegamento sobre un disco de metal horizontal, que gira alrededor de un eje vertical, los movimientos combinados producen en la muestra un crater de desgaste en forma de cascaron esférico. Generalmente el medio abrasivo empleado es pasta de diamante [15].

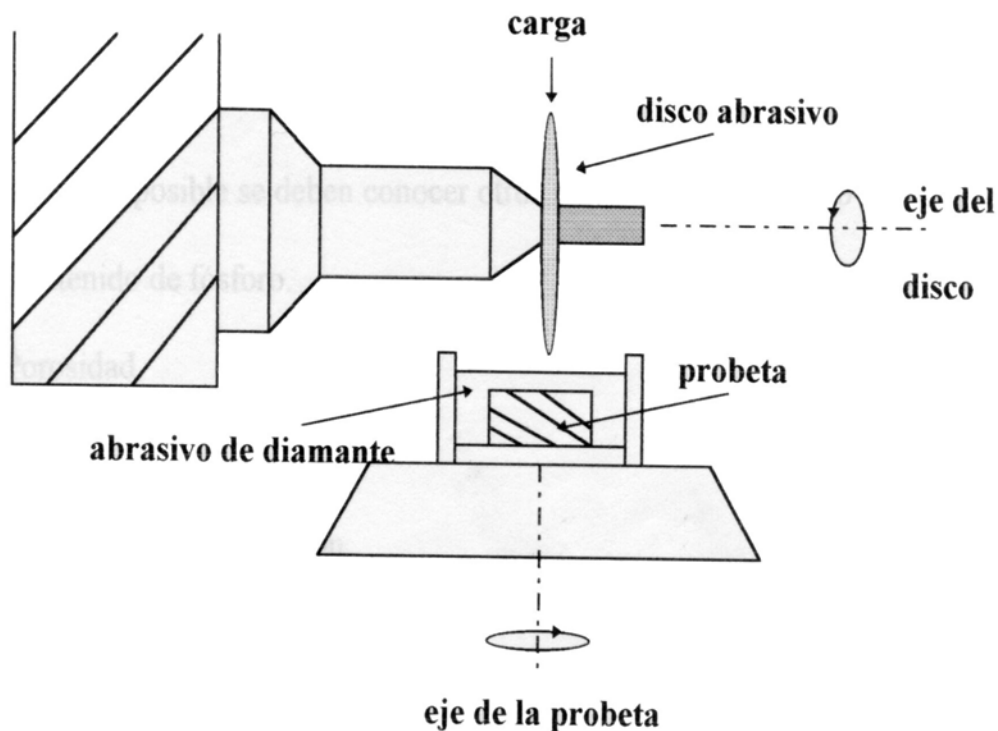


Figura 13. Crater Grinder

El desgaste del recubrimiento y del sustrato pueden ser descritos por la siguiente ecuación:

$$SL = \left(\frac{V_c}{K_c} \right) + \left(\frac{V_s}{K_s} \right) \quad \{3\}$$

Donde:

S = Distancia recorrida

L = Carga

V_c = Volumen desgastado del recubrimiento

V_s = Volumen desgastado del sustrato

K_c = Constante de desgaste del recubrimiento

K_s = Constante de desgaste del sustrato

V_c (que puede ser calculado fácilmente por el diámetro del "crater") es graficado vs. SL- (V_s/K_s) obteniendo K_c como la pendiente de la curva lineal. K_s es obtenida del sustrato sin recubrir. Las constantes de desgaste son esencialmente una medida de la tasa de

desgaste. Mientras mas baja sea la constante de desgaste mejor será la resistencia al desgaste abrasivo [17].

El ensayo ha sido utilizado sub-secuentemente para medir y clasificar la resistencia al desgaste de recubrimientos abrasivos de nitruro de titanio PVD sobre sustrato de acero de herramienta.

El uso de una rotación controlada en contra- cuerpo para generar crateres de desgaste por un abrasivo de tres cuerpos es mas sencillo que el "crater grinder". Happ y Shockley [18] utilizaron la rotación de un cilindro para perfilar la profundidad de capas de difusión en un silicio. Esta tecnica fue sub-secuentemente mejorada por McDonald y Goetzberger [18] que demostraron como el espesor del recubrimiento podría ser derivado de una medición optica por una señal de desgaste. Thompson, [18] utilizó la rotación de una esfera recubierta con una pasta de diamante, para preparar muestras para la delaminación de los perfiles de profundidad mediante la espectroscopia Auger. Con esta geometría, las regiones desgastada toman la forma de una calota esférica. Estudios más detallado de los crateres rea fueron llevados a cabo por Valli [18], quien determinó las condiciones optimas del ensayo para mediciones precisas de espesor. El aparato de rotación esférica es utilizado actualmente en forma rutinaria y este comercialmente avalado para la medición de espesor de los recubrimiento.

K.L. Rutherford. I.M. Hutchings [18] describen una metodología, la cual permite el uso de este aparato de rotación esférica para llevar acabo ensayos de micro-abrasión y la exploración en detalle de los fenómenos asociados al desgaste abrasivo del sistema recubrimiento sustrato.

Desde 1996 M. Staia y colaboradores [19] adaptaron el equipo llamado Calotest ("Adaptación del método de CALOTEST para el ensayo de desgaste abrasivo") , utilizado generalmente para medir espesores delgados ($10\text{ }\mu\text{m}$ - $25\text{ }\mu\text{m}$), para realizar ensayos de micro-abrasión en materiales no homogéneos. El ensayo consiste en hacer rotar una esfera sobre una muestra en presencia de una mezcla que contiene partículas abrasivas, que genera

un "crater" de desgaste cuya geometría esférica conocida esta representada en la Figura 14, [19].

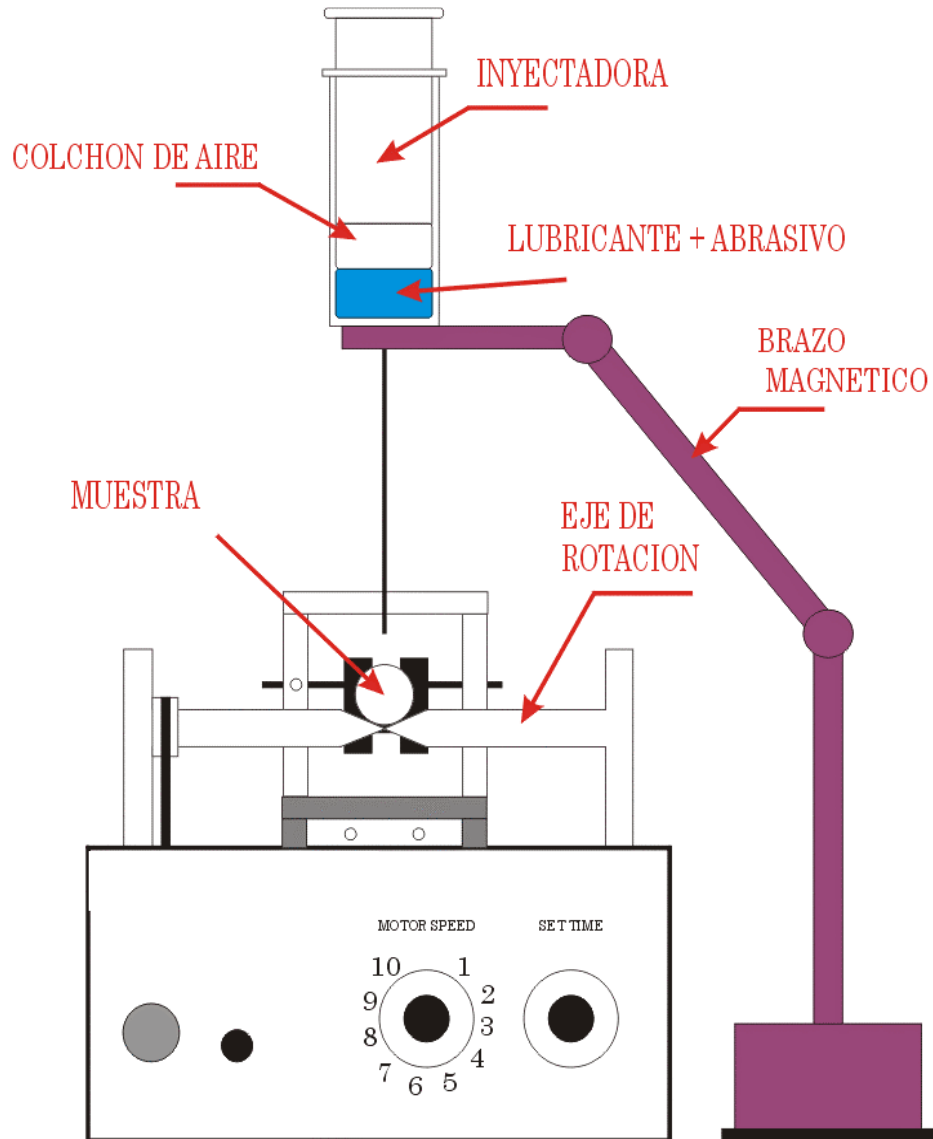


Figura 14. Calotest modificado

2.6. MÉTODO PARA OBTENER LA CONSTANTE DE DESGASTE.

Para materiales homogéneos según la ley de Archad, se aplica la siguiente ecuación :

$$\frac{V}{S} = K' \frac{L}{H} \quad \{4\}$$

Donde:

V= Volumen del material desgastado (m³)

S= Distancia recorrida en [m]

L= Carga en [N]

H= Dureza [Nm⁻²]

K'= Coeficiente de desgaste

Las propiedades de desgaste del material están incluidas en K' y H por esto se prefiere sustituir el coeficiente de desgaste por la constante de desgaste K, definida como:

$$K = \frac{K'}{H} \quad \{5\}$$

La ecuación de desgaste puede ser expresada:

$$\frac{V}{S} = KL \quad \{6\}$$

Donde K se considera normalmente como una constante del material que determina la tasa de desgaste siempre y cuando los parámetros tribológicos, tales como carga, velocidad, ambiente, temperatura y materiales del par tribológico se mantienen constantes.

Sin embargo, para materiales no homogéneos como son los materiales recubiertos, K no es constante. Tan pronto como ambos, recubrimiento y sustrato comienzan a ser desgastados,

el valor de K se convierte en un valor intermedio entre los valores individuales de K de los dos materiales.

Para situaciones en que la tasa de desgaste no es constante la ecuación (14) tiene que ser reformulada como:

$$\frac{dV}{dS} = KL \quad \{7\}$$

$$\frac{dV}{dS} = K(K_c, K_s, L_c, L_s)L \quad \{8\}$$

Donde $K = K(K_c, K_s)$ y K_c y K_s denotan la parte de la constante de desgaste perteneciente al recubrimiento y sustrato respectivamente.

$L = L(L_c, L_s)$ y L_c y L_s denotan la parte de la carga ejercida sobre el recubrimiento y el sustrato, respectivamente[20].

A. Kassman y colaboradores [20] resolvieron una ecuación que permite calcular la constante tanto del sustrato [K_s] como del recubrimiento [K_c] para estas situaciones.

$$S_{appr} = \frac{\pi r h^2}{L K_c} \quad \{9\} \quad \text{si } h \leq t$$

$$S_{appr} = \frac{\pi r h}{L} \left[\frac{2t \left(h - \frac{t}{2} \right)}{K_c} + \frac{(h-t)^2}{K_s} \right] \quad \{10\} \quad \text{si } h > t$$

Donde:

h = profundidad del "crater"

S = distancia recorrida

t = espesor del recubrimiento

N = representa los datos experimentales

Entonces K_c y K_s se pueden representar como:

$$K_c = \frac{\Pi r}{L} \left(\frac{\sum_{i=1}^N h_i^2}{\sum_{i=1}^N S_i} \right) \quad \{11\}$$

y

$$K_s = \frac{\sum_{i=1}^N (h_i - t)^4}{\frac{L}{\Pi r} \sum_{i=1}^N S_i (h_i - t)^2 - \frac{2t}{K_c} \sum_{i=1}^N \left(h_i - \frac{t}{2} \right) (h_i - t)^2} \quad \{12\}$$

2.6 Determinacion de la carga

La tasa de desgaste, depende entre otras cosas, de la carga ejercida en la probeta por la bola. Dicha carga depende del peso de la bola y de la inclinación del plano de la probeta con respecto de la horizontal.

Debido a que debe existir rodadura entre el eje y la bola, la inclinación de la probeta debe ser tal que la carga sobre ella sea menor que la carga sobre el eje. También se utiliza un

lubricante entre la bola y la probeta para asegurar que la fuerza de fricción entre ellas sea menor que la fuerza de fricción entre la bola y el eje. El uso de un lubricante también sirve para otro propósito, que es el de asegurar abrasión pura como único mecanismo de desgaste [16].

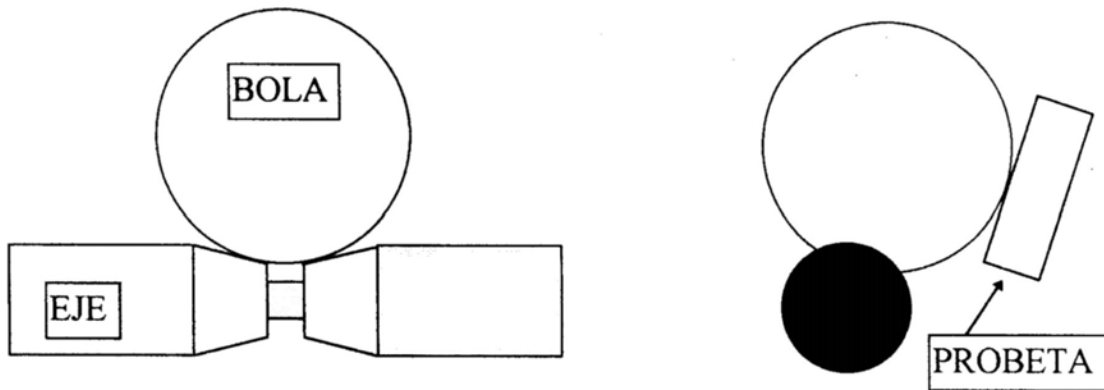


Figura 15. Esquema del eje, bola y probeta en sus posiciones relativas.

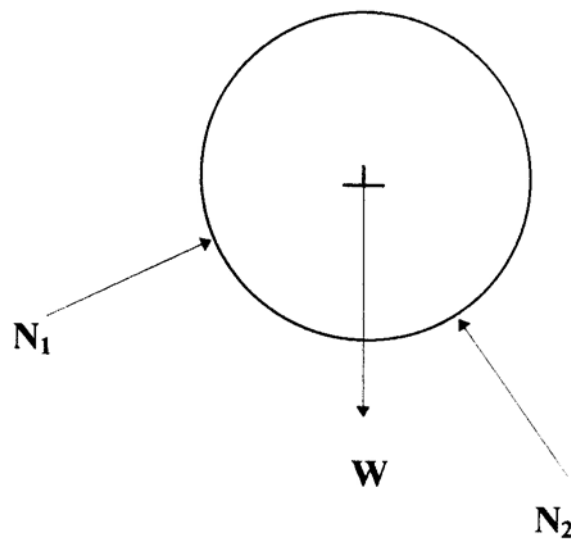


Figura 16. Diagrama de cuerpo libre (solo se consideran cargas estáticas)

En la figura 16 se representan las fuerzas que actúan sobre la bola, en donde:

N_1 = Carga ejercida sobre la probeta (N)

N_2 = Carga ejercida sobre el eje (N)

W = Peso de la bola (N)

Geometría:

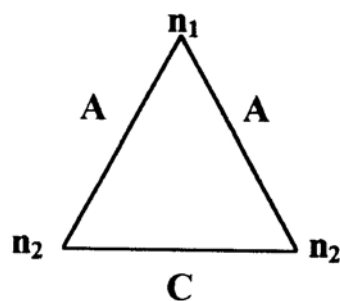


Figura 17. Triángulo formado entre los puntos de apoyo (n_1 - n_2)

Donde:

A = Distancia entre el punto de apoyo (n_1) y el eje (n_2).

C = Distancia entre los dos puntos de apoyo en el eje (n_2).

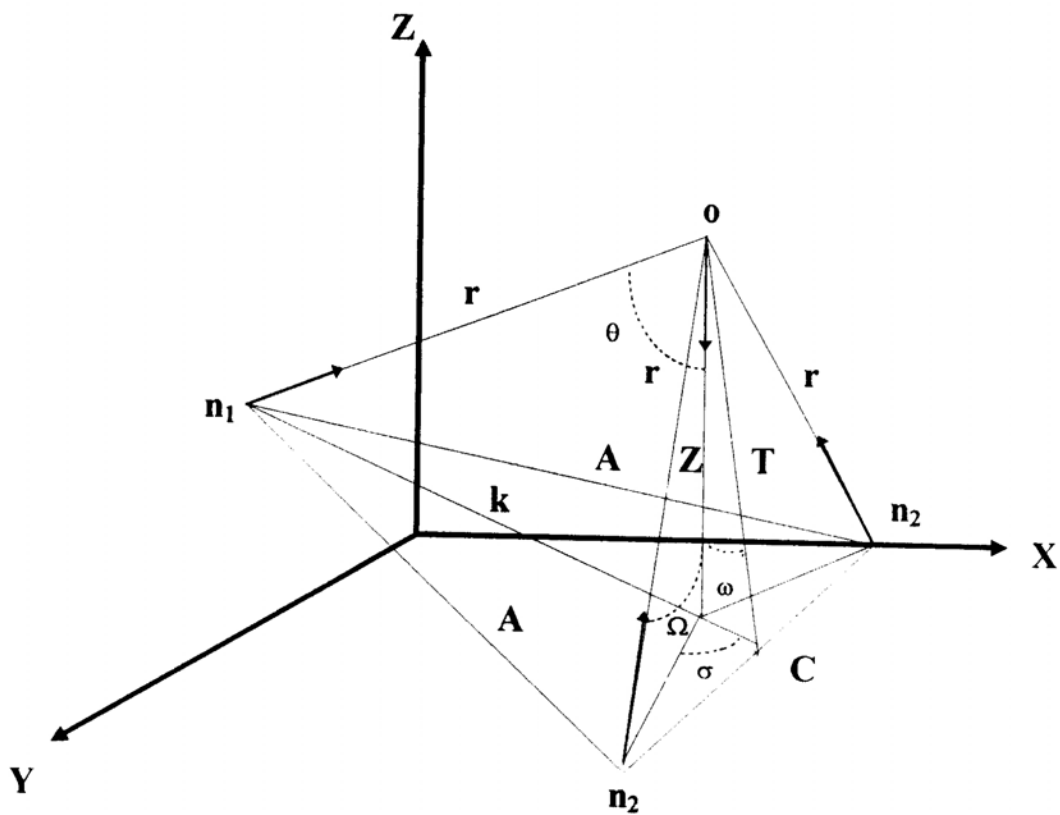


Figura 18. Representación tridimensional de las fuerzas y su geometría.

θ = Angulo entre la vertical y la normal a la probeta.

Ω = Angulo entre la vertical y la normal al eje.

R = Radio de la bola.

O = Centro de la bola.

Las distancias A y C son medidas directamente. El ángulo θ es el ángulo que forma el plano de la cara ensayada en la probeta con el plano horizontal y puede ser regulado a un valor deseado en el equipo.

De los triángulos formados en la figura 18 se deducen las siguientes formulas utilizadas para la obtención de la carga [16].

$$T = \sqrt{R^2 - \left(\frac{C^2}{4}\right)} \quad \{13\}$$

$$K = \sqrt{A^2 - \left(\frac{C^2}{4}\right)} \quad \{14\}$$

$$\omega = \arccos \left[\frac{T^2 + r^2 \cdot K^2}{2rT} \right] - \theta \quad \{15\}$$

$$\lambda = \arcsin \left[\frac{r}{k} \sin(\theta + \varpi) \right] \quad \{16\}$$

$$S = \frac{-2T \sin \lambda c \operatorname{tg} \omega \pm \sqrt{(2T \sin \lambda c \operatorname{tg} \omega)^2 - 4 \left(1 - \frac{\sin \lambda}{\sin^2 \omega}\right) (-T^2)}}{2 \left(1 - \frac{\sin^2 \lambda}{\sin^2 \omega}\right)} \quad \{17\}$$

$$Z = \frac{S \sin \lambda}{\sin \omega} \quad \{18\}$$

$$Q = \sqrt{S^2 + \left(\frac{C^2}{4}\right)} \quad \{19\}$$

$$\Omega = \arccos \frac{r^2 + Z^2 - Q^2}{2Zr} \quad \{20\}$$

$$\sigma = \arcsin \frac{C}{2Q} \quad \{21\}$$

$$N_1 = \frac{W}{\cos \theta + \frac{\sin \theta \cos \Omega}{\sin \Omega \cos \sigma}} \quad \{22\}$$

$$N_2 = \frac{N_1 \sin \theta}{2 \cos \sigma \sin \Omega} \quad \{23\}$$

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1 Elaboración y obtención de las probetas

Las probetas ensayadas, cuyas dimensiones se indican en la Figura 19, han sido cortadas a partir de barras de acero inoxidable 316L y preparadas metalográficamente hasta producir una rugosidad superficial de 600 y 800 Grif . Seguidamente las muestras han sido recubiertas con nitruro de titanio obtenido mediante dos técnicas de PVD: la técnica de bombardeo iónico (magnetron sputtering) realizado por la compañía Teer Coating y la técnica de arco catódico realizado por la compañía Platit.

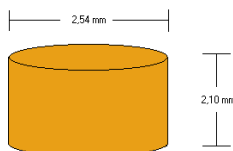


Figura 19. Dimensiones de las probetas

3.2 Medición de la rugosidad

Con la finalidad de estudiar la rugosidad en el sustrato, de las probetas recubiertas , profundidad y rugosidad de los crateres despues de los ensayos de micro-abrasión se utilizó perfilometría el perfilometro por interferometría óptica marca Zygo NewView (ver Figura 20).

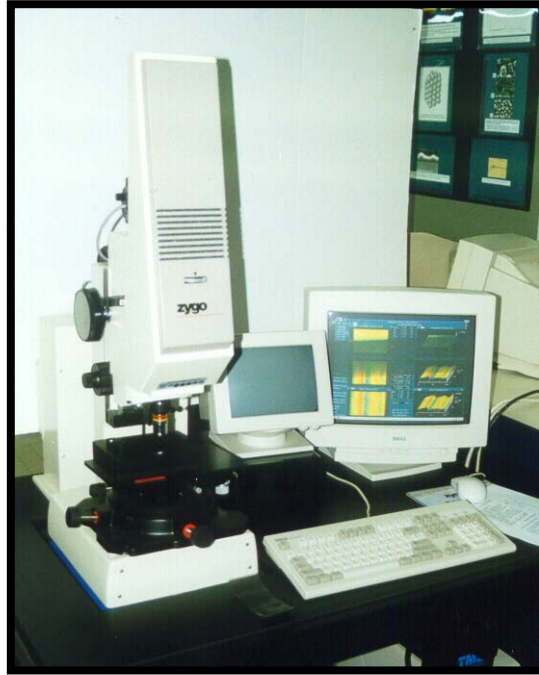


Figura 20 . Equipo de perfilometría Zygo

3.3 Caracterización del recubrimiento de TiN

3.3.1 Medición del espesor del recubrimiento

Calotest:

Este equipo de precisión modelo S/N 13-233 es fabricado por CSEM (Suiza). Sus características principales son:

Velocidad del eje :Desde 60 hasta 1200 r.p.m con posibilidad de ajuste continuo por medio de un potenciómetro.

Diámetro de la bola: Diámetro mínimo 10 mm y diámetro máximo 40 mm

Duración de la abrasión: Por medio de un regulador electrónico se puede seleccionar el intervalo de tiempo que va desde 10 seg. hasta 9 min.

Alimentación: 220 V (110 V opcional).

Mesa para soporte de la muestra: esta tiene una superficie efectiva de 80x80 mm y es provista con diferentes tipos de mordazas para ajustarse a la forma de la probeta. El Calotest tiene una tolerancia en la medición de $\pm 5\%$; pero puede llegar hasta $\pm 10\%$ en recubrimientos

3.3.1.1 Procedimiento para la medición del espesor en los recubrimientos delgados

El espesor no es una propiedad en si misma, pero puede influir en gran parte a la determinación de la calidad de un recubrimiento. En el experimento de micro-abrasión da una idea del tamaño de partícula a utilizar en la mezcla abrasivo- lubricante, en el ensayo.

El método utilizado para la obtención de los espesores fue el CALOTEST, que permite realizar medidas de espesor relativamente rápidas. Es un instrumento de uso simple que consiste básicamente en un eje, este trasmite movimiento a una esfera de acero que erosiona la muestra formando una cavidad esférica ver (Figura 22).



Figura 22. Equipo Calotest

En la siguiente figura se muestra un dibujo explicativo de la huella ("crater") y sus dimensiones

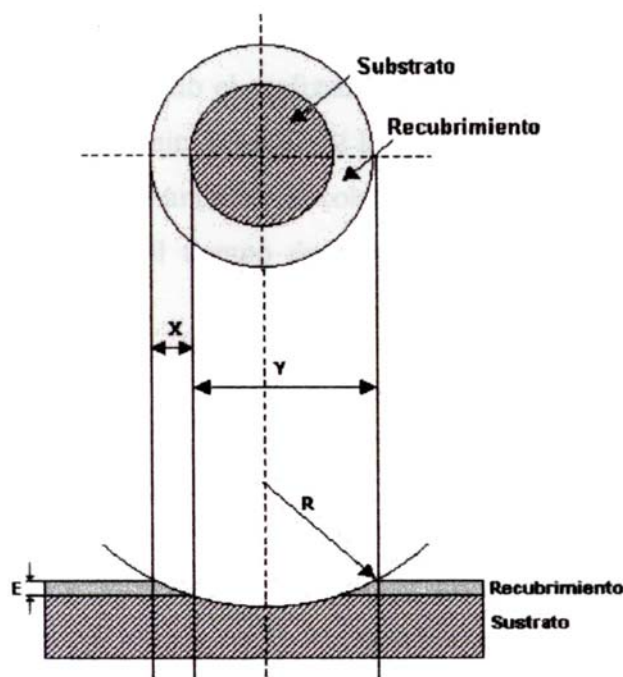


Figura 23. Principio del Calotest

Antes de realizar el ensayo para la obtención del espesor las probetas fueron limpiadas en el ultrasonido con acetona durante 30 min. y luego en alcohol durante 10 min. El principio de medición del Calotest consiste en el uso de una bola untada con pasta abrasiva compuesta por pequeñas partículas de diamante. Generalmente se comienza usando pasta de diamante de $6\ \mu\text{m}$ para lograr con esto un desbaste relativamente rápido del recubrimiento, seguidamente se repite la operación con las pastas de diamante de $3\ \mu\text{m}$ y $1\ \mu\text{m}$. Esto se hace con el fin de obtener un "crater" bien definido que permite la determinación de las longitudes características con facilidad debido al pequeño espesor del recubrimiento, en este experimento se utilizó pasta de diamante de $1\ \mu\text{m}$. Una vez obtenida la huella, se limpió con un poco de alcohol se observa si cumple aproximadamente la relación $x/y=1/5$. Posteriormente se retira y se ataca para obtener una mejor visualización de la zona correspondiente al recubrimiento y al sustrato [21]. Seguidamente el "crater" se observa y

se mide empleando una Lupa Nikon SMZ-U acoplada al analizador de imágenes LECO 3001. Se obtienen las longitudes X e Y en micras, que permiten calcular el espesor mediante la siguiente formula :

$$E = \frac{X * Y}{2R} \quad \{24\}$$

Donde: X , Y y R se muestran en la (Figura 23).

3.3.2 Medición de la dureza compuesta (micro-dureza Vickers)

Antes de realizar las medidas de microdureza las probetas fueron limpiadas en un equipo de ultrasonido marca LECO modelo UC-50 con acetona durante 30 min. y luego en alcohol durante 10 min.

Para determinar la dureza se utilizó el micro-durometro marca Leco modelo M-400-H, el cual tiene acoplado un microidentador Vickers (HV).

El ensayo consistió en la aplicación de diferentes cargas: 25, 50, 100, 200, 300 y 500 gf, utilizando un indentador de diamante de forma piramidal de base cuadrada durante 15 s en una zona escogida del recubrimiento se utilizaron 12 indentaciones para cada carga. Luego de la aplicación de la carga con ayuda del analizador de imágenes Leco 3001 se midieron las diagonales de las huellas y se determinó el valor de la dureza compuesta del sistema recubrimiento/substrato para cada carga utilizada. Los resultados se grafican para representar la dependencia de la dureza (Gpa) con la profundidad relativa de indentación (RID). La profundidad relativa de indentación es un parámetro adimensional que se determina mediante la siguiente formula:

$$RID = \text{Profundidad} / \text{Espesor} \quad \{24\}$$

$$\text{Profundidad} = D_p / 7 \quad \{25\}$$

Donde D_p es el promedio de la diagonales para cada valor de carga

3.3.3 Caracterización morfológica

3.3.3.1 Microscopía Electrónica de Barrido

Esta técnica se empleó para observar la morfología del recubrimiento y el mecanismo de desgaste predominante en el ensayo de micro-abrasión. El equipo utilizado fue el Microscopio Electrónico de barrido marca Hitachi S-400 ubicado en el Centro de Microscopía Electrónica de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, de la Universidad Central de Venezuela.

3.4 Determinación del ensayo de micro-abrasión

Para realizar los ensayos de micro-abrasión se utilizó el CALOTEST modificado para tal fin. El equipo esta dotado de un porta probeta donde se coloca la muestra, una jeringa de vidrio con la mezcla abrasivo-lubricante, un brazo magnético para sostener la jeringa y una bola de rodamiento, (ver Figura 24). El ensayo consiste en hacer rotar una esfera sobre una muestra en presencia de una mezcla que contiene partículas abrasivas, y que genera un "crater" de desgaste cuya geometría esférica es conocida.

3.4.1 Procedimiento para la determinación del ensayo de micro-abrasión

Para realizar el ensayo, cada probeta fue limpiada en un equipo de ultrasonido marca LECO modelo UC-50 durante 30 min. sumergiéndole completamente en acetona y 10 min. sumergiéndole completamente en alcohol.

Antes de realizar el ensayo se procedió a calcular los parámetros y fijar algunos de ellos que se mencionan a continuación:

- Mezcla abrasivo lubricante.
- Posición de la probeta y bola de rodamiento.

- Carga a utilizar.
- Distancia de recorrido.
- Velocidad.
- Dosificación de la mezcla abrasivo-lubrican.

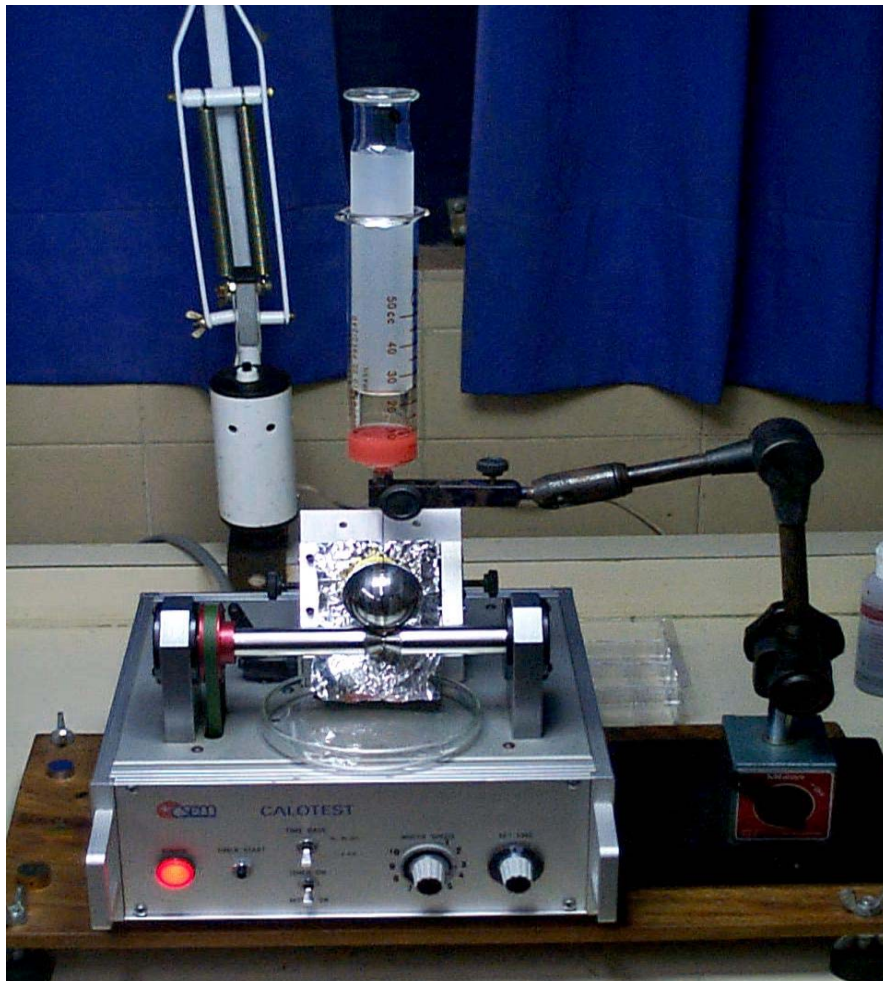


Figura 24. Calotest modificado

3.4.1.1 Preparación de la mezcla abrasivo lubricante

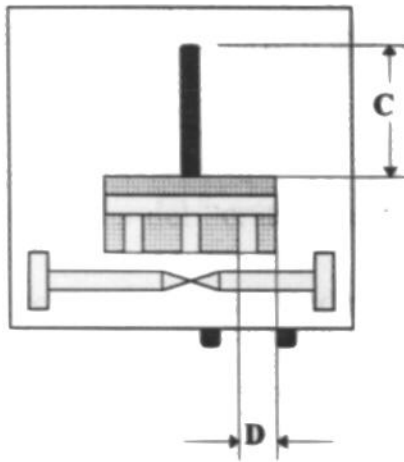
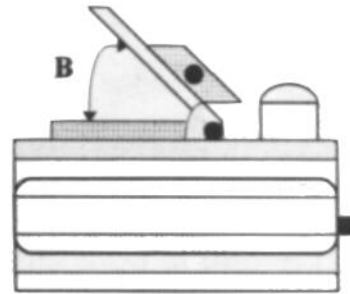
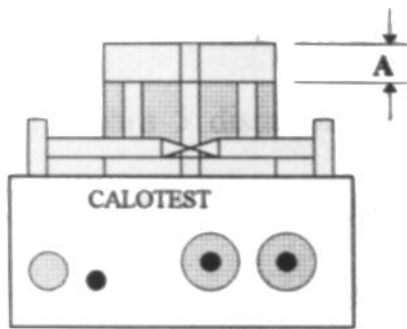
Para la elaboración de esta mezcla se utilizó:

Pasta de diamante de $1\mu\text{m}$ marca Leco y Lubricante para pulido con pasta de diamante marca Leco (Microid Diamond Compound Extender).

Se mezcló 1 gramo de pasta de diamante en 50 ml de lubricante en un beaker. Para ayudar la incorporación de la pasta, la mezcla se colocó en una plancha de calentamiento durante 30 min empleando un agitador magnético.

3.4.1.2 Posición de la probeta y bola de rodamiento

Para la inclinación de la probeta, el Calotest posee una escala en grados que va desde 30° hasta 90° en aumentos sucesivos de 10° . La altura de la probeta con respecto al eje también puede ser regulada pero esta no posee una escala para tal fin. No existe una escala que permita conocer la posición horizontal de la probeta (cuán lejos o cuán cerca está la probeta del eje). En vista de la necesidad de conocer la posición de la probeta con exactitud, se han establecido una serie de medidas características para posicionar la probeta (ver Figura 25) teniendo en cuenta que la posición de la probeta determina la carga que se ejerce sobre ella. El ángulo de inclinación utilizado para los ensayos fue de 65° . Una vez colocada la probeta en su posición correcta, se utilizó para ejercer la carga sobre la probeta y como contraparte en el par tribológico una bola de rodamiento RB38.1/g100p3, según norma ISO 3290-1975. Se utilizó también un brazo magnético marca Mitutoyo, este brazo permitió sujetar en posición la jeringa durante los ensayos.



A = Distancia de plato.
B = Inclinación de probeta.
C = Distancia de bandeja.
D = Distancia de mordaza.

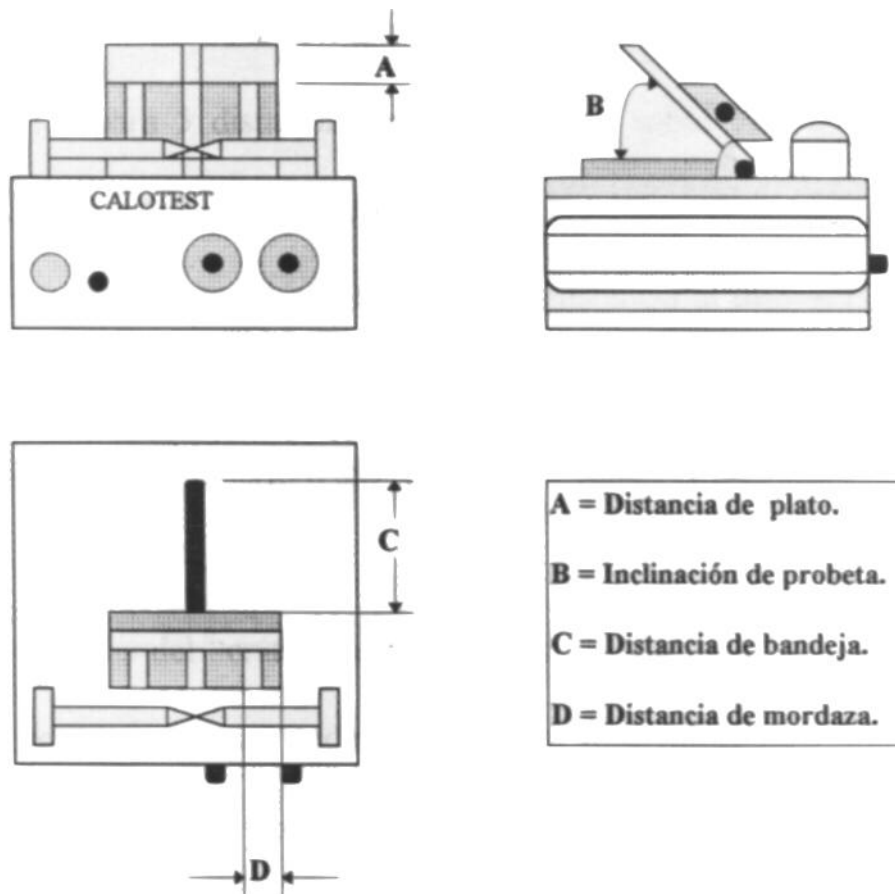


Figura 25. Dibujo esquemático del Calotest y las medidas características para el posicionamiento de la probeta en el mismo.

3.4.1.3 Determinación de la carga

Para calcular la carga necesaria en los ensayos se utilizaron los siguientes valores y se empleo la formula indicada en la pagina () :

$$\theta=65^{\circ}, R=19.05 \text{ mm}, L=25.15 \text{ mm}, C=16.25 \text{ mm}, W=225 \times 10^{-3} \text{ Kgf}$$

Donde:

- θ es el ángulo que forma el plano de la probeta
- R es el radio de la bola
- L es la distancia entre el punto de apoyo en la probeta y los puntos de apoyo en el eje
- C es la distancia entre los dos puntos de apoyo sobre el eje
- W es el peso de la bola

Donde:

$$N_1=0.68 \text{ N}$$

$$N_2=1.12 \text{ N}$$

3.4.1.4 Determinación de la distancia de recorrido (S)

Uno de los parámetros más importantes que debe controlarse con exactitud es la distancia recorrida (S) y para esto se debe controlar tanto la velocidad del eje, como el tiempo durante el cual el mismo esta en rotación. El Calotest está dotado de un potenciómetro para regular la velocidad y también posee un regulador electrónico para el tiempo.

En los ensayos se utilizaron los siguientes tiempos:

PROBETAS	t (minutos)	S (m)
Acero 316L	1	66.6
	3	199.8
	5	333
	9	599.4
	12	1799.2

Tabla I . Distancias de recorrido probetas de acero316L

PROBETAS	t (minutos)	S (m)
Depositadas por el Método de Arco catódico	1	66.6
	3	199.8
	5	333
	9	599.4
	12	1799.2

Tabla II . Distancias de recorrido probetas recubiertas
por el método de arco catódico

PROBETAS	t (minutos)	S (m)
Depositadas Por el método de Bombardeo Iónico	1	66.6
	3	199.8
	9	599.4
	12	799.2
	15	999.0
	18	1198.8
	21	1398.6

Tabla III. Distancia de recorrido probetas recubiertas
por el método de bombardeo iónico

3.4.1.5 Determinación de la velocidad del ensayo

El Calotest está dotado de un potenciómetro para regular la velocidad pero no posee un dial en la perilla de control que permita identificar una velocidad en específico. Esto se debe a que en las mediciones del espesor del recubrimiento la velocidad exacta no es parámetro de importancia.

En la adaptación de este equipo para realizar los ensayos de desgaste se colocaron marcas de graduación alrededor de la perilla. Con el fin de agilizar la lectura se colocaron 10 marcas de graduación alrededor de la perilla reguladora de velocidad, desde 1 hasta 10.

Durante todos los ensayos se colocó en el No 7 que corresponde a una velocidad de 1.11 m/s. La velocidad angular corresponde a una determinada velocidad lineal en el eje del Calotest y éstas a su vez corresponde a una velocidad lineal en el meridiano de la bola.

3.4.1.6 Dosificación de la mezcla abrasivo lubricante

Para la dosificación de la mezcla lubricante-abrasivo se utilizó una jeringa de vidrio marca VAN de 50 cc con émbolos intercambiables, la aguja utilizada fue # 24 para todos los ensayos.

La posición de la jeringa debe ser tal que la aguja esta centrada con la vertical que pasa por el centro del eje. La altura del brazo E es medida desde la parte superior del Calotest hasta la parte superior del brazo magnético ver (Figura 27). La mezcla abrasiva no debe entrar en contacto con el eje, ya que produciría desgaste en el mismo arruinando el equipo. La cantidad de abrasivo lubricante debe ser tal que siempre exista mezcla entre la probeta y la bola.

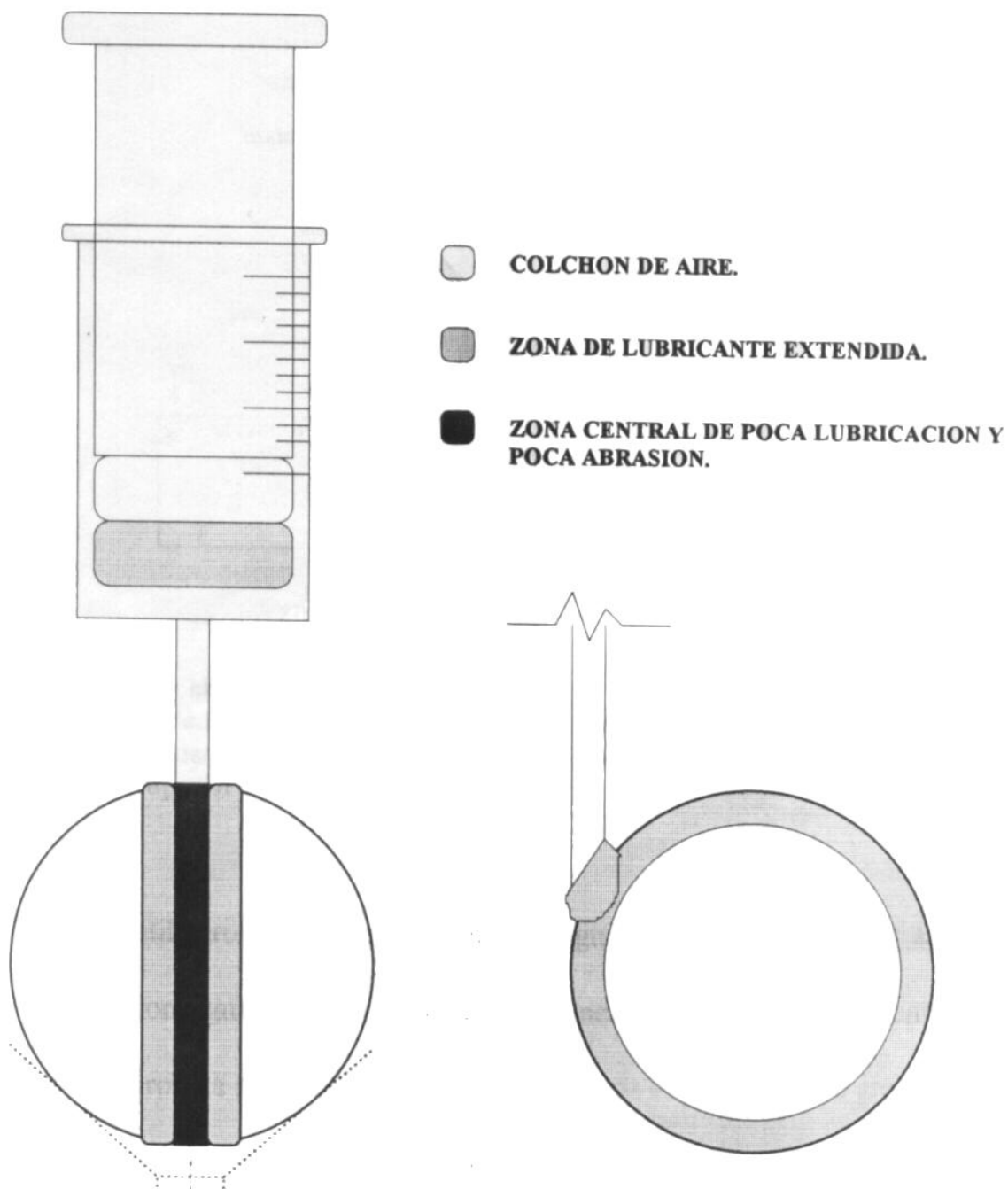
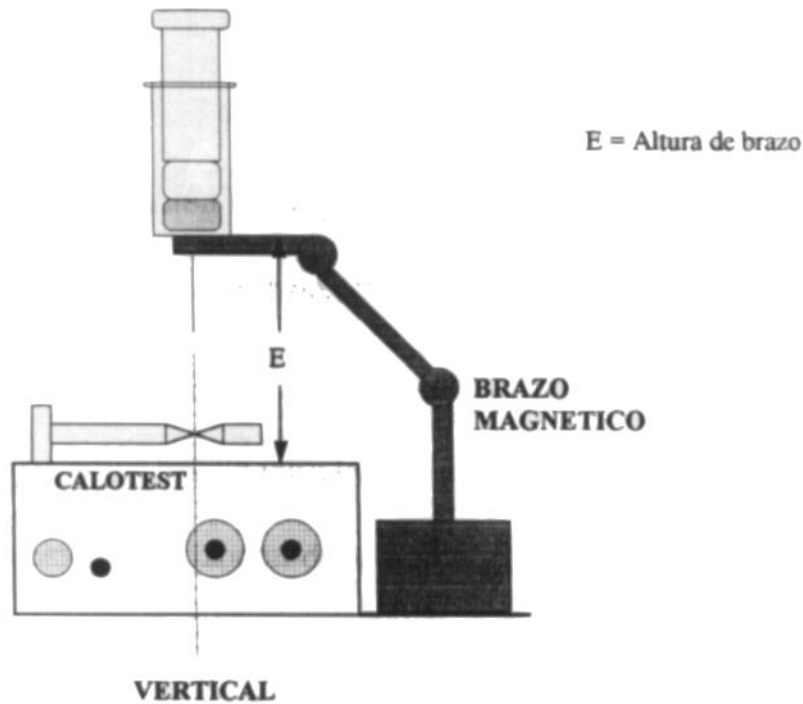


Figura 26. Muestra como se reparte la mezcla sobre la bola en movimiento. Además se observa que la mezcla y el émbolo están separados por un colchón de aire que impide el contacto directo entre ambos, lo cual resultaría en un desgaste prematuro del émbolo y/o el émbolo se adhiere a las paredes de la jeringa.

Figura 27. Posición de la jeringa y altura del brazo magnético.



3..5 Obtencion de la huella o "crater" en la probeta

Una vez colocada la probeta, bola de rodamiento y la jeringa con el abrasivo en el equipo se procede a la obtención de los "crateres" en la probeta. La obtención del "crater" se realizó para 5 distancias recorridas y 3 corridas para las probetas de acero 316L y para las probetas recubiertas por el método de arco catódico (9,11, y 17) y 7 distancias recorridas y 2 corridas para las probetas recubiertas por el método de bombardeo iónico (18 y 19). Una vez terminado el ensayo la probeta tiene un aspecto como lo muestra la siguiente figura:

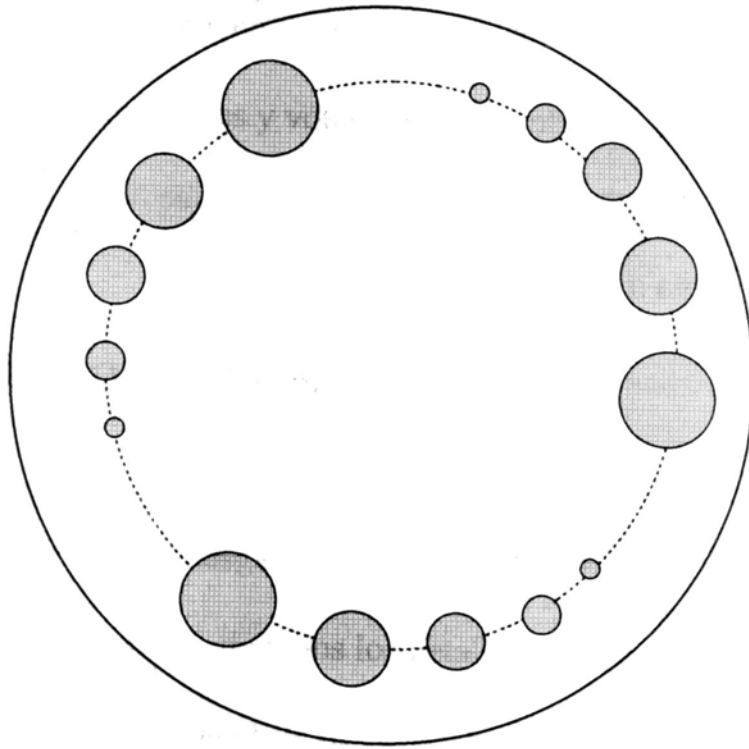


Figura 28. Aspecto de una probeta después de haber sido ensayada.

Como puede observarse en la Figura 27 los "cráteres" están en una misma línea concéntrica en la probeta. Si el ensayo se detiene por algún motivo y se retira la probeta, debe realizarse el "crater" en otra zona de esta ya que no se puede asegurar una posición correcta sobre el mismo "crater".

3.6 Registro de datos

Una vez realizados los ensayos de desgaste se retira la probeta y se limpia con alcohol. Con ayuda de la lupa y el analizador de Imágenes se miden los diámetros de los "cráteres" con aumentos de 25X. Se realizaron 5 medidas de diámetro, de cada crater se reporta el valor promedio, la profundidad, el volumen del "crater" (volumen desgastado) mediante las siguientes formulas:

$$h = R - \frac{1}{2}(\sqrt{4R^2 - D^2})$$

$$V = \pi/3h^2 * (3R-h)$$

Donde:

h = profundidad del “crater”

R = radio de la bola

D = diámetro externo del “crater”

En cada ensayo de desgaste se obtienen esta serie de datos numéricos así como también se toma nota de todos los detalles experimentales particulares a un determinado ensayo. Con el fin de recolectar y archivar todos los cálculos, datos y detalles relativos al ensayo, se diseñó una hoja de cálculo que facilita y agiliza la obtención de estos resultados. Para los cálculos se utilizó Excel versión 5.0 (ver Figura 29).

3.4. Determinación de las constantes

Una vez obtenida la hoja de datos de cada uno de los ensayos realizados en cada probeta se obtuvo el promedio del diámetro y de la profundidad, la desviación estándar correspondiente al acero 316L, probetas recubiertas por el método de arco catódico y probetas recubiertas por bombardeo iónico, se gráfico h promedio vs distancia recorrida del ajuste de estos puntos experimentales a la curva teórica descrita por la ecuación (6) se obtuvo la constante de desgaste para el substrato (Ks), para las probetas recubiertas por el método de arco catódico y el método de bombardeo iónico el ajuste de los puntos experimentales se hizo a la curva teórica descrita por las ecuaciones (9), (10), (11) y (12) obteniéndose los valores de la constante de desgaste del recubrimiento (Kc) y del substrato (Ks). El ajuste de la curva experimental se realiza por medio del método de mínimos cuadrados.

Figura 29. Modelo de hoja de calculo

S [metros] 66.6 60 S (1 M N)	1 [μm]	2 [μm]	3 [μm]	D _h [mm] = 38.103 Radio [mm] = 19.0515 Radio [μ] = 19051.5 CARGA [N] = t _{μm} = k _s [m ² / N] = k _c [m ² / N] = HK ₁₀₀ =			
DAM [μm]				BOLA : RB38.1/G100P4			
PROF [μm]				W (Boh) =			
VOL [mm ³]				ABRASIVO :			
S [metros] 199.8 180 S (3 M N)	1 [μm]	2 [μm]	3 [μm]	VEL.DE ENSAYO :			
				FECHA :			
				#DE ENSAYO :			
				TPO PROBETA :			
DAM [μm]				#DE PROBETA :			
PROF [μm]				TRATAMIENTO :			
VOL [mm ³]				SUBSTRATO :			
S [metros] 333 300 S (5 M N)	1 [μm]	2 [μm]	3 [μm]	AGUJA =			
				L =			
				NCLNACION :			
DAM [μm]				DAT.ESPESOR DEL RBTO. (E)			
PROF [μm]				X [μm] Y [μm] XY			
VOL [mm ³]				0.0000			
				0.0000			
				0.0000			
				0.0000			
				0.0000			
				0.0000			
S [metros] 599.4 420 S (9 M N)	1 [μm]	2 [μm]	3 [μm]	S [metros] 799.2 540 S (12 M N)	1 [μm]	2 [μm]	3 [μm]
DAM [μm]				DAM [μm]			
PROF [μm]				PROF [μm]			
VOL [mm ³]				VOL [mm ³]			
PROF PROMEDIO [μ]	S						
	h [max]						
	h [min]						
VOL PROMEDIO [mm ³]	S						
	V [max]						
	V [min]						

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Rugosidad en el acero 316L y probetas recubiertas

Una vez realizadas las mediciones de rugosidad, se obtuvieron dos imágenes, la primera es una imagen microscópica de la superficie de la probeta tomada a un aumento de 5X y la segunda es una gráfica de la rugosidad de la probeta en tres dimensiones reportando un valor promedio de rugosidad Ra.(Ver Tabla IV).

PROBETA	PROCESO	RUGOSIDAD Ra	DESVIACION ESTANDAR
Acero 316L	-----	0.016	
Acero 316L	-----	0.13	0.003
18	Bombardeo Ionico	0.14	0.007
19		0.17	0.019
9	Arco catódico	0.15	0.004
11		0.13	0.008
17		0.14	0.006

Tabla IV. Resultados de rugosidades

En la Figura (30) se puede observar la apariencia superficial del substrato acero 316L pulido a lija No 600 y 800 respectivamente.

En la Figura 31 se muestran las superficies del recubrimiento depositadas sobre el substrato el cual tenía un acabado superficial de lija No 600. Se observa que la superficie de las probetas recubiertas por el método de bombardeo iónico muestran las líneas dejadas por la lija más nítida y homogéneas que las depositadas por el método de arco catódico, en la cual se observan muy pocas líneas de lijado y con mayor cantidad de zonas claras. Esto sucede también en la Figura 32 en donde el acabado superficial del substrato fue de lija No 600.

Las gráficas de los perfiles de rugosidad muestran las línea de desbaste dejadas por los distintos tipos de acabado superficial en el sustrato.

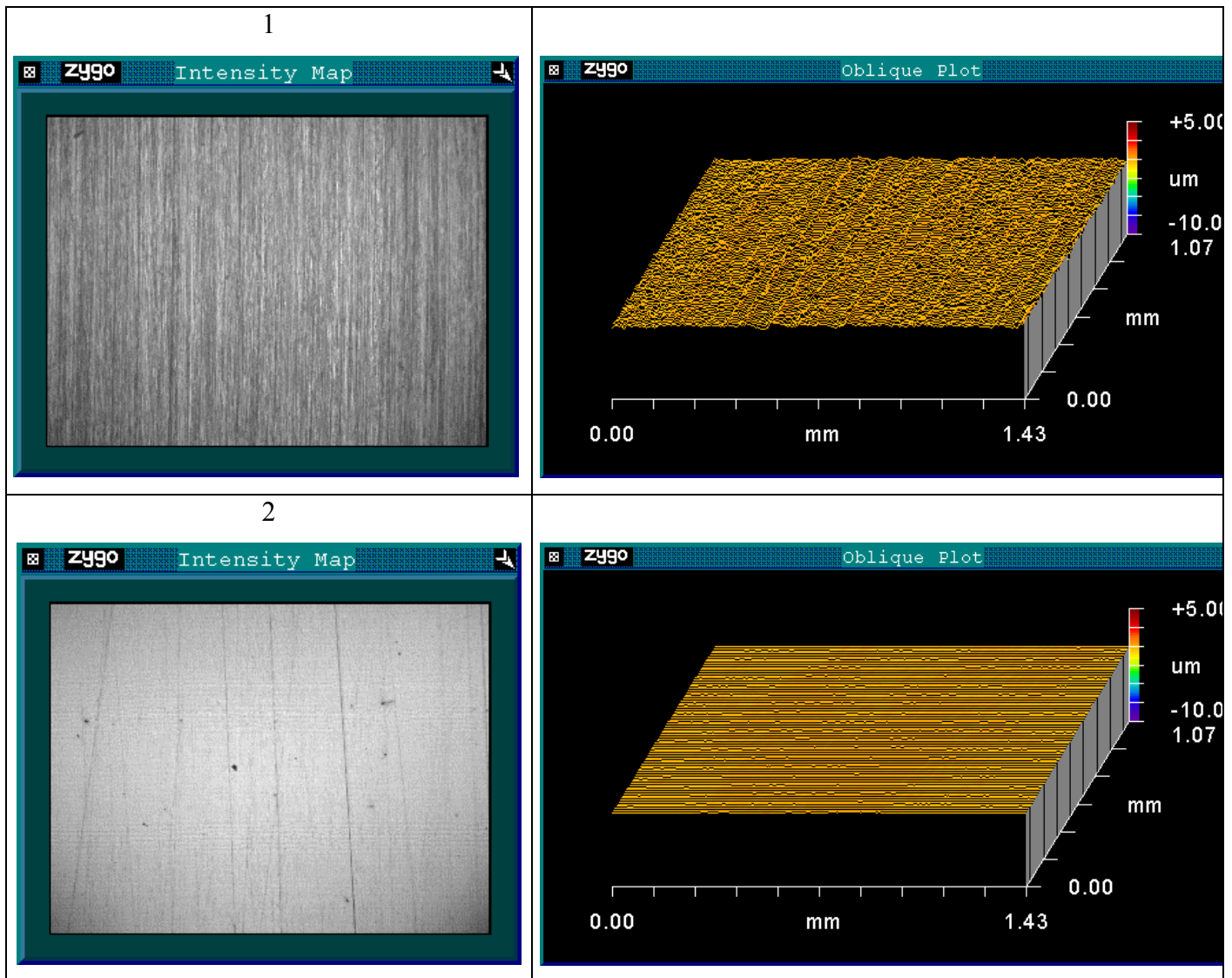


Figura 30. Imagen de la superficie del acero 316L y gráfica de su rugosidad, condición de acabado superficial lija 600 probeta 1, lija 800 probeta 2.

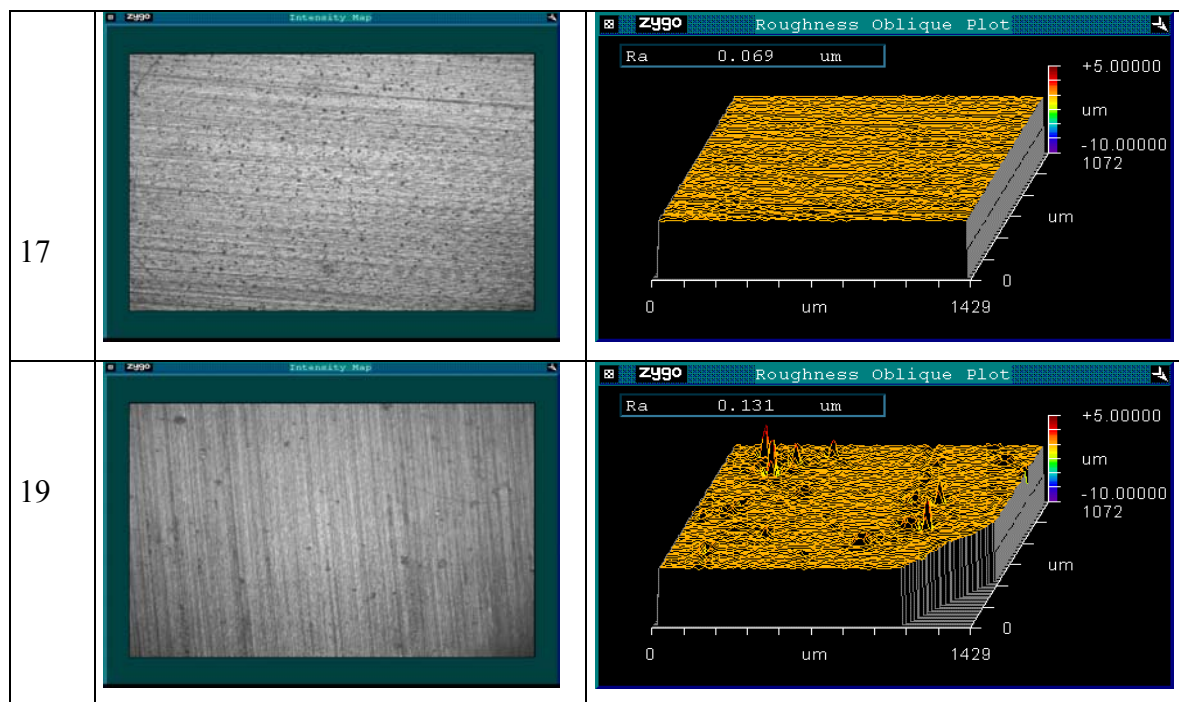


Figura 31. Imagen de la superficie de la muestra y gráfica de su rugosidad, condición superficial del sustrato lija 600 (probeta 17: arco catódico y probeta 19 bombardeo ionico)

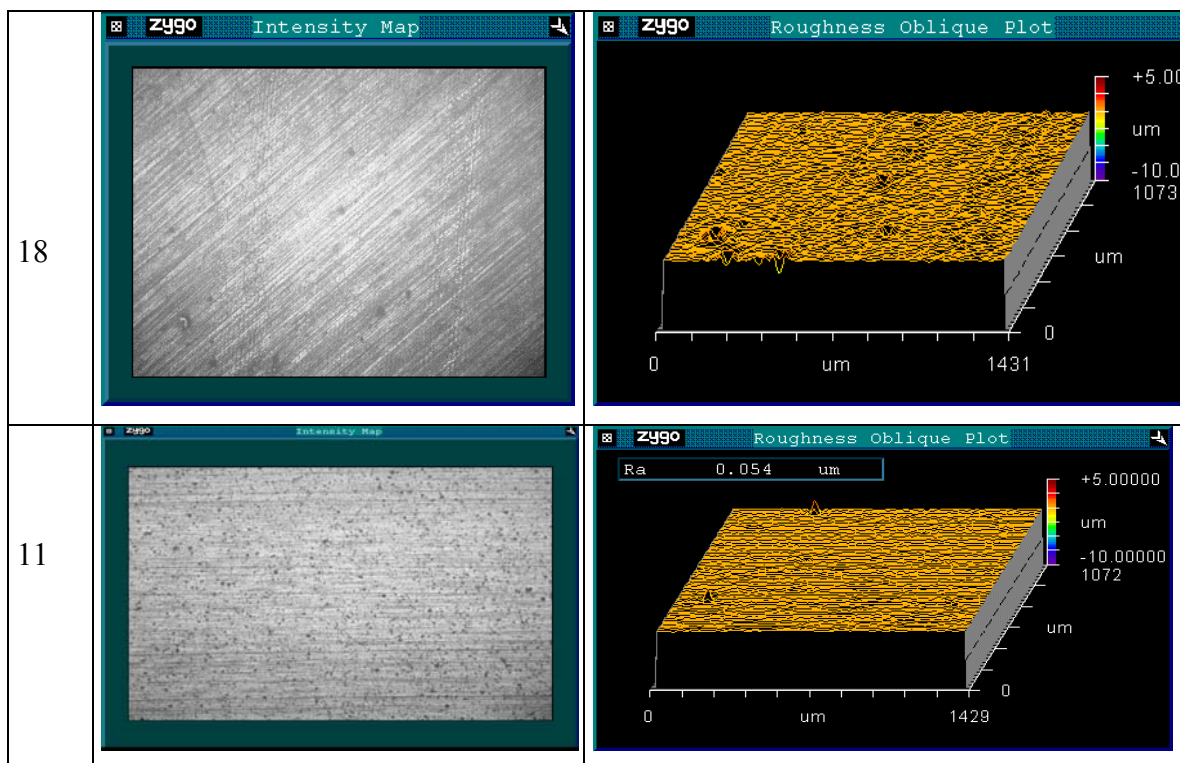


Figura 32. Imagen de la superficie de la muestra y gráfica de su rugosidad, condición superficial del sustrato lija 800 (probeta 18: bombardeo iónico y probeta 11: arco catódico).

C. Subramanian y colaboradores [24] encontraron que para el recubrimiento de nitruro de titanio, los valores de rugosidad del sustrato sin recubrir y el sustrato recubierto, poseen una relación de 1:1, es decir que el recubrimiento de nitruro de titanio copia el perfil del sustrato en casi a la perfección.

4.2 Espesor

Para esta medición se utilizó el método del CALOTEST y la huella fue medida por medio del analizador de imágenes LECO 3001.

El espesor fue calculado de la manera descrita en la sección (3.3.1) y el valor final del espesor fue el promedio del obtenido para cada una de las cinco mediciones sobre cada probeta. Ejemplo tipo:

$$t = \frac{X * Y}{2R} = \frac{153.08 * 737.31}{2 * (1.5 \times 10^4)} \approx 3.76$$

$$t \approx 3.76 \mu\text{m}$$

En la tabla V se reportan los valores de espesores de cada una de las probetas ensayadas en este trabajo.

	No	X (μm)	Y (μm)	Y/X	ESPESOR (μm)	ESPESOR PROMEDIO (μm)
PLATIT	9	153.08	737.31	4.82	3.76	3.70
	11	158.70	717.38	4.52	3.79	
	17	139.07	768.33	5.52	3.56	
TEER	18	-----	-----	-----	5.87	5.78
	19	183.7	928.51	5.05	5.69	

Tabla V.Resultado de espesores para las probetas.

Puede observarse que para la probetas depositada por el método de bombardeo iónico el espesor es mayor que la probetas depositadas por el método de arco catódico. Estos valores se encuentran dentro del intervalo reportado por la literatura [12] que indica que los espesores típicos de recubrimientos duros producidos por plasma PVD Y CVD están en el intervalo de 1 a 10 μm.

4.3 Resultados de dureza compuestas

En las Tablas VI, VI-I,VII,VII-I y VIII, VIII-I se reportan los resultados de dureza compuesta para el acero 316L y los dos recubrimientos de TiN estudiados. Estos valores están dentro de los valores reportado por la literatura los cuales se encuentran entre 1900 y 2500 HV para el proceso de arco catódico [25] y de entre 2200 y 2500 HV para el bombardeo iónico [26].

Tabla VI. Resultados de las mediciones de dureza del acero 316L

I	Carga (g)																	
	25			50			100			200			300			500		
	D1	D2	HV	D1	D2	HV	D1	D2	HV	D1	D2	HV	D1	D2	HV	D1	D2	HV
1	15.2	14.6	216.3	18.8	18.8	269	28.5	27.9	223	41.5	41.1	206	50.2	52.6	203	61.7	63.4	231
2	13.0	12.9	288.1	20.2	19.5	240	28.5	28.9	215	42.6	42.5	195	52	51.6	200	67.9	66.6	200
3	14.1	14.3	239.1	19.1	19.9	249	30	30	198	41.9	42.5	198	51.3	52.3	200	63.2	66.6	215
4	14.1	13.6	251.5	18.8	19.6	264	28.2	28.6	220	43.7	42.5	190	53.1	53.7	188	67.1	67.6	200
5	14.4	13.9	238.9	19.9	20.2	236	29.6	30	200	41.9	42.5	198	50.5	51.2	207	67.1	70	193
6	14.1	13.2	258.1	19.9	20.2	236	28.2	29.3	215	41.9	42.2	200	51.3	49.8	209	67.9	67.6	197
7	13.4	13.6	265.5	20.2	19.5	240	30.7	30.3	191	44	43.9	183	52.7	51.9	196	68.2	67.9	195
8	13.7	14.3	245.4	19.9	19.5	245	27.8	29.3	218	43.3	42.9	190	51.6	51.9	200	69.7	72.4	179
9	14.8	15.3	211.4	19.5	20.2	240	28.5	29.3	212	41.9	42.2	200	49.8	49.8	215	67.9	71.4	187
10	13.4	12.9	280.1	20.2	21.6	217	28.9	30	205	41.9	42.5	198	53.8	54	185	65.7	65.5	210
11	13.4	14.3	252.0	19.5	19.5	249	28.9	28.6	215	42.2	40.8	205	54.2	53	187	68.6	66.6	198
12	14.1	14.3	239.1	19.1	19.2	259	27.8	27.5	231	41.9	41.5	203	53.4	53.7	187	69.7	68.6	189
P	14.0	13.9	249	19.6	19.8	245	28.8	29.1	212	42.4	42.2	197	52.0	52.1	198	67.1	67.9	200
DE	0.64	0.73	22.7	0.53	0.71	14.0	0.89	0.87	11.4	0.84	0.83	6.7	1.44	1.38	9.8	2.42	2.52	13.7

Tabla VI-I. Resultados de mediciones de dureza compuesta para el acero 316L

Carga	Dureza (HV)	DE	D1	D2	Dprom	DE	Profundidad	Dureza (Gpa)	DE (Gpa)
25	249.0000	22.7000	14.000	13.900	13.95	0.07	1.99	2.44	0.22
50	245.0000	14.0000	19.600	19.800	19.70	0.14	2.81	2.40	0.14
100	212.0000	11.4000	28.800	29.100	28.95	0.21	4.14	2.08	0.11
200	197.0000	6.7000	42.400	42.200	42.30	0.14	6.04	1.93	0.07
300	198.0000	9.8000	52.000	52.100	52.05	0.07	7.44	1.94	0.10
500	200.0000	13.7000	67.100	67.900	67.50	0.57	9.64	1.96	0.13

Tabla VII. Resultados de las mediciones de dureza de las muestras de TiN (bombardeo ionico)

I																		
	25			50			100			200			300			500		
	D1	D2	HV	D1	D2	HV	D1	D2	HV	D1	D2	HV	D1	D2	HV	D1	D2	HV
1	3.2	2.8	6,092	4.33	3.5	6,801	12.3	12.2	1,116	22	22.3	687	33.2	31.4	502	47.7	48.4	389
2	2.9	4.2	4,322	7.94	6.6	1,857	13.4	12.5	1,002	23.5	24.0	601	32.5	31.7	508	50.9	50.2	352
3	2.9	3.5	5,413	7.94	7.0	1,769	13	14.3	907	24.2	24.0	584	31.0	30.3	554	47.7	48.4	389
4	2.9	2.8	6,975	8.3	9.1	1,294	14.4	15	785	24.5	26.8	518	32.9	34.1	467	46.9	47.0	406
5	2.9	4.2	4,322	7.22	7.0	1,959	12.3	15	909	27.8	24.0	509	32.9	31.4	507	48.4	49.5	375
6	4.0	3.5	3,854	7.58	6.6	1,956	11.9	12.5	1,117	22.7	23.7	628	33.9	33.1	467	46.9	45.6	418
7	2.2	3.5	7,043	7.94	6.6	1,857	13	14.6	886	24.2	23.7	592	32.9	33.1	482	44.8	42.2	473
8	2.5	3.1	7,009	6.85	7.3	1,963	13	14.6	886	23.1	24.0	610	30.3	33.1	586	48.7	47.0	391
9	3.2	3.8	4,306	7.94	7.0	1,769	11.9	12.9	1,088	23.5	25.4	569	27.8	29.3	694	48.7	48.0	383
10	3.6	4.2	3,506	6.13	5.9	2,742	13.6	13.6	929	24.2	24.4	576	32.1	26.8	497	46.9	50.2	381
11	3.6	4.2	3,506	7.22	7.7	1,775	13.4	14.3	885	25.6	25.1	531	31.4	32.8	508	48.7	49.5	372
12	3.9	4.5	2,911	7.94	7.3	1,687	13.4	13.2	953	23.5	25.1	577	32.5	32.8	518	48	49.5	378
P	3.2	3.7	4938	7.3	6.8	2286	12.9	13.7	955	25.1	24.4	582	31.9	31.0	524	47.9	48.0	378
DE	0.56	0.59	1,506.5	1.11	1.29	1,459.1	0.75	1.02	104.7	1.49	1.12	49.3	1.64	2.04	63.2	1.48	2.29	30.5

Tabla VII-I . Resultados de mediciones de dureza compuesta de las muestras de TiN (bombardeo ionico)

Carga	Dureza (HV)	DE	D1	D2	Dprom	DE	Profundidad	Dureza (Gpa)	DE (Gpa)	Espesor	RID
25	4938.0000	1506.5000	3.200	3.700	3.45	0.35	0.49	48.39	14.76	5.69	0.09
50	2286.0000	1459.1000	7.300	6.800	7.05	0.35	1.01	22.40	14.30	5.69	0.18
100	955.0000	104.7000	12.900	13.700	13.30	0.57	1.90	9.36	1.03	5.69	0.33
200	582.0000	49.3000	25.100	24.400	24.75	0.49	3.54	5.70	0.48	5.69	0.62
300	524.0000	63.2000	31.900	31.000	31.45	0.64	4.49	5.14	0.62	5.69	0.79
500	378.0000	30.5000	47.900	48.000	47.95	0.07	6.85	3.70	0.30	5.69	1.20

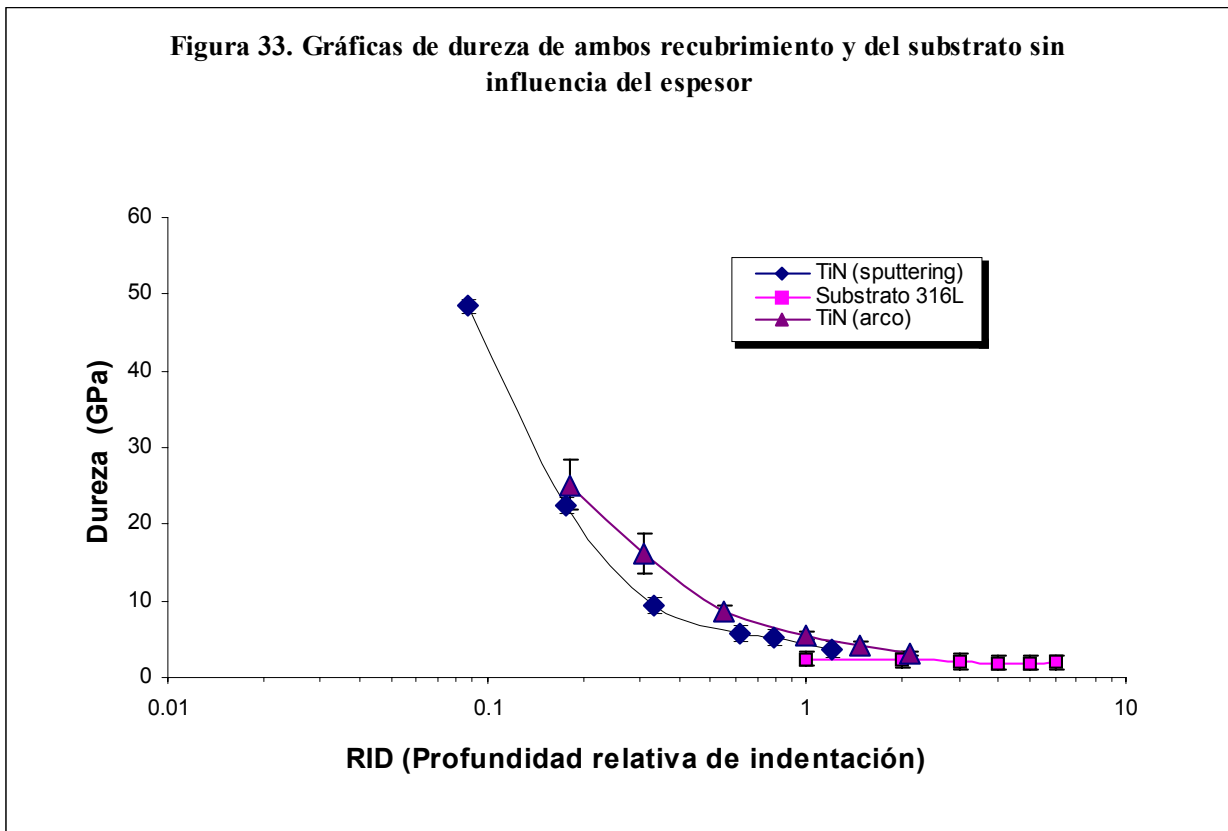
Tabla XVIII. Resultados de las mediciones de dureza de las muestras de TiN (arco catódico)

I	Carga (g)																	
	25			50			100			200			300			500		
	D1	D2	HV	D1	D2	HV	D1	D2	HV	D1	D2	HV	D1	D2	HV	D1	D2	HV
1	4.3	4.2	2901.5	7.94	8.36	1,472	13.4	13	953	22.4	23	656	28.9	28.9	622	52	55.7	312
2	4.3	4.5	2664.2	7.58	8.01	1,613	13	13	978	21.3	24	657	34.3	34.1	448	51	51.2	347
3	4.3	4.9	2454.9	7.58	8.01	1,613	12.3	14	955	24.5	24	576	33.9	35.2	440	49	51.2	354
4	4.7	4.9	2262.9	7.58	8.71	1,474	14.8	15	767	24.2	24.7	568	39.4	36.6	366	56	57.8	277
5	4.0	4.2	3182.5	6.85	6.27	2,300	14.1	16	769	24.2	24.7	568	38.3	38.7	357	52	55.1	312
6	5.4	3.8	2433.7	8.66	7.31	1,534	13.7	14	906	24.2	24.7	568	36.5	36.9	391	51	53	331
7	5.1	5.6	1814.1	7.58	8.36	1,541	14.4	14	862	26.7	27.2	472	34.7	36.9	411	51	50.5	352
8	4.3	4.9	2454.9	7.6	9.05	1,412	13.7	14	906	25.6	27.2	491	36.5	37.6	384	54	51.9	322
9	4.7	4.2	2656.2	6.9	6.96	2,067	13.7	15	824	24.2	25.1	561	35.4	36.9	403	52	53.3	322
10	5.1	3.8	2648.2	8.3	7.31	1,608	12.6	13	1,030	25.3	25.1	538	35	36.6	411	51	53.7	331
11	4.3	4.5	2664.2	8.3	6.62	1,766	13.7	15	843	25.6	25.8	517	34.7	35.9	423	52	52.3	331
12	4.7	4.2	2656.2	7.94	8.01	1,539	13	15	886	24.9	25.8	531	53.4	38.7	370	51	54.4	323
P	4.6	4.5	2566	7.7	7.7	1661	13.5	14.1	890	24.4	25.1	559	36.8	36.1	419	51.8	53.3	326
DE	0.41	0.51	335.0	0.54	0.85	264.4	0.73	0.87	81.6	1.45	1.23	56.3	5.86	2.60	70.0	1.80	2.14	21.0

Tabla VIII-I . Resultados de mediciones de dureza compuesta de las muestras de TiN (arco catodico)

Carga	Dureza (HV)	DE	D1	D2	Dprom	DE	Profundidad	Dureza (Gpa)	DE (Gpa)	Espesor	RID
25	2566.0000	335.0000	4.600	4.500	4.55	0.07	0.65	25.15	3.28	3.56	0.18
50	1661.0000	264.4000	7.700	7.700	7.70	0.00	1.10	16.28	2.59	3.56	0.31
100	890.0000	81.6000	13.500	14.100	13.80	0.42	1.97	8.72	0.80	3.56	0.55
200	559.0000	56.3000	24.400	25.100	24.75	0.49	3.54	5.48	0.55	3.56	0.99
300	419.0000	70.0000	36.800	36.100	36.45	0.49	5.21	4.11	0.69	3.56	1.46
500	326.0000	21.0000	51.800	53.300	52.55	1.06	7.51	3.19	0.21	3.56	2.11

En la Figura 33 se puede observar que al graficar la dureza de los dos recubrimientos (magnetron sputtering y arco catódico) sin influencia del espesor presentan el mismo comportamiento, la diferencia entre los puntos puede deberse a errores experimentales durante el ensayo. No se puede asegurar que uno presente mayor dureza con respecto al otro.



4.4 Caracterización morfológica

4.4.1 Morfología del recubrimiento

En la figura 34 se ilustra el estudio mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) de la superficie de los recubrimientos de TiN, el cual revelo una superficie de pequeños montículos o nódulos pequeños muy agrupados para el recubrimiento depositado por el método de magnetron sputtering y una superficie lisa en forma de canales ligeramente profundos para el recubrimiento depositado por el método de arco catódico.

Aunque en ambos recubrimientos el crecimiento de los granos es de forma columnar esta morfología puede estar relacionada con el tamaño y compactación de los granos. Estudios anteriores de TiN [2] demostraron que en el recubrimiento depositado por el método de bombardeo iónico (magnetron sputtering) hay presencia de granos más gruesos y bien definidos, mientras que en recubrimiento depositado por el método de arco catódico son más finos.

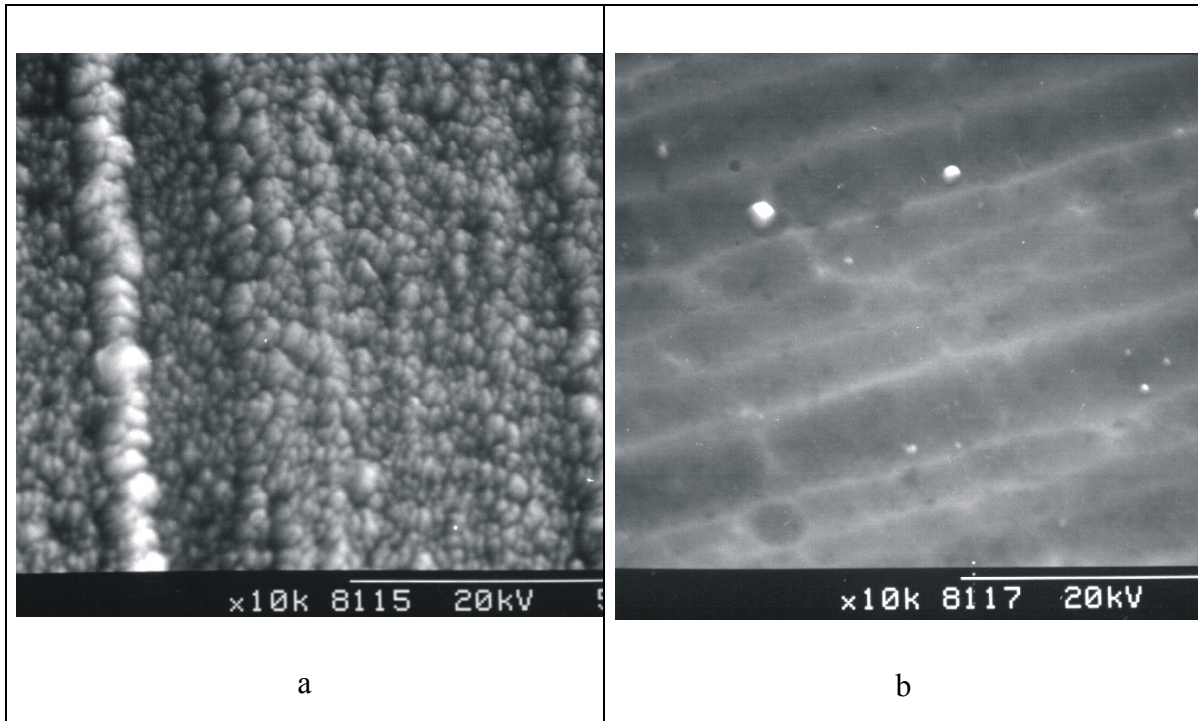


Figura 34. Morfología del recubrimiento a, bombardeo ionico y b, arco catódico

4.4.2 Mecanismo de desgaste predominante

El desgaste abrasivo se caracteriza por surcos bien definidos dejados en la dirección del movimiento de las partículas abrasivas. Las huellas dejadas sobre las probetas por el ensayo de micro-abrasión del sustrato y recubrimiento se observaron al Microscopio Electrónico de Barrido (MEB), estas revelaron surcos definidos

Las Figuras 35 y 36 muestran el mecanismo de desgaste predominante recubrimiento/sustrato y sustrato.

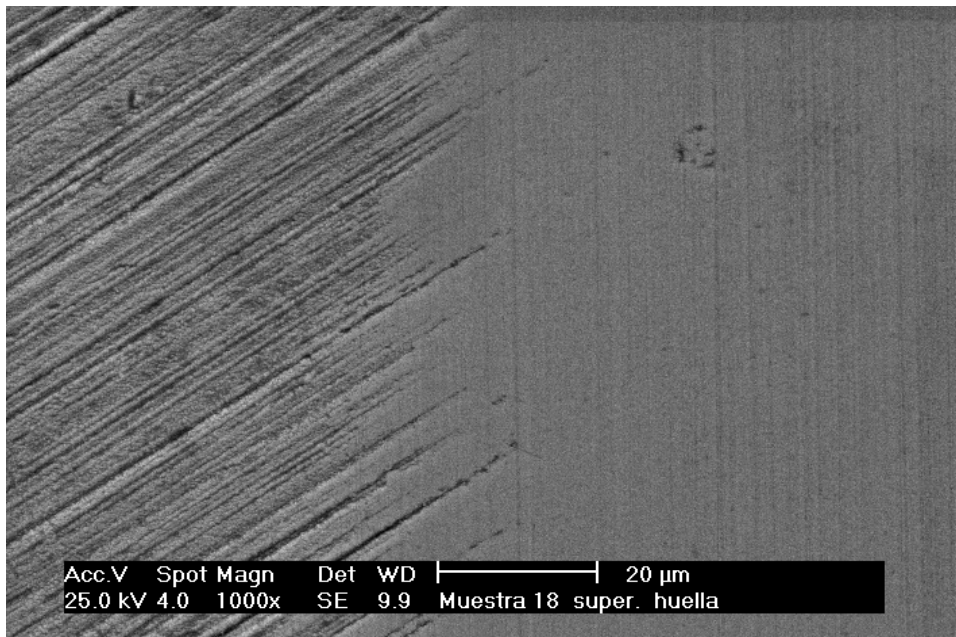


Figura 36. Mecanismo de desgaste predominante

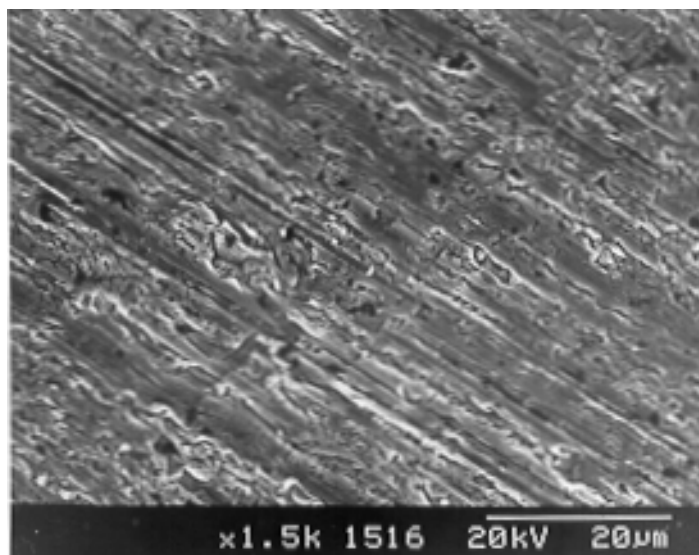


Figura 38. Mecanismo de desgaste predominante acero 316L

4.5 Dosificación de la mezcla abrasivo-lubricante

La dosificación de la mezcla es muy importante para el ensayo. Esta se debe suministrar en forma constante y en el meridiano de la bola, ya que de lo contrario se obtienen "crateres" erróneos. En todos los ensayos se utilizó una aguja # 24 y el intervalo de tiempo entre gota y gota fue aproximadamente de 0.5 seg. El tamaño de la gota y la velocidad con la que se adhiere a la bola están en relación directa con la distancia entre la punta de la aguja y la bola

Es muy importante recordar que la mezcla abrasivo lubricante no debe entrar en contacto con el eje ya que esto produciría desgaste en el mismo, arruinando el equipo

4.6 Carga

La carga utilizada en todos los ensayos fue de 0.68 N, calculada de la forma descrita en la sección (3.4.1.3). En ensayos realizados sobre recubrimientos de nitruro de titanio (TiN) con espesores de 1-10 μm , se encontró que esta carga era adecuada permitiéndose la obtención de "crateres" que cumplen con la ecuación teórica propuesta.

Se puede observar que la carga ejercida sobre la probeta (N_1) es menor que la carga ejercida sobre el eje (N_2). Este hecho y el que existan dos puntos de apoyo sobre el eje en los cuales se ejerce la fuerza normal N_2 aseguran rodadura entre el eje y la bola. Es necesario ejercer cierta carga sobre la probeta para de esta manera, lograr un desgaste pronunciado sobre ella (ver figura 16).

Es deseable tener un coeficiente bajo de fricción entre la bola y el eje, así como también es deseable tener un coeficiente alto entre la probeta y la bola. De esta manera, se asegura poco desgaste en el eje y altas tasas de desgaste entre la bola y la probeta [22].

4.7 Velocidad

La velocidad utilizada en todos los ensayos fue de 1.11 m/s. Esta es la velocidad más adecuada que se encontró cuando se adaptó el equipo (CALOTEST) al estar dentro del comportamiento de recubrimientos duros cuyo espesor esta comprendido entre 1 y 10 μm .

4.8 Ensayo de micro-abrasion

4.8.1 Ensayo de micro-abrasion para el acero 316L

La resistencia al desgaste de las probetas se evaluó graficando promedio de h (profundidad del "crater" vs distancia de recorrido. El ajuste de los puntos experimentales a la curva teórica descrita por la ecuación (6), permitió la obtención del valor de K_s . El ajuste de la curva experimental se realizó por el método de mínimos cuadrados.

La pendiente de la curva se toma como la constante de desgaste (K_s) del material.

En la tabla V se muestra el valor obtenido para K_s .

MATERIAL	K_s (m^2/N)
Acero 316L	1.1842×10^{-13}

Tabla IX. Resultado de K_s para el acero 316L

En ensayo se usaron distancias de recorrido desde 66.6 hasta 799.2 m obteniéndose un factor de correlación R^2 0.87.

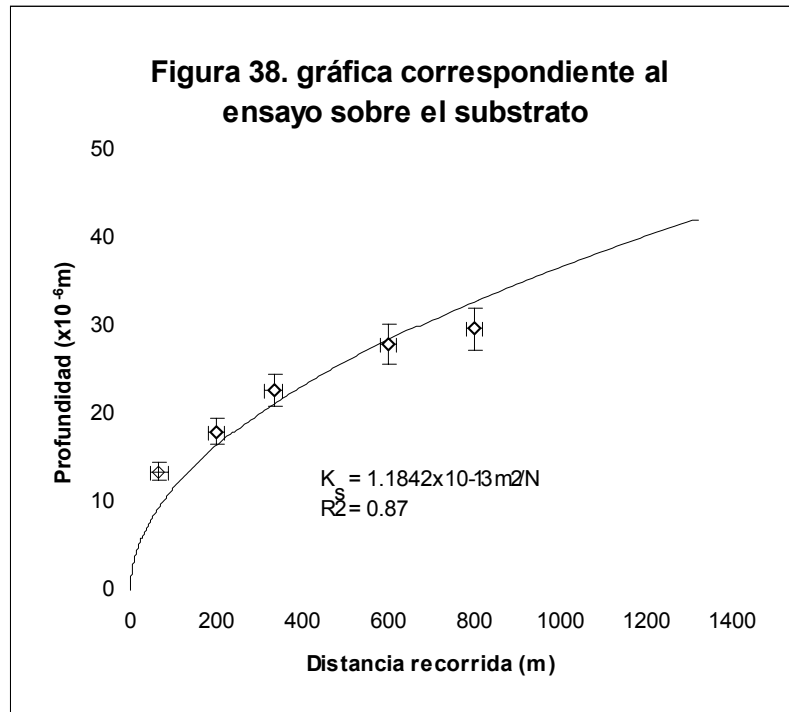
Condiciones en las que se realizaron estos ensayos:

Medio	aire
Temperatura	$22 \pm 1^{\circ} \text{ c}$
Humedad relativa	$60 \pm 5\%$
Fuerza normal	0.68 n
Velocidad	1.11 m/s
Duración del ensayo	66.6 m -799.2 m
bola de rodamiento	RB38.1/G100P3

En las siguientes páginas se encuentran las hojas de anotaciones utilizadas y la gráfica correspondiente a los ensayos de desgaste abrasivo

Tabla VI . Resultados de medición de diametro, profundidad promedios y desviación estandar del acero 316L

	DIAMETRO PROMEDIO μm	PROFUNDIDAD PROMEDIO μm	DESVIACION ESTANDAR PROFUNDIDAD
S [metros] 66.6 60 S (1 M N)	1435.1600	13.52	0.6
S [metros] 199.8 180 S (3 M N)	1656.06	18	0.3
S [metros] 333.0 300 S (5 M N)	1860.46	22.73	0.9
S [metros] 599.4 420 S (9 M N)	2063.68	27.96	0.1
S [metros] 540 S (12 M N)			



4.8.2 Ensayo de micro-abrasion para la probeta recubierta por bombardeo iónico

La resistencia al desgaste de las probetas se evaluó graficando promedio de h (profundidad del "crater") de las probetas 18 y 19 vs distancia de recorrido. El ajuste de los puntos experimentales a la curva teórica descrita por las ecuaciones (9), (10), (11) y (12) permitió la obtención del valor de K_c y K_s . El ajuste de la curva experimental se realizó por el método de mínimos cuadrados.

La pendiente de la curva se toma como la constante de desgaste (K_c) del material.

En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos de K_c y K_s .

METODO DE DEPOSICION	Kc (m²/N)	Ks (m²/N)
Bombardeo ionico	2.9871×10^{-15}	5.1746×10^{-14}

Tabla X. Resultado de las constantes obtenidas en los ensayos.

En el ensayo usaron distancias de recorrido desde 66.6 hasta 1398.6 m obteniéndose un factor de correlación R^2 0.99

Condiciones en las que se realizaron estos ensayos:

Medio	aire
Temperatura	$22 \pm 1^\circ \text{C}$
Humedad relativa	$60 \pm 5\%$
Fuerza normal	0.68 n
Velocidad	1.11 m/s
Duración del ensayo	66.6 m -1398.6 m
Bola de rodamiento	RB38.1/G100P3

En las siguientes paginas se encuentran las hojas de anotaciones utilizadas y la gráfica correspondiente al ensayo de desgaste abrasivo:

S [metros]	1	2	1	2
	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]
	442.1053	453.9474	535.4331	519.6858
	442.1053	453.9474	523.6220	531.4961
	446.0526	450.0000	515.7480	519.6850
60 S	434.2105	469.7368	527.5591	527.5591
(1 M N)	430.2632	453.9474	523.6220	535.4331
DAM [μm]	438.9474	456.3158	525.1968	526.7717
PROF [μm]	1.26	1.37	1.81	1.82
S [metros]	1	2	1	2
	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]
	643.4211	690.7855	685.0394	618.1102
	647.3684	698.6842	677.1654	614.1732
	651.3158	678.9474	673.2283	610.2362
180 S	663.1579	698.6842	673.2283	622.0472
(3 M N)	643.4211	694.7368	669.2913	610.2362
DAM [μm]	649.7369	692.3676	675.5905	614.9606
PROF [μm]	2.77	3.15	2.99	2.48
S [metros]	1	2	1	2
	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]
	903.9474	900.0000	834.6457	818.8976
	907.8947	907.8947	822.8346	814.9606
	892.1053	919.7368	830.7087	810.2362
420 S	903.9474	911.8421	826.7717	810.2362
(9 M N)	900.0000	927.6316	842.5197	811.0236
DAM [μm]	982.8947	913.4210	831.4961	813.0708
PROF [μm]	5.33	5.48	4.54	4.34
S [metros]	1	2	1	2
	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]
	931.5789	931.5789	850.3937	854.3307
	943.4211	939.4737	838.5877	866.1417
	927.6316	923.6842	842.5197	850.3937
540 S	951.3158	935.5263	850.3937	858.2677
(12 M N)	923.6842	939.4737	842.5197	854.3307
DAM [μm]	935.5263	933.9474	844.8829	856.6929
PROF [μm]	5.33	5.72	4.68	4.82
S [metros]	1	2	1	2
	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]
	990.7895	989.8421	866.1417	862.2047
	955.2632	967.1053	870.0787	866.1417
	971.0526	982.8947	862.2047	858.2677
900 S	982.8947	982.8947	854.3307	858.2677
(15 M N)	982.8947	978.9474	862.2047	858.2677
DAM [μm]	976.5789	979.7368	862.9921	860.6299
PROF [μm]	6.26	6.30	4.89	4.86
S [metros]	1	2	1	2
	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]
	1022.3684	1014.4737	921.2598	925.1969
	1014.4737	1042.1035	913.3858	933.0709
	1030.2632	1038.1579	933.0709	921.2598
1198.8	1038.1579	1026.3158	937.0079	921.2598
1080 S	1018.4211	1034.2105	921.2598	925.1969
(18 M N)				
DAM [μm]	1024.7369	1031.0523	925.1968	925.1969
PROF [μm]	6.89	6.98	5.62	5.62

Diá[mm]=	38.103
Radio[mm]=	19.0515
Radio [μ]=	19051.5
CARGA[N]=	0.68
t[μm]=	
k _s [m ² /N]=	
k _c [m ² /N]=	
HK ₁₀₀ =	

BOLA :	RB38.1/G100P4
W(Bola)=	225 g
ABRASIVO :	1 mm
VEL. DE ENSAYO :	1.11 m/s
FECHA :	
# DEL ENSAYO :	
TIPO PROBETA :	316L
# DE PROBETA :	
TRATAMIENTO :	-----
SUBSTRATO :	316L
AGUJA=	#24
L=	25.6 mm
INCLINACION:	65°

S [metros]	1	2	1	2
	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]
	1061.8421	1050.0000	982.5328	970.7424
	1073.6842	1073.6842	874.6725	986.4629
	1069.7368	1069.7368	974.6725	982.5328
1260	1073.6842	1089.4337	982.5328	974.6725
(21 M N)	1069.7368	1093.4211	970.7424	978.6026
DAM [μm]	1069.7368	1075.2552	957.0306	978.6026
PROF [μm]	7.51	7.99	6.26	6.28

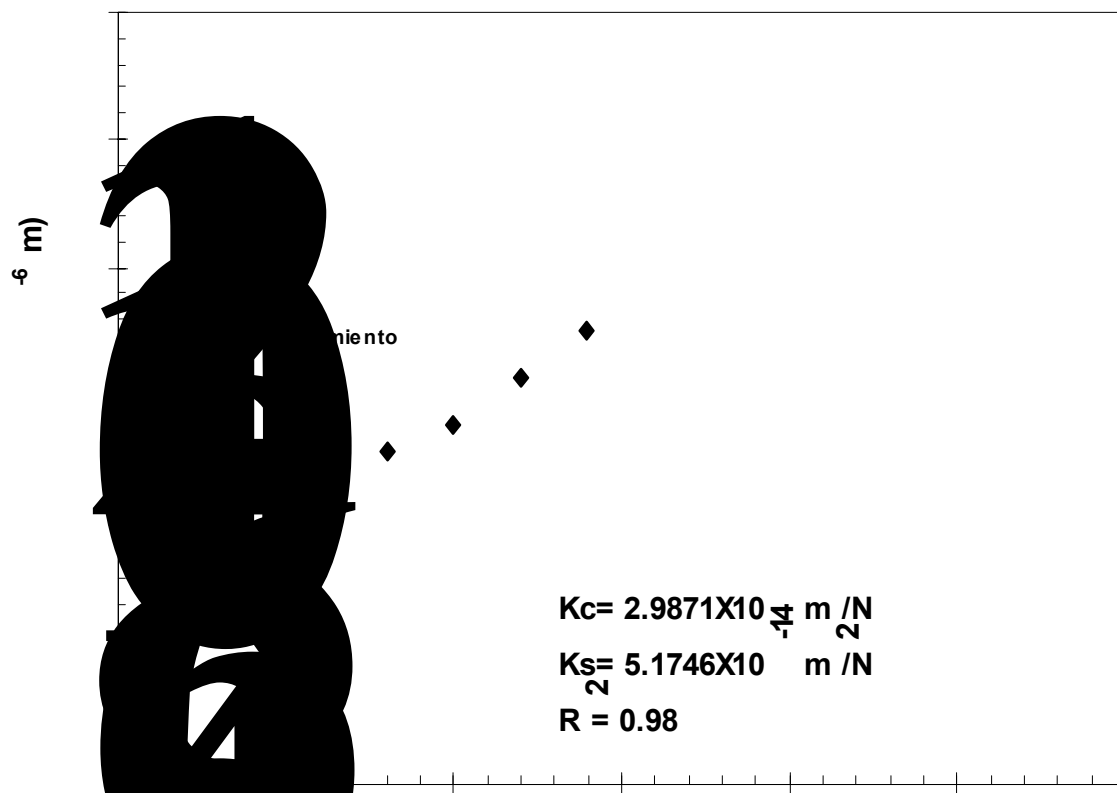
Figura 39. Hoja de anotaciones correspondiente a las probetas recubiertas por magnetron sputtering

Tabla VIII Resultados de medición de diámetro profundidad de las probetas recubiertas por bombardeo iónico

	DIAMETRO PROMEDIO μm	PROFUNDIDAD PROMEDIO μm	DESVIACION ESTANDAR PROFUNDIDAD
S [metros] 66.6 60 S (1 MIN)	486.8079	1.57	0.29
S [metros] 199.8 180 S (3 MIN)	658.1639	2.85	0.29
S [metros] 599.4 420 S (9 MIN)	885.2207	4.92	0.56
S [metros] 799.2 540 S (12 MIN)	892.7624	5.14	0.47
S [metros] 999.0 900 S (15 MIN)	919.9844	5.58	0.81
S [metros] 1198.8 1080 S (18 MIN)	976.5457	6.28	0.76
S [metros] 1398.6 1260 S (21 MIN)	1020.1563	7.01	0.87

Figura 40. Hoja de anotaciones correspondiente a las probetas recubiertas por bombardeo iónico

Gráfica correspondiente a las muestras recubiertas por bombardeo ionico



4.8.3 Ensayo de micro-abrasión para las probetas recubiertas por arco catódico

La resistencia al desgaste de las probetas se evaluó graficando promedio de h (profundidad del "crater") de las probetas 9, 11 y 17 vs distancia de recorrido. El ajuste de los puntos experimentales a la curva teórica descrita por las ecuaciones (9), (10), (11) y (12) permitió la obtención del valor de K_c y K_s . El ajuste de la curva experimental se realizó por el método de mínimos cuadrados.

Los datos obtenidos para la constante se muestran en la tabla siguiente:

METODO DE DEPOSICION	K_c (m^2/N)	K_s (m^2/N)
Arco catódico	4.4011×10^{-15}	1.1834×10^{-14}

Tabla XI. Resultado de la constante obtenidas en el ensayo de desgaste abrasivo.

En ensayo se usaron distancias de recorrido desde 66.6 hasta 799.2 m obteniéndose un factor de correlación R^2 0.99.

Condiciones en las que se realizaron estos ensayos:

Medio	aire
Temperatura	$22 \pm 1^\circ \text{C}$
Humedad relativa	$60 \pm 5\%$
Fuerza normal	0.68 n
Velocidad	1.11 m/s
Duración del ensayo	66.6 m - 799.2 m
Bola de rodamiento	RB38.1/G100P3

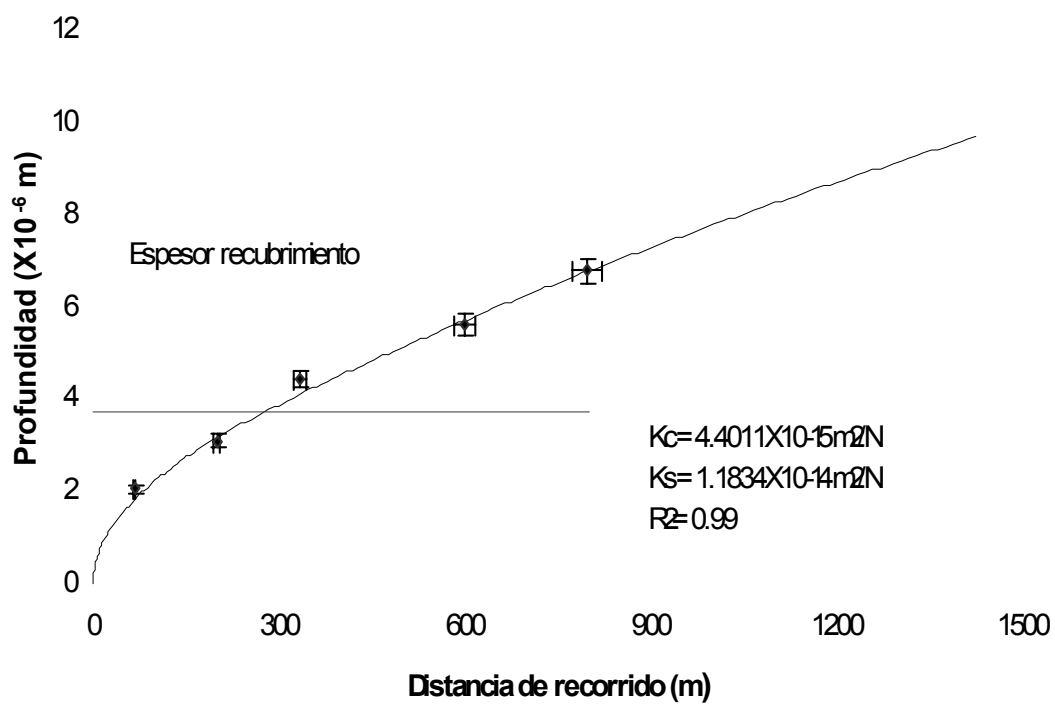
En las siguientes paginas se encuentran las hojas de anotaciones utilizadas y la gráfica correspondiente al ensayos de desgaste abrasivo:

				PROBETA # 9			PROBETA # 11			PROBETA # 17		
S	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
[metros]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]			
66.6	575.1000	599.8000	615.9000	599.3300	559.7600	525.7800	631.1200	587.6700	549.6400			
	593.5000	529.5000	654.5000	498.1200	476.6600	506.8900	545.4600	640.0200	452.5000			
	584.4000	533.1000	638.1000	558.4500	516.8100	443.4300	583.1400	574.4800	516.6500			
60 S	582.7000	583.5000	548.8000	540.7100	495.4800	542.7300	587.9200	622.9300	502.6400			
(1 M N)	584.4000	597.3000	593.1000	516.1700	528.0000	455.2800	596.9800	585.1000	519.9100			
D AM [μm]	584.0200	568.6400	610.0800	542.5560	515.3420	494.8220	588.9240	602.0400	508.2680			
PROF [μm]	2.24	2.12	2.44	1.93	1.74	1.61	2.28	2.38	1.70			
S	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
[metros]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]			
199.8	688.2300	668.1000	693.9000	766.6500	729.1500	695.0000	686.9900	601.7500	760.9200			
	716.6100	661.3000	686.1000	683.4100	653.1900	705.2300	620.0700	675.0800	658.2500			
	662.1300	693.0000	702.7000	693.7100	683.4800	632.1200	629.1500	622.1500	707.4900			
180 S	703.7200	697.2000	691.3000	729.8100	692.2700	708.4300	672.5900	640.3800	721.7700			
(3 M N)	687.6400	719.1000	692.6000	717.8300	717.0700	655.0500	659.4900	664.5500	745.0400			
D AM [μm]	691.6660	687.7400	693.3200	718.2820	695.0320	679.1660	653.6580	640.7820	718.6940			
PROF [μm]	3.14	3.10	3.15	3.39	3.17	3.03	2.80	2.69	3.39			
S	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
[metros]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]			
333.0	836.4000	853.8000	773.9000	808.6000	851.4200	751.7400	836.3800	853.2700	905.0300			
	772.7000	890.5300	776.1000	865.3000	766.5900	810.1600	798.9400	898.0900	837.4700			
	843.4000	878.0000	788.1000	821.9000	823.3100	732.3200	767.2600	879.9600	894.1800			
300 S	825.1000	869.4000	784.8000	821.5000	834.7400	790.8900	628.3500	873.7400	834.7400			
(5 M N)	855.1000	840.1000	776.7000	709.4500	765.6500	767.2700	781.0400	900.7000	857.7500			
D AM [μm]	826.5400	866.3660	779.9200	805.3500	808.3420	770.4760	762.3940	881.1520	865.8340			
PROF [μm]	4.48	4.93	3.99	4.26	4.29	3.90	3.81	5.09	4.92			
S	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
[metros]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]			
599.4	966.2000	918.5000	963.1000	980.3200	878.8100	870.2100	958.5200	864.7600	890.1000			
	1012.2000	947.4000	939.7000	961.4500	945.2500	936.7500	931.2400	887.0500	812.8500			
	1019.0000	936.8000	924.6000	925.0900	890.0700	879.1500	894.0700	899.6300	866.9200			
420 S	1025.2000	943.80	951.7000	1007.9000	912.2600	907.2300	963.0000	855.1000	849.2600			
(9 M N)	993.5000	921.500	966.3200	950.2200	868.4400	907.3900	893.7600	886.4700	887.4700			
D AM [μm]	1003.220	933.6000	949.0840	964.9960	898.9660	900.1460	928.1180	878.6020	861.3200			
PROF [μm]	6.60	5.72	5.91	6.11	5.30	5.32	5.65	5.07	4.87			
S	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
[metros]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]			
799.2	1054.0000	1019.0000	1047.9000	1071.1000	1014.3000	1029.4000	1011.4000	985.9700	1022.7000			
	1062.5000	1097.9000	1073.9000	1000.3000	1000.8000	1011.0000	1024.8000	980.9200	925.6400			
	1080.0000	1057.0000	1059.0000	1050.3000	964.6500	982.0400	965.0300	1010.0000	974.7600			
540 S	1074.5000	1033.1000	1033.2000	1028.0000	1034.5000	1048.4000	1014.6000	931.1200	991.4600			
(12 M N)	1019.0000	988.3000	1032.3000	1019.6000	976.9500	1010.5000	952.1600	995.7100	989.2000			
D AM [μm]	1058.000	1039.060	1049.260	1033.8600	998.2400	1016.268	993.598	980.7440	980.7520			
PROF [μm]	7.35	7.09	7.22	7.01	6.54	6.78	6.48	6.31	6.31			
			Diá[mm]=	38.103				BOLA : RB38.1/G100P4				
			Radio[mm]=	19.0515				W(Bola)= 225 g				
			Radio [μ]=	19051.5				ABRASIVO : 1 μm				
			CARGA[N]=	0.68				VEL. DE ENSAYO : 1.11 m/s				
			t[μm]=					FECHA :				
			k _s [m ⁻² N]=					# DEL ENSAYO :				
			k _c [m ⁻² N]=					TIPO PROBETA : 316L				
									SUBSTRATO : 316L			
									AGUJA=#24			
									L= 25.6 mm			
									INCLINACION: 65°			

	DIAMETRO μm	PROFUNDIDAD μm	DESVIACION ESTANDAR
S [metro 66. 60 (1	557.180	2.0	0.3
S [metro 199. 180 (3	686.4	3.1	0.2
S [metro 333. 300 (5	818.4	4.4	0.5
S [metro 599. 420 (9	924.2	5.6	0.5
S [metro 799. 540 (12	1016.6	6.7	0.4

Tabla X. Resultados de medición de diámetro, profundidad de las probetas recubiertas por arco catódico

**Figura 42 Gráfica correspondiente a las muestras depositadas por arco
cátodico**



4.9 Discusión sobre las constantes

De acuerdo a los valores obtenidos para las constantes K_c de la probeta recubierta por el método de bombardeo iónico se observa que su resistencia al desgaste abrasivo es mayor con respecto a las recubierta por el método de arco catódico (ver tabla XVII). Esto posiblemente se debe a que los granos en bombardeo iónico son más compactos y mas unidos, mientras que en arco catódico los granos son más finos y menos densos, son más fáciles de deformar.

Los valores obtenidos para K_c y K_s difieren en más de un 1000 por ciento para las muestras recubiertas por el método de bombardeo iónico y en 200 por ciento para las muestras recubiertas por el método de arco catódico, es decir por este método se pueden obtener constantes de desgaste con un amplio margen de diferencia.

Las constante del substrato K_s obtenida para la probeta recubierta por el método de bombardeo iónico es mayor con respecto a la recubierta por el método de arco catódico.

La diferencia entre estos dos grupos de recubrimientos reside en la técnica de deposición utilizada , la distancia recorrida , tamaño de partícula utilizada en la mezcla abrasivo-lubricante.

Para los 66.6 m de distancia de recorrido aproximadamente el 50% del recubrimiento se ha removido en la región de contacto abrasivo para espesores menores a las 4 μm y los 199.2 m para espesores mayores a la 4 μm . Es muy importante el espesor del recubrimiento para determinar las distancias de recorrido a utilizar y el tamaño de partícula en la mezcla abrasivo-lubricante en este tipo de ensayos.

Tabla XVII. Constante de desgaste obtenida para el material estudiado

Material	$K_c \text{ (m}^2/\text{N)}$	$K_s \text{ (m}^2/\text{N)}$
Acero AISI 316L (Substrato)	-----	1.1842×10^{-13}
TiN (Bombardeo ionico)	2.9871×10^{-15}	5.1746×10^{-14}
(TiN) (Arco catódico)	4.4011×10^{-15}	1.1834×10^{-14}

4.10 Bola de rodamiento utilizada en los ensayos

El diámetro de la bola utilizada en los ensayos fue de 38.103 mm y un peso de 225.00 grs. Al final de los ensayos no se pudo comparar el peso inicial y final para determinar la variación del diámetro ya que esta fue lijada.

5. CONCLUSIONES

1. El recubrimiento depositado por el método de bombardeo iónico presentó ligeramente un aumento en la resistencia al desgaste abrasivo que el recubrimiento depositado por el método de arco catódico.
2. para el segundo crater de desgaste, aproximadamente el 50 % del recubrimiento se ha removido en la región de contacto abrasivo.
3. Los valores obtenidos para k_c y k_s difieren en un amplio margen, lo que indican que la resistencia al desgaste abrasivo de las muestras recubiertas es mayor que de las muestras sin recubrir
4. El mecanismo de desgaste predominante es el abrasivo.
5. El método experimental empleado es capaz de discernir entre la resistencia a la abrasion de recubrimientos depositados empleando varias tecnicas de deposicion .

6. RECOMENDACIONES

1. Utilizar agitación de la mezcla abrasivo-lubricante.
2. Asegurar una dosificación constante de mezcla abrasivo-lubricante durante el ensayo.
3. Utilizar una granulometría de la mezcla abrasivo-lubricante más fina.
4. Generalizar el método de calculo tomando en consideración las propiedades mecánicas del substrato y del recubrimiento y la geometría del cráter.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Sonia P. Bruhl, Recubrimientos por plasma PVD, Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires.
2. Geovanny E. Castañeda, Caracterización de dos recubrimientos de TiN sobre acero AISI 316L depositados mediante dos técnicas PVD, Universidad Central de Venezuela, 1999.
3. P. J. Kelly, R.D. Arnell, Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications, VACUUM, vol.56, 2000, p. 161.
4. Teer Coatings, Magnetron Sputtering. 2001, pp. 1-4.
5. S. J. P. Laube, A. A. Voevodin, A. Korenyi-Both, Cathodic arc titanium nitride in situ process feedback control for multi-layer deposition, Surface and coatings technology , 99 ,1998, p.282.
6. David M. Sanders, Adré Anders, Review of cathodic arc deposition tecnology at the star of the new millennium, Surface and coatings technology , 133-134 ,2000, pp.79-80.
7. Bernard F. Coll, David M. Sanders, Desing of Vacumm arc-based sources, Surface and coatings technology , 81 ,1996, p.42-45.
8. H. Curtins, Platit: a new industrial approach to cathodic arc coatings technology, Surface and coatings technology , 76-77 ,1995, pp.632-633.
9. Estándar Terminology Relating to Wear and Erosión, anual book of estándar vol.03 ASTM, 1987, p. 243.

10. Juan Carlos Vazquez, Elementos de control de desgaste, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, Dpto de Diseño, 1988, pp., 5-15.
11. Lipsoo, Charles, Importancia del desgaste en el diseño, Julio 1970, pp. 163.
12. A. Rodrigo, Caracterización de adherencia, dureza y espesor de recubrimientos duros, Comisión Nacional de Energía Atómica Buenos Aires, pp.171-173.
13. Riedel, W., Electroless nickel plating, AMS international, 1991.
14. Ovidio León Lara, Recubrimientos autocatalíticos compuestos Ni-pBn(h), Julio 2000, pp., 147-148,160-161.
15. Rickard Gahlin, Mats Larsson, Per Hedenqvist, et., The crater grinder method as a means for coatings wear evaluation -an update, Surface and coatings technology , 90, 1997, pp.107-108.
16. Cesar Enriquez G. Determinación de la constante de desgaste de un recubrimiento electroless Ni-P, Universidad Central de Venezuela, 1996.
17. P. Hedqvist, M. Bromark, M. Olsson y S. Hogmark, Surface and coatings technology , 63, 1994, pp.117-118.
18. K. L. Rutherford, I. M. Hutchings, Amicro-abrasive wear test, with particular application to coated systems, Surface and coatings technology , 79, 1996, pp.236-237.
19. M. H. Staia, C. Enriquez, et., Application of ball cratering method to study abrasive wear, Surface engineering, vol. 14, No 1, 1998, pp.51-53.
20. Asa Kassman y et., A new test method for the intrinsic abrasion resistance of thin coatings.

21. CSEM-CALOTEST, direction for use, centre suisse D' electronique et de microtechnique S. A., Rue, CH-2007 Neuchatel, Switzerland.

22. Ludema, K. C. , Friction and wear, adhesion and lubrication - tribology, University of michigan, 1993.

23. Williams D. Sproul, Physical vapor deposition tool coatings, Surface and coatings technology , 81,1996, p. 4.

24. C. Subramanian, K. N. Strafford, T.P Wilks, L.P. Ward & W. Mc Millan, Influence of substrate roughness on scratch adhesion of titanium nitride coatings, Surface and coatings technology, 62, 1993.

25. B. T. Tay, X. Shi, H. S. Yang, H. S. Tan, D. Chua & S. Y. Teo, The effect of deposition conditions on the properties of TiN thin films prepared by filtered cathodic vacuum-arc technique, Surface and coatings technology , 111 ,1999.

26. K. Laing, J. Hampshire, D. Teer, G. Chester, The effect of ion current density on the adhesion and structure of coating deposited by magnetron sputter ion plating, Surface and coatings technology , 22 ,1999.