



**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CELAYA**

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“CARACTERIZACIÓN TRIBOMECÁNICA DE UN ACERO H13  
RECUBIERTO CON TiN y TiCN”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRA EN CIENCIAS  
EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:

ING. VIRGINIA CAMPOS SANABRIA

ASESORES DE TESIS:

M.C. LUIS DANIEL AGUILERA CAMACHO  
DR. J. SANTOS GARCÍA MIRANDA

NOVIEMBRE 2016

CELAYA, GTO



Celaya, Gto., **29/Septiembre/2016**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

OFICIO No. IMP **140/2016**

**ASUNTO: Autorización de Impresión**

**M.C. GILBERTO RUÍZ MONDRAGÓN**  
Jefe del departamento de Ingeniería Mecánica  
**Presente**

Comunicamos a usted, que de acuerdo a la convocatoria hecha por esta Jefatura a su digno cargo, se determinó aprobar la impresión del Proyecto de Tesis de Maestría, titulado:

**"Caracterización tribomecánica de un acero H13 recubierto con TiN y TiCN"**

Que para obtener el Grado de

**Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica**

Presenta:

**Virginia Campos Sanabria**

Lo que comunicamos a Usted, para los efectos consiguientes.

**ATENTAMENTE**

**La técnica por un México mejor**

**M.C. LUIS DANIEL AGUILERA CAMACHO**  
Presidente

**DRA KARLA JUDITH MORENO BELLO**  
Secretario

**DR. J. SANTOS GARCÍA MIRANDA**  
Vocal

**M.C. MARÍA TERESA HERNÁNDEZ SIERRA**  
Vocal Suplente

ASR/mrcf



SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA  
TECNOLÓGICO NACIONAL  
DE MÉXICO  
www.itcelaya.edu.mx

Av. Tecnológica s/n, C.P. 35010 Celaya, Gto.  
A.P. 57 ..... Comunicador: (461) 811-2575 correo electrónico: lince@itcelaya.edu.mx  
INSTITUTO TECNOLÓGICO  
DE CELAYA  
DEPTO. ING. MECANICA



## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mis asesores de tesis el M.C Luis Daniel Aguilera Camacho, a la Dra. Karla Judith Moreno Bello y al Dr. J. Santos García Miranda que hicieron posible el desarrollo y conclusión de este trabajo. De igual manera agradezco sus enseñanzas, invaluable consejos y su paciencia.

A mi madre Sofía Sanabria Ramírez y a mi padre José Concepción Campos Piña, por estar siempre conmigo en todo momento y ser el motor que me impulsa a seguir adelante.

A mi hermana Brenda Campos Sanabria y mi hermano Iván Concepción Campos Sanabria por su cariño y admiración.

Al Lic. José Antonio Méndez Díaz por el cariño y la amistad brindada en cada una de las acciones que decido tomar, apoyándome e impulsándome a ser siempre una mejor versión de mí.

A la Ing. Alejandra Rivas Franco, a la M.C. María Teresa Hernández Sierra y al Ing. José Luis Martínez Carreño, por haber sido excelentes compañeros de trabajo pero sobre todo por su invaluable amistad, permitiéndome aprender de cada uno de ustedes tanto a nivel profesional como a nivel personal.

Al conjunto docente y personal administrativo del Departamento de Mecánica, por todo el apoyo y cariño brindado permitiendo hacer de mi estancia en la institución más llevadera.

Al Instituto Tecnológico de Celaya por permitirme realizar mis estudios de posgrado así como a CONACYT por la beca otorgada.

# ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vi
RESUMEN	I
ABSTRACT	II
INTRODUCCIÓN	III
Capítulo I Marco de Referencia	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del problema	3
1.3 Justificación	4
1.4 Objetivos	4
1.4.1 Objetivo General	4
1.4.2 Objetivos Específicos	4
1.5 Impacto	5
1.6 Alcances	5
Capítulo II Marco teórico	6
2.1 Acero H13	6
2.2 Recubrimientos Duros	7
2.2.1 Recubrimientos por deposición PVD	7
2.2.2 Recubrimientos por deposición CVD	9
2.2.3 Aplicaciones de los recubrimientos	10
2.2.4 Adhesión de recubrimientos	11
2.2.4.1 Prueba por desprendimiento	11
2.2.4.2 Prueba por indentación	11
2.2.4.3 Prueba por scratch	12
2.3 Tribología	13
2.3.1 Fricción	13
2.3.2 Leyes de Fricción	14
2.3.3 Área de contacto	16
2.3.4 Desgaste	17

2.3.4.1	Desgaste por adherencia	17
2.3.4.2	Desgaste por abrasión	17
2.3.4.3	Otras formas de desgaste	18
2.3.5	Pruebas Pin-on-Disk	18
2.3.6	Volumen perdido y tasa de desgaste	19
Capítulo III	Metodología	20
3.1	Preparación de muestras	20
3.1.1	Corte	20
3.1.2	Pulido	22
3.1.3	Medición de la rugosidad	23
3.2	Recubrimiento	23
3.3	Pruebas mecánicas	24
3.3.1	Medición del espesor del recubrimiento	24
3.3.2	Pruebas de adhesión	25
3.4	Pruebas tribológicas	27
3.4.1	Coefficiente de fricción.	29
3.4.2	Medición de ancho de huella	30
3.4.2.1	Volumen perdido y tasa de desgaste	31
3.4.3	Perfil de huella	32
3.4.4	Mecanismos de desgaste	33
Capítulo IV	Resultados y discusiones	34
4.1	Medición de Espesor	34
4.2	Adhesión	35
4.3	Coefficiente de fricción y mecanismos de desgaste	37
4.3.1	Acero AISI H13 recubierto con TiN	37
4.3.2	Acero AISI H13 recubierto con TiCN	40
CONCLUSIONES		45
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		46
ANEXOS		48
Anexo A	Certificado de calidad del acero AISI H13	49
Anexo B	Certificado de calidad de tratamiento térmico para el acero AISI	50

### H13

Anexo C Certificado de calidad de los recubrimientos TiCN y el TiN	51
Anexo D Norma BSI 1071-8:2004	52
Anexo E Norma ASTM G 99-05	53

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Secuencia del proceso de forja [1].	1
Figura 2.1	Diagrama de una deposición física de vapor.	8
Figura 2.2	Diagrama de deposición química de vapor.	9
Figura 2.3	Prueba de adhesión por el método de desprendimiento.	11
Figura 2.4	Esquema y equipamiento de la prueba de Scratch.	12
Figura 2.5	Tribosistema.	14
Figura 2.6	Diagrama de equilibrio para un cuerpo sobre un plano inclinado con fricción estática.	16
Figura 2.7	Área real de dos superficies en contacto.	16
Figura 2.8	Configuración Pin On Disk.	19
Figura 3.1	Metodología.	21
Figura 3.2	Dimensiones de las probetas.	20
Figura 3.3	Pulidora Struers Labpol-1.	22
Figura 3.4	Rugosímetro Mitutoyo SJ400 (controlador y palpador).	23
Figura 3.5	Dirección de deslizamiento del palpador del rugosímetro sobre las probetas pulidas.	23
Figura 3.6	Cortes transversales de las probetas recubiertas de TiN y TiCN.	24
Figura 3.7	Montaje sobre baquelita de los cortes transversales de las probetas recubiertas de TiN y TiCN.	25
Figura 3.8	Microscopio SEM Hitachi 1510.	25
Figura 3.9	Indentador Universal de Sistemas de Medición Inteligentes.	26
Figura 3.10	Criterio de adhesión de Norma CEN/TS BSi 1071-8; (a) Clase 0; (b) Clase 1; (c) Clase 2; (d) Clase 3.	27
Figura 3.11	Tribómetro CSM Instruments.	28
Figura 3.12	Montaje de probeta en seco.	29
Figura 3.13	Montaje de probeta lubricada.	29
Figura 3.14	Grafico del coeficiente de Fricción en TriboXTM	30
Figura 3.15	Microscopio Metalográfico, marca Zeiss.	30
Figura 3.16	Huella seccionada en cuadrantes.	31

Figura 3.17	Medición del ancho de huella en Cuadrante I.	31
Figura 3.18	Rugosímetro Mitutoyo SJ400.	32
Figura 3.19	Dirección del deslizamiento del palpador sobre la huella de desgaste.	33
Figura 4.1	Espesor del recubrimiento TiN observado en un microscopio SEM a 5000x; (1) Baquelita, (2) TiN y (3) Acero AISI H13.	34
Figura 4.2	Espesor del recubrimiento TiCN observado en un microscopio SEM a 5000X; (1) Baquelita, (2) TiCN y (3) Acero AISI H13.	35
Figura 4.3	Indentación Rockwell D en recubrimiento de TiN a 100X.	36
Figura 4.4	Indentación Rockwell D en recubrimiento de TiCN a 100X.	36
Figura 4.5	Coefficiente de fricción de acero H13 recubierto de TiN en seco y lubricado.	37
Figura 4.6	Micrografías ópticas (50X) de los anchos de huella del TiN; a) Seco y b) lubricado.	38
Figura 4.7	Perfiles del ancho de huella del TiN, tanto en seco como lubricado.	39
Figura 4.8	Micrografías ópticas de las superficies desgastadas del TiN (200X); (a) seco y (b) lubricado.	40
Figura 4.9	Coefficiente de fricción de acero H13 recubierto de TiCN en seco y lubricado.	41
Figura 4.10	Micrografías ópticas (50X) de los anchos de huella del TiCN; a)Seco y b) lubricado.	42
Figura 4.11	Perfiles del ancho de huella del TiCN, tanto en seco como lubricado.	42
Figura 4.12	Micrografías ópticas de las superficies desgastadas del TiCN (200X); (a) seco y (b) lubricado.	43



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Composición química del acero AISI H13 (%).	6
Tabla 2.2	Propiedades mecánicas del acero AISI H13.	6
Tabla 2.3	Típicos fenómenos de desgaste causados por los principales mecanismo de desgaste.	18
Tabla 3.1	Metodología de pulido hasta lija 400.	22
Tabla 3.2	Especificaciones de certificado de calidad del recubrimiento del TiCN y TiN.	24
Tabla 3.3	Criterio de adhesión de Norma CEN/TS BSi 1071-8.	26
Tabla 3.4	Condiciones de la pruebas tribológicas, tanto en seco como lubricada.	28
Tabla 4.1	Ancho de huella (d), coeficiente de fricción ( $\mu_K$ ), volumen perdido (V) y razón de desgaste (K) del acero AISI H13 recubierto con TiN.	39
Tabla 4.2	Ancho de huella (d), coeficiente de fricción ( $\mu_K$ ), volumen perdido (V) y razón de desgaste (K) del acero AISI H13 recubierto con TiCN.	43

## RESUMEN

El objetivo del presente estudio fue investigar el desempeño tribológico del acero AISI H13 recubierto de nitruro de titanio (TiN) y carbonitruro de titanio (TiCN) contra una bola de carburo de tungsteno (WC), bajo ensayos de 10N, con y sin lubricación. El análisis se desarrolló por medio de un sistema de desgaste con la configuración pin-on-disk (perno en disco), realizándose a una velocidad de deslizamiento de 2.5 cm/s, a una temperatura de 25°C para las pruebas en seco mientras que para las pruebas lubricadas se realizó a 100°C, condiciones que se mantuvieron durante el recorrido de una distancia de deslizamiento de 1000 m, con un radio de huella de 2 mm. Así mismo se determinaron los mecanismos de desgaste realizaron los estudios de los mecanismos de desgaste determinándose por medio de microscopía óptica. Previo al análisis tribológico se realizan pruebas de adhesión para comprobar que las propiedades de los recubrimientos son de buena calidad por medio de indentaciones Rockwell D, así como la medición del espesor del mismo por medio de microscopía óptica. Entre los resultados reportados se encuentra la demostración de la buena calidad de la adhesión de los recubrimientos. De igual forma los espesores de estos mismos se encuentran dentro de las especificaciones establecidas por el proveedor. Por otro lado se reportan las curvas de coeficiente de fricción contra la distancia de deslizamiento, permitiendo evaluar por medio del cálculo del volumen perdido y razón de desgaste, el desempeño tribológico. En condiciones secas se detectaron entre los mecanismos de desgaste principalmente la abrasión y oxidación, mientras que en condiciones lubricadas no se pudieron determinar qué mecanismos se presentaron. El uso de perfilometría sobre la huella de desgaste permitió esclarecer y soportar algunas teorías acerca de la topografía de la misma. Los resultados sugieren que el TiCN tiene mejor desempeño tribológico en condiciones secas, mientras que en condiciones húmedas ambos recubrimientos (TiN y TiCN) tienen un buen desempeño.

## **ABSTRACT**

The main purpose of this work was to investigate the tribological performance of Titanium nitride (TiN) and Titanium carbide nitride (TiCN) coatings on an AISI H13 steel against a Tungsten carbide (WC) ball, under a 10N load in dry and lubricated conditions. The tests were carried out in a ball-on-disk configuration, with a sliding velocity of 2.5cm/s, at room temperature for the dry tests and 100°C for the lubricated, these conditions were maintained for a sliding distance of 1000m, with a wear track radius of 2mm. To determine the wear mechanisms it was performed an analysis with the optical microscope. Previously to the tribological analysis, we developed an adhesion analysis with Rockwell D indentations in order to verify the properties and quality of the coatings, the measurement of the coating thickness was done with the optical microscope. It is reported the good quality of the adhesion of the coatings. The thickness of the coating correspond to the supplier specifications. Between the results obtained in this project we have the graphics of friction coefficient against sliding distance from where we can evaluate through the calculus of volume loss and wear rate the tribological performance. The wear mechanisms observed were mainly abrasion and oxidation, with the use of lubrication there were no trace of any wear mechanism under the established conditions. Profilometry was performed on the wear track to describe the topography of the track. The results suggest that the use of TiCN coating improve the tribological performance under dry conditions, while in lubricated conditions both coatings (TiCN and TiN) had an excellent performance.

# INTRODUCCIÓN

El proceso de forjado consiste en la fabricación de piezas a partir de la deformación plástica de un metal, que a través de impactos sucesivos aplicados sobre el herramental, los cuales son llamados dados, se obtiene la forma deseada. Dichos dados al ser sometidos a cargas y en ocasiones en temperaturas altas ya sea por el propio trabajo realizado o por las condiciones a las que se lleva a cabo el proceso de forja, es indispensable que sean fabricados de material que permitan prologar su vida útil. Las propiedades deseables para este tipo de herramientas son la tenacidad, dureza y resistencia al desgaste.

Por lo anterior, el material sugerido para los dados de forja es el acero AISI H13, el cual cuenta con la tenacidad y dureza necesaria para el proceso. En los últimos años, se ha encontrado una gran influencia de los recubrimientos duros que mejoran las propiedades superficiales de los materiales y consecuentemente su desempeño tribológico. Entre estos se destacan los recubrimientos de nitruro de titanio (TiN) y carbonitruro de titanio (TiCN), siendo estos los que cuentan con las durezas más altas dentro de su gama.

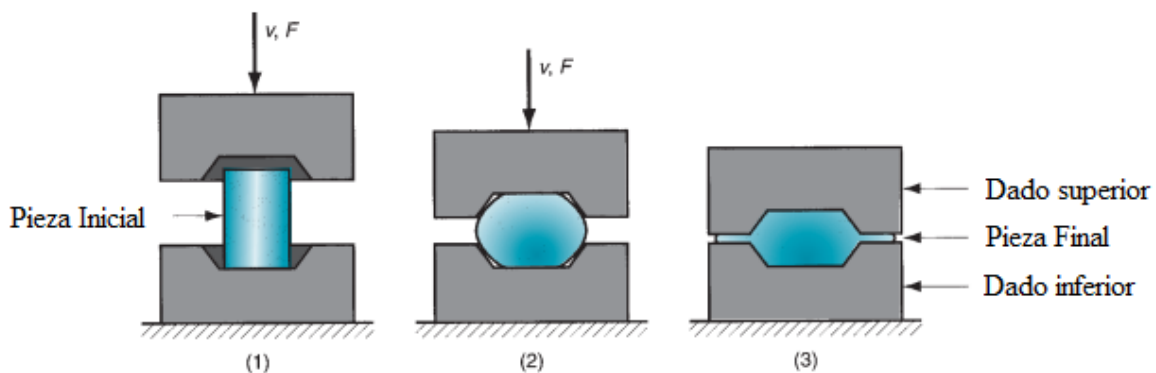
En el presente trabajo, se analiza el estudio de fricción y desgaste del acero AISI H13 recubierto de TiN y TiCN bajo diferentes condiciones de lubricación y temperatura, conforme a la norma ASTM G99-05. Este trabajo se divide en cuatro capítulos. El primer capítulo muestra los antecedentes, el planteamiento y justificación del problema, así como los objetivos generales y específicos. El capítulo dos, se muestra la información acerca de los materiales utilizados, así como las técnicas de análisis tribológicos y todos sus elementos. El capítulo tres, hace referencia a la metodología con la que se llevó a cabo la investigación. Finalmente el capítulo cuatro muestra los resultados y discusiones obtenidas, así como las conclusiones.

# Capítulo I Marco de Referencia

## 1.1 Antecedentes

El forjado es un proceso industrial importante mediante el cual se hacen una variedad de componentes de alta resistencia para automóviles, vehículos aeroespaciales y otras aplicaciones. Estos componentes incluyen flechas y barras de conexión para motores de combustión interna, engranes, componentes estructurales para aviación y partes para turbinas y motores a propulsión [1].

El proceso de conformado mecánico de forja consiste en deformar plásticamente un metal, por medio de la aplicación de presión o impactos sucesivos hasta lograr la forma deseada, ver Figura 1.1. Una de sus principales ventajas de este proceso es que la pieza trabajada, sale del proceso con geometrías y dimensiones casi finales, permitiendo así una mayor facilidad y rapidez de maquinado.



**Figura 1.1** Secuencia del proceso de forja [1].

Una forma de clasificar el proceso de forja es mediante su temperatura de trabajo, que puede ser en frío, tibio y caliente. La mayoría de las operaciones de forja se realizan en caliente (por arriba y por debajo de la temperatura de recristalización), debido a la deformación que demanda el proceso y la necesidad de reducir la resistencia e incrementar la ductilidad del metal de trabajo, por lo que la pieza llega a temperaturas de hasta  $500^{\circ}\text{C}$ , temperatura que es transferida a los dados de forja. Las altas temperaturas y los esfuerzos de contacto, junto con otras condiciones ocasionan la generación de daños en el herramental, siendo estas primeras las principales causas de deterioro en la superficie. De esta manera se realiza la búsqueda de materiales para la elaboración de dados de forja que proporcionen además de una alta

resistencia al desgaste por fatiga térmica y esfuerzos de contacto, contar con excelentes propiedades mecánicas, así como una buena estabilidad dimensional ante exposiciones a altas temperaturas [2]. Uno de los aceros adecuados para el formado en caliente es el acero AISI H13, el cual provee un buen balance de tenacidad y alta resistencia a la formación de grietas causadas por el choque térmico, así como una buena resistencia al revenido y resistencia al desgaste moderado. Estas propiedades están dadas por su composición de C, Si, Cr, Mo y V, convirtiéndolo en un material altamente utilizado para la elaboración de dados de extrusión de aleaciones ligeras (como el aluminio), para cuchillas de corte en caliente, para moldes de plástico, punzones y matrices, pernos eyectores y dados de forja [3]. A pesar de las propiedades que ofrece el acero AISI H13, la aplicación de recubrimientos duros puede proveer una mejora en las propiedades superficiales en términos de baja fricción y alta resistencia al desgaste y/o corrosión, ya que este es el principal problema en los herramientas en los procesos de formado [4].

Debido a la importancia que tiene el desgaste en herramientas, numerosos investigadores han analizado el comportamiento de estos mismos en términos tribológicos. Knotek evaluó el desempeño de TiN, donde observó las ventajas del recubrimiento de TiN sobre insertos de carburo, teniendo un coeficiente de fricción menor que los insertos de carburo sin recubrir [5]. Por otro lado J.D. Bressan, realizó una comparación del comportamiento tribológico de recubrimientos de TiAlN y TiCN sobre un sustrato de acero rápido M2 donde concluye que el desempeño del TiAlN es superior sobre el TiCN [6]. También, Velasco y colaboradores efectuaron una comparación mecánica y tribológica sobre un acero de alta velocidad M2, con un recubrimiento de TiCN, donde la concentración de la matriz de componentes metálicos fue modificado, realizando dicha comparación en dos diferentes concentraciones (2.5% y 5%). A pesar de que esta modificación no tuvo una influencia significativa sobre el coeficiente de fricción, la tasa de desgaste tiene una tendencia descendente [7].

Por otro lado Y.H. Cheng y colaboradores, analizaron la influencia del contenido de C de un recubrimiento de TiCN sobre las propiedades mecánicas y tribológicas de este. Los porcentajes de C presentes en el recubrimiento fueron de 5, 10, 20, 30 y 50%, siendo caracterizados por medio de microscopía electrónica de barrido (SEM), nanoindentación y pruebas tribológicas con una configuración pin-on-disc, obteniendo así la dureza, el módulo de elasticidad, la tasa de desgaste y el coeficiente de fricción. Como resultado se obtiene que

el aumento de C en el recubrimiento, permite el aumento de la dureza y el módulo elástico hasta un máximo en un contenido de C de 2.8%, luego disminuye rápidamente, lo que resulta del aumento de la densidad de defectos en los revestimientos. En cuanto el análisis tribológico se encuentra que en el coeficiente de fricción no existen cambios significativos cuando el recubrimiento de TiCN tiene un contenido de C por debajo de 4.6%, pero el coeficiente de fricción disminuye rápidamente con un contenido de C mayor a 9.3%. Además con el aumento de contenido de C en los recubrimientos de 0 a 9.3%, la velocidad de desgaste disminuye notablemente [8].

Además de investigaciones sobre el desempeño tribológico, otros investigadores se han dado a la tarea de evaluar este mismo tipo de recubrimientos pero de manera cualitativa. Por ejemplo, Sivitski y colaboradores realizaron una evaluación de la adherencia de recubrimientos de TiN, TiCN, TiAlN, AlTiN y nAlCo a sustratos de acero Vanadis 6, concluyendo que la adhesión del TiN y TiCN, son las más destacadas al presentar menor agrietamiento a pesar de que el TiN presenta un porcentaje muy bajo de delaminación[9]. Por otro lado, Carney investigó el comportamiento de películas de TiN sobre un acero inoxidable 304 bajo cargas de indentación, observando que existe relación directa entre la profundidad de la penetración y la carga de indentación. Además, la aparición de efectos de fluencia y térmicos durante las pruebas, dan indicio de ser los principales causantes de la delaminación del recubrimiento [10].

## **1.2 Planteamiento del problema**

En el proceso de forja, debido a los altos niveles de deformación, se utilizan fuerzas que conllevan a esfuerzos de contacto suficientemente elevados para ocasionar agrietamientos superficiales sobre los dados de forja, siendo esta una de las principales causas para el deterioro prematuro (desgaste) de los mismos. Debido al desgaste severo y a los esfuerzos térmicos y mecánicos, condiciones a las que están sometidos los dados en los procesos de conformado, se han desarrollado procesos de modificación superficial con la finalidad de incrementar la resistencia al desgaste del material o modificar el comportamiento del coeficiente de fricción. Los recubrimientos duros por deposición física de vapor (PVD) son alternativas muy utilizadas en la industria para modificar la superficie de los aceros utilizados en herramientas. Generalmente, estos tratamientos mejoran las propiedades mecánicas de la

superficie del material tales como dureza, resistencia al desgaste, fatiga y fricción. Por lo anteriormente mencionado, en este estudio se plantea una investigación sobre fricción y desgaste de un acero para herramienta H13, usado para el trabajo de forja, el cual fue tratado superficialmente con recubrimientos de nitruro de titanio (TiN) y carbonitruro de titanio (TiCN), con el objetivo de incrementar su resistencia al desgaste. Este estudio permitirá establecer las condiciones de uso de los recubrimientos que prolongarán la vida útil de los dados.

### **1.3 Justificación**

Debido a la gran demanda de productos, en la actualidad existe una creciente necesidad de racionalizar el consumo de energía y aprovechar al máximo el uso de los materiales empleados, ocasionado por el aumento de competencia y la escasez de recursos. El desgaste de herramientas tiene influencia directa en la productividad, eficiencia, confiabilidad y calidad de los productos manufacturados y debido al impacto económico que representa el problema de desgaste, es necesario contar con información relacionada con la fricción y desgaste en aceros para herramientas que permita una mejor toma de decisiones para incrementar la vida útil de los herramientas utilizados en los procesos de forja.

### **1.4 Objetivos**

#### **1.4.1 Objetivo General**

Evaluar el comportamiento tribológico del acero herramienta AISI H13 recubierto superficialmente con nitruro de titanio (TiN) y carbonitruro de titanio (TiCN), en diferentes condiciones de lubricación (seco y húmedo) y temperatura (25°C y 100°C).

#### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- a) Preparar las muestras (acero AISI H13) hasta obtener la misma calidad superficial para cada una de las muestras.
- b) Realizar ensayos de fricción sobre capas duras en condiciones de temperatura y lubricación diferentes.
- c) Evaluar y comparar la evolución del coeficiente de fricción entre cada una de las capas duras y condiciones.



- d) Medir el ancho de la huella de desgaste por medio de microscopía óptica para determinar el volumen perdido y tasa de desgaste
- e) Determinar los mecanismos de desgaste mediante microscopía electrónica de barrido.
- f) Realizar pruebas mecánicas de adherencia por medio de indentaciones en Rockwell D, determinando así la calidad de estas.

### **1.5 Impacto**

El impacto del presente estudio es la generación de las gráficas de coeficiente de fricción y tasas de desgaste confiables del acero para herramienta AISI H13 recubierto de TiN y TiCN en condiciones para el proceso de forja, para su posterior aplicación ingenieril.

### **1.6 Alcances**

El desarrollo de los ensayos de fricción de discos se llevó acabo con un acero AISI H13 recubierto de nitruro de titanio (TiN) y carbonitruro de titanio (TiCN), con una contraparte de carburo de tungsteno (WC), donde la carga, la velocidad, la distancia de deslizamiento y el radio de huella de desgaste se mantienen constantes, realizándose en un tribómetro CSM Instruments conforme a la Norma ASTM G99-05, donde las pruebas en seco se hicieron a 25°C y las lubricadas a 100°C.

## Capítulo II Marco teórico

### 2.1 Acero H13

El acero AISI H13 es un acero grado herramienta, donde su contenido de cromo, molibdeno, vanadio y silicio, ver Tabla 2.1, hacen de este un acero resistente a raspaduras por fatiga térmica; contando con excelentes propiedades mecánicas, ver Tabla 2.2, como buena tenacidad, buena estabilidad dimensional durante el tratamiento térmico y buena resistencia al desgaste, facilitando el proceso de pulido y mecanizado de este mismo. Por esta razón este acero es ideal para herramientas de trabajo en caliente y moldes para inyección de plástico [11].

**Tabla 2.1** Composición química del acero AISI H13 (%).

C	Cr	Mn	Mo	P	S	Si	V
0.40	4.850	0.490	1,250	0.013	0.002	1.060	0.910

**Tabla 2.2** Propiedades mecánicas del acero AISI H13.

Propiedad	Unidad	Valor
Resistencia última a la tensión	MPa	1990
Módulo de Elasticidad, E	(GPa)	207
Densidad	(gr/cm <sup>3</sup> )	7.80
Dureza	HB	215
Módulo de Poisson, $\nu$		0.30

Este acero tiene aplicación típica en la fabricación de matrices y punzones para forja, matrices de trabajo en caliente, insertos para matrices, moldes y componentes de fundición o inyección de aleaciones en zinc, estaño, plomo y aluminio, matrices de extrusión de latón, aluminio y magnesio, mandriles y otros componentes de extrusoras, moldes para inyección en termoplásticos no clorados donde se requiere un alto grado de pulido y cuchillas de tijera en caliente.

## **2.2 Recubrimientos Duros**

Se entiende por recubrimientos duros aquellas películas delgadas con las que se recubren las superficies de muchas piezas de uso técnico. Los recubrimientos metálicos duros han experimentado un incremento importante en su uso en las últimas décadas, debido a la diversidad de aplicaciones industriales que surgen cada día [12].

En las últimas tres décadas los investigadores dedicados al estudio de nuevos materiales metálicos, han mostrado un especial interés en el desarrollo de recubrimientos duros. El desarrollo espectacular de los recubrimientos, en forma de capas o películas delgadas, está asociado a la batalla que libra la industria contra los nocivos efectos de la fricción y el desgaste generado sobre piezas mecánicas en cualquier línea de producción. En efecto, el continuo rozamiento entre componentes y/o herramientas en procesos de mecanizado, conformado de metales, transmisión de movimiento, sistemas de engranajes, cojinetes, rodamientos y, en general, la acción propia del trabajo, causa que todas las superficies mecánicas en contacto sufran deterioro y desgaste.

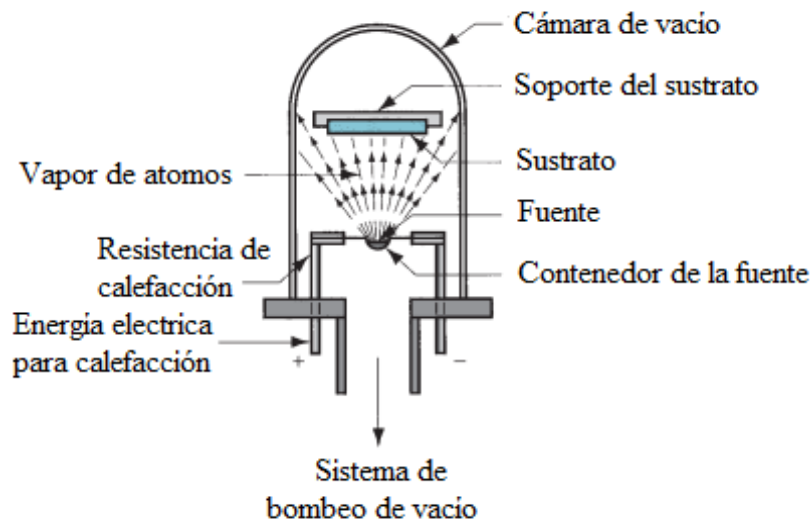
Con el fin de mejorar las propiedades de los metales para que tengan un mejor desempeño frente las extremas condiciones y factores industriales como la fricción, las altas temperaturas, corrosión y el desgaste, existen numerosas técnicas de recubrimientos con capas delgadas de materiales superduros de tipo cerámico, cuyo espesor puede ser entre algunos nano-metros hasta unas pocas micras ( $\mu\text{m}$ ). La idea es mejorar el rendimiento y acabado superficial de los metales, además disminuir costos de mantenimiento por paradas inesperadas [12].

A continuación se describen brevemente las técnicas por las cuales se pueden obtener los recubrimientos TiN y TiCN

### **2.2.1 Recubrimientos por deposición PVD**

Las técnicas PVD están basadas en la formación de un vapor del material a depositar, con objeto de que se condense sobre la superficie de un sustrato para formar una o varias capas ultra delgadas que lo recubran y protejan. El proceso se realiza en atmósfera controlada en alto vacío (10-5 mbar), para evitar la interacción del material en estado gaseoso con el aire, así como la absorción, por parte del sustrato, de gases contaminantes de la atmosfera, además

se efectúa a temperaturas de entre 150 y 500 °C, dependiendo de las características a obtener en el recubrimiento.



**Figura 2.1** Diagrama de una deposición física de vapor [13].

Todos los procesos de deposición física de vapor consisten en los siguientes pasos:

- 1) Síntesis del vapor de recubrimiento.
- 2) Transporte del vapor al sustrato.
- 3) Condensación de los vapores sobre la superficie del sustrato.

Dichos pasos se pueden observar en la Figura 2.1. La síntesis del vapor del recubrimiento se obtiene mediante diversos métodos, tales como el calentamiento por resistencia eléctrica o el bombardeo con iones para vaporizar un sólido (o líquido) existente. Éstas y otras variables producen varios procesos de deposición física de vapor. Se agrupan en tres tipos principales: 1) evaporación en vacío, 2) bombardeo de partículas atómicas y 3) recubrimiento iónico. Entre la variedad de procesos que existen para el endurecimiento de superficies, podemos encontrar que este método es muy seguro, permite emplearse prácticamente con cualquier tipo de material inorgánico, además de ser uno de los métodos más efectivos para aumentar la resistencia y durabilidad de una superficie.

Cualquiera que sea la técnica de evaporación, los átomos evaporados dejan la fuente y siguen trayectorias en línea recta hasta que chocan con otras moléculas de gas o con una superficie sólida. Tras el contacto con la superficie del sustrato relativamente fría, el nivel de energía de los átomos que chocan se reduce repentinamente, hasta un punto donde ya no pueden

permanecer en estado de vapor, entonces se condensan y se pegan a la superficie sólida, donde forman una película delgada [13].

### **2.2.2 Recubrimientos por deposición CVD**

La deposición química de vapor (CVD), implica la interacción entre una mezcla de gases y la superficie de un sustrato calentado, provocando la descomposición química de algunas de las partes del gas y la formación de una película sólida en el sustrato, Las reacciones ocurren en una cámara de reacción sellada. El producto de la reacción (ya sea un metal o un compuesto) forma un núcleo y crece en la superficie del sustrato para formar el recubrimiento. Casi todas las reacciones pueden ser provocadas por otras fuentes de energía, tales como la luz ultravioleta o un plasma. La CVD incluye un amplio rango de presiones y temperaturas; y se aplica a una gran variedad de materiales de recubrimiento y de sustrato.

El interés moderno en la CVD se concentra en sus aplicaciones para recubrimiento, tales como las herramientas recubiertas con carburo reforzado, las celdas solares, el depósito de metales refractarios en las hojas de turbinas de motores a chorro y otras aplicaciones en donde son importantes la resistencia al desgaste, la corrosión, la erosión y el choque térmico.

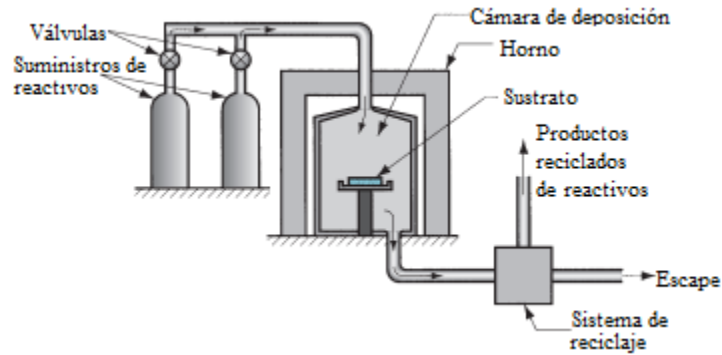
Las ventajas que citan comúnmente para la deposición química de vapor incluyen:

- a) Es posible depositar materiales refractarios a temperaturas debajo de sus puntos de fusión o sinterizado
- b) Es posible controlar el tamaño del grano
- c) El proceso se realiza a presión del ambiente normal
- d) Hay una buena unión del recubrimiento a la superficie del sustrato.

Los procesos de deposición química de vapor se realizan en un reactor que consiste en:

- 1) Sistema de provisión de reactivos
- 2) Cámara de deposición
- 3) Sistema de reciclado/evacuación

Una variable de la deposición CVD es la deposición química de vapor asistida con plasma, DQVAP (en inglés PACVD), en la cual la deposición sobre un sustrato se consigue mediante la reacción de los ingredientes en un gas que se ha ionizado mediante una descarga eléctrica. En este caso se usa la energía que contiene el plasma en lugar de energía térmica para activar las reacciones químicas [13].



**Figura 2.2** Diagrama de deposición química de vapor [13].

### 2.2.3 Aplicaciones de los recubrimientos

El recubrimiento abre nuevas dimensiones en la fabricación y diseño con claras ventajas en la reducción de costos de numerosas aplicaciones. Por ejemplo, los recubrimientos hacen que las cajas de engranajes funcionen con mayor fiabilidad y sean capaces de admitir mayores cargas, reduzcan el consumo de combustible del motor, aumentan las prestaciones de las bombas y compresores y las hacen menos agresivas para el medioambiente. Los recubrimientos duros proporcionan una combinación ideal de bajo coeficiente de fricción, elevada resistencia al desgaste y capacidad extrema de carga. Una característica especial, es el notable rendimiento durante el rodaje y en seco de los recubrimientos desarrollados por PVD y CVD.

Entre otras ventajas se destaca la reducción de costos debido a que existe menos gastos en refrigerantes, consumo de energía debido a la disminución del esfuerzo de la máquina y replazo de herramientas, así como mejora la resistencia a la corrosión. En términos de productividad, acorta los plazos de entrega ya que permite mayores velocidades de mecanizado, así como disminuye significativamente en número de paradas de máquina. En cuanto a la calidad del producto final, se puede apreciar el mejoramiento del acabado superficial al presentar disminución de las rugosidades presentes puesto que protege la herramienta cuando se mecaniza en seco (autolubricación). Finalmente ofrecen un excelente desempeño industrial e impulsan la competitividad de las empresas y la apertura de nuevos mercados y al mismo tiempo reducen el impacto medioambiental, al ahorrar recursos.

## 2.2.4 Adhesión de recubrimientos

La cualidad más importante durante el proceso de deposición de material superficial, es la adherencia, definiéndose esta como la capacidad de un recubrimiento de mantenerse unido al sustrato bajo condiciones de operación. Cabe señalar que esta definición no debe ser confundida con la adhesión entre la superficie superior del recubrimiento y la superficie de deslizamiento, que está relacionada con la fricción adhesiva y el desgaste adhesivo, ver Figura 2.3.

### 2.2.4.1 Prueba por desprendimiento

Esta consiste en formar una unión sobre el recubrimiento y aplicar posteriormente una fuerza para desprenderlo. La cara final de una barra cilíndrica de bajo carbono es pegada en ángulos rectos a la superficie del recubrimiento con cemento epóxico. Después del curado, una carga es aplicada en el extremo de la barra paralela al recubrimiento. La carga con la cual la barra cae y desprende la capa muestra una medición de la adhesión [14].

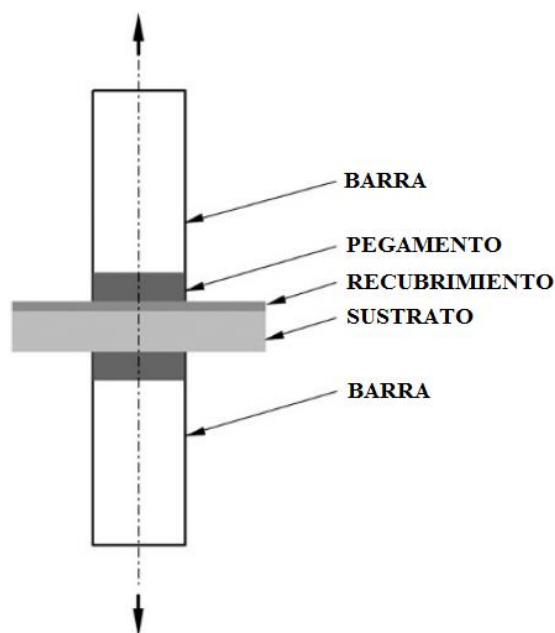


Figura 2.3 Prueba de adhesión por el método de desprendimiento [14].

### 2.2.4.2 Prueba por indentación

Las pruebas de indentación son ampliamente utilizadas en la industria como un medio rápido y conveniente de obtener una indicación cualitativa de la adhesión. Éstas usualmente

consisten en una simple indentación Rockwell y la observación con un microscopio óptico a 100X alrededor de la fractura de la indentación resultante, la cual es comparada con una tabla mostrando resultados aceptables y no aceptables sobre un sustrato duro de 54 HRC. La deficiencia de este método es que se basa en la propagación del agrietamiento sobre la superficie que por lo tanto tiene que ser observado y es posible que se origine desunión sin agrietamiento visible de la superficie [14].

### 2.2.4.3 Prueba por scratch

Esta prueba consiste en un indentador, Figura 2.4, arrastrado a través de la superficie de un recubrimiento bajo una carga normal creciente, provocando la separación del recubrimiento. La carga correspondiente a la falla proporciona una guía de la resistencia de la adhesión y regularmente está referenciada como la carga crítica. La falla puede definirse al inicio del a indentación como agrietamiento, astillamiento de la película, o el desarrollo de un canal en el cual todo el recubrimiento ha sido removido. El tipo de falla dependerá en cierta medida de la ductilidad de la película del recubrimiento. Los resultados obtenidos por la prueba de scratch dependen del material del indentador, su acabado superficial y geometría. Así mismo, la condición de la superficie del recubrimiento, su geometría, e incluso la humedad relativa en el aire durante la prueba puedan influir en el resultado [14].

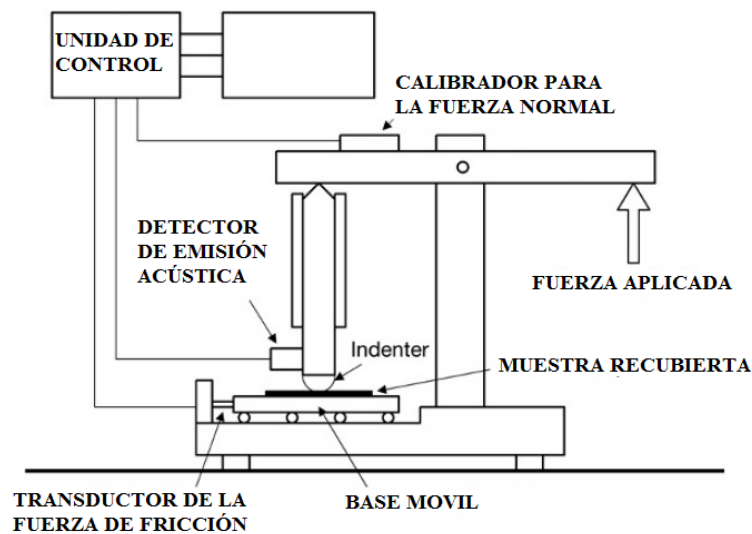


Figura 2.4 Esquema y equipamiento de la prueba de Scratch [14].



## **2.3 Tribología**

La tribología (del griego τριβω tribō, "frotar o rozar") es la ciencia que estudia la fricción, el desgaste y la lubricación que tienen lugar durante el contacto entre superficies sólidas en movimiento, así como las aplicaciones tecnológicas de los conocimientos tribológicos. La importancia del desarrollo de la tribología a nivel industrial se ve reflejada en los diferentes estudios económicos que realizan países industrializados como: Inglaterra, Alemania, Japón y Estados Unidos [15].

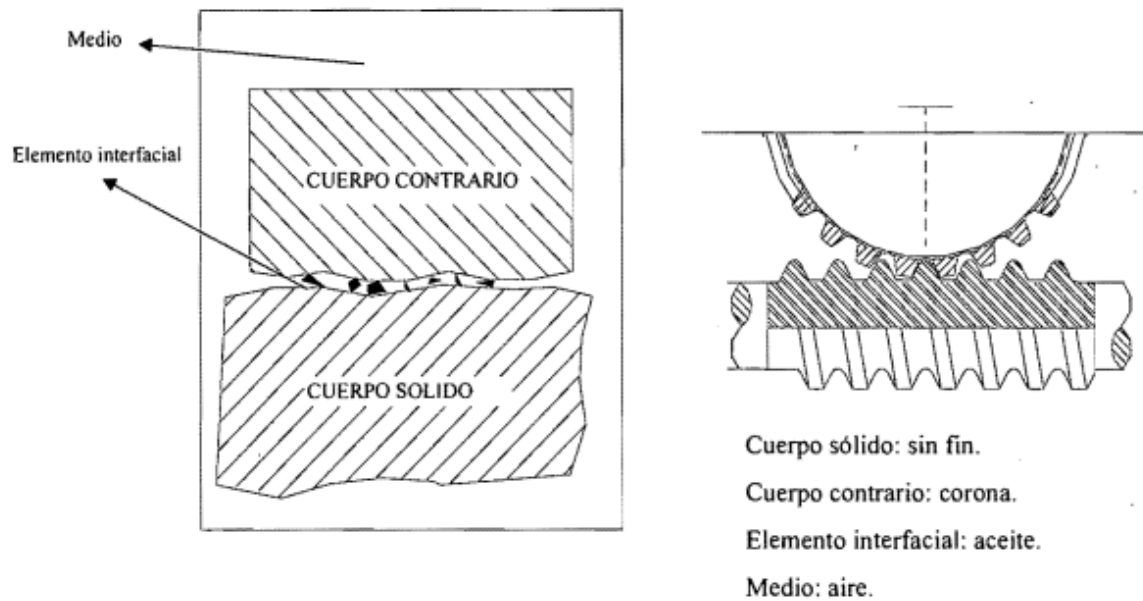
La fricción y la lubricación no son propiedades intrínsecas de los materiales en operación, sino de los sistemas ingenieriles en operación. La fricción es un fenómeno que se caracteriza por la pérdida de energía mientras que el desgaste es un fenómeno que se caracteriza por la pérdida de masa. La DIN 50320 define el desgaste como “la pérdida progresiva de material de la superficie de un cuerpo sólido debido a una acción mecánica” [16]. El desgaste rara vez es catastrófico, más bien se refleja una disminución de la eficiencia de las condiciones de operación [17]. Al presentarse el desprendimiento de pequeñas partículas debido al desgaste en sistemas con claros y/o tolerancias pequeñas, puede representar un mayor problema que los cambios dimensionales de los componentes.

Por tanto se entiende por tribosistema (o sistema tribo-tecnológico), como el sistema de análisis que sirve para identificar la naturaleza de mecanismo de desgaste presente. Su propósito es transformar y/o transmitir tecnológicamente las entradas en salidas. En este ámbito se entiende por entrada a la variable que inicialmente gobierna el tribosistema para realizar una función específica bien sea este trabajo, movimiento, masa, información, etc. Sin embargo, por la naturaleza propia de todo tribosistema dichas variables sufren perturbaciones de diferentes magnitudes, por lo cual a las variables resultado de estas perturbaciones se les considera salidas.

### **2.3.1 Fricción**

Cuando una superficie se coloca sobre otra, Figura 2.5, es necesario aplicar una fuerza horizontal finita para iniciar el deslizamiento. Esta fuerza horizontal es la fricción estática entre las dos superficies, cuya magnitud depende, entre otras cosas, de la limpieza de la interface de modo que la fricción entre dos cuerpos es alta en el vacío. La fuerza necesaria

para mantener el deslizamiento debe ser mayor que la fricción cinética entre las dos superficies.



**Figura 2.5** Tribosistema.

La resistencia al deslizamiento bajo tracción tangencial se explicó durante mucho tiempo mediante la hipótesis de la rugosidad que sugiere que las crestas de una superficie descansan sobre los valles de la otra y la resistencia al movimiento es el esfuerzo que deben realizar estas crestas para salir de los valles, la teoría actual de la fricción parte de la premisa básica de que el contacto ocurre en unos cuantos puntos aislados debido a la naturaleza ondulatoria de las superficies. Las áreas de contacto forman uniones metálicas debido a la deformación plástica o elástica, de manera que la resistencia friccional es la fuerza necesaria para destruir estas uniones [18].

### 2.3.2 Leyes de Fricción

Existen dos leyes básicas de fricción que se cumplen en un amplio rango de aplicaciones. Estas leyes son conocidas como leyes de Amontons, después de que el físico francés Guillaume Amontons las redescubrió en 1699; Leonardo da Vinci, sin embargo, fue el primero en introducir el concepto de coeficiente de fricción como la relación entre la fuerza de fricción y la carga normal, pero sus cuadernos permanecieron sin publicar 200 años [19]. La descripción de estas leyes inicia con:

$$F = \mu W \quad \text{Ec. 2.1}$$

La ecuación (2.1) explica que  $F$  es la fuerza de fricción,  $W$  es la carga normal sobre el contacto y  $\mu$  es una constante conocida como el coeficiente de fricción estático ( $\mu_s$ ) o coeficiente de fricción cinético ( $\mu_c$ ) que es independiente de la carga normal. En el caso de la fuerza de fricción estática es posible expresar esta ley en términos de ángulo de reposo límite  $\theta$  definido por:

$$\mu_s = \tan\theta \quad \text{Ec. 2.2}$$

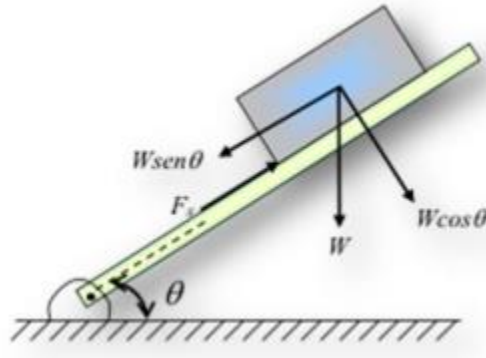
En esta ecuación (2.2),  $\theta$  es el ángulo tal que un cuerpo de algún peso, colocado sobre un plano inclinado a un ángulo menor que  $\theta$  desde la horizontal permanecerá estacionario mientras que si se aumenta la inclinación del ángulo a  $\theta$ , el cuerpo empezará a deslizar hacia abajo, como lo muestra la Figura 2.6. Estas consideraciones se cumplen igualmente para los casos de fricción sin y con lubricación. El coeficiente de fricción sin lubricación puede variar en un amplio rango, desde valores muy pequeños de 0.02 a valores tan grandes como 10 o incluso mayores en el caso de metales blandos y limpios deslizando contra ellos mismos en vacío [19].

La segunda ley plantea que la fuerza de fricción (o coeficiente de fricción) es independiente del área aparente de contacto entre los cuerpos en contacto, (pero no del área real de contacto) por este motivo un paralelepípedo de cualquier peso sufrirá la misma fuerza de fricción apoyado sobre cualquiera de sus caras.

A estas dos leyes se añade una tercera ley, que es con frecuencia atribuida a Coulomb [19]. Esta ley estipula que la fuerza de fricción cinética (o coeficiente de fricción) es independiente de la velocidad de deslizamiento una vez el movimiento empieza.

El coeficiente de fricción puede ser muy bajo para superficies muy lisas o a cargas por debajo del rango micro a nano-Newton, por ejemplo el coeficiente de fricción de SiO<sub>2</sub> recubriendo Si contra diamante inicia en 0.05 y empieza a aumentar por encima de cierta carga crítica. La deformación totalmente elástica y la carencia de contribuciones debidas al desgaste son las responsables de la baja fricción a cargas por debajo de la carga crítica. Es importante enfatizar que  $\mu$  en general es una constante independiente de la velocidad de deslizamiento pero su valor depende ciertamente de las condiciones de operación (temperatura, humedad, presión ambiental). Si dos superficies sólidas están

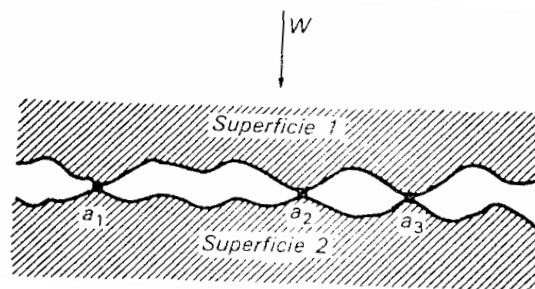
limpias y sin capas de óxidos pueden presentar una alta fricción en contacto, mientras que si estas superficies se encuentran contaminadas el valor de la fricción en general es menor. Algunos pares de materiales pueden mostrar una cierta dependencia de los coeficientes de fricción estático y cinético con la carga normal, la velocidad de deslizamiento y el área aparente



**Figura 2.6.** Diagrama de equilibrio para un cuerpo sobre un plano inclinado con fricción estática.

### 2.3.3 Área de contacto

Considérese una superficie que descansa sobre otra, Figura 2.7, ambas con protuberancias, como es el caso de las superficies ingenieriles, no puede existir un contacto en toda el área aparente de la interface y los dos sólidos sólo se tocan en aquellas asperezas que se aproximan en posición favorable. En esta forma, las áreas de contacto  $a_1$ ,  $a_2$ , etc. serán las que formen el área de contacto de manera que la suma de todas ellas serán el área total efectiva de contacto ( $A_t = a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n$ ), como se muestra en la Figura 2.7, la superficie 1 descansa sobre otra superficie 2 bajo una carga normal  $W$ , donde el contacto se produce en unas cuantas asperezas ( $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$ ).



**Figura 2.7** Área real de dos superficies en contacto.

La medición de la conductividad eléctrica de las superficies estacionarias muestra que el área real de contacto es una fracción del área aparente. Por ejemplo, para superficies de acero,  $A_r=(a/10\ 000)$ , donde  $a$  es el área aparente de contacto que es la superficie medida en la interfase. Un área de contacto pequeña significa que la carga es soportada en unos cuantos puntos aislados. Esto produce un esfuerzo normal intensificado en la interfase y está bien establecido que el material en  $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$  fluye plásticamente y forma fuertes uniones entre las superficies 1 y 2. Obviamente, la suma de las áreas interfaciales de todas las uniones es el área real de contacto y éstas deben romperse para que una superficie pueda deslizarse en relación con otra [18].

### **2.3.4 Desgaste**

Siempre que hay movimiento relativo entre dos sólidos que soportan una carga existe una situación potencial de desgaste. En términos generales, se sabe que el movimiento puede ser unidireccional o de vaivén, ya sea deslizante o de rodamiento. Puede existir una combinación de estos dos últimos, o el desgaste puede deberse a un movimiento oscilatorio de pequeñas amplitudes. Un metal puede interactuar con un no metal, o con líquidos, como aceite lubricante o agua de mar. Los tipos de desgaste se clasifican de la siguiente manera, dependiendo de la naturaleza del movimiento o de los medios que intervienen en una interacción de metales bajo carga.

#### **2.3.4.1 Desgaste por adherencia**

En este caso, el movimiento relativo puede ser deslizamiento unidireccional o de vaivén, o bien la interacción ocurre bajo carga en un contacto oscilatorio de pequeña amplitud. Se sabe que los picos superficiales que coinciden fluyen plásticamente y forman fuertes uniones endurecidas por el trabajado. A medida que éstas se rompen bajo la tracción tangencial impuesta, los sólidos van perdiendo material.

#### **2.3.4.2 Desgaste por abrasión**

Las partículas abrasivas producidas por los residuos del desgaste o por partículas extrañas de arena y polvo circundante permanecen atrapadas en la superficie deslizante y eliminan material principalmente por formación de surcos.

### 2.3.4.3 Otras formas de desgaste

El desgaste por ludimiento aparece como resultado del movimiento oscilatorio de dos superficies en contacto, como sucede en máquinas donde existe vibración entre las partes. El desgaste surge como resultado de las cargas cíclicas; por ejemplo, en los baleros con rodillos que produce pérdida de material al desbastarse las capas superficiales. Cuando las partículas duras inciden sobre los sólidos, se produce desgaste por erosión, y cuando un componente rota en medio fluido, habrá erosión por cavitación [18].

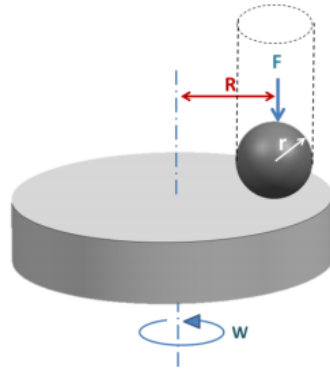
A manera de resumen se presentan los típicos fenómenos de desgaste causados por los principales mecanismos de desgaste en la tabla 2.3.

**Tabla 2.3** Típicos fenómenos de desgaste causados por los principales mecanismo de desgaste.

<b>Mecanismos de desgaste</b>	<b>Fenómenos de desgaste</b>
Adhesión	Scuffing o áreas galling, huecos, cizallamiento, plástico, transferencia de material.
Abrasión	Rasguños, surcos, ondulaciones.
Fatiga superficial	Grietas, pícuduras.
Reacción triboquímica	Productos de reacción (capas, partículas).

### 2.3.5 Pruebas Pin-on-Disk

Un método estándar para pruebas de desgaste utilizando un aparato perno en disco (pin-on-disk). La Figura 2.8 muestra un esquema de pruebas perno en disco. La norma ASTM G 99-05 indica que se pueden usar las ecuaciones 2.3 y 2.4 para el cálculo de volumen perdido cuando el pin tiene inicialmente una forma terminal esférica de radio  $R$  y el disco es inicialmente plano, en las condiciones que sólo uno de los dos miembros se desgasta significativamente.



**Figura 2.8** Configuración Pin On Disk.

### 2.3.6 Volumen perdido y tasa de desgaste

En el caso de desgaste del disco, el perfil promedio de la huella de desgaste se puede integrar para obtener el área de sección transversal de la huella, y se multiplica por la longitud media de la huella para obtener el volumen de desgaste del disco, sin embargo como se comentó anteriormente esto es establecido también por la norma ASTM G 99 – 05 [Anexo E], por medio de la fórmula que se describe a continuación, donde además se considera la ecuación que calcula el volumen perdido del pin, además de la tasa de desgaste dada por esta misma norma.

$$\text{Volúmen perdido en el pin} = \left(\frac{\pi h}{6}\right) \left[\frac{3d^2}{4} + h^2\right] \quad \text{Ec. 2.3}$$

$$h = r - \left[r^2 - \frac{d^2}{4}\right]^{1/2} \quad \text{Ec. 2.4}$$

Donde  $r$  es el valor del radio del pin y el valor de  $h$  se calcula por medio de la Ec. 2.4.

$$\text{Volúmen perdido del disco} = 2\pi R \left[ r^2 \sin^{-1}\left(\frac{d}{2r}\right) - \left(\frac{d}{4}\right) (4r^2 - d^2)^{1/2} \right] \quad \text{Ec. 2.5}$$

Dónde  $R$  es el radio de la pista de desgaste,  $r$  es el radio el pin y  $d$  es el ancho de la huella de desgaste.

La razón de desgaste o coeficiente de desgaste dimensional ( $K$ ) es un parámetro importante para saber cómo el comportamiento de desgaste de un material. Éste se calcula con la ecuación de Bhushan (1991), Ecuación 2.5, en donde el volumen perdido del material es proporcional a la carga normal aplicada y la distancia total de deslizamiento.

$$\text{Razón de desgaste, } K = \frac{V}{Fs} \quad \text{Ec. 2.6}$$

Dónde  $V$  es el volumen perdido,  $F$  es la fuerza aplicada y  $s$  es la distancia recorrida.

## Capítulo III Metodología

En el presente capítulo se describe la metodología realizada para el estudio del desempeño tribológico del acero herramienta AISI H13 recubierto con nitruro de titanio (TiN) y carbonitruro de titanio (TiCN), tanto en seco como en lubricado. El desarrollo experimental, a manera de diagrama de flujo, se presenta en la Figura 3.1 y posteriormente se plantean cada una de las técnicas y parámetros utilizados para el estudio del desempeño tribológico de los aceros con y sin recubrimiento.

### 3.1 Preparación de muestras

Para los ensayos tribológicos, los equipos y las condiciones a las que se pretenden simular en las probetas, restringen las especificaciones de las mismas, como lo son las dimensiones y rugosidades por lo cual es necesario llevar a cabo el proceso de preparación de las muestras previo al desarrollo de los ensayos.

#### 3.1.1 Corte

Las dimensiones son restringidas a partir de los sujetadores de muestras del tribómetro, por tanto se manufacturan a partir de una barra de acero redonda de AISI H13 de 2.5 cm de diámetro, por medio del torneado con las dimensiones que se especifican en la Figura 3.2.

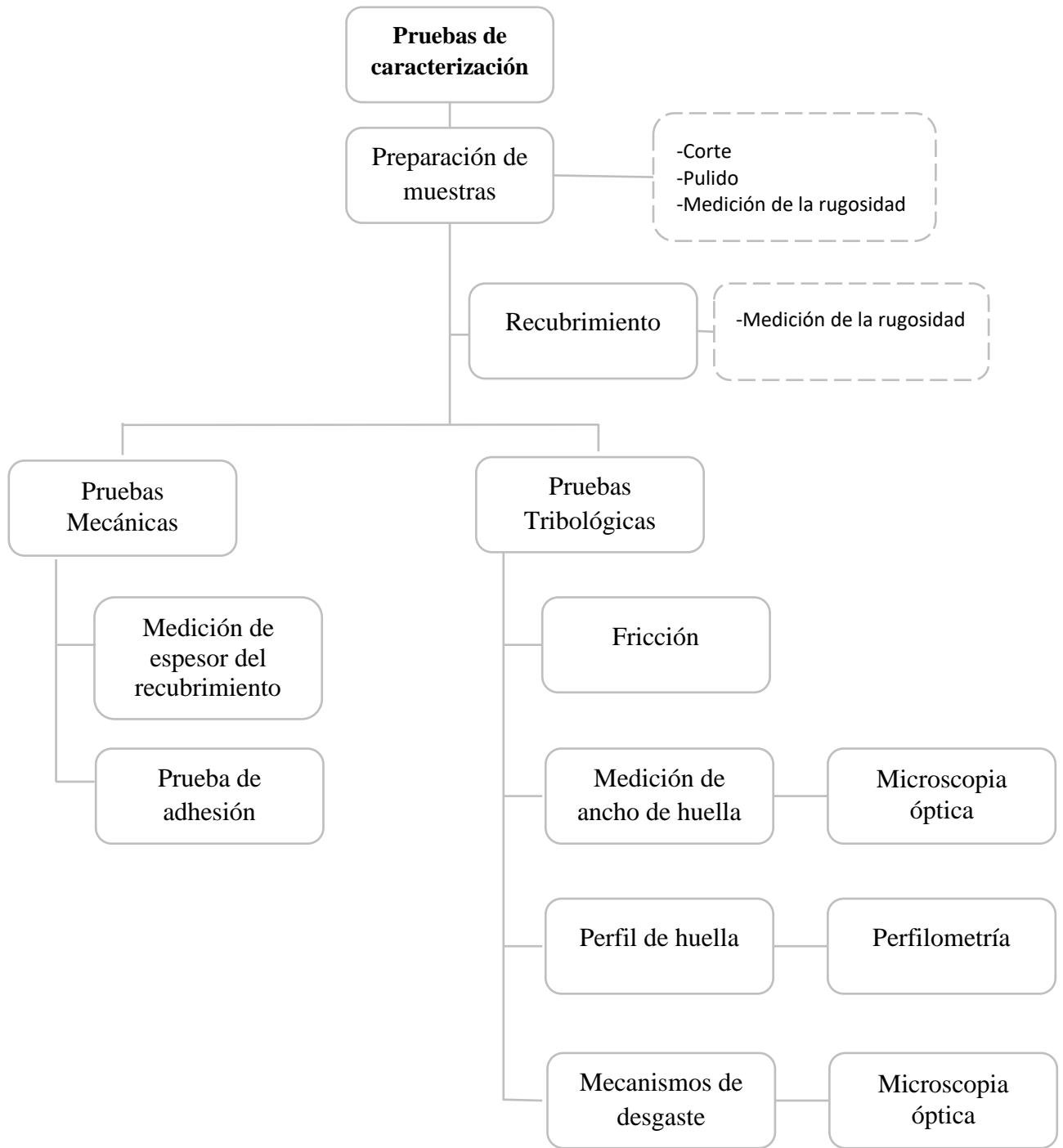
Con este proceso se obtuvieron aproximadamente 40 probetas con las dimensiones especificadas y una rugosidad final promedio de  $0.70 \mu\text{m}$  en Ra, debido al mismo proceso de corte, por lo cual a todas las probetas se les realizó un proceso de pulido.

#### 3.1.2 Pulido

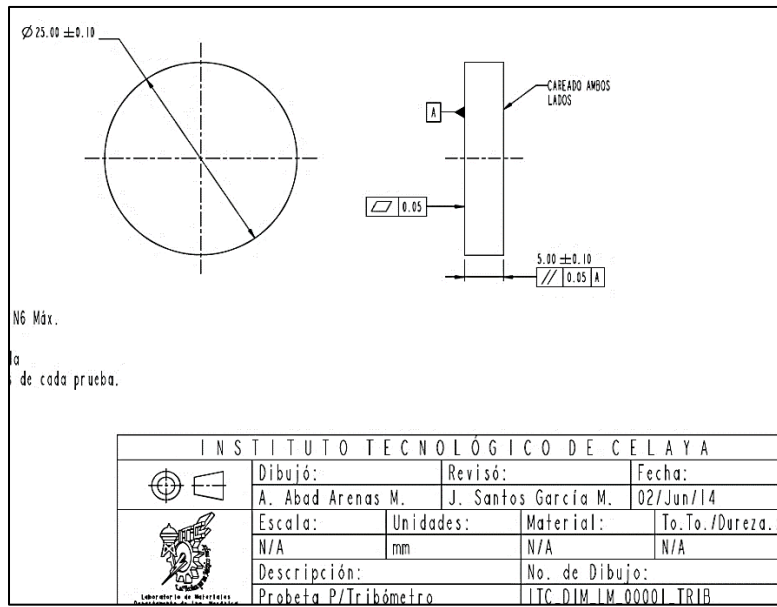
Se establece que será controlada la rugosidad de las probetas para analizar la adherencia del recubrimiento sobre la probeta en base a esta. Por tanto el procedimiento de pulido para dicha variación se llevará a cabo como se describe a continuación.

Se utilizaron lijas con diferente tamaño de grano, entendiéndose que el número de la lija es en realidad es la cantidad de granos que existe en una pulgada cuadrada. La primera que se utilizó en este procedimiento fue una lija 80, donde solo se pule una de las caras de la probeta durante 20 minutos en un solo sentido. Posteriormente se rota  $90^\circ$  la probeta para pulir con una lija 120, puliendo hasta eliminar las marcas de pulido de la lija anterior, aproximadamente 15 minutos.





**Figura 3.1** Metodología



**Figura 3.2** Dimensiones de las probetas.

Este proceso iterativo se realiza con las lijas de 200 y 400. El pulido se llevó a cabo de modo manual con las primeras dos lijas y se terminó el proceso con una pulidora marca Struers Labpol-1, Figura 3.3, donde los tiempos de pulido se reducen significativamente, tal como se muestra en la tabla 3.1.



**Figura 3.3** Pulidora Struers Labpol-1.

**Tabla 3.1** Metodología de pulido hasta lija 400.

<b>Pulido hasta lija 400</b>		
Lija	Método	Tiempo (min)
80	Manual	20
120	Manual	15
400	Pulidora	1

### 3.1.3 Medición de la rugosidad

Posterior al pulido se realizó la medición de la rugosidad para garantizar que la calidad superficial fuera la misma para las probetas, haciéndose por medio de un rugosímetro marca Mitutoyo SJ400, Figura 3.4, bajo el parámetro Ra en  $\mu\text{m}$ .



**Figura 3.4** Rugosímetro Mitutoyo SJ400 (controlador y palpador).

Se tomaron tres mediciones de la rugosidad de la superficie, deslizando el palpador sobre la superficie pulida de cada una de las probetas en tres ocasiones para tratar de asegurar que la rugosidad fuera regular sobre toda el área pulida, la lectura de las rugosidades se llevó a cabo como se muestra en la Figura 3.5. La rugosidad final de cada una de las probetas fue en promedio de  $0.18 \mu\text{m}$ .



**Figura 3.5** Dirección y orden de las lecturas realizadas con el rugosímetro sobre las probetas posterior al pulido.

### 3.2 Recubrimiento

El procedimiento para el recubrimiento de las piezas se realiza con un proveedor externo a la institución. Dichos procedimientos para realizar los recubrimientos de TiN y TiCN, son totalmente confidenciales, como información del proceso solo se cuenta con la metodología que la literatura nos ofrece, realizándose un tratamiento de templado y revenido térmico

previo al recubrimiento, el cual tiene como finalidad incrementar la dureza del sustrato, adquiriendo una dureza de 52 HRC, en el Anexo B se muestra el certificado de calidad de tratamiento térmico del acero AISI H13.

Las especificaciones finales de los recubrimientos se muestran en la Tabla 3.2; los certificados de calidad de los recubrimientos de TiCN y TiN se muestran en el Anexo C.

Las rugosidades promedio, se obtienen bajo la metodología realizada para la medición de la rugosidad posterior al pulido, donde la rugosidad de las probetas recubiertas con TiN es de 0.23  $\mu\text{m}$  aproximadamente, mientras que para las probetas recubiertas con TiCN es de 0.24  $\mu\text{m}$ .

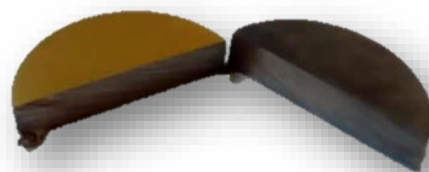
**Tabla 3.2** Especificaciones de certificado de calidad del recubrimiento del TiCN y TiN.

Parámetro	Magnitud	
	TiCN	TiN
Recubrimiento	TiCN	TiN
Color Característico	Azul	Dorado
Espesor	4.02 $\mu\text{m}$	5 $\mu\text{m}$
Dureza	3000 (HV 0.05)	2300 (HV 0.05)
Adherencia	Buena	Buena

### 3.3 Pruebas mecánicas

#### 3.3.1 Medición del espesor del recubrimiento

Para la medición del espesor, se cortaron por la mitad una probeta de cada recubrimiento, Figura 3.6, durante el corte fueron enfriadas con agua para no afectar la pieza por la elevación de la temperatura durante el corte.



**Figura 3.6** Cortes transversales de las probetas recubiertas de TiN y TiCN.

Posteriormente son montadas sobre baquelita, dejando expuesta el área donde se realizó el corte para la medición del espesor del recubrimiento, en la Figura 3.7 se puede observar que

se utilizaron dos colores distintos para la baquelita y fácilmente identificar cada uno de los recubrimientos, donde la baquelita de color rojo corresponde al TiN y la baquelita de color negro corresponde al TiCN.



**Figura 3.7** Montaje sobre baquelita de los cortes transversales de las probetas recubiertas de TiN y TiCN.

Una vez realizado el montaje en la baquelita se procede a realizar el pulido hasta acabado espejo, para finalmente ser observado con un microscopio SEM Hitachi 1510, Figura 3.8, y realizar las mediciones correspondientes.



**Figura 3.8** Microscopio SEM Hitachi 1510.

### **3.3.2 Pruebas de adhesión**

La adhesión del recubrimiento al sustrato es un parámetro importante que debe ser determinado ya que esta adhesión se encuentra ligada a la resistencia al desgaste del recubrimiento.

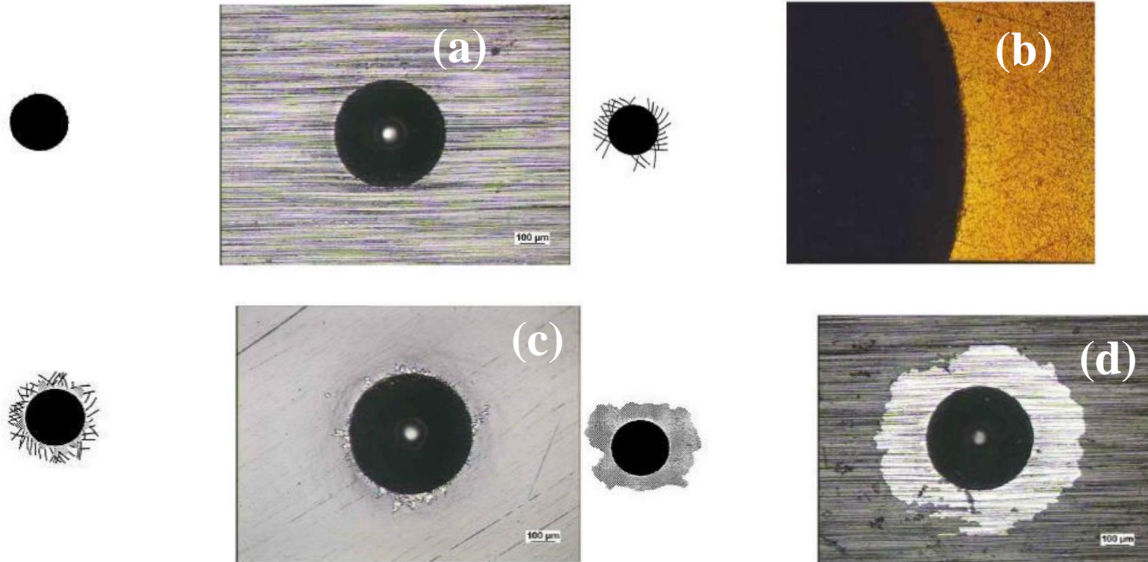
Las pruebas de adhesión se llevaron a cabo bajo las condiciones especificadas en la norma CEN/TS BSi 1071-8, Anexo D, enfocada al análisis de adherencia de recubrimientos cerámicos por medio de indentaciones Rockwell. Por lo tanto, de acuerdo a esta norma se establece que el sustrato al tener de una dureza inferior a 54 HRC, la indentación se realizará en la escala Rockwell D, es decir, con una carga de 100kgf (981 N), mediante un indentador universal del proveedor de Sistemas de Medición Inteligentes, ver Figura 3.9. Posteriormente las huellas de indentación fueron observadas con un microscopio óptico a una magnificación de 100X, realizando la comparación con los criterios que se muestran en la Tabla 3.3 y Figura 3.10 establecidos por la norma, clasificando cada uno de los recubrimientos.



**Figura 3.9** Indentador Universal de Sistemas de Medición Inteligentes.

**Tabla 3.3** Criterio de adhesión de Norma CEN/TS BSi 1071-8.

Clase	Observación
Clase 0	Sin grietas, sin deslaminación adhesiva.
Clase 1	Presencia de grietas, sin deslaminación adhesiva del recubrimiento.
Clase 2	Parcial deslaminación adhesiva, con o sin grietas.
Clase 3	Completa deslaminación adhesiva.



**Figura 3.10** Criterio de adhesión de Norma CEN/TS BSi 1071-8; (a) Clase 0; (b) Clase 1; (c) Clase 2; (d) Clase 3.

### 3.4 Pruebas tribológicas

Debido a la complejidad de las interacciones tribológicas, aún se está lejos de predecir un coeficiente de fricción o tasa de desgaste para las condiciones de un contacto particular basándonos en análisis teóricos, de aquí la importancia de llevar a cabo la prueba tribológica, la cual permitirá revelar el fenómeno interfacial a nivel micrométrico entre los recubrimientos duros y un pin de carburo de tungsteno (WC). Las propiedades tribológicas analizadas en el presente trabajo son el coeficiente de fricción, tasa de desgaste y los mecanismos de desgaste, todos estos referidos al deslizamiento en seco y en lubricación para cada una de las condiciones de las probetas.

El ensayo de fricción se llevó a cabo en un tribómetro que cuenta con una configuración Pin-On-Disk de la marca CMS Instruments, Figura 3.11, de acuerdo a la norma ASTM G99-95A, las cuales son llevadas a cabo en seco y con lubricación, como se menciona anteriormente, además estableciendo una temperatura ambiente para la prueba en seco y una temperatura de 100°C para la prueba lubricada. De esta manera se obtuvieron los coeficientes de fricción cinéticos ( $\mu_k$ ) sobre el tiempo y la distancia recorrida.

Para la puesta en marcha del ensayo de fricción, se realizó la limpieza tanto de la muestra como de la mordaza o la copa de sujeción, según el caso, con hexano y acetona, con la

finalidad de evitar partículas extrañas en la prueba, que pudieran intervenir en la interacción entre el pin y la probeta.



**Figura 3.11** Tribómetro CSM Instruments.

La tabla 3.4 especifica las condiciones con las que fueron sometidas para las pruebas en seco y lubricadas, obteniendo esfuerzos de contacto máximos de 1,790 MPa, el cual se encuentra por debajo del esfuerzo de cedencia del sustrato, asegurando que el material evitará presentar fallos durante la prueba.

**Tabla 3.4** Condiciones de la pruebas tribológicas, tanto en seco como lubricada.

Parámetro	Condición	
	Seco	Lubricada
Medio de Inmersión	N/A	Disolución de grafito en aceite
Volumen de lubricante	N/A	70 ml
Fuerza	10 N	10 N
Radio de desgaste	2 mm	2 mm
Velocidad	2.5 cm/s	2.5 cm/s
Distancia	1000 m	1000 m
Tiempo	11.5 hrs.	11.5 hrs.
Material del pin	WC	WC
Radio del pin	6 mm	6 mm
Temperatura	25 °C	372.15 K 100°C

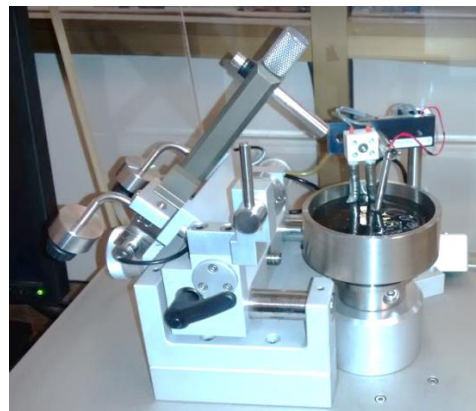


Se mantuvieron las condiciones de distancia de deslizamiento, radio de la huella, velocidad y carga para las pruebas tanto en seco como en húmedo. La temperatura para las pruebas en seco fue mantenida a 25°C a lo largo de toda la prueba. La condición de lubricación implica modificaciones en el montaje de la probeta sobre el tribómetro, tal como se observa en la Figura 3.12 y 3.13, el montaje para las probetas en seco es por medio de una mordaza, mientras que para los ensayos con lubricación cuenta con una copa donde se realizará la deposición del lubricante, siendo aproximadamente 70 ml de este. Además un dispositivo electrónico que consta de una resistencia que permitirá elevar la temperatura hasta 100° C, así como el sensor que mantendrá el control de la misma.

Al finalizar las pruebas, independientemente de la condición, se procedió nuevamente con la limpieza de las probetas y del pin con hexano, eliminando así residuos, generados por la interacción entre estos y el lubricante adherido de los ensayos en húmedo.



**Figura 3.12** Montaje de probeta en seco.

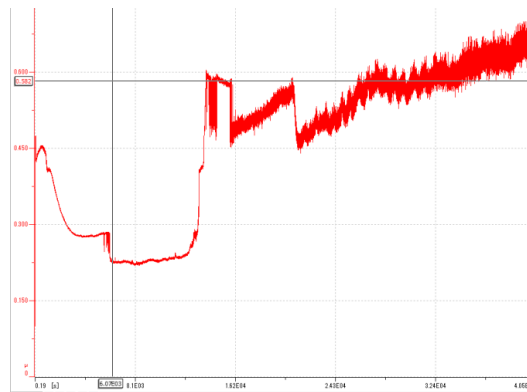


**Figura 3.13** Montaje de probeta lubricada.

### **3.4.1 Coeficiente de fricción.**

El coeficiente de fricción es obtenido directamente desde el software utilizado por el tribómetro llamado TriboX™, el cual es la interfase entre el tribómetro y el usuario. El sistema obtiene del usuario los siguientes datos: fuerza aplicada, el radio de huella de desgaste, los materiales utilizados en el tribosistema, la distancia a recorrer y la velocidad a la que correrá el sistema. Como resultado el usuario obtiene un gráfico que muestra el comportamiento de coeficiente de fricción, tal como se muestra en la Figura 3.14. Además se obtiene el coeficiente de fricción promedio, el comportamiento del coeficiente de fricción

conforme pasa el tiempo y la desviación estándar de este. El manejo de esta información es procesada posteriormente con OriginPro 8™.



**3.14** Gráfico del coeficiente de Fricción en TriboX™.

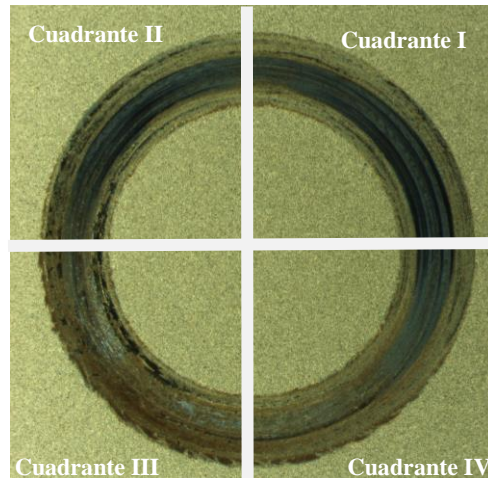
### 3.4.2 Medición de ancho de huella

Para el cálculo del volumen perdido de acuerdo a la norma ASTM G99-05, es necesaria la medición del ancho de huella de desgaste, la cual se llevó a cabo por medio de microscopia óptica con un Microscopio Metalográfico, marca Zeiss, Figura 3.15, a un aumento de 5X, el cual ofrece la mejor perspectiva al realizar las mediciones.



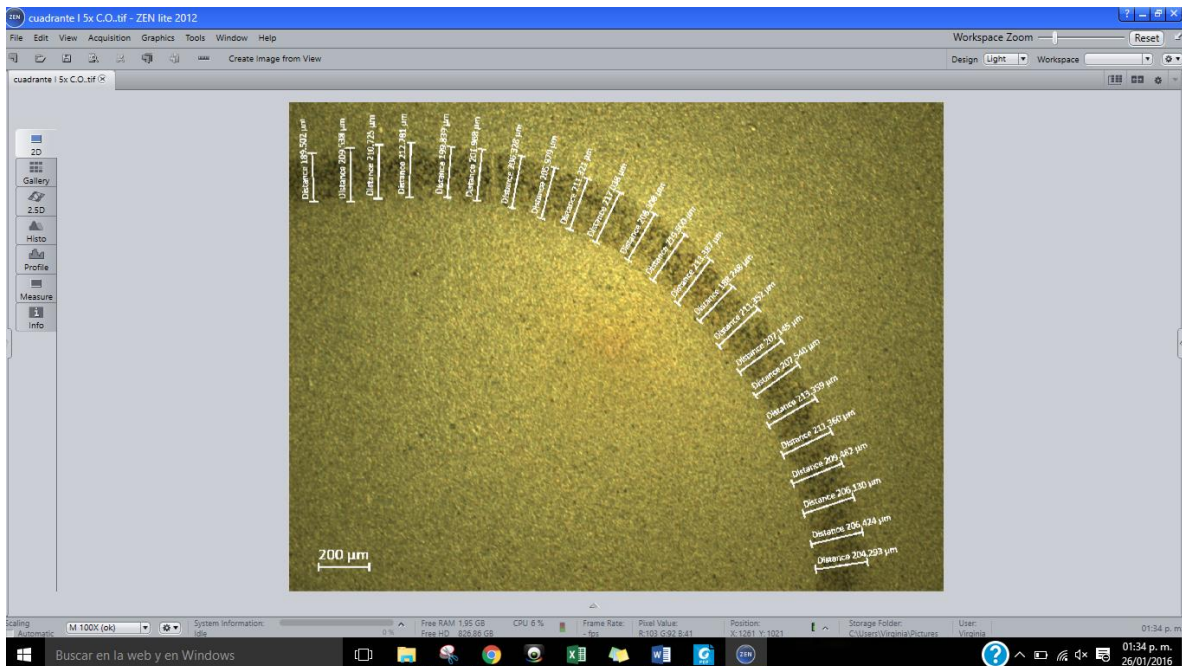
**Figura 3.15** Microscopio Metalográfico, marca Zeiss.

Debido a que este aumento solo permite la visión de una parte de la huella de desgaste en la probeta, se divide la huella de desgaste en cuatro secciones tal como lo muestra la Figura 3.16, nombrándolos Cuadrante I, Cuadrante II, Cuadrante III y Cuadrante IV, en sentido anti-horario comenzando con la sección superior derecha.



**Figura 3.16** Huella seccionada en cuadrantes.

Utilizando el Software ZEN™, se realizan 25 mediciones por cada uno de los cuadrantes de la huella de desgaste, Figura 3.17, obteniendo así un total de 100 mediciones del ancho de huella, para posteriormente obtener un promedio de dichas mediciones, siendo este promedio el dato que se utiliza para los análisis de volumen perdido y tasa de desgaste.



**Figura 3.17** Medición del ancho de huella en Cuadrante I.

### 3.4.2.1 Volumen perdido y tasa de desgaste

El proceso de remoción de material de una superficie sólida es conocido como desgaste, este es indeseado en casi todas las aplicaciones de maquinaria donde es importante mantener

indefinidamente la forma de las piezas y su integridad superficial. El desgaste por medio de fenómenos mecánicos y químicos, excepto la fatiga mecánica ocurre mediante remoción gradual de material en numerosas porciones variando enormemente, desde tamaño a nivel atómico hasta micras. En varios de los casos, el desgaste puede ser iniciado por un mecanismo y avanzar por mecanismos distintos. Frecuentemente encontraremos el desgaste adhesivo y abrasivo.

El cálculo del volumen perdido y la tasa de desgaste se llevaron a cabo con la fórmula 3.1 y 3.2 que se presentan en la norma ASTM G99-05A.

De acuerdo a la norma mencionada, a pesar de que tanto el pin como la probeta pierden material durante la interacción tribológica, se establece que para alguno de los dos cuerpos, está perdida es despreciable debido a la cantidad perdida en proporción y puesto que se considera que para las pruebas uno de los dos materiales es el que cuenta con una dureza superior, encontrando generalmente que sea el pin el que cuente con dicha propiedad, con el objetivo de que el objeto de análisis sea el que sufra el desgaste, en este caso las probetas recubiertas.

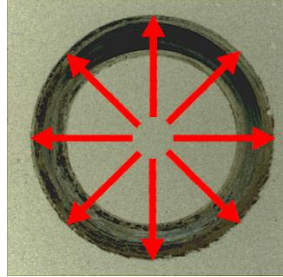
### 3.4.3 Perfil de huella

El perfil de huella es obtenido a partir de un rugosímetro Mitutoyo SJ400, Figura 3.18, el cual permitirá a primera estancia la verificación del ancho de huella, realizando una comparativa con lo obtenido por medio de la microscopia óptica. Posteriormente analizar la profundidad de la huella, permitiendo realizar un cálculo alterno del volumen perdido, a partir de la técnica de la revolución del área transversal. Finalmente el gráfico permitirá apreciar el comportamiento del material en la prueba tribológica.



**Figura 3.18** Rugosímetro Mitutoyo SJ400.

Los perfiles se obtuvieron deslizando el palpador del rugosímetro desde el centro de la circunferencia de la huella de desgaste de manera radial, haciéndolo pasar por encima de la sección transversal de dicha huella de desgaste, tal como se muestra en la Figura 3.19.



**Figura 3.19** Dirección del deslizamiento del palpador sobre la huella de desgaste.

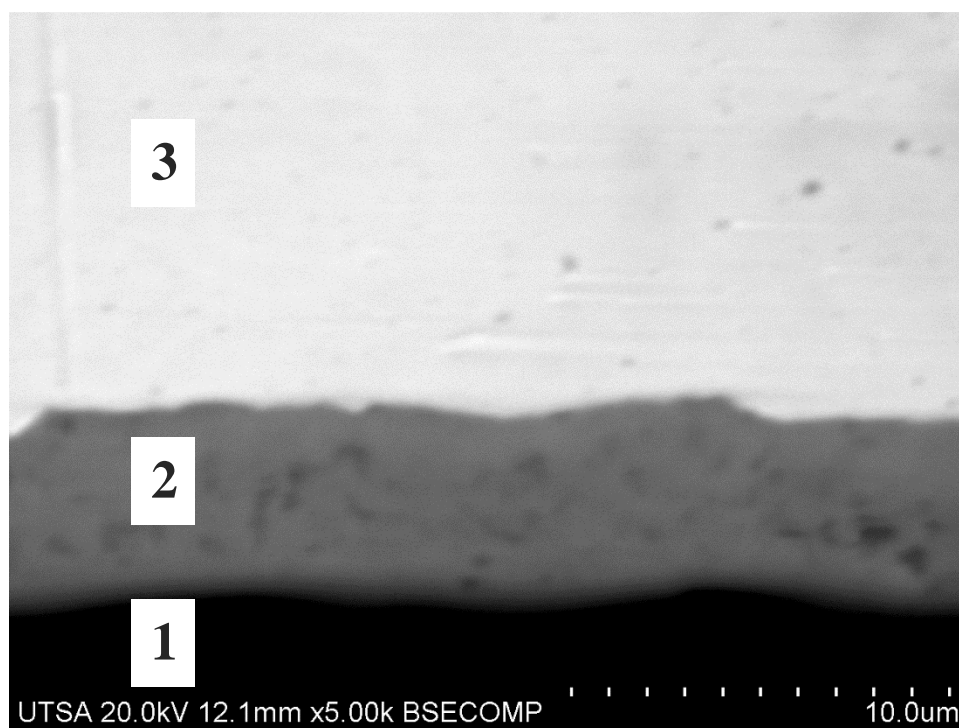
#### **3.4.4 Mecanismos de desgaste**

Para analizar los mecanismos de desgaste presentes durante las pruebas de tribología, se empleó la microscopía óptica. Para la obtención de las imágenes se hace uso nuevamente del microscopio Metalográfico, marca Zeiss mostrado en la Figura 3.15, el cual permiten la obtención de imágenes dentro de la huella, determinando así los mecanismos de desgaste de la prueba de acuerdo a los criterios establecidos en la literatura.

## Capítulo IV Resultados y discusión

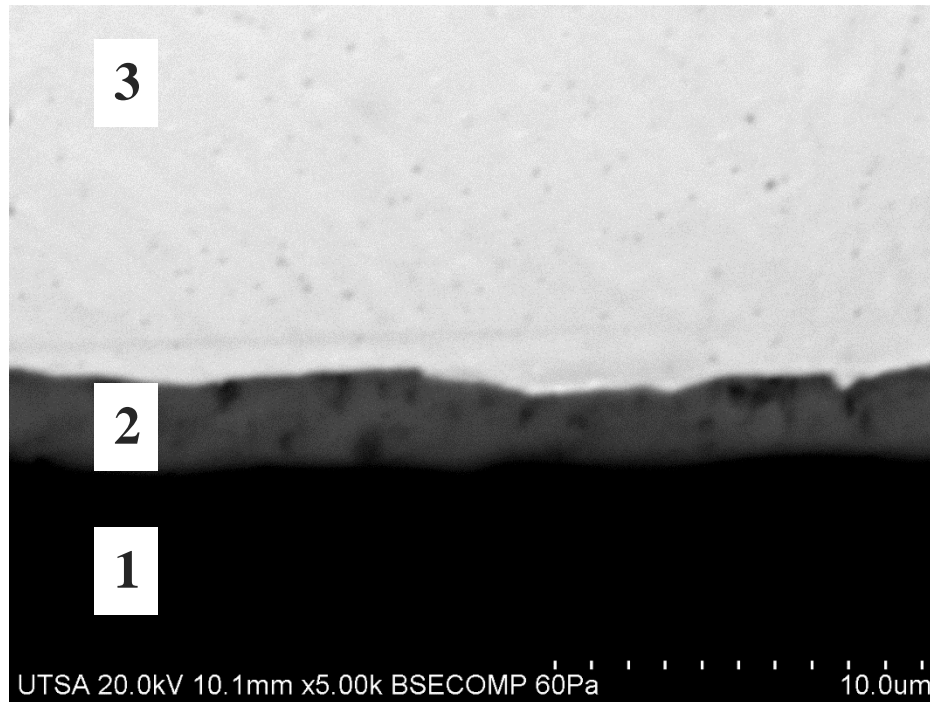
### 4.1 Medición de Espesor

En la Figura 4.1, se muestran una micrografía de la sección transversal de los recubrimientos, donde se distinguen tres zonas diferentes. La zona marcada como 1, al ser de un color opaco se concluye que es la baquelita sobre la cual fue montada la pieza, mientras que la zona 2 y 3 corresponden al recubrimiento TiN y al sustrato respectivamente. La medición realizada da como resultado que el espesor del recubrimiento se encuentra entre 5 y 5.5  $\mu\text{m}$ .



**Figura 4.1** Espesor del recubrimiento TiN observado en un microscopio SEM a 5000x; (1) Baquelita, (2) TiN y (3) Acero AISI H13.

De igual forma, en la Figura 4.2, se observan nuevamente las 3 fases, siendo la zona 2 la correspondiente al recubrimiento TiCN, con un espesor aproximado de 2.3-2.6  $\mu\text{m}$ . En ambos casos (TiN y TiCN) se observa que el recubrimiento no es totalmente uniforme, los valores de los espesores se encuentran dentro de las especificaciones técnicas del proveedor.



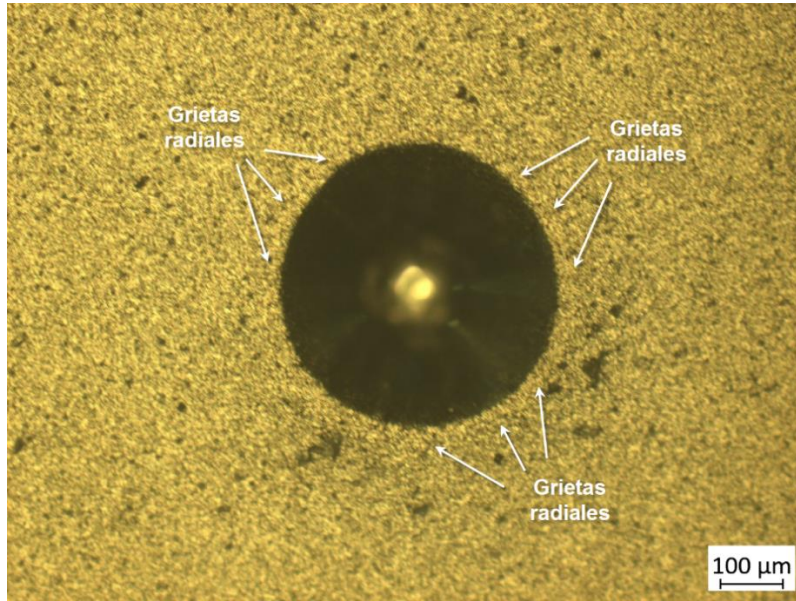
**Figura 4.2** Espesor del recubrimiento TiCN observado en un microscopio SEM a 5000X; (1) Baquelita, (2) TiCN y (3) Acero AISI H13.

Finalmente la información de los valores de los espesores de ambos recubrimientos, también permitirá confirmar si durante las pruebas de tribología, los recubrimientos son totalmente removidos comparando el espesor inicial y la profundidad del desgaste obtenidas por medio de perfilometría.

#### **4.2 Adhesión**

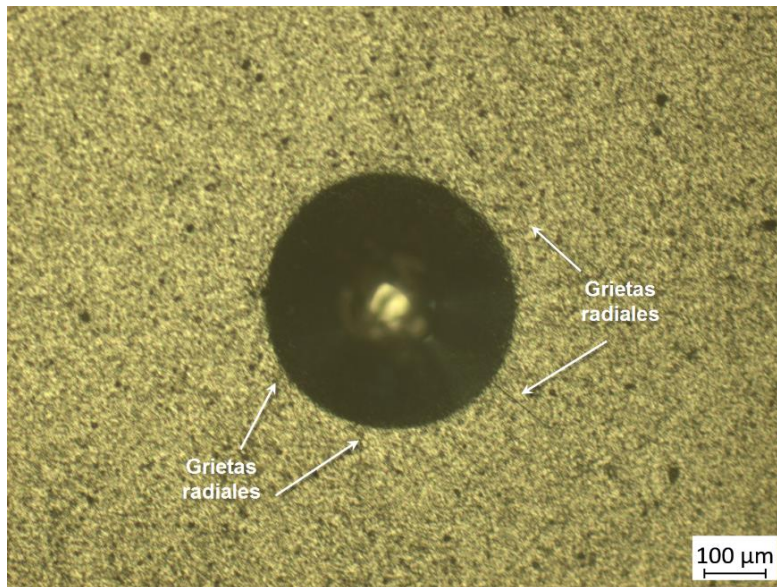
La Figura 4.3 y 4.4 muestran las indentaciones sobre TiN y TiCN, respectivamente, a un acercamiento a 100X, que es la establecida por norma. El recubrimiento TiN, Figura 4.3, cuenta con un gran número de agrietamientos radiales diminutos alrededor de la huella, a pesar de la presencia de agrietamientos, no existe delaminación del recubrimiento, por lo que de acuerdo al criterio de la Norma BSI 1071-8, es un recubrimiento de Clase I, siendo la adherencia de buena calidad para este recubrimiento.





**Figura 4.3** Indentación Rockwell D en recubrimiento de TiN a 100X.

El recubrimiento de TiCN, Figura 4.4, se observa que se presenta menor número de grietas alrededor de la huella, pero de mayor longitud siendo de 50-150  $\mu\text{m}$ , mientras que las presentadas en el TiN no exceden los 10 $\mu\text{m}$ .



**Figura 4.4** Indentación Rockwell D en recubrimiento de TiCN a 100X.

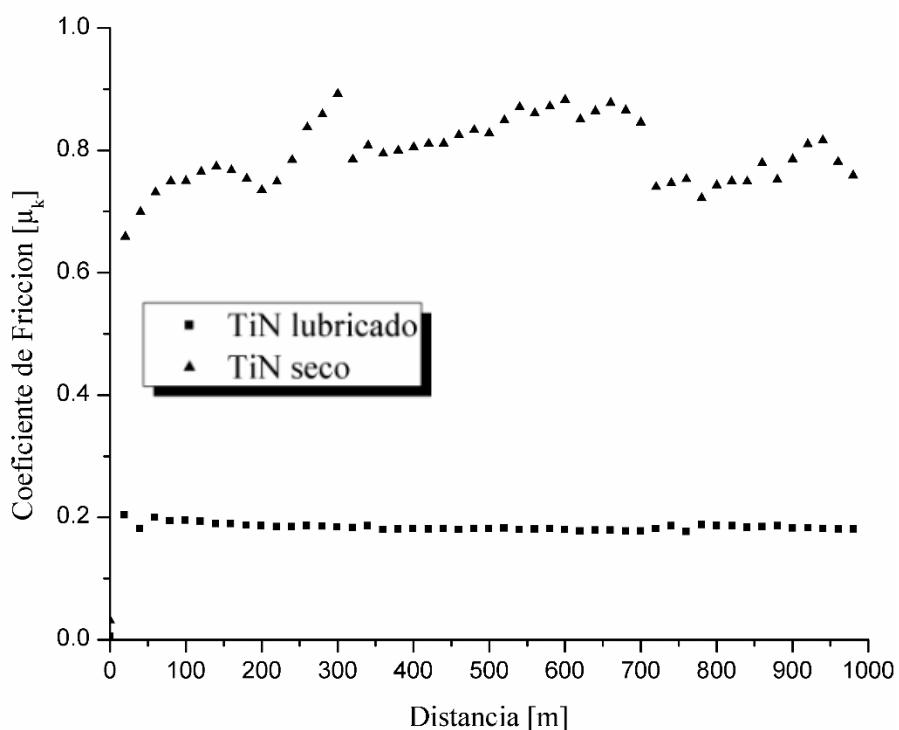
Este hecho se pudiera relacionar con la dureza más elevada del TiCN, impartida por el carbono existente. Este recubrimiento al ser más duro es también más frágil, lo que ocasiona una mayor longitud de grieta.



### 4.3 Coeficiente de fricción y mecanismos de desgaste

#### 4.3.1 Acero AISI H13 recubierto con TiN

La Figura 4.5 muestra la evolución del coeficiente de fricción ( $\mu_k$ ), como función de una distancia de deslizamiento para las muestras tanto en seco como en lubricado. En condiciones secas podemos observar que el  $\mu_k$  inicialmente es de un valor de 0.65, con una tendencia a incrementar en los primeros 300 m, donde se encontrara su valor máximo siendo de aproximadamente 0.9 y a su vez una disminución repentina del  $\mu_k$  de al menos un 10%, manteniéndose los siguientes 400 m en un valor cercano a 0.8 con una tendencia a incrementar con una pendiente muy pequeña.



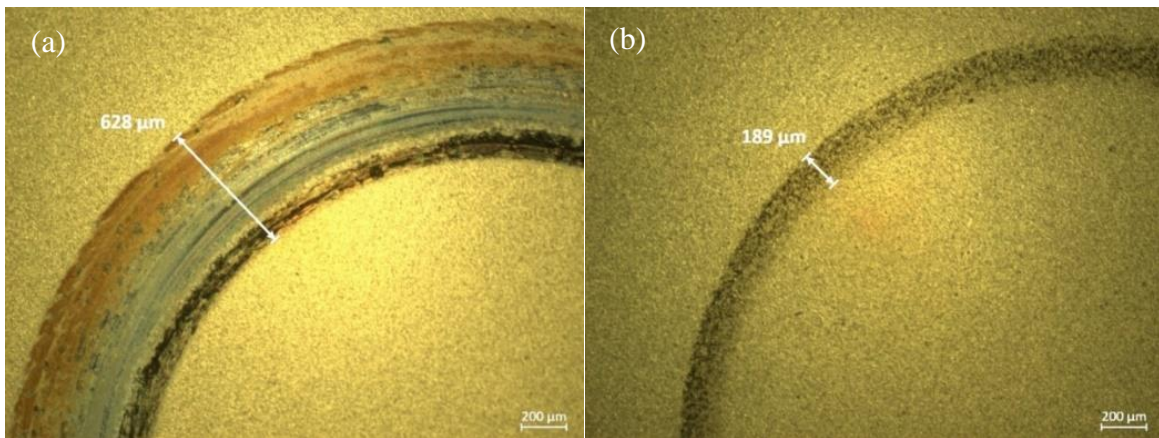
**Figura 4.5** Coeficiente de fricción del acero H13 recubierto de TiN en seco y lubricado.

Finalmente a los 700 m se presenta el último cambio del  $\mu_k$ , donde la disminución ahora se presenta de aproximadamente un 12%, finalizando la prueba con un valor cercano a 0.7.

El comportamiento del  $\mu_k$  es muy irregular durante toda la prueba, teniendo un promedio de 0.803. Por otro lado, se muestra claramente que en condiciones lubricadas se tiene un comportamiento estable, sin presentarse cambios repentinos del  $\mu_k$ , teniendo un valor promedio de 0.184.

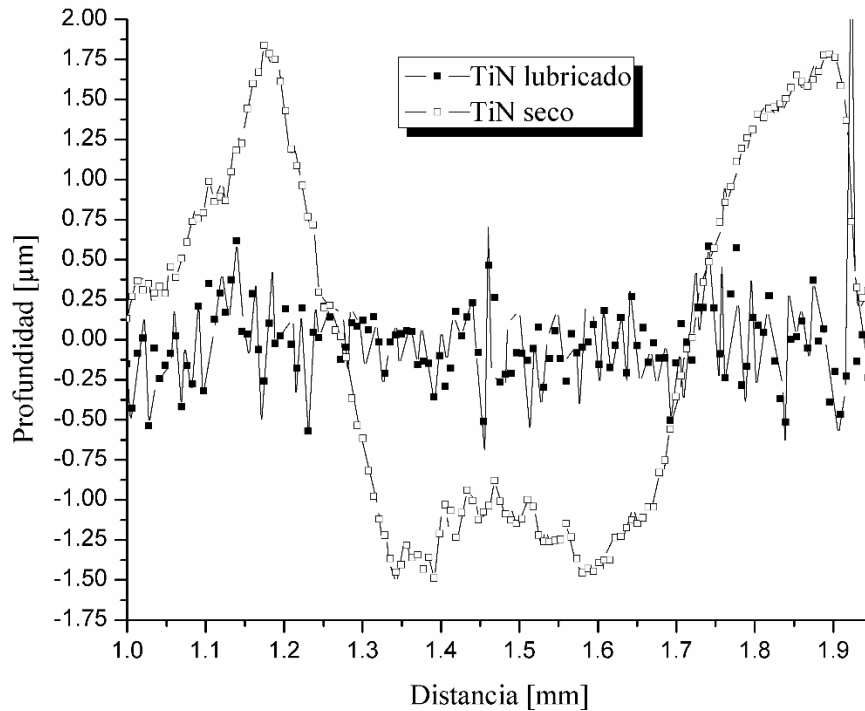
En la Figuras 4.6 (a) y (b) se muestran el ancho de huella de las probetas recubiertas de TiN con valores de 628  $\mu\text{m}$  y 189  $\mu\text{m}$ , para condiciones en seco y lubricado respectivamente.

El ancho de huella también fue analizado por perfilometría, donde el palpador del rugosímetro fue deslizado por la huella de desgaste generada en dirección transversal. El resultado se muestra en la Figura 4.7, donde se puede apreciar el ancho y profundidad de las huellas tanto en seco como en húmedo. Primeramente, el perfil de huella de la prueba en seco, inicia en un valor aproximado de 1.2 mm y finaliza en 1.875 aproximadamente donde la diferencia es de 0.675mm, siendo este último el ancho de huella, valor que es muy similar al obtenido por medio de las micrografías ópticas.



**Figura 4.6** Micrografías ópticas (50X) del ancho de huella del TiN; a) Seco y b) lubricado.

En el valle de la huella en seco se puede apreciar bastantes irregularidades que pudieran representar los surcos generados por el desgaste abrasivo. Por otro lado en la huella de desgaste lubricada no se alcanza a distinguir, alguna profundidad o un inicio y finalización de la huella, impidiendo medir el ancho de huella por este método, además se pudiera decir que en este caso no hubo desgaste significativo sobre el recubrimiento.



**Figura 4.7** Perfiles del ancho de huella del TiN, tanto en seco como lubricado.

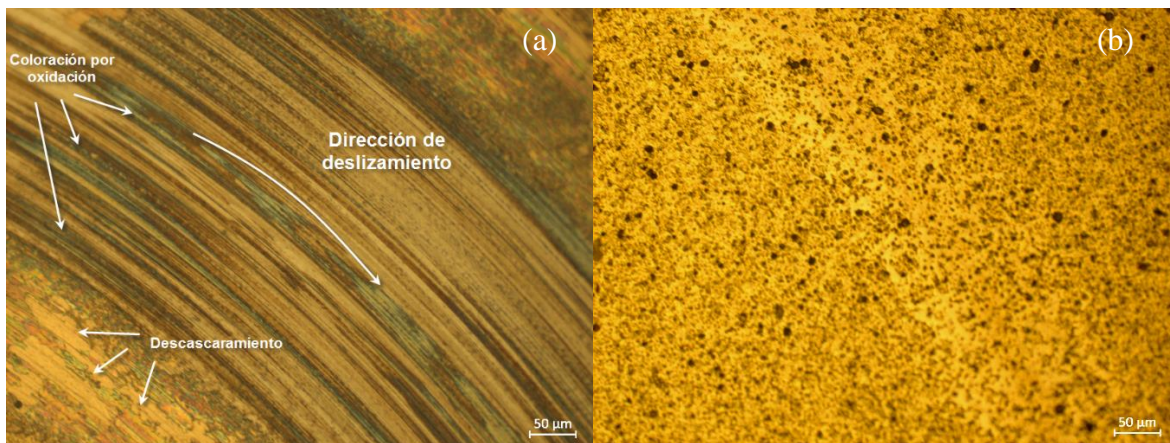
Una vez medidos los anchos de huella, se calcularon los volúmenes perdidos de material y los factores de desgaste con las ecuaciones 3.1 y 3.2, respectivamente, con los datos obtenidos por medio de microscopía. En la tabla 4.1 fueron tabulados estos valores, donde además de los valores del ancho de huella y el coeficiente de fricción.

**Tabla 4.1** Ancho de huella (d), coeficiente de fricción ( $\mu_k$ ), volumen perdido (V) y razón de desgaste (K) del acero AISI H13 recubierto con TiN.

Recub.	d [mm]	$\mu_k$	V [mm <sup>3</sup> x10 <sup>-4</sup> ]	K [mm <sup>3</sup> /Nmx10 <sup>-8</sup> ]
TiN Seco	0.700 ± 0.030	0.803 ± 0.062	1211.40 ± 157.94	1211.40 ± 157.94
TiN Húmedo	0.189 ± 0.015	0.184 ± 0.065	24.08 ± 5.68	24.08 ± 5.68

En la Figura 4.8 (a) se muestra la huella de desgaste en seco del TiN, donde se pueden apreciar una gran cantidad de surcos en dirección al deslizamiento, indicando un desgaste abrasivo, además de pequeños cambios de coloración por oxidación por aumentos de temperatura ocasionado por la fricción, así como pequeños descascaramientos. Mientras en

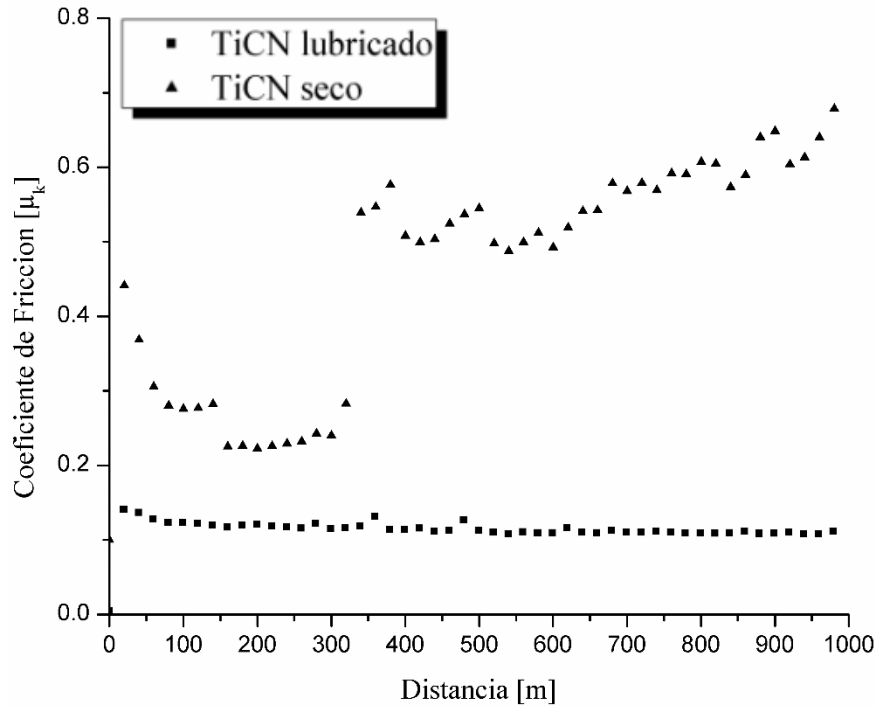
la Figura 4.8 (b), se observa una huella demasiado tenue, en la cual no es posible establecer mecanismos de desgaste.



**Figura 4.8** Micrográficas ópticas de las superficies desgastadas del TiN (200X); (a) seco y (b) lubricado.

### 4.3.2 Acero AISI H13 recubierto con TiCN

En la Figura 4.9 se muestra la evolución del  $\mu_k$  del acero H13 recubierto de TiCN, de igual forma que en el caso del TiN, se encuentra en función de la distancia de deslizamiento para ambas pruebas (tanto en seco como en húmedo). En condiciones secas, el ( $\mu_k$ ), comienza con un valor de aproximadamente igual a 0.425 con una tendencia a disminuir en los primeros 300 m, a esta distancia se tiene un cambio repentino de al menos un 300%, para posteriormente mantener una tendencia a aumentar teniendo un valor promedio de 0.468. Por otro lado, para condiciones lubricadas se tiene un comportamiento igualmente estable que en el caso del TiN, donde mantiene un valor promedio de 0.116 a lo largo de toda la prueba sin cambios significativos.



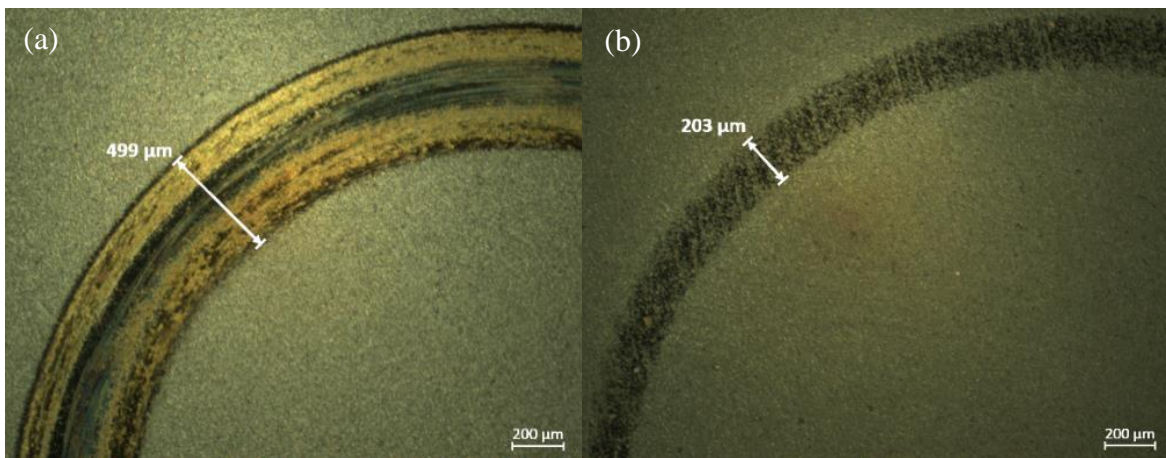
**Figura 4.9** Coeficiente de fricción del acero H13 recubierto de TiCN en seco y lubricado.

A partir de este punto del análisis ya se puede apreciar la clara importancia del uso de lubricación para sistemas donde existe contacto, puesto que para ambos recubrimientos hubo una disminución importante del coeficiente de fricción y el ancho de huella, disminuyendo así la tasa de desgaste hasta un 75% en el caso del TiN y un 80% en el caso de TiCN. Por otro lado realizándose la comparación entre recubrimientos se observa, que los coeficientes de fricción menores siempre son por parte del TiCN.

En la Figura 4.10 (a) y (b) se muestra el ancho de huella de la pruebas en seco y lubricado, respectivamente, teniendo un valor de 499  $\mu\text{m}$  para la prueba en seco y de 203  $\mu\text{m}$  para la prueba lubricada.

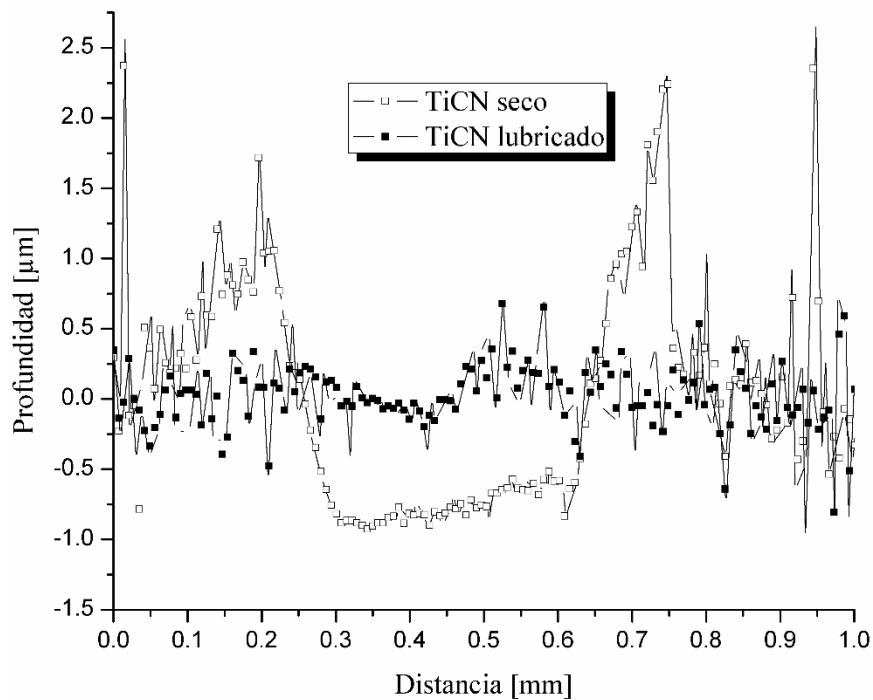
En la Figura 4.11, se muestran los perfiles de huella tanto en condición seca como en húmeda, mostrándose para el caso de la huella en seco un inicio de la huella en 0.2 mm, mientras que la finalización de esta es a los 0.7 mm, teniendo una diferencia aproximada de 0.5 mm siendo nuevamente un dato muy similar al obtenido por las micrografías ópticas. En el valle de la huella en comparación con el TiN, no se presentan tantas irregularidades, pudiéndose decir que no hubo un desgaste abrasivo tan significativo. Para el caso de la huella en húmedo no se distingue el inicio de la huella, pero se encuentra entre 0.25 mm y 0.3 mm, mientras que

el extremo derecho de la huella se distingue aproximadamente a los 0.5 mm, por lo que el ancho de huella es entre 0.2 mm y 0.25 mm.



**Figura 4.10** Micrografías ópticas (50X) de los anchos de huella del TiCN; a) Seco y b) lubricado.

Esta última huella no presenta profundidad como en el caso de la huella en seco, pero si se presenta más marcada a diferencia de lo observado en la Figura 4.7 para el TiN en la misma condición, pero de igual manera la profundidad considerándose nula o casi nula da indicio a concluir que no hubo desgaste durante las pruebas con lubricación,



**Figura 4.11** Perfiles del ancho de huella del TiCN, en seco y lubricado.

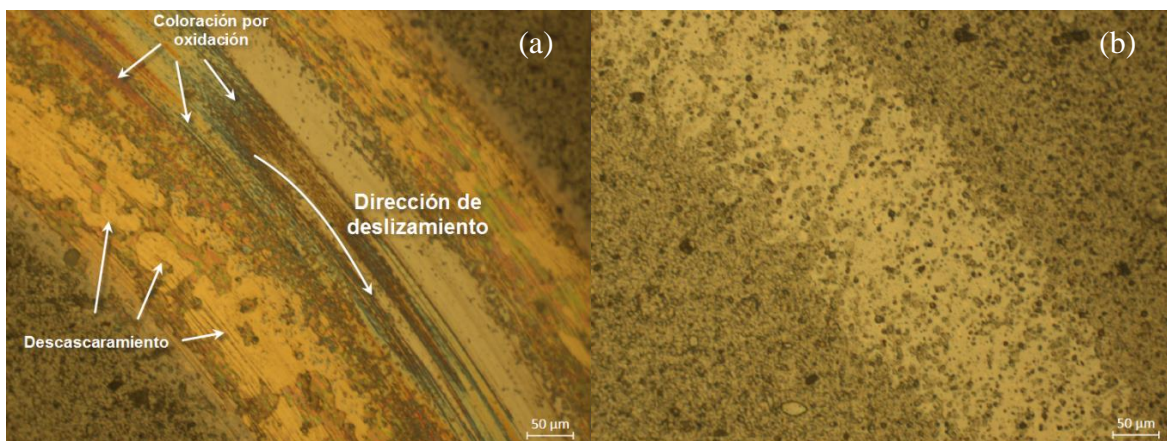


Finalmente en la tabla 4.2 se muestran los volúmenes perdidos de material y factores de desgaste, así como el ancho de huella obtenidos por medio de los datos analizados por microscopía.

**Tabla 4.2** Ancho de huella (d), coeficiente de fricción ( $\mu_k$ ), volumen perdido (V) y razón de desgaste (K) del acero AISI H13 recubierto con TiCN.

Recub.	d [mm]	$\mu_k$	V [mm <sup>3</sup> x10 <sup>-4</sup> ]	K [mm <sup>3</sup> /Nmx10 <sup>-8</sup> ]
TiCN Seco	0.499 ± 0.014	0.468 ± 0.146	438.51 ± 72.00	438.51 ± 72.00
TiCN Húmedo	0.203 ± 0.017	0.116 ± 0.010	20.78 ± 10.88	20.78 ± 10.88

La Figura 4.12 (a) y (b) muestran las superficies desgastadas en condiciones en seco y lubricado respectivamente. Primeramente en la Figura 4.12 (a) se observa que la presencia de signos característicos de una oxidación por los cambios de coloración que se presentan, los cuales pudieron haber sido ocasionados por el incremento de temperatura debido a la fricción a lo largo de la prueba.



**Figura 4.12** Micrografías ópticas de las superficies desgastadas del TiCN (200X); (a) seco y (b) lubricado.

Además de la presencia de surcos en dirección del deslizamiento indicando el manifiesto de un desgaste abrasivo. Finalmente en la Figura 4.12 (b) se observa una huella muy tenue, sin poder apreciar mecanismos de desgaste.

Para ambos recubrimientos en condiciones secas, la abrasión se presenta como mecanismo principal de desgaste, donde la micrografía óptica como el perfil de huella muestran la

presencia de surcos, presentando una mayor cantidad de surcos el TiN. De igual manera se presentan cambios de coloración tanto para el TiN como para el TiCN, donde existen más zonas oxidadas en este último, lo cual puede ser dado debido que al ser más difícil de remover este recubrimiento, la superficie se mantiene más tiempo en contacto con el ambiente y el pin elevando aún más la temperatura, mientras que el TiN no tiene la oportunidad de sufrir este cambio pues la superficie es removida antes de que ocurra. Esto mismo puede ser la misma causa del porque en la micrografía del TiCN se muestran zonas más grandes de descascaramiento.



## CONCLUSIONES

El presente proyecto logró reportar el comportamiento tribológico del acero AISI H13 recubierto de nitruro de titanio (TiN) y carbonitruro de titanio (TiCN), por medio de pruebas de desgaste con una configuración Pin-On-Disk (perno en disco), de acuerdo a la norma ASTM G99-05.

El coeficiente de fricción ( $\mu_k$ ) más pequeño tanto en condiciones secas como en lubricadas se presentó para el recubrimiento de TiCN ( $\mu_k=0.468$  y  $\mu_k=0.116$  respectivamente). Mientras los  $\mu_k$  más altos fueron para el recubrimiento TiN con un valor de 0.803 y 0.184 en condiciones secas y lubricadas respectivamente.

La tasa de desgaste presenta la misma tendencia donde el TiCN presenta tasas más pequeñas en comparación con el TiN, donde tiene un valor de  $438.51 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  para la condición en seco y un valor de  $20.78 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ . Mientras que para el TiN el valor para la condición en seco es de  $1211.40 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  y de  $24.08 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  para la condición lubricada.

Los mecanismos de desgaste observados en las micrografías muestran que en condiciones secas el TiCN muestra más daños en la superficie, sin embargo esto puede ser dado debido a que la superficie de contacto se mantiene por más tiempo en comparación al TiN, puesto que en este último al ser removida más fácilmente la superficie de contacto se presenta en la micrografía zonas menos dañadas. Esto podría comprobarse con los perfiles de huella mostrados anteriormente donde el TiN tiene una penetración mayor del pin, en comparación con el TiCN.

En ambos recubrimientos los principales mecanismos de desgaste que se presentan es la abrasión y la oxidación. Por otro lado, se muestra cómo el uso del lubricante evitó la presencia de algún mecanismo de desgaste, donde en las micrografías no existen marcas características del algún desgaste y en las de perfilometría la profundidad de la huella es imperceptible.

Debido a esto, los resultados sugieren que en condiciones secas y lubricadas el mejor desempeño tribológico es dado por el recubrimiento de TiCN. Sin embargo, para ambos recubrimientos el desempeño se ve mejorado con el uso de lubricante, por lo que bajo esta condición se sugiere analizar el costo-beneficio de utilizar un recubrimiento de TiN o de TiCN, debido a que este último presenta costos de aplicación más altos.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Mikell P. Groover, Fundamentals of modern manufacturing, 4th Edition, Edit. Renata Marchione.
- [2] Maryory A. Gómez (2007), *Caracterización de las propiedades tribológicas de los recubrimientos duros*. (Tesis de licenciatura)
- [3] Hoja de propiedades del Acero SISA H13.
- [4] M.R. Cruz y colaboradores, *Tribología en aceros con tratamiento superficiales tipo dúplex*. Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela, Rev. Fac. Ing. UCV v. 20 n.1 Caracas mar. 2005
- [5] O. Knotek, F. Löffler, and G. Kramer, Deposition, Properties and Performance Behaviour of Carbide and Carbonnitride PVD Coatings, Surf. Coat. Technol., Vol 61, 1993, p 320-325
- [6] J.D. Bressan, R. Hesse and E.M. Silva Jr., *Abrasive wear behavior of high speed steel and hard metal coated with TiAlN and TiCN*, Rev. Wear 250(2001) 561-568.
- [7] F. Velasco, E. Gordo, R. Isabel, E.M. Ruiz-Navas, A. Bautista, J.M. Torralba, *Mechanical and wear behavior of high-speed steels reinforced with TiCN particles* Rev. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 19 (2001) 319-323.
- [8] Y.H. Cheng, Influence of the C content on the mechanical and tribological properties of the TiCN coatings deposited by LAFAD technique. Rev. Surface and Coatings Technology. 205 (2011) 4024-4029.

- [9] Alina Sivitskia, Andre Gregorb, Mart Saarnab, Priit Kulub and Fjodor Sergejev, *Application of the indentation method for cracking resistance evaluation of hard coatings on tool steels. Rev. Estonian Journal of Engineering.* 15 (2009) 309-317
- [10] J.M. Cairney, *Degradation of TiN coatings under cyclic loading. Rev. Degradation of TiN coatings under cyclic loading.* 52 (2004) 3229-3237.
- [11] Maryory A. Gómez (2005), *Caracterización de las propiedades tribológicas de los recubrimientos duros.* (Tesis de doctorado)
- [12] Marín Villar, Camilo, *Recubrimientos duros: Deposición Física en Fase Vapor (PVD).* Rev. Metal Actual 32-36
- [13] Mikel P. Groover, *Fundamentos de Manufactura Moderna, Materiales, procesos y sistemas,* Ed. Prentice Hall.
- [14] Kenneth Holberg, *Coating Tribology properties, mechanisms, techniques and applications in surface engineering.* Ed. El Sevier, No. 56
- [15] B.I. Sandor, *Engineering Mechanics, Static and Dynamics,* Prentice Hall, 4ed. N.J. 1987
- [16] F. Mosteller, G.B. Thomas, *Probabilistic and statistics,* Addison-Wesley Publishing Company, E.U. 1967
- [17] D. Tabor, *Revista "J. Inst. Met."* E.U. 1951
- [18] A.D. Sárkar B. Sc., *Desgaste de metales,* ed. Limusa Noriega Editores
- [19] Bharat Bhusman *Principles and applications of tribology* (Ed Willey Interscience, New York 1999.
- [20] *Advanced technical ceramics- Methods of test for ceramic coatings, Part 8: Rockwell indentation test for evaluation of adhesión,* DD CEN/TS BSi 1071-8.

# **ANEXOS**

# Anexo A Certificado de calidad del acero AISI H13

 <b>SCHMOLZ + BICKENBACH</b> Providing special steel solutions	No. Pedido producción 3645000919 Standard cliente: Industry Standard:	Comproedor Ventas Contado - Querétaro Pedido No. MX03 3630058494 02/25/2015 365006906/10 02/24/2015 No. 8000012640 /0004 Cae: 02/25/2015	Pedido cliente: INSTITUTO TEC. CELAYA Entrega #Pca. 516	IM Cert: 162848 Certificado Inspección 3.1. Acc. to EN 10204							
						Dimension A 25 5000 mm	Dimension B 0.0003 mm	Dimension C 3000 0500 mm	No. Material 4010531	Karl Heinz Emmerle Technical & Quality Manager	
Heat No. 255374	C 0.400	Cr 4.850	Mn 0.400	Ni 1.290	P 0.013	S 0.002	Si 1.080	V 0.910	Composición química en %		
Producto / Steel making Process X40CrNiMoV5-1 redondo +AC											
Producto X40CrNiMoV5-1 redondo +AC											
Pesa Entrega PZ 1		Job Information Job No.: Detail No.: Part No.:		HB 215		Temperatura: Return Dureza HRC		Temperatura: Return Dureza HRC		Pruebas de Impacto Pruebas magnéticas Pruebas	
Pruebas adicionales											
All data indicated serve as a information - only the original data from our supplier are valid. Todos los datos indicados se entienden para informacion - solamente los datos originales de nuestro proveedor son los vigentes.											

# Anexo B Certificado de calidad de tratamiento térmico para el acero AISI H13



## CERTIFICADO DE CALIDAD (Tratamiento Térmico)

**Cliente No.:** 5587  
**Nombre del Cliente:** Rosalia Cruz Mancera  
**Dirección:** Soto y Gama 118  
**Población:** Celaya  
**Teléfono:** 461 136 66 33

**Folio:** 11523193-B-2015  
**Fecha:** martes, 18 Agosto, 2015

**Oerlikon Balzers Coating Mexico, S.A. de C.V.**

**Matriz:**  
 Acceso III No. 304 y 306  
 Col. Ind. La Montaña  
 Queretaro, Qro 76150  
 Tel: +52 (442) 209 68 00  
 Fax: +52 (442) 209 68 10

**Sucursal:**  
 Blvd. Futuro 520  
 Parque Industrial Comercial  
 Saltillo, Coah 25026  
 Tel: +52 (844) 413 59 55  
 Fax: +52 (844) 413 59 00  
 info.coating.mexico@oerlikon.com  
 www.oerlikon.com/coating/mexico

Certificamos que las partidas que se enlistan a continuación, han sido templadas conforme a nuestros procedimientos planteados, para obtener la tenacidad y resistencia que requieren las piezas

### 1. Datos Generales y Estados de las Herramientas después del proceso

Partida	Orden	Referencia Artículo Cliente	Tipo de Tratamiento Térmico	Herramienta o Producto Tipo de Acero	Foto de Tratamiento	Diseño Dibujado en Hoja No.
1	11523193	SI 313305	BAI H13 RM	Material para BAI H13 RM Acero H13	BA009070	1218892
<b>Datos de Ingresos y Valores Solicitados</b>						
Querosol (kg)			52.54	Apariencia de las piezas: Homogénea		
Fleco (kg)			3			
Piezas por pieza			54			

# Anexo C Certificado de calidad de los recubrimientos TiCN y el TiN



## CERTIFICADO DE CALIDAD (Recubrimiento)

Cerlikon Balzers Coating Mexico, S.A. de C.V.

México:  
 Acceso III No. 204 y 208  
 Col. Ind. La Montaña  
 Cuernavaca, Gro 78160  
 Tel. +52 (442) 209 68-00  
 Fax. +52 (442) 209 68 19

Secretaría:  
 Blvd. Futuro 520  
 Parque Industrial Comoran  
 Saltillo, Coah 25020  
 Tel. +52 (844) 413 59 55  
 Fax. +52 (844) 413 69 98  
 info.coating.mexico@cerlikon.com  
 www.cerlikon.com/coating/mexico

<b>Código del Cliente:</b> 5587	<b>Folio:</b> 11334161-B-2015
<b>Nombre del Cliente:</b> Rosalia Cruz Mancera	<b>Fecha:</b> miércoles, 26 Agosto, 2015
<b>Dirección:</b> Soto y Carra 518	
<b>Población:</b> Celaya	
<b>Teléfono:</b> 481 135 06 33	

Certificamos que las partidas que se enlistan a continuación, han sido recubiertas mediante el proceso PVD y dado que han sido producidas con los equipos, materiales y procedimientos de CERLIKON-BALZERS a nivel mundial, garantizamos la calidad en términos de homogeneidad, espesor y adherencia de la capa depositada.

### 1. Datos Generales y Estados de las Herramientas después del proceso

Partida	Orden	Herramienta y Producto Tipo de Acero	No de Partes	Tipo de Herramienta Referencia: Anverso Cliente	Estado de Recubrimiento	Tipo de Recubrimiento	Adherencia de la capa
1	11324101	Rulón de Formado Redondo H13 Acero Tool. en caliente	9	LLA-100 MR	BACIADOS	BALNIT A Espesor: 5	Buena
2	11324101	Rulón de Formado Redondo H13 Acero Tool. en caliente	9	LLA-100 MR	BACIADOS	BALNIT A Espesor: 5	Buena
3	11324101	Rulón de Formado Redondo H13 Acero Tool. en caliente	9	LLA-100 MSR	BACIADOS	BALNIT A Espesor: 5	Buena
4	11324101	Rulón de Formado Redondo H13 Acero Tool. en caliente	9	LLA-100 MSR	BACIADOS	BALNIT A Espesor: 5	Buena

### Espeor de los recubrimientos Balnit® (µm)

A TiN	B TiCN	C NiCr	D CrN	X-CELL Base Cromo	X-TREME TiAlN	FUTURA MAMO TiAlN	HELION Base ALCr	LUMINA TiAlN	ALOPOM PRO ALCr	AVANCELINE TiAlN + MELCr	ALYON ALCr	PERFORM Base TiAlN	ALOPOM Base ALCr + ALCr
1-6	1-6	1-6	2-15	1a-11	03-4	1-7	1-6	8-103	1-8	1-6	1-6	1-6	1-6

Observaciones:

Elaborado por:  
  
 José Juan López Jiménez

Autorizado por:  
  
 Ing. Volando Aguilera  
 Gerente de Calidad

DRAFT FOR DEVELOPMENT

DD CEN/TS  
1071-8:2004

# Advanced technical ceramics — Methods of test for ceramic coatings —

Part 8: Rockwell indentation test for  
evaluation of adhesion

© 2004 BSI

NO COPYING WITHOUT BSI PERMISSION EXCEPT AS PERMITTED BY COPYRIGHT LAW

**BSI**  
British Standards



# Anexo E Norma ASTM G 99-05



Designation: G 99 – 05

## Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation G 99; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

### 1. Scope

1.1 This test method covers a laboratory procedure for determining the wear of materials during sliding using a pin-on-disk apparatus. Materials are tested in pairs under nominally non-abrasive conditions. The principal areas of experimental attention in using this type of apparatus to measure wear are described. The coefficient of friction may also be determined.

1.2 The values stated in SI units are to be regarded as standard.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

### 2. Referenced Documents

#### 2.1 ASTM Standards:<sup>2</sup>

E 178 Practice for Dealing with Outlying Observations

G 40 Terminology Relating to Wear and Erosion

G 117 Guide for Calculating and Reporting Measures of Precision using Data from Interlaboratory Wear or Erosion Tests

#### 2.2 Other Standard:<sup>3</sup>

DIN-50324 Testing of Friction and Wear

### 3. Summary of Test Method

3.1 For the pin-on-disk wear test, two specimens are required. One, a pin with a radiused tip, is positioned perpendicular to the other, usually a flat circular disk. A ball, rigidly held, is often used as the pin specimen. The test machine causes either the disk specimen or the pin specimen to revolve

about the disk center. In either case, the sliding path is a circle on the disk surface. The plane of the disk may be oriented either horizontally or vertically.

*Note 1—Wear results may differ for different orientations.*

3.1.1 The pin specimen is pressed against the disk at a specified load usually by means of an arm or lever and attached weights. Other loading methods have been used, such as hydraulic or pneumatic.

*Note 2—Wear results may differ for different loading methods.*

3.2 Wear results are reported as volume loss in cubic millimetres for the pin and the disk separately. When two different materials are tested, it is recommended that each material be tested in both the pin and disk positions.

3.3 The amount of wear is determined by measuring appropriate linear dimensions of both specimens before and after the test, or by weighing both specimens before and after the test. If linear measures of wear are used, the length change or shape change of the pin, and the depth or shape change of the disk wear track (in millimetres) are determined by any suitable metrological technique, such as electronic distance gaging or stylus profiling. Linear measures of wear are converted to wear volume (in cubic millimetres) by using appropriate geometric relations. Linear measures of wear are used frequently in practice since mass loss is often too small to measure precisely. If loss of mass is measured, the mass loss value is converted to volume loss (in cubic millimetres) using an appropriate value for the specimen density.

3.4 Wear results are usually obtained by conducting a test for a selected sliding distance and for selected values of load and speed. One set of test conditions that was used in an interlaboratory measurement series is given in Table 1 and Table 2 as a guide. Other test conditions may be selected depending on the purpose of the test.

3.5 Wear results may in some cases be reported as plots of wear volume versus sliding distance using different specimens for different distances. Such plots may display non-linear relationships between wear volume and distance over certain portions of the total sliding distance, and linear relationships over other portions. Causes for such differing relationships include initial "break-in" processes, transitions between regions of different dominant wear mechanisms, and so forth.

<sup>1</sup> This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee G02 on Wear and Erosion and is the direct responsibility of Subcommittee G02.40 on Non-Abrasive Wear.

Current edition approved May 1, 2005. Published May 2005. Originally approved in 1990. Last previous edition approved in 2004 as G 99 – 04a.

<sup>2</sup> For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, [www.astm.org](http://www.astm.org), or contact ASTM Customer Service at [service@astm.org](mailto:service@astm.org). For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

<sup>3</sup> Available from Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstrasse 6, 1000 Berlin 30, Germany.