



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CELAYA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

“ANÁLISIS DE FRICCIÓN Y DESGASTE DE ACEROS  
PARA HERRAMIENTA RECUBIERTOS CON TiCN”

TESIS

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

PRESENTA:  
ING. RAMÓN ORTEGA NUÑEZ

DIRECTOR DE TESIS:  
DR. J. SANTOS GARCÍA MIRANDA  
M.C. LUIS DANIEL AGUILERA CAMACHO

CELAYA, GTO.

FEBRERO, 2017



"Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos"

Celaya, Gto., **14/febrero/2017**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

OFICIO No. IMP **22/2017**

**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:

**"Análisis de fricción y desgaste de aceros para herramientas recubiertos con TiCN"**

Que para obtener el Grado de:

**Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica**

Presenta:

**Ramón Ortega Núñez**

Lo que comunicamos a Usted, para los efectos consiguientes.

**ATENTAMENTE**

**La técnica por un México mejor.®**

**DR. J. SANTOS GARCÍA MIRANDA**  
Presidente

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

**DRA. KARLA JUDITH MORENO BELLO**  
Vocal

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

ASR/mrcf

SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA  
TECNOLÓGICO NACIONAL  
DE MÉXICO  
INSTITUTO TECNOLÓGICO  
DE CELAYA  
**DEPTO. ING. MECÁNICA**



## Índice de contenidos

Índice de figuras	IV
Índice de tablas	VI
Resumen	VII
Abstract	VIII
Introducción	IX
Capítulo I Marco de referencia	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del problema	4
1.3 Justificación	4
1.4 Objetivo general y específicos	5
1.5 Alcance y limitaciones	5
1.6 Impacto	5
Capítulo II Marco teórico	6
2.1 Tipo de troqueles, su funcionamiento y sus partes	8
2.2 Aceros para herramientas	12
2.3 Recubrimientos duros	15
2.4 Técnicas de caracterización	17
2.4.1 Dureza	17
2.4.2 Adhesión del recubrimiento	19
2.4.3 Tribología	21
Capítulo III Metodología	27
3.1 Esquema general de la metodología	27
3.2 Determinación de la dureza de los sustratos	29
3.3 Determinación de la rugosidad	29
3.4 Determinación de la adhesión	30
3.5 Ensayos tribológicos	31
3.5.1 Coeficiente de fricción	32

3.5.2	Medición de ancho de huella	33
3.5.3	Volumen perdido y tasa de desgaste	34
3.5.4	Mecanismos de desgaste	35
Capítulo IV Resultados y discusión		36
4.1	Evaluación de la dureza de los sustratos D2 y M4	36
4.2	Evaluación de la rugosidad promedio del recubrimiento de TiCN sobre sustratos D2 y M4	36
4.3	Evaluación de la adhesión del recubrimiento al sustrato	36
4.4	Coeficiente de fricción para los aceros D2 y M4 recubiertos con TiCN	38
4.5	Factor de desgaste para los aceros D2 y M4 recubiertos con TiCN	39
4.6	Mecanismos de desgaste para los aceros D2 y M4 recubiertos con TiCN	43
Conclusiones		45
Referencias		46

## Índice de figuras

Figura 2.1	La cadena de producción de un engrane de una motocicleta.....	7
Figura 2.2	Proceso de de tres estaciones progresiva en la fabricación de un engrane.....	8
Figura 2.3	Principio de estampación de una matriz de corte fino durante el corte y Principio de estampación de una herramienta de corte fino durante la eyección de la pieza.....	10
Figura 2.4	Resultado de trabajo para corte convencional (izquierda) y corte fino (derecha).....	11
Figura 2.5	Partes del troquel de corte fino.....	12
Figura 2.6	Los engranes que interactúan en muchos de los sistemas están constantemente sometidos a cargas cíclicas que terminan por desgastarlos.....	21
Figura 2.7	Diagrama esquemático del desgaste por adhesión que resulta en una remoción de material entre las asperezas del mismo.....	23
Figura 2.8	Desgaste por abrasión: a) dos cuerpos y b) tres cuerpos.....	24
Figura 2.9	Desgaste triboquímico entre dos superficies.....	25
Figura 2.10	Tipos de grietas presentadas en el desgaste por fatiga.....	25
Figura 3.1	Metodología aplicada.....	27
Figura 3.2	Dimensiones de las probetas.....	28
Figura 3.3	Sustratos de acero D2 y M4 cortados por electroerosión.....	28
Figura 3.4	Durómetro empleado para determinar la dureza de los sustratos...	29
Figura 3.5	Rugosímetro empleado para la determinación de la rugosidad promedio de probetas.....	30
Figura 3.6	Criterio de adhesión de Norma 1071-8: (a) Clase 0; (b) Clase 1; (c) Clase 2; (d) Clase 3.....	31
Figura 3.7	Tribómetro CSM Instruments empleado para los ensayos de fricción.....	31
Figura 3.8	Montaje de probeta lubricada.....	32
Figura 3.9	Gráfico del coeficiente de Fricción en TriboX™.....	33
Figura 3.10	Microscopio óptico Marca Zeiss.....	33

Figura 3.11	Medición del ancho de huella.....	34
Figura 3.12	Micrografía óptica de la huella de desgaste de un recubrimiento de TiCN.....	35
Figura 4.1	Huella de indentación Rockwell C para la evaluación de la adhesión del sustrato de acero D2 al recubrimiento de TiCN.....	37
Figura 4.2	Huella de indentación Rockwell C para la evaluación de la adhesión del sustrato de acero M4 al recubrimiento de TiCN.....	37
Figura 4.3	Coefficiente de fricción de los aceros D2 y M4 recubiertos con TiCN a una carga de 10 N.....	38
Figura 4.4	Coefficiente de fricción de los aceros D2 y M4 recubiertos con TiCN a una carga de 30 N.....	39
Figura 4.5	Perfil de la huella de desgaste para el acero D2 recubierto con TiCN, a una carga de 10 N.....	40
Figura 4.6	Perfil de la huella de desgaste para el acero M4 recubierto con TiCN, a una carga de 10 N.....	41
Figura 4.7	Variación del coeficiente de fricción y del factor de desgaste para el acero D2 recubierto con TiCN conforme se incrementa la carga aplicada.....	41
Figura 4.8	Variación del coeficiente de fricción y del factor de desgaste para el acero M4 recubierto con TiCN conforme se incrementa la carga aplicada.....	42
Figura 4.9	Micrografías de las huellas de desgaste del acero D2 recubierto con TiCN: a) 10 N y b) 30N.....	43
Figura 4.10	Micrografías de las huellas de desgaste del acero M4 recubierto con TiCN: a) 10 N y b) 30N.....	43

**Índice de tablas**

Tabla 2.1	Clasificación AISI-SAE de los aceros para herramienta.....	13
Tabla 3.1	Propiedades y características del recubrimiento BALINIT B®.....	29
Tabla 3.2	Criterio de adhesión bajo la norma BSi 1071-8.....	30
Tabla 3.3	Condiciones de la pruebas tribológicas, tanto en seco como lubricada.....	32
Tabla 4.1	Durezas de los sustratos D2 y M4.....	36
Tabla 4.2	Valores de Rugosidad para D2, M2, M4, sin huella de desgaste.....	36
Tabla 4.3	Coefficiente de fricción, volumen perdido y factor de desgaste para los aceros D2 y M4 con recubrimiento de TiCN.....	40

## Resumen

El objetivo del presente trabajo es el análisis de fricción y desgaste de aceros para herramientas, específicamente los aceros AISI D2 Y M4, empleados en la manufactura de herramientas para procesos de corte fino, recubiertos con carbonitruro de titanio (TiCN). Los ensayos de fricción de los aceros D2 y M4 recubiertos con TiCN se realizaron mediante el método de perno en disco, empleando como contraparte una bola de carburo de tungsteno (WC) de 6 mm de diámetro, una distancia de deslizamiento de 1000 m, bajo condiciones de lubricación empleando un lubricante de corte (comercial) a temperatura ambiente, aplicando cargas de 10 y 30 N. El análisis de los factores de desgaste y mecanismos de desgaste presentes se realizaron con la ayuda de microscopía óptica. Los resultados de coeficiente de fricción muestran un incremento de 14% y 3.5 % mientras que los factores de desgaste presentan un aumento de hasta 57% y 46% para los aceros D2 y M4, respectivamente, conforme se incrementa la carga de 10 N hasta 30 N. Los mecanismos de desgaste presentes fueron abrasivo y deformación plástica, presentes en ambas condiciones de carga. Se realizaron además ensayos de indentación para evaluar la adhesión del sustrato mediante la evaluación cualitativa de la huella, resultando en una adhesión clase 1, la cual indica una buena adhesión. El acero M4 mostró mejor comportamiento tribológico comparado con el acero D2.

## Abstract

The objective of the present work is the analysis of friction and wear of tool steels, specifically AISI D2 and M4 steels used in the manufacture of fine blanking tooling coated with titanium carbonitride (TiCN). The friction tests of the TiCN-coated steels D2 and M4 were carried out by the pin-on-disk method, using as counterpart a 6 mm diameter tungsten carbide ball (WC), a slip distance of 1000 m, under lubricating conditions employing a (commercial) cutting lubricant at room temperature, applying loads of 10 and 30 N. The analysis of wear rates and wear mechanisms were performed with the aid of optical microscopy. The friction coefficient shown an increase of 14% and 3.5% while the wear rates shown an increase of up to 57% and 46% for the D2 and M4 steels, respectively, as the load increases from 10 N up to 30 N. The present wear mechanisms were abrasive and plastic deformation, present in both loading conditions. Besides, indentation tests were performed to evaluate the adhesion of the substrate by qualitative evaluation of the imprints, resulting in a class adhesion type 1, which indicates a well adhesion. The M4 tool steel showed better tribological behavior compared D2 steel.

## Introducción

El proceso de corte fino es un proceso de corte avanzado y preciso mediante el cual se obtiene una geometría exacta y lisa y una superficie libre de grietas por lo que se generan esfuerzos de contacto elevados en el área de corte de los herramientas de corte lo cual lleva a un desgaste agravado de los mismos. En la actualidad, los aceros de alta velocidad son muy utilizados para herramientas de corte fino debido sus excelentes propiedades mecánicas y a su alta resistencia al desgaste, especialmente en el caso de series largas de trabajo. En el presente trabajo se proponen 2 diferentes aceros para herramientas, D2 y M4, los cuales fueron recubiertos con carbonitruro de titanio (TiCN), mismos que serán estudiados mecánica y tribológicamente, obteniéndose la adhesión del recubrimiento de TiCN a los sustratos y los coeficientes de fricción y factores de desgaste, respectivamente.

Este trabajo consta de cuatro capítulos; en el capítulo I se presenta el estado del arte acerca de los trabajos realizados por investigadores acerca del desempeño tribológico de recubrimientos cerámicos sobre sustratos de acero. También se realiza el planteamiento del problema donde se expone la importancia que tiene el problema de desgaste en herramientas de acero en la empresa Celay S.A. de C.V. La justificación de esta investigación se realiza en base al planteamiento del problema expuesto. Además se definen los objetivos, tanto general como específicos, los alcances del proyecto y el impacto que tendrá el mismo.

El capítulo II presenta el marco teórico, donde se describe el proceso de corte fino, los aceros empleados en este tipo de procesos de corte así como sus propiedades mecánicas. Se mencionan brevemente los tipos de recubrimientos cerámicos más empleados en procesos industriales así como sus procesos de deposición. Por último se describen brevemente los conceptos fundamentales y las técnicas de caracterización empleadas en este proyecto tales como la dureza, adhesión, tribología, etc.

En el capítulo III se describe la metodología empleada para la parte experimental de este proyecto, los materiales utilizados así como los parámetros empleados para los ensayos de dureza de los sustratos, adhesión del recubrimiento al sustrato, fricción.

También se muestran los criterios empleados para el análisis y la evaluación de los resultados de los mismos.

Como última parte, el capítulo IV muestra los resultados de los ensayos de adhesión, de fricción. Dentro de los resultados de fricción también se encuentran además del coeficiente de fricción, los factores de desgaste y mecanismos de desgaste presentes. Los resultados se presentan a manera de figuras y tablas para un mejor entendimiento.

## Capítulo I Marco de referencia

### 1.1 Antecedentes

El Grupo ELAY con sede en Antzuola, localidad situada en el País Vasco al norte de España, inició actividades hace más de 45 años. Especializada en la fabricación de piezas metálicas mediante la tecnología de corte fino, colabora con empresas líderes en la industria de la automoción a nivel mundial así como pertenecientes a otros sectores industriales, ELAY es una empresa global, líder en tecnología, calidad e innovación que, procura la involucración y satisfacción de las personas ofreciendo productos de altas prestaciones que aporten el mayor valor a sus clientes a través del corte fino y/u otras tecnologías en el mercado de la automoción y otros.

Estudios recientes reportan que el parque automovilístico en Europa, Oriente Medio y África está en permanente crecimiento. En Europa Occidental, una región relativamente saturada, el número de vehículos matriculados experimentará un crecimiento anual de aproximadamente. 2.1 % para los automóviles y 3.1 % para los camiones durante el próximo lustro, mientras que para los mercados en expansión de Medio Oriente y África se pronostica un crecimiento superior al 5 % tanto para autos como para camiones. América no es la excepción debido a que en los últimos años se ha tenido un gran aumento en el número de unidades, principalmente en Estados Unidos, Canadá, Brasil. Chile y México.

Por lo anterior, se tiene una gran demanda de diferentes componentes que requiere un vehículo automotriz, por ejemplo cinturones de seguridad, sistema de frenado, balatas, bridas de acero inoxidable de menor tamaño del sistema de escape, cerraduras del vehículo, trinquetes y gatillos, soportes de motores, elevadores, etc.

Para la fabricación de los diferentes tipos de elementos se requiere del uso de troqueles y prensas de gran capacidad que usan la tecnología de corte fino o Fineblanking. Este es un proceso de corte avanzado y preciso mediante el cual se obtiene una geometría exacta y lisa y una superficie libre de grietas [1] por lo que se generan esfuerzos de contacto elevados en el área de corte de los herramientales de corte lo cual lleva a un desgaste agravado de los mismos [2]. En la actualidad, los aceros de alta velocidad son muy utilizados para herramientales de corte fino debido

sus excelentes propiedades mecánicas y a su alta resistencia al desgaste, especialmente en el caso de series largas de trabajo [3].

Recientemente se han desarrollado diferentes alternativas para mejorar el desempeño de este tipo de materiales (aceros de alta velocidad) cuando son sometidos a esfuerzos de contacto elevados, desgaste severo, gradientes altos de temperatura pero sobre todo a largos periodos de carga mediante recubrimientos duros utilizando métodos PVD [4]. Los recubrimientos de carbonitruro de titanio (TiCN) son recubrimientos que combinan la alta dureza y bajo coeficiente de fricción de las fases del carburo de titanio (TiC) y la alta tenacidad de las fases del nitruro de titanio (TiN) [5-6]. Estas propiedades únicas hacen de los recubrimientos de carbonitruro de titanio (TiCN) una buena solución para aplicaciones que requieren de altas resistencias a la abrasión y al desgaste, como en aplicaciones tribológicas [7].

Debido a la importancia que representa el desgaste de los herramientas dentro de la industria, una gran cantidad de investigadores se han dado a la tarea de evaluar experimentalmente tanto a los aceros para herramientas como a los recubrimientos duros con la finalidad de entender su comportamiento tribológico y mecánico en aplicaciones típicas de conformado y corte de metales.

Wang y colaboradores [8] realizaron pruebas de desgaste a sustratos de acero H13 recubierto con carbonitruro de titanio (TiCN) utilizando como contraparte un acero al bajo carbono, obteniendo que parámetros como el tiempo y temperatura de deposición influyen de manera importante en la resistencia al desgaste.

Otros estudios demuestran que para recubrimientos multicapas de TiN y TiCN, la secuencia de deposición y el espesor de las mismas influyen en la resistencia al desgaste [9]. También señalan que la resistencia a la adhesión del recubrimiento está relacionada con el espesor del recubrimiento. Bressan y colaboradores [10] estudiaron el comportamiento tribológico de recubrimientos de TiAlN y TiCN sobre sustratos de acero rápido teniendo los primeros un mejor desempeño. Sus resultados demuestran que la resistencia al desgaste se ve disminuida con el exceso de porosidad en los recubrimientos. Otros investigadores concluyen que partículas de TiCN sobre aceros rápidos [11] mejoran su resistencia al desgaste y que los factores de desgaste disminuyen con el incremento de carbono en las partículas de TiCN.

De igual forma, Bull y colaboradores [12] investigaron el desempeño tribológico de recubrimientos de TiCN sobre carburo cementado y encontraron que disminuyendo el espesor de las capas se obtienen mejores comportamientos de fricción y desgaste debido al mejoramiento en la adhesión del recubrimiento. Concluyen también que los coeficientes de fricción de los recubrimientos están influenciados por la rugosidad, existencia de micro grietas, etc.

Otras investigaciones acerca de fricción de recubrimientos duros [13] sugieren que las superficies modificadas mejoran significativamente la resistencia al desgaste en la superficie del acero para herramienta así como que el desempeño de estos recubrimientos depende ampliamente del tipo, espesor y dureza del mismo. Meng y colaboradores [14] estudiaron tribológicamente dos tipos de cermets, ambos basados en TiCN, a altas temperaturas utilizando como contraparte nitruro de silicio observando que existe tribo-oxidación como resultado de los esfuerzos mecánicos repetidos y el calor por fricción a altas temperaturas.

Más recientemente, se han analizado recubrimientos dúplex TiN/TiCN sobre aceros nitrurados [15] encontrando que durezas y tenacidades más altas de las capas dúplex favorecieron una mejor resistencia a la erosión. Wang y colaboradores [16] estudiaron las propiedades de fricción y desgaste de recubrimientos de carbonitruro de titanio (TiCN) contra bolas de carburo de silicio (SiC) observando que los tribo-pares de TiCN/SiC tienen mejores propiedades tribológicas en agua que en aire (en seco) y que el comportamiento en agua está fuertemente influenciado por la habilidad antioxidante de los tribomateriales más que de sus propiedades mecánicas. Sergejev y colaboradores [17] recubrieron matrices de acero rápido con dos tipos de recubrimientos, (TiCN) y (AlCrN), y muestran que las matrices con menor rugosidad superficial exhiben más daño intensivo comparado con las de mayor rugosidad superficial en condiciones lubricadas. En el desgaste por fatiga se observa que las matrices con rugosidad superficial menor son más resistentes en condiciones de carga por impacto cíclica concluyendo que la rugosidad superficial es el parámetro más crítico en el tiempo de vida útil de la matriz. Por el contrario, Siow y colaboradores [18] sugieren que el comportamiento de la fricción en un recubrimiento depende en gran medida de la lubricidad más que de la rugosidad del mismo.

Shan y colaboradores [19] investigaron el desempeño tribológico de capas de TiN y TiCN en diferentes medios tales como aire, agua destilada y agua de mar resultando en menores coeficientes de fricción en húmedo debido a la capa lubricante entre el recubrimiento y su contraparte así como un mayor factor de desgaste en agua de mar debido al efecto destructivo del cloro sobre los recubrimientos.

En la actualidad existen gran cantidad de investigaciones acerca del desgaste de aceros para herramienta, con y sin recubrimientos duros, sin embargo, la mayoría de ellas no toman en cuenta las condiciones de carga que satisfagan el esfuerzo de contacto generado por el herramental y la parte de trabajo durante el proceso de corte. Además, se caracterizará la adhesión entre el recubrimiento y el sustrato ya que dicha adhesión es un parámetro importante en el desempeño al desgaste de los recubrimientos. El resultado de este estudio permitirá conocer, de mejor manera, el desempeño y la vida útil de los tribosistemas (sustrato-recubrimiento) propuestos.

## **1.2 Planteamiento del problema**

La empresa Celay S.A de C.V actualmente utiliza materiales para llevar a cabo sus procesos de corte fino, entre los cuales se encuentran, aceros M4 y el D2, sin embargo, ya no están siendo eficientes, debido al excesivo desgaste que estos presentan.

## **1.3 Justificación**

Debido a la gran cantidad de paros no programados de máquinas, reclamos del cliente, cambio de repuestos, daños en el troquel, la empresa Celay tiene pérdidas económicas; existe también el riesgo de cancelación de proyectos. La mayor parte de esas pérdidas económicas es derivada del desgaste de herramientas, mismo que tiene influencia directa en la productividad, eficiencia, confiabilidad y calidad de los productos manufacturados. Por lo tanto, 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 el proceso de corte fino.

#### **1.4 Objetivo general**

Analizar el comportamiento de fricción y desgaste de un recubrimiento de carbonitruro de titanio (TiCN) sobre aceros empleados en el proceso de corte fino.

Los objetivos específicos son:

- Realizar los ensayos de indentación Rockwell C para evaluar la adhesión del recubrimiento al sustrato.
- Realizar ensayos de fricción sobre capas de TiCN para evaluar la evolución del coeficiente de fricción.
- Medir el ancho de la huella de desgaste por medio de microscopía óptica para determinar el volumen perdido y el factor de desgaste
- Determinar los mecanismos de desgaste mediante microscopía electrónica de barrido.

#### **1.5 Alcance y limitaciones**

El análisis del comportamiento de fricción y desgaste recubrimientos de TiCN está enfocado solo a los sustratos de acero D2 y M4, bajo condiciones de lubricación a temperatura ambiente con condiciones de carga de 10 y 30 N.

#### **1.6 Impacto**

El conocimiento del comportamiento de fricción y desgaste de recubrimientos de TiCN depositados sobre aceros para herramientas genera un impacto científico al obtenerse más información acerca de los mecanismos de desgaste presentes bajo diferentes condiciones de carga y de lubricación.

## Capítulo II Marco teórico

El corte fino es un proceso de trabajo de la técnica de troquelado que hace posible producir en una sola operación componentes de acabado preciso, con un corte limpio por todo el espesor del material, con tolerancias dimensionales estrechas y libres de desgarros y grietas en sus áreas funcionales. Al utilizar este proceso se eliminan operaciones secundarias tales como fresado, rectificado, mandrinado o taladrado. En este proceso se pueden producir tanto piezas planas como diversas formas:

- Pliegues
- Chaflanes
- Embutidos
- Doblados
- Extrusiones

Para que se lleve a cabo la tecnología de corte fino, esta debe de incluir las siguientes áreas:

- Prensas de corte fino
- Herramentales de corte fino
- Materiales de corte fino
- Lubricantes de corte fino

Ventajas de corte fino

Aparte de las ventajas relacionadas con la calidad de corte fino, los conceptos de costo-efectividad son también un factor decisivo a favor de la aplicación de este proceso. Específicos relacionados con el blanco ventajas en comparación con el corte convencional, son:

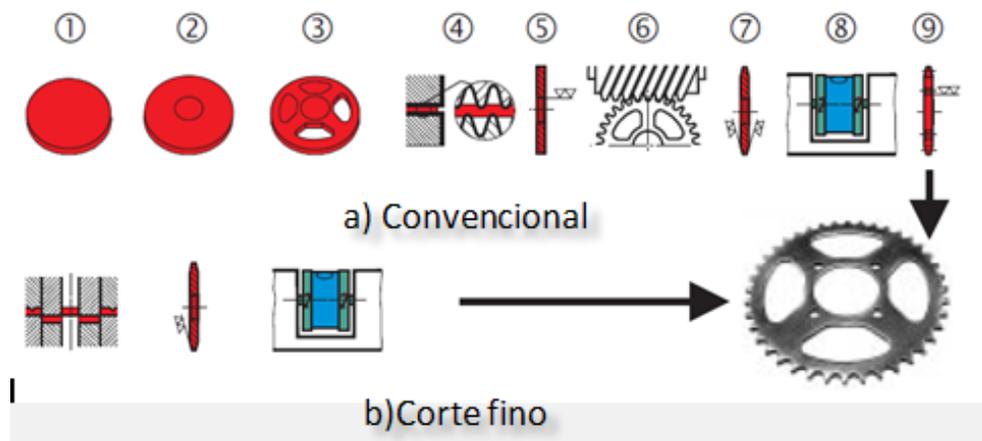
- Superficies lisas libres de fracturas y desgarros que son capaz de ejercer sus funciones sin la necesidad de volver a trabajar.
- Campo de aplicación amplio para corte de cizalla.
- Pequeñas tolerancias dimensionales.

Ventajas en relación con el proceso son:

- No hay choque de cierre y la consiguiente reducción de los niveles de ruido y vibraciones.

- Menor número de pasos en el proceso de producción.

Un ejemplo se puede ver en la figura 2.1 donde ilustra la producción de un engrane de una motocicleta utilizando el método convencional y el método de corte fino. Las nueve operaciones de trabajo requerido en la producción convencional, incluyendo cortes en prensas individuales, mecanizado de desbarbado y pulido, se pueden reducir mediante el uso de la técnica de corte fino en una secuencia comprendida de tres operaciones. Corte fino es más ventajoso en este ejemplo, si tiene en cuenta el tiempo requerido para realizar la pieza requerida y el alto costo de cambios de maquinas utilizando métodos convencionales.



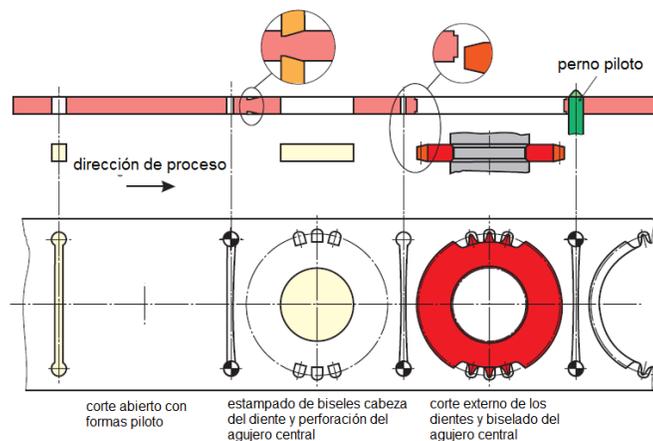
**Figura 2.1 La cadena de producción de un engrane de una motocicleta.**

En la figura 2.1 se puede observar los pasos de la producción convencional de un engrane y se enumeran a continuación: 1. Corte del contorno exterior, 2. Perforación del agujero interior, 3. Perforación de cuatro ventanas; 4. Nivelación, 5. Pulido del agujero interior y biselado en ambos lados; 6. Pulido de los dientes; 7. Biselado de puntas de los dientes en ambos lados; 8. Desbarbado; 9. Pulido; mientras que en la Producción de corte fino (parte inferior de la figura 2.1) sólo se hacen tres pasos para tener la pieza terminada: 1. Corte fino, 2. Biselado de los dientes de un lado, la segunda cara ya tiene el biselado por el proceso de corte fino, 3. Desbarbado. En la figura 2.2 se muestra esquemáticamente el proceso de corte fino.

También cabe mencionar que para que se obtenga un producto satisfactorio así como el método de troquelado de precisión y la mayor producción posible entre afilado de herramientas, se deben de tener los siguientes parámetros optimizados:

- Plano terminado para corte fino
- Material para corte fino
- Troquel de corte fino
- Material del troquel
- Prensa de corte fino
- Aceite de corte

Si se cumple con los parámetros mencionados, se obtendrán piezas bien en tolerancias dimensiones y en el porcentaje de corte fino.



**Figura 2.2 Proceso de de tres estaciones progresiva en la fabricación de un engrane.**

### 2.1 Tipo de troqueles, su funcionamiento y sus partes

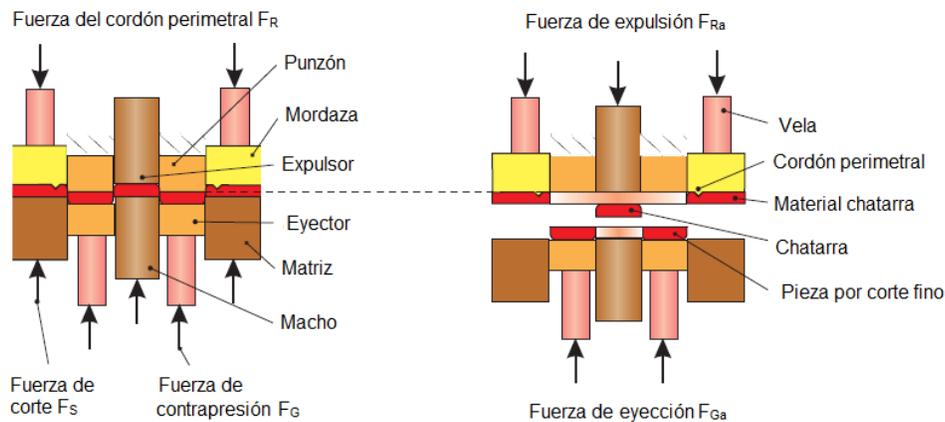
Troquelar es un arte metalmecánico de gran importancia para la industria, enfocado, principalmente, hacia la productividad, debido a que siempre se busca fabricar productos más eficientes, resistentes, de calidad y económicos que los obtenidos con cualquier otro proceso productivo como fundición, forja o mecanizado. Es empleado en gran variedad de sectores: electrodomésticos (línea blanca), automotor, aeronáutico, naval, electrónico e informático y su objetivo es aprovechar al máximo el material para elaborar la mayor cantidad de piezas con el menor tiempo y costo posible. Este se puede definir como un proceso mecánico de producción industrial que se utiliza para trabajar en frío lámina metálica y fabricar completa o parcialmente piezas por medio de una herramienta (troquel), conformada por un punzón y una matriz, también llamados '*macho*' y '*hembra*', respectivamente. Mediante una prensa, el troquel ejerce presión sobre el material, supera su límite elástico y actúa como

fuerza para transformarlo, bien sea para cortar, doblar o conformar una forma previamente definida.

Los troqueles es un conjunto de utillajes, los cuales son construidos teniendo en cuenta cuatro aspectos muy importantes: trabajo a realizar, características de la prensa, material a troquelar y número de piezas a producir. A medida que aumentan los requerimientos del trabajo, la capacidad de las prensas, las exigencias de los materiales y la necesidad de producir más y mejor, también se conciben diseños de troqueles con mayor complejidad y desarrollo. En ese sentido, los troqueles se pueden clasificar en simples, compuestos y progresivos:

- Troqueles Simples (de una estación o un paso) estos troqueles permiten realizar solamente una operación en cada golpe de la prensa, son de baja productividad y normalmente es necesario el uso de otros troqueles para poder concluir una pieza y considerarla terminada. Se utilizan para fabricar piezas sencillas como arandelas, accesorios y pequeñas partes para electrodomésticos.
- Troqueles Compuestos (de dos o tres estaciones o pasos) son herramientas que permiten aprovechar la fuerza ejercida por la prensa realizando dos o más operaciones en cada golpe y agilizando el proceso. Generan mayor productividad y se utilizan para conformar lavaplatos, utensilios, recipientes, partes de estufas... etc.
- Troqueles Progresivos (múltiples estaciones o pasos): son troqueles complejos y de gran desarrollo, también llamados matrices progresivas. Constan de, incluso, decenas de etapas o pasos, en cada uno de ellos se modifica la lámina con una secuencia establecida por el diseñador (secuencia de corte), de tal manera que al final se obtiene una o varias piezas terminadas. En un troquel de corte progresivo, los punzones entran en acción sucesivamente sobre un punto de la tira de lámina, a medida que ésta avanza a través del troquel. Son altamente productivos aunque su mantenimiento y operación es más compleja que en los otros casos y requiere de mayor capacitación del personal involucrado, por supuesto, por su alta eficiencia y precisión, vale la pena todo ello.

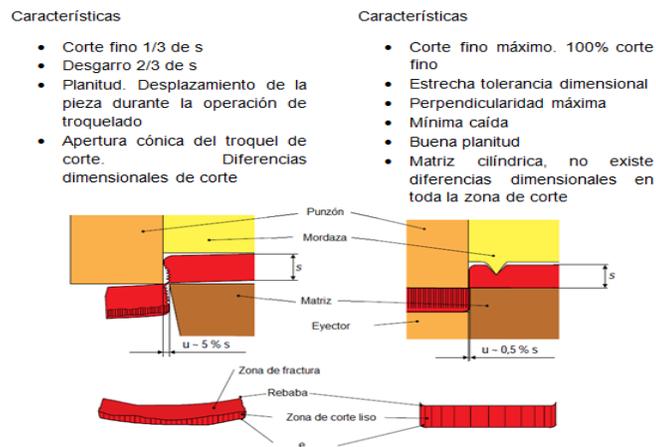
El proceso de troquelado de precisión es realizado según el principio de trabajo siguiente, ver figura 2.3 Durante el corte fino, existen tres fuerzas principales para llevar a cabo dicho proceso. El método de troquelado de precisión se necesita una mordaza con cordón perimetral, la cual sujeta el material fuerza de mordaza ( $F_R$ ) fuera del perímetro de la pieza cortada, y antes de que el punzón empiece a cortar. La fuerza de la contrapresión o fuerza de eyector ( $F_G$ ) es la que sujeta la pieza, para que no se deforme, contra el punzón principal, una vez de que el material está sujeto se realiza el corte de la pieza. Una vez que el proceso de corte se ha completado, la fuerza del de mordaza y la de eyector son desactivadas, el herramental comienza a abrirse y después de una carrera de apertura completada el material chatarra y la chatarra son despojadas del punzón por la fuerza de expulsión ( $F_{Ra}$ ) La pieza por corte fino es eyectada de la matriz por la fuerza de extracción ( $F_{Ga}$ )



**Figura 2.3 Principio de estampación de una matriz de corte fino durante el corte y Principio de estampación de una herramienta de corte fino durante la eyección de la pieza.**

Como se sabe hay dos tipos de troquelado el troquelado de precisión y el troquelados convencional, El troquelado de precisión se realiza con el material completamente sujetado por la parte interior y exterior, aquí se necesita una holgura entre el punzón y la matriz, es importante la sujeción del material y la pequeña holgura entre el punzón y la matriz asegura una perfecta superficie de corte fino. También es importante tomar en cuenta las aberturas de la matriz cilíndrica garantizan la precisión de la pieza durante toda la vida del troquel. Cuando se ejecuta el troquelado convencional el material no es sujeto por ninguna presión.

También la holgura que existe entre el punzón matriz es del 5% al 10% de espesor del material. Por lo cual se obtiene una superficie cortada que se presenta una zona desgarrada causada por la holgura existente entre el punzón y la matriz en ese momento se produce una deformación de la pieza entre el punzón y la matriz, lo cual provoca aberturas de la matriz un ángulo de holgura de  $10'$  hasta  $3^\circ$  y en caso de rectificar la matriz, la holgura del punzón aumenta de forma que los tamaños de la pieza varían, dimensiones inestables por la salida cónica de la matriz de corte ver figura 2.4.



**Figura 2.4 Resultado de trabajo para corte convencional (izquierda) y corte fino (derecha).**

En el troquelado de precisión se requiere condiciones y elementos y por consecuente un resultado de la pieza:

- Máquina de triple efecto
- Material fuertemente sujeto al hacer el corte
- No se produce rotura
- Corte fino 100% espesor
- Buena planitud
- Dimensiones estables por forma cilíndrica de la matriz de corte

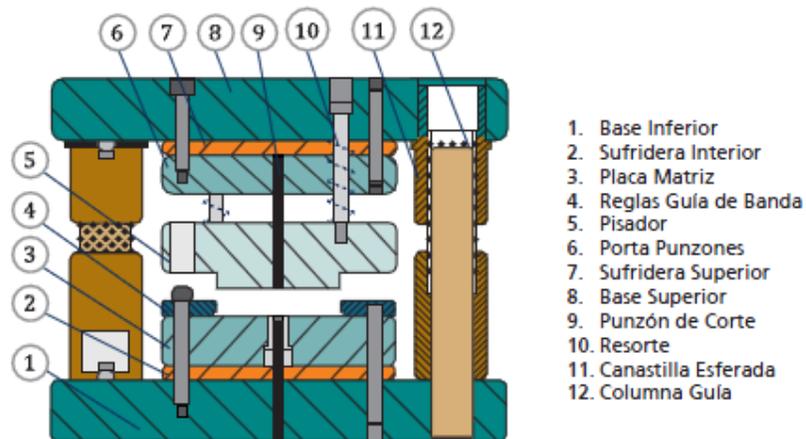
En el troquelado convencional se requiere condiciones y elementos y por consecuente un resultado de la pieza:

- Máquina de simple efecto
- Material sin ser sujeto al hacer el corte
- Rotura 67% del espesor

- Corte fino 33% espesor

Cada troquel se compone de diferentes componentes dependiendo su complejidad y desarrollo, los troqueles cuentan con una serie de elementos constructivos que cumplen con una misión específica dentro del conjunto general del trabajo para el cual han sido fabricados. Estos componentes, por sus características mecánicas deben estar cuidadosamente diseñados para lograr el objetivo de producir piezas sin ningún defecto. Obviando los troqueles simples, los cuales esencialmente también tienen algunos de los siguientes componentes, a continuación se describe las partes que de una u otra forma están presentes en casi todas las matrices progresivas, independientemente de su tamaño.

El troquel se compone con gran variedad de elementos, de los cuales cada uno tiene su función, así como el tipo de material del cual está construido ver figura 2.5.



**Figura 2.5 Partes del troquel de corte fino.**

## 2.2 Aceros para herramientas

De acuerdo a su asignación, los aceros para herramienta sirven principalmente para la elaboración de herramientas, utilizadas en la manufactura y mecanización del trabajo y transformación de metales, madera, plásticos, y otros materiales industriales. Las herramientas deben soportar altas cargas específicas, a menudo concentradas en áreas expuestas, teniendo que operar a elevadas temperaturas que cambian rápidamente, están también en contacto continuo con varios tipos de abrasivos usados como materiales de trabajo, y con frecuencia se someten a golpes, o tienen que desempeñarse bajo otra variedad de condiciones adversas. Sin

embargo, cuando se emplean en circunstancias que son consideradas como condiciones normales de operación, la herramienta no debe sufrir daño mayor, desgaste prematuro resultante del achatamiento de los bordes, o ser susceptibles a cambios metalúrgicos perjudiciales. Una especificación sustancial de los aceros ha resultado del desarrollo de un sistema de clasificación que es ampliamente aceptado en toda la industria, por parte de los productores y los usuarios de los aceros para herramienta. Este sistema se utiliza como una base para proporcionar información concisa sobre tipos de aceros para herramienta, sus propiedades, y métodos de selección del acero para herramienta [20].

El sistema de clasificación de los aceros para herramienta establece siete categorías básicas de aceros (tabla 2.1). Estas categorías están asociadas con las características predominantes de aplicación, algunas de estas categorías se componen de varios grupos para distinguir entre las familias de los tipos de acero que sirven para el mismo propósito general, sin embargo difieren con respecto a una o más características dominantes [20].

**Tabla 2.1 Clasificación AISI-SAE de los aceros para herramienta [2].**

CATEGORÍA	SÍMBOLO	GRUPO
High-Speed Tool Steels	M	Molibdeno
	T	Tungsteno
Hot-Work Tool Steels	H1-H19	Cromo
	H20-H39	Tungsteno
	H40-H59	Molibdeno
Cold-Work Tool Steels	D	Alto Carbono, Alto Cromo
	A	Media Aleación, Templado al aire
	O	Templado en aceite
Shock-Resisting Tool Steels	S	:::
Mold Steels	P	:::
Special-Purpose Tool Steels	L	Baja Aleación
	F	Carbono-Tungsteno
Water-Hardening Tool Steels	W	:::

*High-Speed Tool Steels (Aceros para herramienta de alta velocidad, HSTS).*

La principal aplicación de los HSTS es para herramientas usadas en el trabajo de metales a altas velocidades de corte. El corte de metal a altas velocidades genera calor, la penetración del filo de la herramienta de corte en el material de trabajo requiere gran dureza y resistencia, el contacto continuo de fricción de la herramienta con su material par y el desprendimiento de viruta solo puede ser sostenido por una herramienta con filo resistente a la abrasión. Los HSTS son listados en las

especificaciones de AISI en dos grupos: grupo molibdeno y grupo tungsteno, estas designaciones expresan el elemento aleante dominante del grupo respectivo [20].

*Cold-Work Tool Steels (Aceros para herramienta de trabajo en frío, CWTS).*

La intención principal de los CWTS es para el trabajo en troqueles, aunque su uso no está restringido a este campo en general. Los CWTS son ampliamente utilizados para herramientas de las cuales su servicio regular no involucra elevadas temperaturas. Están disponibles en composiciones químicas ajustadas a varios requerimientos, de un rango amplio de diferentes aplicaciones. De acuerdo a sus propiedades predominantes, los CWTS están clasificados cada uno por su composición química o por el medio de enfriamiento en el tratamiento térmico, los CWTS están asignados en tres diferentes grupos; alto carbono, alto cromo; media aleación, templado al aire; templado en aceite [20].

Debido a que los aceros para herramienta generalmente son tratados térmicamente para hacerlos adaptables al uso designado mediante la mejora de las propiedades deseadas, el comportamiento del acero durante el tratamiento térmico es de primordial importancia. El comportamiento del acero comprende, en este sentido, tanto la resistencia a los efectos perjudiciales y a la obtención de las propiedades deseables. Las siguientes propiedades se consideran las principales relacionadas con el tratamiento térmico:

*Seguridad en el temple:* Esta designación expresa la capacidad del acero para soportar los efectos perjudiciales de la exposición a calor muy alto y en particular a los cambios bruscos de temperatura durante el enfriamiento rápido, sin efectos dañinos.

*Distorsiones en el tratamiento térmico:* En partes hechas de aceros para herramienta, las distorsiones a menudo son consecuencia de un diseño inadecuado o tratamiento térmico inapropiado. Sin embargo, ciertos tipos de aceros para herramienta muestran diferentes grados de sensibilidad a la distorsión.

*Profundidad del Endurecimiento:* La profundidad del temple se indica mediante un rango relativo basado en la penetración de la fase de transformación de la superficie que produce una capa endurecida.

*Resistencia a la descarburación:* Mayor o menor sensibilidad a la pérdida de una parte del contenido de carbono de la superficie expuesta al calor depende de la química del acero. La sensibilidad puede ser balanceada parcialmente por equipos apropiados de tratamiento térmico y procesos.

*Maquinabilidad:* Las herramientas son productos de precisión cuya última forma y dimensiones deben ser producidas por mecanizado, un proceso al que no todos los tipos de aceros para herramienta se prestan igualmente bien.

*Dureza en caliente:* Esta propiedad designa la resistencia del acero al efecto suavizante a elevada temperatura.

*Resistencia al desgaste:* La erosión gradual de la superficie de operación de la herramienta más visible, que se produce en los bordes expuestos es conocida como desgaste. La resistencia al desgaste prolonga la vida útil de la herramienta retardando la degradación de su superficie a través del contacto abrasivo de trabajo a temperaturas regulares de operación; estas temperaturas varían de acuerdo al tipo de proceso.

*Tenacidad:* En los aceros para herramienta, esta propiedad expresa la capacidad para soportar choques, cargas aplicadas rápidamente o altos impactos sin romperse. Los aceros utilizados para la fabricación de herramientas también deben ser capaces de absorber tales fuerzas con sólo una mínima deformación elástica y sin deformación permanente a cualquier medida, que podría interferir con el funcionamiento apropiado de la herramienta [20].

### **2.3 Recubrimientos duros**

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.

En la actualidad, los recubrimientos duros tales como el nitruro de titanio, carburo de titanio y óxido de aluminio son comúnmente utilizados en herramientas de corte en la industria manufacturera. Los recubrimientos de nitruro de cromo y disulfuro de molibdeno son usados en herramientas de formado de metal. Muy duros pero también con baja fricción, los recubrimientos de carbono tipo diamante que son depositados para protección contra el desgaste en los dispositivos magnéticos de almacenamiento fabricados para computadoras. Lentes ópticos son producidos con recubrimientos transparentes delgados y duros, resistentes a la erosión. Diversos recubrimientos a base de carbono son utilizados en componentes en la industria automotriz para reducir el consumo de energía. Los recubrimientos en algunas aplicaciones son depositados como recubrimientos multicomponentes, multicapas, capas con gradiente, estructuras superreticuladas y superficies tratadas dúplex con combinaciones de varios materiales [21].

El sistema general de clasificación para los procesos de deposición se divide dentro de las cuatro categorías siguientes:

- *Procesos en estado gaseoso.*
- *Procesos en estado de solución.*
- *Procesos en estado fundido o semifundido.*
- *Procesos en estado sólido.*

Las abreviaturas usadas para cada una de las técnicas dentro de los procesos son las siguientes:

- *PA:* Asistido por plasma (Plasma Assisted).
- *CVD:* Deposición química de vapor (Chemical Vapour Deposition).
- *PVD:* Deposición física de vapor (Physical Vapour Deposition).
- *IBAD:* Deposición asistida por haz de iones (Ion Beam Assisted Deposition).
- *IAC:* Recubrimiento asistido por iones (Ion Assisted Coating).
- *II:* Implantación de iones (Ion Implantation).

Los procesos en estado gaseoso cubren las técnicas de ingeniería de superficie en las cuales el recubrimiento o el material de tratamiento superficial pasan a través de una fase de vapor o gaseosa antes de la deposición sobre la superficie. Los principales subgrupos de recubrimientos son de deposición química de vapor (CVD) y de deposición física de vapor (PVD). El primero utiliza reactivos gaseosos como fuente de los constituyentes del recubrimiento, mientras que en el último al menos uno de los constituyentes del recubrimiento es evaporado o de otra forma atomizado en sólido dentro de la cámara de recubrimiento. Los procesos de deposición física de vapor (PVD) implican la atomización o vaporización del material de una fuente sólida y la deposición de ese material sobre el sustrato para formar un recubrimiento. Los métodos de PVD a menudo se dividen en evaporación y pulverización catódica (sputtering). La evaporación implica la vaporización térmica del material fuente de deposición. El sputtering es un proceso controlado cinéticamente en el cual el material fuente u objetivo se hace catódico y es bombardeado con iones, usualmente de un gas inerte. Esto resulta en una transferencia de momento de átomos en el objetivo, dando lugar a la expulsión de átomos de recubrimiento [21].

## **2.4 Técnicas de caracterización**

**2.4.1 Dureza.** El término dureza tal como es usado en la industria, puede definirse; como la habilidad de un material para resistir una indentación o deformación permanente cuando está en contacto con un indentador bajo la acción de una carga. Generalmente una prueba de dureza consiste en presionar un indentador de geometría y propiedades mecánicas conocidas contra un material de prueba. La dureza del material es cuantificada con una o una variedad de escalas, que directa o indirectamente indica la presión de contacto involucrada en la deformación de la superficie de prueba. Desde que el indentador es presionado contra el material durante la prueba, la dureza también se percibe como la habilidad de un material para resistir cargas de compresión. El indentador puede ser esférico (ensayo Brinell), piramidal (ensayo Vickers y Knoop), o cónico (ensayo Rockwell). En los ensayos Brinell, Vickers y Knoop, el valor de la dureza es la carga soportada por unidad de área de la indentación, expresado en kilogramos por milímetro cuadrado ( $\text{kgf}/\text{mm}^2$ ). En los ensayos Rockwell, la profundidad de la indentación a una carga específica es

determinada y convertida a un número de dureza (adimensional), el cual esta inversamente relacionado con la profundidad.

El resultado de la dureza del material también depende de su aplicación en la industria. Por ejemplo, un ingeniero de mecánica de la fractura puede considerar a un material duro como frágil y poco confiable bajo cargas de impacto; un tribólogo puede considerar la alta dureza como una propiedad deseable, para reducir la deformación plástica y el desgaste en aplicaciones de deslizamiento. Un metalúrgico desearía tener baja dureza para metales rolados en frío, y un ingeniero de manufactura preferiría materiales suaves para maquinados fáciles y rápidos e incrementar la producción [22].

*Dureza Brinell.* El ensayo de dureza Brinell consiste en un indentador esférico duro, presionado bajo una carga normal fija contra la superficie lisa de un material. Cuando el equilibrio es alcanzado, la carga y el indentador son retirados, y el diámetro de la indentación formada sobre la superficie es medido usando un microscopio con una escala milimétrica incorporada. La dureza Brinell es expresada como la relación de la carga del indentador  $W$  sobre el área de la superficie de contacto de la indentación esférica, que es responsable de soportar la carga, y está dada como el valor de la dureza Brinell (BHN) denotado por HB. Por lo tanto:

$$HB = 2W/\pi D^2 [1 - \sqrt{1 - (d/D)^2}] \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde  $W$ , es la carga en kilogramos,  $d$  y  $D$  son los diámetros de la indentación y el indentador respectivamente, en milímetros [3].

*Dureza Vickers.* Durante los ensayos de dureza Vickers, las longitudes de las dos diagonales de la indentación son medidas, y su valor promedio,  $d$  es calculado. Si la indentación es cuadrada, el área proyectada de la indentación es  $d^2/2$ , por lo tanto, la presión de cedencia es  $2W/d^2$  y  $HV=0.927(2W/d^2)$ . En el caso de un indentador cónico, los experimentos han demostrado que el valor de la dureza Vickers es independiente del tamaño de la indentación, y por lo tanto, de la carga [22].

*Dureza Knoop.* El indentador de diamante Knoop es una variación del indentador Vickers. Éste es una pirámide en la cual los ángulos incluidos son  $172^\circ 30'$  y  $130^\circ$ , y la indentación tiene la forma de un paralelogramo con la diagonal mayor cerca de

siete veces más grande que la diagonal menor. La dureza Knoop está definida como la carga  $W$ , dividida entre el área proyectada  $A$  de la indentación. Por lo tanto,  $HK=W/A$ , la cual proporciona la presión de cedencia. Los valores de la dureza obtenidos por el método Knoop son, como se esperaría, casi independientes de la carga y son casi idénticos con los valores  $HV$  [22].

*Dureza Rockwell.* En el ensayo Rockwell con indentador cónico, una carga de 10 kgf es primeramente aplicada sobre la superficie del material, y la profundidad de penetración es considerada como cero. Una carga de 90 o 140 kgf es entonces aplicada y removida, dejando la carga inicial en su lugar, y la profundidad adicional de penetración es medida directamente con un calibrador, el cual entrega el valor de la dureza que puede ser correlacionado con valores de dureza Vickers o Brinell. En el ensayo de dureza Rockwell, un indentador esférico es usado para materiales suaves (escala Rockwell B), y un indentador cónico para materiales duros (escala Rockwell C) [22].

*Microindentación.* En el ensayo de dureza de microindentación, un indentador de diamante de geometría específica es impreso sobre la superficie de la muestra del ensayo, utilizando una fuerza aplicada conocida de 1 a 1000 gf. Históricamente, el término "microdureza" ha sido usado para describir tales ensayos. Este término, como se presenta, sugiere que se realizan mediciones de dureza de valores muy bajos, más bien que, mediciones de indentaciones muy pequeñas. Aunque el término "microdureza" está bien establecido y generalmente interpretado correctamente por los usuarios, lo mejor es utilizar el término más correcto de; ensayo de dureza de microindentación [22].

**2.4.2 Adhesión del recubrimiento.** 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. Existen distintas pruebas para evaluar esta característica y a continuación se describen brevemente:

### 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 epóxido. 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 [21].

### 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 C a 150 Kgf y una 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 [21].

### Prueba por scratch

Esta prueba consiste en un indentador 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 de la 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 [21].

**2.4.3 Tribología.** La palabra tribología viene de la palabra griega “tribos” que significa rozar o frotar, y es la ciencia que se encarga del estudio de la fricción, el desgaste y la lubricación presentados cuando interactúan entre sí 2 cuerpos en movimiento relativo, es de vital importancia el estudio de esta ciencia ya que puede llegar a ser una herramienta muy útil que nos ayuda a asegurar el buen funcionamiento de componentes en un sistema mecánico.

La tribología como disciplina científica es bastante nueva y sobre todo es comúnmente conocida por su estudio de la fricción, desgaste y lubricación. Posee una naturaleza compleja ya que ofrece pocas posibilidades a hacer cálculos teóricos de la fricción y el desgaste.

Las propiedades tribológicas son de suma importancia para los materiales en contacto y el sistema suele ser muy sensible a las condiciones de operación y el medio ambiente. Para entender la tribología se requiere de conocimiento en física, química, metalurgia y mecánica, lo que hace que una ciencia interdisciplinaria y de mente abierta.

Con esta ciencia se podrá optimizar la fricción y el desgaste en aplicaciones tecnológicas como por ejemplo en componentes de maquinas (ver figura 2.6) o en sistemas de trabajo de metales, ahorrando dinero y protegiendo más el ambiente.



**Figura 2.6 Los engranes que interactúan en muchos de los sistemas están constantemente sometidos a cargas cíclicas que terminan por desgastarlos.**

La fricción puede ser definida como la resistencia al movimiento de un cuerpo contra otro y es de gran importancia para herramientas recubiertas usadas en operaciones

de corte. La fricción no es una propiedad de los materiales sino una respuesta de un sistema en la forma de una fuerza de reacción.

Generalmente la ley de fricción conocida como Amontons-Coulomb. Describe el coeficiente de fricción como una relación entre la fuerza tangencial  $F_T$  (fuerza friccional) y la fuerza normal  $F_N$  (carga).

Esta ley se asume como precisa en contactos tribológicos con presiones de contacto ordinarias, como lo son la mayoría de los contactos y es frecuentemente referida como fricción de coulomb

Cabe mencionar que existen tres leyes que gobiernan la fricción las cuales son:

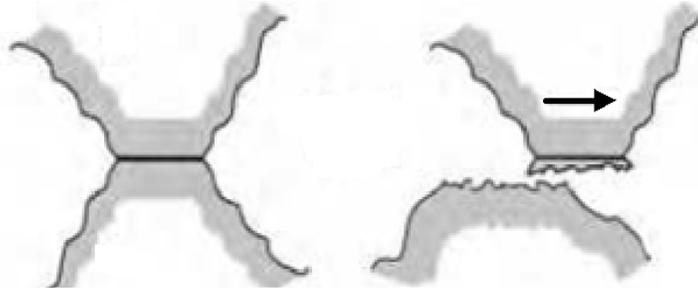
1. La fuerza de fricción es proporcional a la carga normal
2. La fuerza de fricción es independiente del aparente área de contacto entre las superficies deslizantes
3. La fuerza de fricción es independiente de la velocidad de desplazamiento.

Según la norma DIN 50320, el desgaste se define como la pérdida progresiva de material de la superficie de un cuerpo solido. Esta pérdida de material es ocasionada por fenómenos mecánicos y químicos, el material removido puede ser expulsado, transferido a otra superficie o quedar atrapado dentro del sistema. Se pueden identificar cuatro principales mecanismos de desgaste: adhesivo, abrasivo, triboquímico y fatiga.

#### Desgaste adhesivo

El desgaste adhesivo ocurre cuando dos superficies que se encuentran en contacto se adhieren fuertemente formando uniones entre ellas. Debido al movimiento relativo, las uniones se desprenden y se transfieren entre las superficies o quedan como partículas libres. En el contacto entre dos cuerpos, las asperezas determinan el área real de contacto la cual es una pequeña proporción del área aparente de contacto. Al aplicar una fuerza en las superficies, los puntos de contacto (asperezas) se deforman iniciando el crecimiento de uniones, la tendencia a formar uniones adhesivas depende de las propiedades fisicoquímicas de los materiales en contacto, de la carga y de características superficiales, el grado y tipo de contaminación que presenten, ver figura 2.7. El movimiento relativo entre las superficies es originado por una fuerza tangencial, ocasionando rompimiento de las uniones, este fenómeno depende de la

magnitud de la resistencia al corte de cada uno de los materiales de los cuerpos en contacto. Frecuentemente, el rompimiento ocurre en el cuerpo de menor dureza; sin embargo, algunos defectos cercanos a la unión pueden alterar esta tendencia. Parte del material de una superficie se transfiere siendo adherido a la otra superficie o siendo eliminado como una partícula de desgaste.



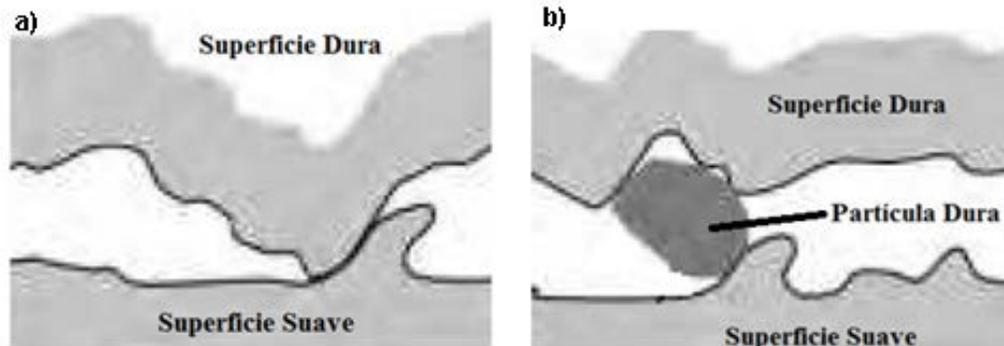
**Figura 2.7 Diagrama esquemático del desgaste por adhesión que resulta en una remoción de material entre las asperezas del mismo.**

La fuerza de las uniones formadas durante el proceso de desgaste por adhesión, depende de las propiedades fisicoquímicas de los materiales en contacto, tales como la estructura cristalina. El ordenamiento de los átomos y las fuerzas de enlaces entre ellos, identifican los diferentes tipos arreglos cristalográficos, cada uno con un porcentaje o factor de empaquetamiento, que describen las propiedades intrínsecas del material. Un mayor factor de empaquetamiento permite la liberación de esfuerzos, debido a que a medida que se aproximan los átomos se enlazan fuertemente permitiendo liberación de energía. Al aplicar una carga, los planos más densos soportan la carga, contrario a los planos menos densos que se deslizan produciendo deformación plástica.

### Desgaste Abrasivo

El desgaste abrasivo provee una significativa deformación plástica de la superficie del material y ocurre cuando una de las superficies en contacto es significativamente más dura comparada con la otra, o cuando partículas muy duras son introducidas en el sistema tribológico. A menudo se hace una distinción entre dos y 3 cuerpos de abrasión donde la última se refiere a situaciones donde partículas duras son introducidas en la interface de contacto (figura 2.8 a y b). No obstante Sin embargo las asperezas duras o partículas son presionadas contra la superficie más suave lo

cual resulta en una deformación plástica en la misma. Debido al movimiento tangencial de la superficie más dura la superficie suave se raya en forma de surco lo cual es señal de desgaste.

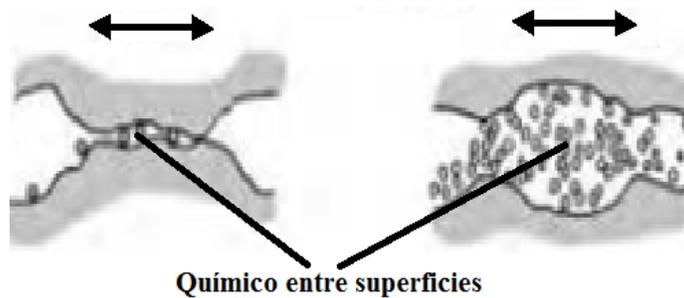


**Figura 2.8 Desgaste por abrasión: a) dos cuerpos y b) tres cuerpos.**

### Desgaste triboquímico

Este tipo de desgaste comprende una combinación de procesos mecánicos y térmicos que ocurren en la interfaz de contacto y en el ambiente presente. La formación de tribo-películas se promueve por el calor friccional y la generación de superficies nuevas de metal y partículas de desgaste. Por ejemplo, la tribo-oxidación inducida que resulta de la formación de capas basadas en óxidos, que se observa frecuentemente en el contacto deslizante entre metales. El desgaste triboquímico se presenta cuando las superficies en contacto reaccionan con el ambiente, generando películas de óxidos en la interfaz. Las reacciones ocurren debido a una serie de factores tales como la presencia de un ambiente corrosivo y cambios de temperatura. El desgaste triboquímico está asociado a los siguientes fenómenos (figura 2.9):

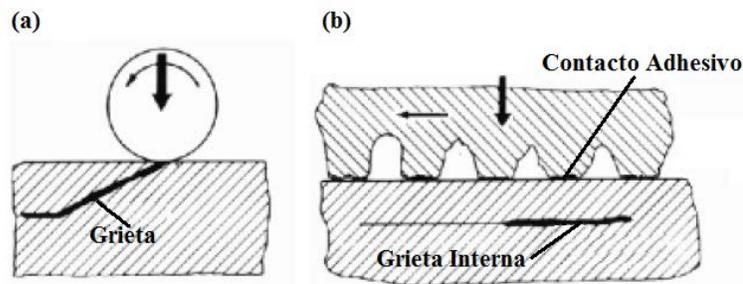
- ❖ Remoción de pequeñas partículas metálicas ocasionada por la ruptura de contactos adhesivos metal-metal que se producen en algunas regiones de contacto y por las altas temperaturas pueden oxidarse.
- ❖ La reacción química entre las superficies y el ambiente que influyen en la formación de películas protectoras.
- ❖ Agrietamiento de las películas superficiales generado por los altos esfuerzos en las zonas de contacto, la alta deformación del material de las superficies, o por el proceso de microfatiga.



**Figura 2.9 Desgaste triboquímico entre dos superficies.**

Desgaste por Fatiga

Los repetidos ciclos de carga y descarga a los cuales los materiales son expuestos pueden inducir la formación de grietas, que eventualmente, después de un número crítico de ciclos resultaran en la rotura de la superficie con la formación de grandes fragmentos. La forma y distribución de estos campos de esfuerzo se hallan influenciadas por la geometría de contacto, las propiedades elásticas y plásticas de los materiales, así como de la intensidad de las cargas normales y tangenciales aplicadas en estas regiones, cuando este tipo de desgaste se presenta se pueden presentar dos tipos de grietas, las superficiales y sub-superficiales como se puede ver en la figura 2.10 (a) y (b) respectivamente.



**Figura 2.10 Tipos de grietas presentadas en el desgaste por fatiga.**

Las grietas superficiales se presentan debido a defectos como indentaciones, irregularidades del proceso de mecanizado del material e inclusiones. Las grietas crecen y se propagan debido a los campos fluctuantes de esfuerzos que se generan en las regiones de contacto. La forma y distribución de estos campos son debidas por la geometría de contacto, las propiedades elásticas y plásticas de los materiales y la intensidad de las cargas aplicadas en estas zonas. Otro factor que influye en el crecimiento de las grietas es la alta presión hidrostática aplicada al sistema cuando

se aplica un lubricante entre las superficies. La viscosidad del lubricante desempeña un papel importante debido a que para altos valores, el lubricante no fluye dentro de la grieta evitando que se incremente. Las grietas sub-superficiales pueden existir al interior del material debido a la presencia de inclusiones y de defectos cristalinos. Si las grietas sub-superficiales se propagan paralelas a la superficie se producen placas del material lo que origina delaminación.

## Capítulo III Metodología

En el presente capítulo se describe la metodología utilizada para la realización del análisis de fricción y desgaste en aceros para herramientas recubiertos con carbonitruro de titanio (TiCN), en condiciones de lubricación. 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.

### 3.1 Esquema general de la metodología

La figura 3.1 muestra un diagrama de flujo de la metodología empleada para el análisis de fricción y desgaste en aceros para herramientas recubiertos con carbonitruro de titanio (TiCN) bajo condiciones de lubricación.

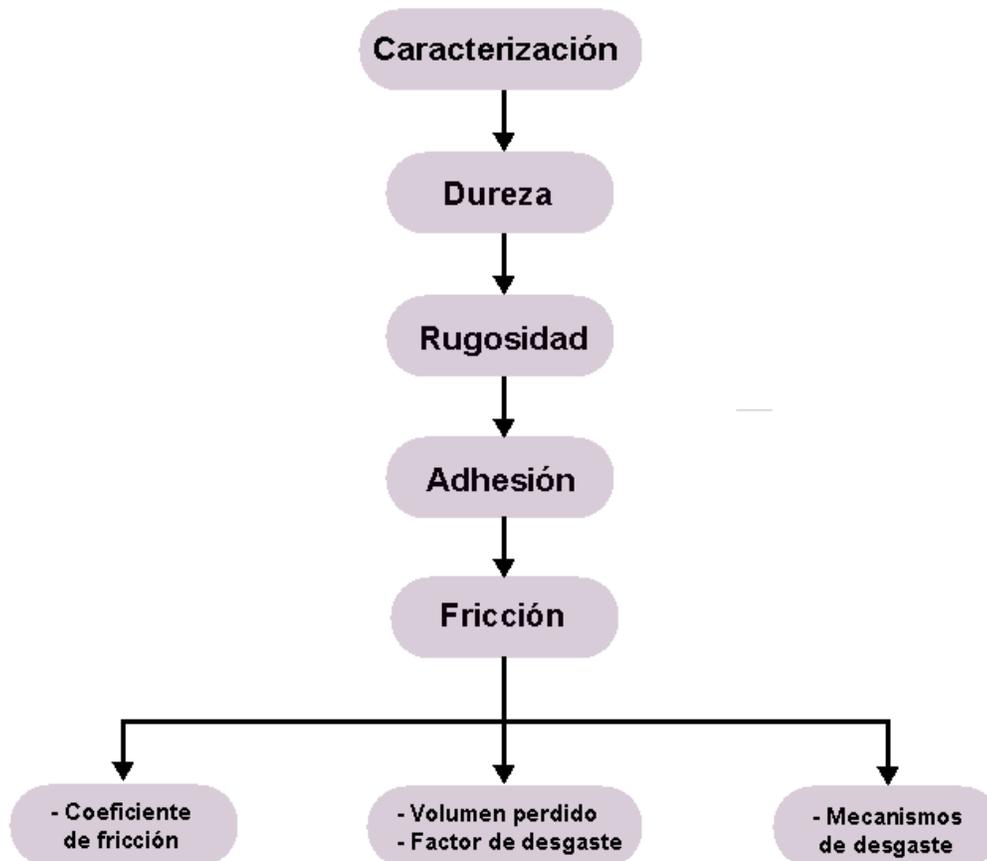
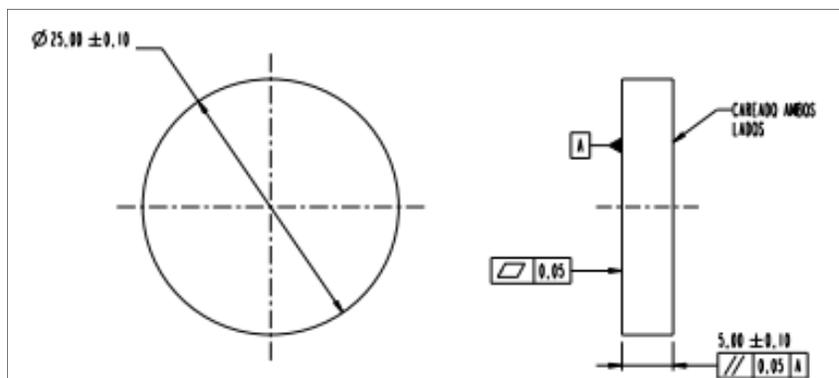


Figura 3.1 Metodología aplicada.

Como parte fundamental de este análisis es la preparación de las muestras. En base a las dimensiones de las probetas, ver figura 3.2; se partió de un tocho con medidas 60x45x40 mm para cada uno de los materiales D2 y M4.



**Figura 3.2 Dimensiones de las probetas.**

Dichos tochos se escuadran mediante un proceso de rectificado para dejar superficies perpendiculares entre sí. También se maquina un barreno de 5 mm de diámetro el cual será el barreno de enhebrado para la siguiente etapa. A cada uno de los materiales se les aplica un temple y revenido con el proveedor externo CRIO. Una vez tratados térmicamente se maquinan a su forma y acabado superficial finales mediante un proceso de erosión por hilo, ver figura 3.3.



**Figura 3.3 Sustratos de acero D2 y M4 cortados por electroerosión.**

La siguiente etapa es mandar recubrir las probetas con el proveedor Oerlikon Balzers Coating Services – México el cual aplicará un recubrimiento BALINIT® B (TiCN). A continuación se muestran las características y propiedades de este recubrimiento:

**Tabla 3.1 Propiedades y características del recubrimiento BALINIT B®.**

Recubrimiento	Microdureza (HV 0.05)	Color del recubrimiento	Temperatura máxima de servicio (°C)
TiCN	3000	azul-gris	400

### 3.2 Determinación de la dureza de los sustratos

Para la determinación de la dureza se empleó un durómetro, ver figura 3.4, en escala Rockwell C, con una carga de 150 Kg<sub>f</sub>. De las pruebas de dureza es la más utilizada, ya que la dureza se obtiene por medición directa y es apta para todo tipo de materiales. Se suele considerar un ensayo no destructivo por el pequeño tamaño de la huella. Para los materiales duros se emplea como elemento de penetración un cono de diamante de ángulo 120°. Los resultados son en la escala HRC.



**Figura 3.4 Durómetro empleado para determinar la dureza de los sustratos.**

### 3.3 Determinación de la rugosidad

Una parte importante es verificar la rugosidad de las probetas con la finalidad de revisar si cumplen con los valores empleados con los que trabajan los punzones de corte fino. La rugosidad promedio Ra se determinó mediante un rugosímetro SurfTest SJ-400 marca Mitutoyo, ver figura 3.5, donde las muestras son limpiadas con etanol absoluto y colocadas en una mesa anti-vibratoria; el palpador del rugosímetro es

situado en la superficie de la muestra y se ejecuta el ensayo de rugosidad bajo un parámetro Ra en base a la norma ISO 4287:1997 [23] con una longitud de evaluación de 4.0 mm; este ensayo es realizado en tres ocasiones en cada probeta.



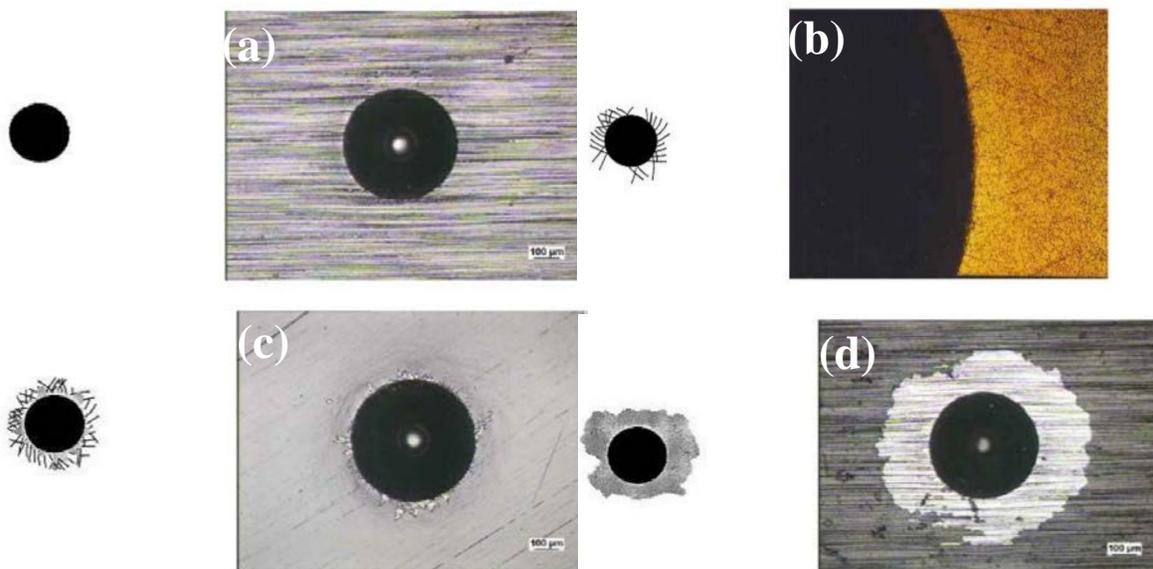
**Figura 3.5 Rugosímetro empleado para la determinación de la rugosidad promedio de probetas.**

### 3.4 Determinación de la adhesión

Las pruebas de adhesión se llevaron a cabo bajo la norma BSi 1071-8 [24], enfocada al análisis cualitativo de la adhesión de recubrimientos cerámicos por medio de indentaciones Rockwell. De acuerdo a esta normativa se establece que debido a que el sustrato es de una dureza superior a 54 HRC, la indentación se realizó en escala Rockwell C a una carga de 150kg<sub>f</sub>, mediante el mismo durómetro empleado para determinar la dureza, figura 3.4. Una vez que las indentaciones son hechas, éstas son observadas bajo microscopio a una magnificación de 100X, y hacer una comparación con el criterio establecido por la norma 1071-8, ver tabla 3.2 y figura 3.6.

**Tabla 3.2 Criterio de adhesión bajo la norma BSi 1071-8.**

<b>Clase</b>	<b>Observación</b>
Clase 0	Sin grietas, sin delaminación adhesiva.
Clase 1	Presencia de grietas, sin delaminación adhesiva del recubrimiento.
Clase 2	Parcial delaminación adhesiva, con o sin grietas.
Clase 3	Completa delaminación adhesiva.



**Figura 3.6** Criterio de adhesión de Norma 1071-8: (a) Clase 0; (b) Clase 1; (c) Clase 2; (d) Clase 3.

### 3.5 Ensayos tribológicos

Los parámetros tribológicos analizados en el presente trabajo son el coeficiente de fricción, tasa de desgaste y los mecanismos de desgaste bajo condiciones de lubricación.

El ensayo de fricción se realizó con un tribómetro CSM Instruments que cuenta con una configuración Pin-On-Disk, figura 3.7, de acuerdo a la norma ASTM G99 [25].



**Figura 3.7** Tribómetro CSM Instruments empleado para los ensayos de fricción.

Ya que los ensayos son bajo condiciones lubricadas, es necesario hacer uso de un dispositivo adicional para el montaje de la probeta. La figura 3.8 muestra este

dispositivo (copa) para la realización del ensayo lubricado. La tabla 3.3 especifica las condiciones empleadas en los ensayos de fricción.



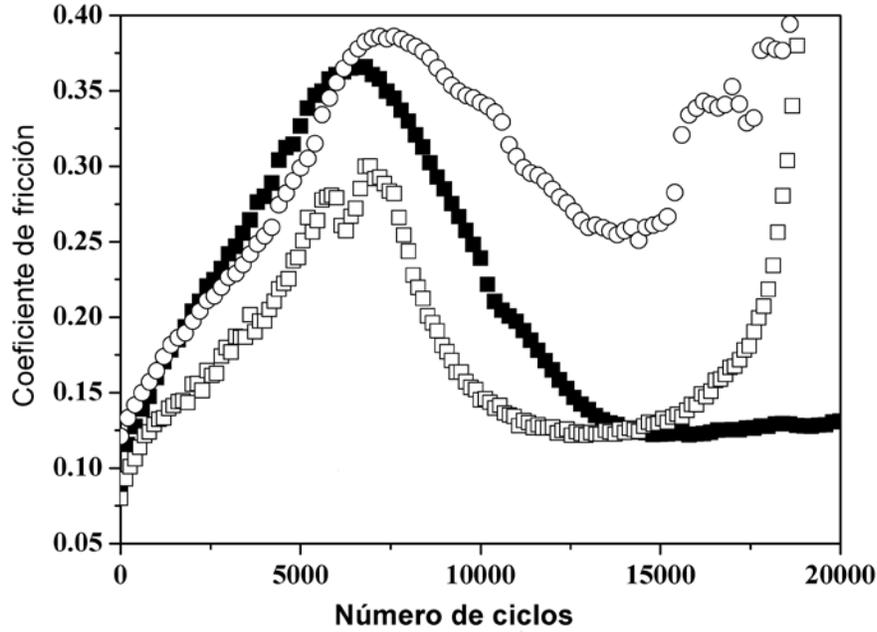
**Figura 3.8 Montaje de probeta lubricada.**

**Tabla 3.3 Condiciones de la pruebas tribológicas, tanto en seco como lubricada.**

Parámetro	Magnitud	
Carga aplicada (N)	10	30
Volumen de lubricante (ml)	70	70
Radio de desgaste (mm)	2	4
Velocidad (cm/s)	5	5
Distancia (m)	1000	1000
Material del pin	WC	WC
Radio del pin (mm)	6	6
Temperatura (°C)	25	25

### 3.5.1 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 se alimenta con los siguientes datos: fuerza aplicada, el radio de huella de desgaste, los materiales de la parte y la contraparte, la distancia a recorrer y la velocidad de deslizamiento, temperatura, etc. Como resultado, el usuario obtiene un gráfico que muestra el comportamiento de coeficiente de fricción, tal como se muestra en la figura 3.9. Se obtiene también el coeficiente de fricción promedio, el máximo y el mínimo y la desviación estándar del mismo.



**Figura 3.9 Gráfico del coeficiente de Fricción en TriboX™.**

### 3.5.2 Medición de ancho de huella

Al finalizar las pruebas, se limpian tanto las probetas como el pin con hexano, eliminando así residuos como resultado de la interacción entre estos y el lubricante adherido de los ensayos. 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 óptico Zeiss, figura 3.10.



**Figura 3.10 Microscopio óptico Marca Zeiss.**

Utilizando el Software ZEN™, se realizan 100 mediciones del ancho de huella para cada huella de desgaste, ver figura 3.11; posteriormente se obtiene un promedio de

dichas mediciones, siendo este promedio el dato que se utiliza para los análisis de volumen perdido y tasa de desgaste.

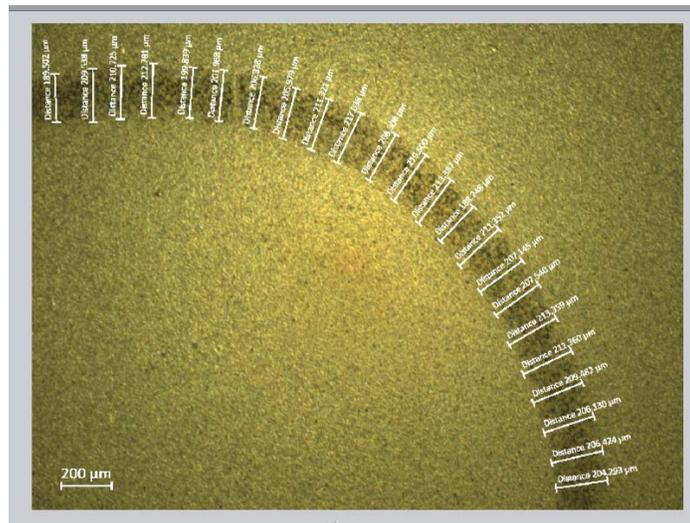


Figura 3.11 Medición del ancho de huella.

### 3.5.3 Volumen perdido y tasa de desgaste

El cálculo del volumen perdido y la tasa de desgaste se llevaron a cabo con las fórmulas que se presentan en la norma ASTM G99, las cuales se presentan a continuación.

$$\text{Volúmen perdido en el pin} = \left(\frac{\pi h}{6}\right) \left[\frac{3d^2}{4} + h^2\right] \quad \text{Ec. 3.1}$$

donde:

- R= El radio de la pista de desgaste
- r= Es el radio el pin
- d= El ancho de la huella de desgaste

$$\text{Volúmen perdido en el disco} = 2\pi R \left[ r^2 \sin^{-1}(d/2r) - (d/4)(4r^2 - d^2)^{1/2} \right] \quad \text{Ec. 3.2}$$

donde:

- R= El radio de la pista de desgaste
- r= Es el radio el pin
- d= El ancho de la huella de desgaste

$$Tasa\ de\ desgaste = \frac{V}{F*s} \quad Ec. 3.3$$

donde:  $V$ = Volumen perdido  
 $F$ = Fuerza aplicada  
 $s$ = Distancia recorrida

De acuerdo a la normativa 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 este caso se considera que el pin no sufre desgaste y el objeto de análisis es el recubrimiento de TiCN.

### 3.5.4 Mecanismos de desgaste

Para analizar los mecanismos de desgaste presentes durante las pruebas de tribología, se empleó microscopía óptica. Se obtienen micrografías de las huellas de desgaste, ver ejemplo en la figura 3.12, y en base a los criterios establecidos en la literatura especializada, se realiza el análisis de los mecanismos de desgaste presentes bajo las condiciones de los ensayos.

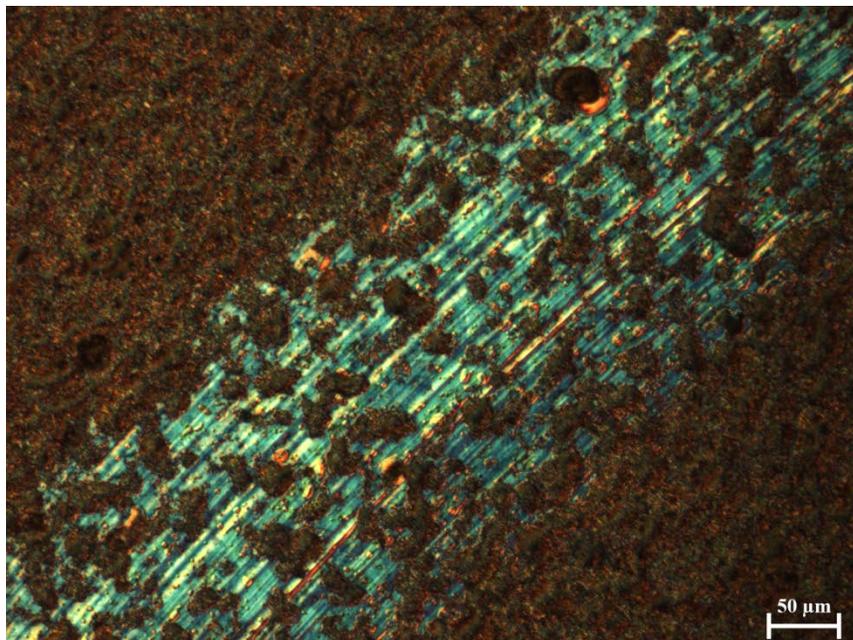


Figura 3.12 Micrografía óptica de la huella de desgaste de un recubrimiento de TiCN.

## Capítulo IV Resultados y discusión

### 4.1 Evaluación de la dureza de los sustratos D2 y M4

En la tabla 4.1 se muestran las durezas de los sustratos D2 y M4, después de ser templados y revenidos. Cabe hacer notar que estos tratamientos térmicos son necesarios antes de ser recubiertos con TiCN.

**Tabla 4.1 Durezas de los sustratos D2 y M4.**

Probeta	Dureza Rockwell C	
	Valor SAE-AISI	Valor ensayo dureza
D2	54-61	60.1
M4	61-66	64

Como puede verse, los valores obtenidos están dentro del rango establecido por SAE-AISI.

### 4.2 Evaluación de la rugosidad promedio del recubrimiento TiCN sobre sustratos D2 y M4

La tabla 4.2 muestra los valores de rugosidad promedio (Ra) del recubrimiento de TiCN sobre los sustratos D2 y M4, siendo 0.4 y 0.53, respectivamente. Estos valores de rugosidad promedio son cercanos entre sí, lo que permitirá realizar una comparación del comportamiento de fricción entre ambos sistemas sustrato/recubrimiento.

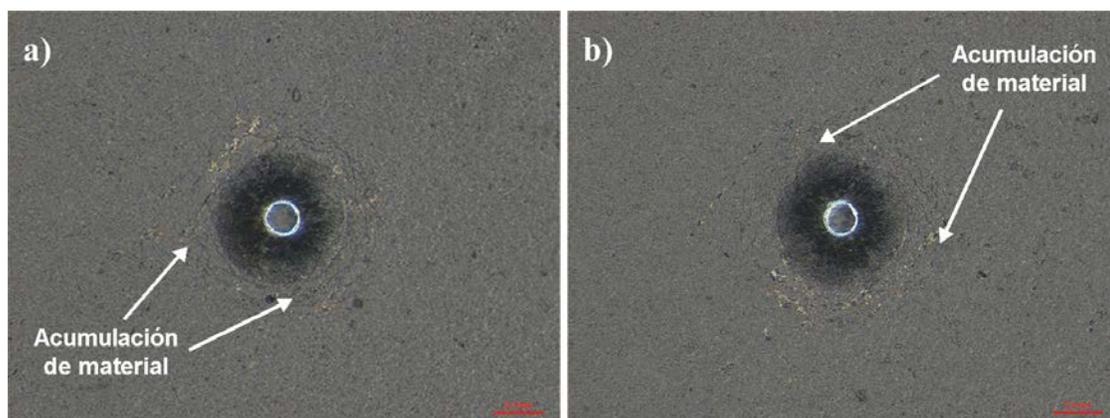
**Tabla 4.2 Valores de Rugosidad para D2, M2, M4, sin huella de desgaste.**

Probeta	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )	Rq ( $\mu\text{m}$ )
D2+TiCN	0.40	0.39	0.30
M4+TiCN	0.53	0.49	0.39

### 4.3 Evaluación de la adhesión del recubrimiento al sustrato

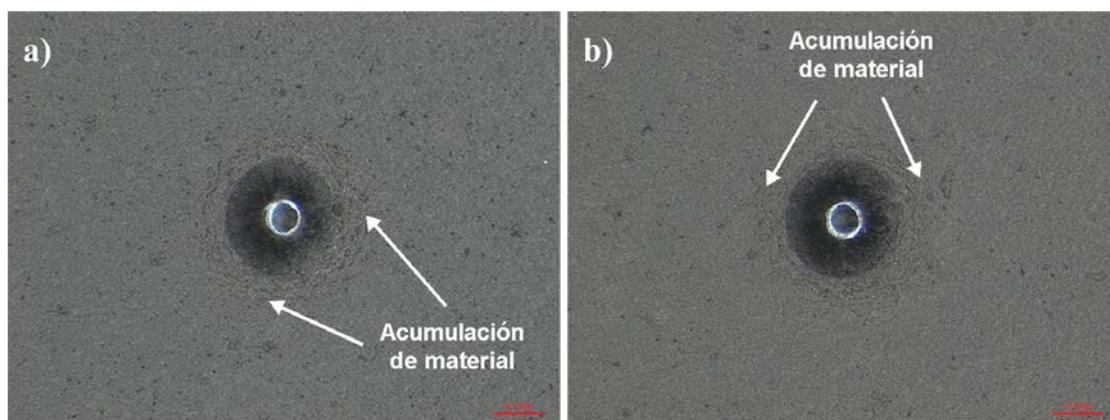
Las figuras 4.1 a y b muestran las huellas de indentación Rockwell C, con una carga de 150 kgf, realizadas sobre el acero D2 recubierto con carbonitruro de titanio (TiCN) con la finalidad de evaluar la adhesión que existe entre el sustrato de acero y el

recubrimiento cerámico de acuerdo a la norma CEN/TS 1071-8. En la figura antes mencionada no se observa delaminación visible del recubrimiento, sin embargo, si se observa un acumulamiento de material en la parte exterior de la huella que está representado como grietas circunferenciales (anillos).



**Figura 4.1 Huella de indentación Rockwell C para la evaluación de la adhesión del sustrato de acero D2 al recubrimiento de TiCN.**

De la misma manera, la figuras 4.2 a y b muestran las huellas de indentación Rockwell C, con una carga de 150 kgf, ensayadas sobre el acero M4 recubierto con carbonitruro de titanio (TiCN) con la finalidad de evaluar la adhesión que existe entre el sustrato de acero y el recubrimiento cerámico de acuerdo a la norma CEN/TS 1071-8. Al igual que en el caso anterior, no se observa delaminación del recubrimiento; sólo se observa un acumulamiento de material en la parte exterior de la huella.



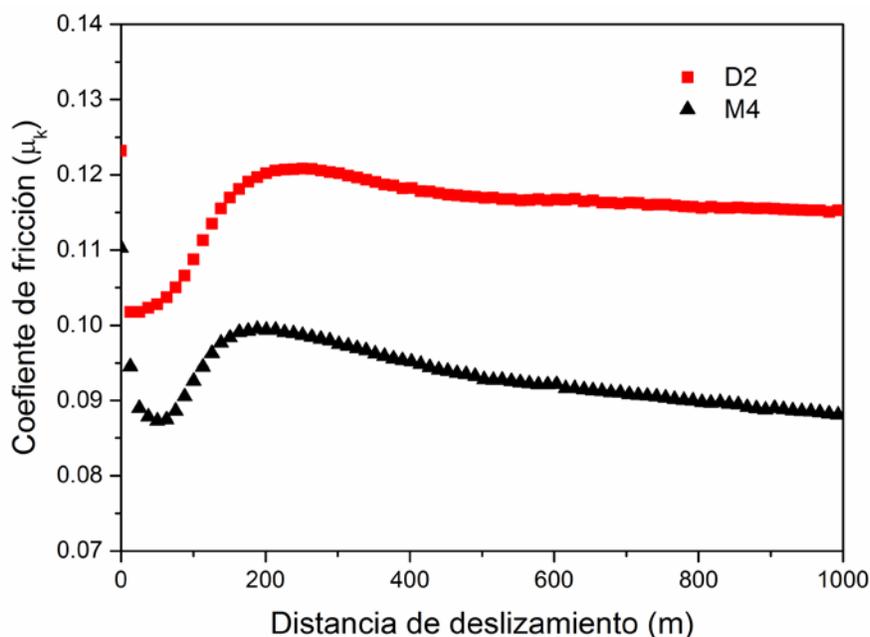
**Figura 4.2 Huella de indentación Rockwell C para la evaluación de la adhesión del sustrato de acero M4 al recubrimiento de TiCN.**

A pesar de que la huella representativa para el TiCN sobre el acero D2 es ligeramente más grande que para el acero M4, no existen diferencias significativas en la clase de adhesión. Esta ligera diferencia en el tamaño de las huellas está relacionada con una menor dureza del acero D2.

La relación que existe entre estas huellas y los patrones descritos en la norma 1071-8 sugieren una adhesión clase 1 que significa una buena adhesión entre sustrato y recubrimiento.

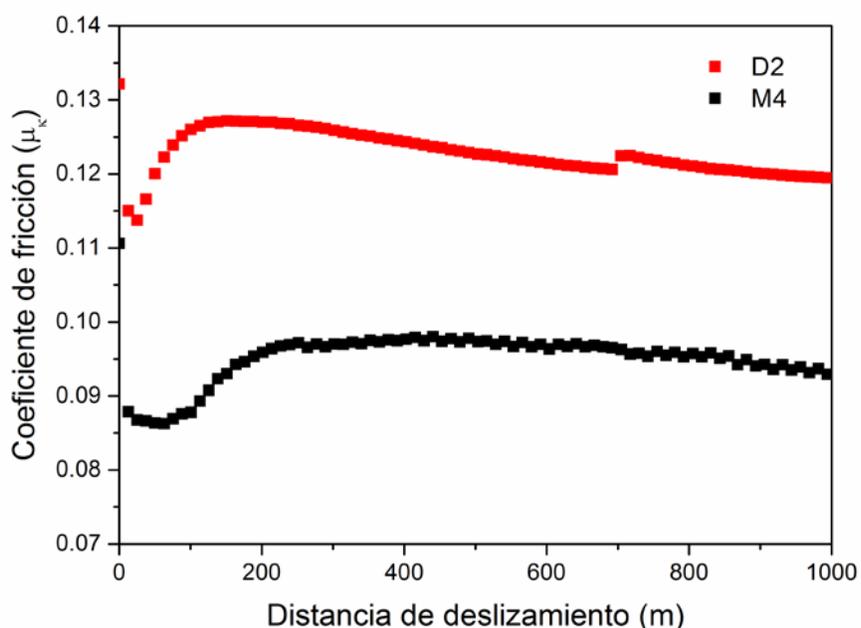
#### 4.4 Coeficiente de fricción para los aceros D2 y M4 recubiertos con TiCN

La figura 4.3 muestra la evolución del coeficiente de fricción como función de la distancia de deslizamiento para los aceros D2 y M4 recubiertos con TiCN en condiciones lubricadas, con una carga aplicada de 10 N. Puede verse que para ambos aceros, D2 y M4, se presenta un comportamiento ascendente aproximadamente hasta los 200 m alcanzando sus valores máximos de 0.12 y 0.1, respectivamente. A partir de esa distancia, el acero D2 tiende a estabilizar su comportamiento hasta el final de la prueba teniendo un coeficiente de fricción promedio de 0.115. Por otro lado, para el acero M4 se observa de manera clara un descenso en la curva hasta obtener un coeficiente promedio de 0.092.



**Figura 4.3. Coeficiente de fricción de los aceros D2 y M4 recubiertos con TiCN a una carga de 10 N.**

La figura 4.4 muestra la evolución del coeficiente de fricción como función de la distancia de deslizamiento para los aceros D2 y M4 recubiertos con TiCN en condiciones lubricadas, con una carga aplicada de 30 N. El acero D2 muestra un comportamiento menos estable, comparado con la prueba a 10N, donde se observa de manera clara su tendencia a disminuir conforme se desarrolla la prueba. Para el acero M4, se observa un comportamiento un poco más estable una vez que ha alcanzado su máximo valor de coeficiente de fricción.



**Figura 4.4** Coeficiente de fricción de los aceros D2 y M4 recubiertos con TiCN a una carga de 30 N.

#### 4.5 Factor de desgaste para los aceros D2 y M4 recubiertos con TiCN

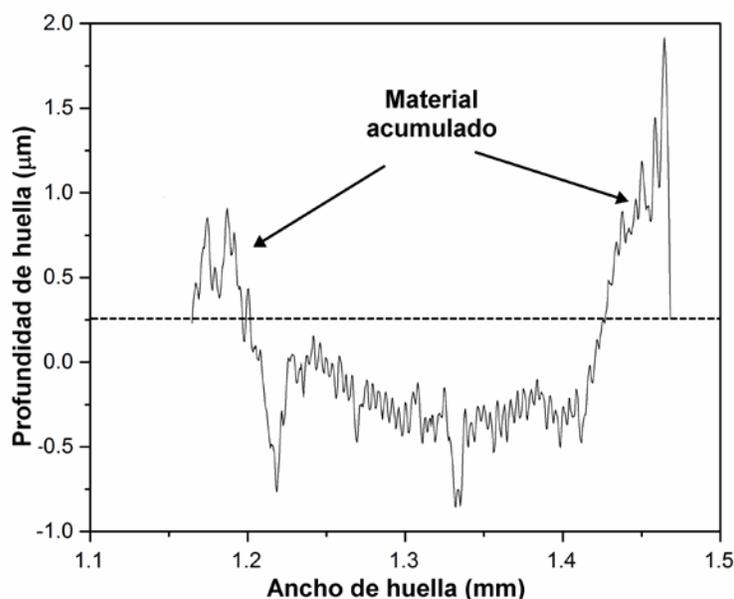
Una vez concluidos los ensayos de fricción, el siguiente paso es obtener el factor de desgaste para cada una de las probetas ensayadas. Como se explicó en el capítulo 3, el factor de desgaste depende de los parámetros de carga aplicada, distancia de deslizamiento y volumen perdido de material durante el ensayo de fricción. El volumen perdido fue determinado a través de mediciones del ancho de huella por medio de microscopía óptica. Cabe recordar que el volumen perdido se determina por las ecuaciones incluidas en la norma ASTM G99, considerando que no hubo desgaste de la contraparte, es decir, no hubo desgaste del pin.

En la tabla 4.3, se muestran los valores de volumen perdido y factor de desgaste para ambos casos de carga, observándose una diferencia en estos valores para los aceros D2 y M4, siendo mayores para el acero D2 para las dos condiciones de carga, 10 y 30 N.

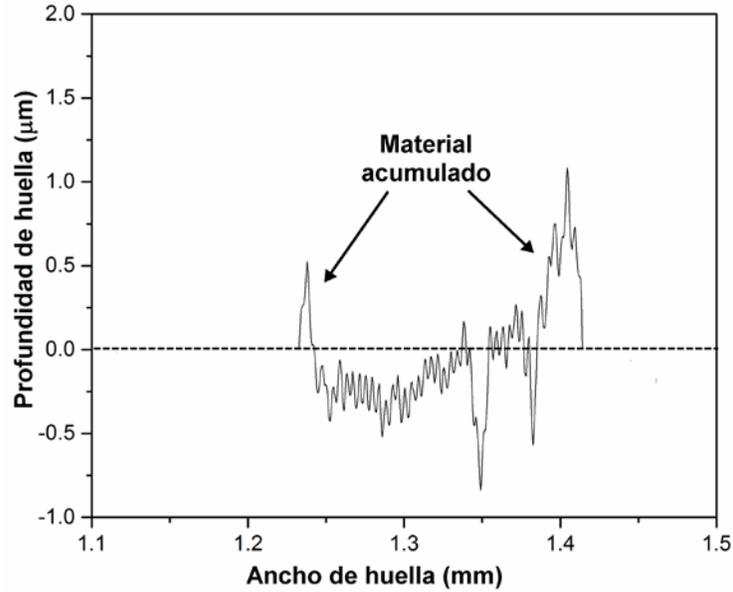
**Tabla 4.3 Coeficiente de fricción, volumen perdido y factor de desgaste para los aceros D2 y M4 con recubrimiento de TiCN.**

Sustrato/ recubrimiento	10 N			30 N		
	Coeficiente de fricción ( $\mu_k$ )	Volumen perdido $V$ , $\text{mm}^3 (\times 10^{-4})$	Factor de desgaste $K$ , $\text{mm}^3/\text{Nm} (\times 10^{-8})$	Coeficiente de fricción ( $\mu_k$ )	Volumen perdido $V$ , $\text{mm}^3 (\times 10^{-4})$	Factor de desgaste $K$ , $\text{mm}^3/\text{Nm} (\times 10^{-8})$
D2 + TiCN	0.1157	39.3	39.3	0.1316	185	61.8
M4 + TiCN	0.0928	30.1	30.1	0.096	131.9	43.98

Las figuras 4.5 y 4.6 muestran los perfiles de las huellas de desgaste para los aceros D2 y M4 recubiertos con TiCN, donde puede observarse que las profundidades de las huellas son muy similares, alrededor de  $0.5 \mu\text{m}$  pero para el acero D2 se tiene un ancho de huella más grande, siendo estas 224 y 205, para el acero D2 y M4, respectivamente.

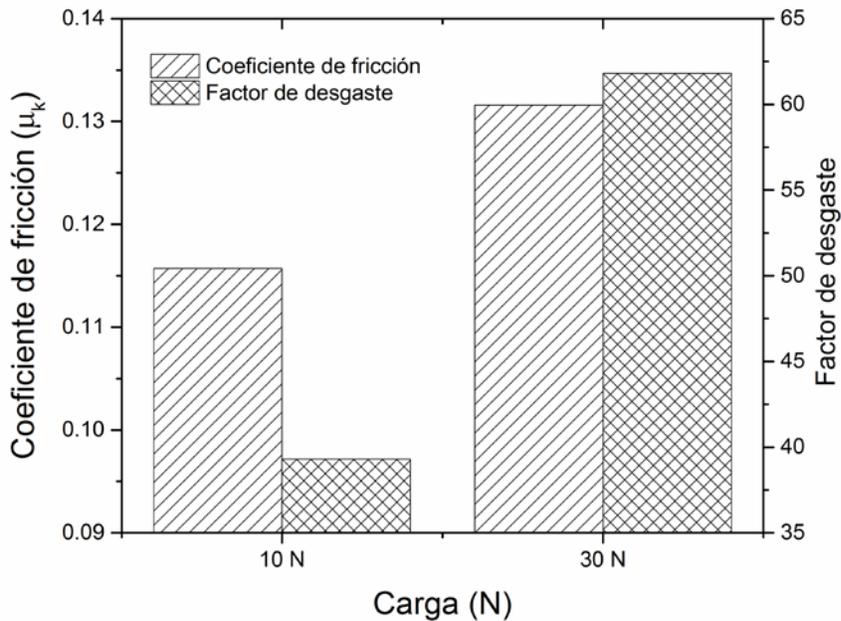


**Figura 4.5 Perfil de la huella de desgaste para el acero D2 recubierto con TiCN, a una carga de 10 N.**



**Figura 4.6 Perfil de la huella de desgaste para el acero M4 recubierto con TiCN, a una carga de 10 N.**

La figura 4.7 muestra el comportamiento del coeficiente de fricción y el factor de desgaste para el acero D2 recubierto de TiCN cuando se incrementa la carga de 10 a 30 N. El coeficiente de fricción se incrementa alrededor de un 14% mientras que el factor de desgaste aumenta aproximadamente un 57%.

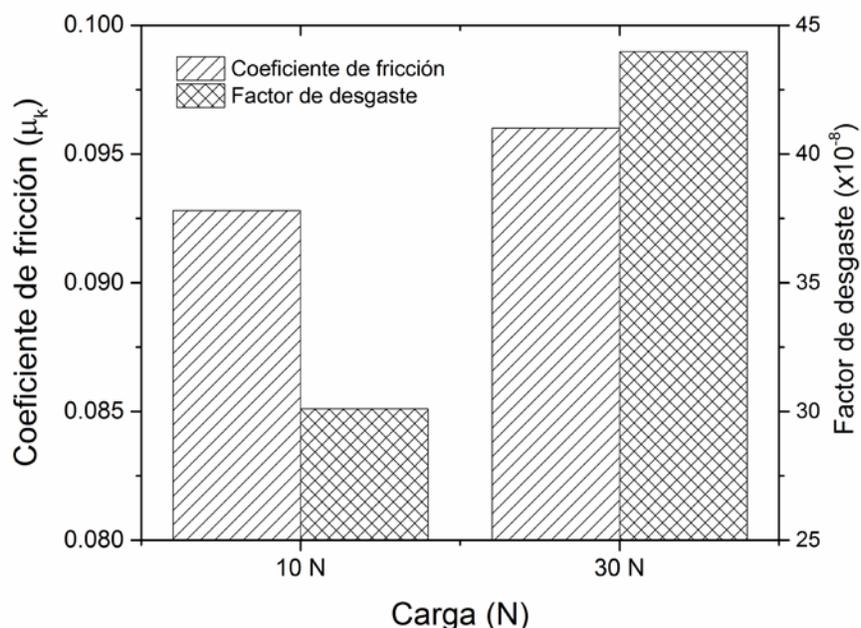


**Figura 4.7 Variación del coeficiente de fricción y del factor de desgaste para el acero D2 recubierto con TiCN conforme se incrementa la carga aplicada.**

Un mayor coeficiente de fricción y factor de desgaste pueden estar relacionados con el hecho de que el lubricante no es capaz de absorber igual cantidad de carga permitiendo así un mayor contacto entre los pares, es decir, entre el pin y el sustrato recubierto con TiCN, que se traduce en una mayor cantidad de partículas removidas aumentando el factor de desgaste. Parte de esas mismas partículas quedan atrapadas entre los pares en contacto generando así un mayor coeficiente de fricción.

La figura 4.8 muestra el comportamiento del coeficiente de fricción y el factor de desgaste para el acero M4 recubierto de TiCN cuando se incrementa la carga de 10 a 30 N. En este caso, el coeficiente de fricción tan solo se incrementa un 3.5% mientras que el factor de desgaste aumenta un 46%.

Es evidente que el acero M4 recubierto con TiCN tiene un mejor comportamiento a la fricción y al desgaste cuando se le compara con el acero D2, en ambos casos de carga, 10 y 30N.



**Figura 4.8 Variación del coeficiente de fricción y del factor de desgaste para el acero M4 recubierto con TiCN conforme se incrementa la carga aplicada.**

#### 4.6 Mecanismos de desgaste para los aceros D2 y M4 recubiertos con TiCN

Las figuras 4.9 a y b muestran las superficies desgastadas del acero D2 recubierto con TiCN. En ambos casos de carga, se aprecian de manera clara surcos en dirección del deslizamiento, mismos que son característicos de un desgaste por abrasión. En los extremos de las huellas se observa también un acumulamiento de material, ver figura 4.5, que puede deberse a deformación plástica tanto del recubrimiento como del sustrato.

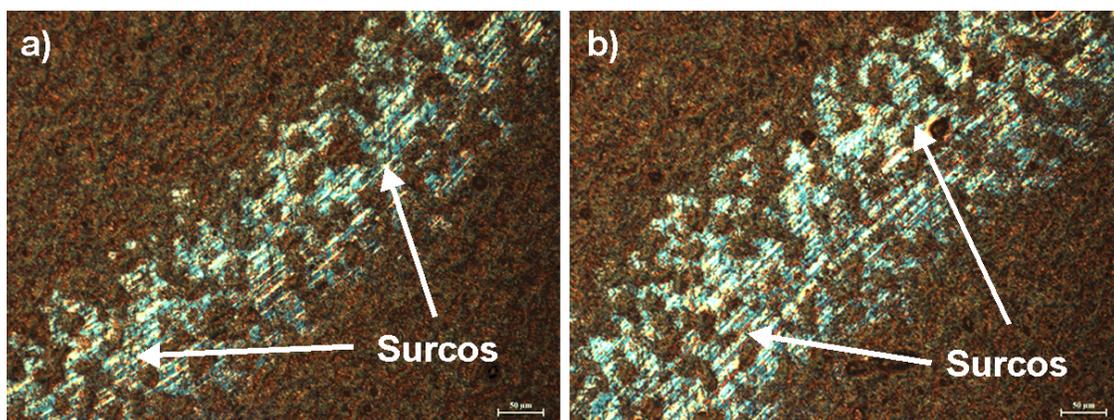


Figura 4.9 Micrografías de las huellas de desgaste del acero D2 recubierto con TiCN: a) 10 N y b) 30N.

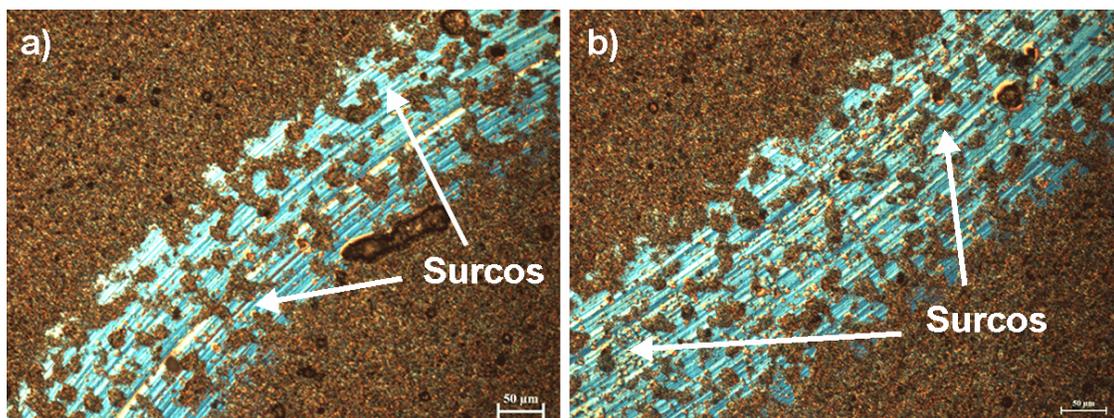


Figura 4.10 Micrografías de las huellas de desgaste del acero M4 recubierto con TiCN: a) 10 N y b) 30 N.

Las figuras 4.10 a y b muestran las superficies desgastadas del acero M4 recubierto con TiCN. También, en ambos casos de carga se aprecian los surcos característicos del desgaste abrasivo, en dirección del deslizamiento. Igual que en el caso anterior,

se observa deformación plástica de material, ver figura 4.6, que puede ser tanto del recubrimiento como del sustrato.

## Conclusiones

En el presente proyecto se reportó el comportamiento tribo-mecánico de aceros para herramienta D2 y M4 recubiertos con carbonitruro de titanio (TiCN) a través de ensayos de indentación para evaluar la adhesión de este recubrimiento a los diferentes sustratos empleados y ensayos de fricción para obtener los coeficientes de fricción, factores de desgaste y mecanismos de desgaste bajo las condiciones establecidas para los ensayos. Analizando los resultados de las pruebas mencionadas se puede concluir que:

En las huellas de indentación para cada sustrato recubierto con TiCN no se observa diferencia apreciable en la adhesión, sin embargo, si existe una huella ligeramente más grande cuando se trata del sustrato D2; esto puede deberse a su menor dureza. El análisis de las huellas sugiere una adhesión clase 1 la cual está catalogada como una buena adhesión.

Con respecto al coeficiente de fricción, este muestra un pequeño incremento de 14% y 3.5 % para los aceros D2 y M4, respectivamente, conforme se incrementa la carga de 10 N hasta 30 N. Por otro lado, el factor de desgaste presenta incrementos de hasta 1.57 y 1.46 veces para los aceros D2 y M4, respectivamente, cuando la carga aplicada se aumenta de 10 hasta 30 N. El aumento en el coeficiente de fricción y los factores de desgaste cuando se incrementa la carga aplicada puede deberse a que el lubricante está permitiendo un mayor contacto entre los pares en contacto promoviendo un mayor factor de desgaste y un mayor coeficiente de fricción.

Respecto a los mecanismos de desgaste presentes, el desgaste abrasivo y la deformación plástica están presentes en ambas condiciones de carga.

En base a lo anteriormente descrito, se concluye que el acero M4 recubierto con TiCN presenta un mejor comportamiento a la fricción y al desgaste cuando se le compara con el acero D2, en los dos casos de carga, 10 y 30N.

## Referencias

- [1] S. Thipprakmas, Improving wear resistance of sprocket parts using a fine-blanking process, *Wear* 271 (2011) 2396–2401.
- [2] P. Peetsalu, M. Saarna, E. Adoberg, E. Kulper, L. Lind, P. Kulu P, Evaluation of punch wear resistance during industrial test. In: Proceedings of acta metallurgica slovacca conference, Starà Lesnà, Slovak Republic; (2010) 105–110.
- [3] V. Leskovsek, B. Ule, Improved vacuum heat-treatment for fine-blanking tools from high-speed steel M2, *Journal of Materials Processing Technology* 82 (1998) 89–94.
- [4] S. Surviliene, S. Bellozor, M. Kurtinaitiene, V.A. Safonov, Protective properties of the chromium–titanium carbonitride composite coatings, *Surface and Coatings Technology*, Volume 176 (2004) 193-201
- [5] O. Knotek, F. Löffler, G. Krämer, Deposition, properties and performance behaviour of carbide and carbonitride PVD coatings, *Surface and Coatings Technology* 61 (1993) 320-325.
- [6] E. Bergmann, H. Kaufmann, R. Schmid, J. Vogel, Ion-plated titanium carbonitride films, *Surface and Coatings Technology* 42 (1990) 237-251.
- [7] Chehung Wei, Jen Fin Lin, Tsae-Hwa Jiang, Chi-Fong Ai, Tribological characteristics of titanium nitride and titanium carbonitride multilayer films: Part II The effect of coating sequence on tribological properties, *Thin Solid Films* 381 (2001) 104-118.
- [8] H. L. Wang, J. L. He, M. H. Hon, Sliding wear resistance of TiCN coatings on tool steel made by plasma-enhanced chemical vapour deposition, *Wear* 169 (1993) 195-200.
- [9] Y. L. Su, W. H. Kao, Tribological behavior and wear mechanisms of TiN/TiCN/TiN multilayer coatings, *Materials Engineering and Performance* 7 (1998) 601-612.
- [10] J. D. Bressan, R. Hesse, E. M. Silva Jr., Abrasive wear behavior of high speed steel and hard metal coated with TiAlN and TiCN, *Wear* 250 (2001) 561-568.

- [11] F. Velasco, E. Gordo, R. Isabel, E. M. Ruiz-Navas, A. Bautista, J. M. Torralba, Mechanical and wear behaviour of high-speed steels reinforced with TiCN particles, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 19 (2001) 319-323.
- [12] S. J. Bull, D. G. Bhat, M. H. Staia, Properties and performance of commercial TiCN coatings. Part 2: tribological performance, *Surface and Coatings Technology* 163-164 (2003) 507-514.
- [13] B. Zhu, G. L. Kelly, J. Mardel, An investigation of tribological properties of CN and TiCN coatings, *Materials Engineering and Performance* 13 (2004) 481-487.
- [14] Junhu Meng, Jinjun Lu, Jingbo Wang, Shengrong Yang, Tribological behavior of TiCN-based cermets at elevated temperatures, *Materials Science and Engineering* 418 (2006) 68–76.
- [15] I. Zukerman, A. Raveh, Y. Landau, R. Weiss, R. Shneck, Y. Shneur, H. Kalman, J.E. Klemberg-Saphieha, L. Martinu, Tribological properties of duplex treated TiN/TiCN coatings on plasma nitrided PH15-5 steel, *Surface and Coatings Technology* 201 (2007) 6171–6175.
- [16] Qianzhi Wang, Fei Zhou, Xiaonan Wang, Kangmin Chen, Meiling Wang, Tao Qian, Yanxia Li, Comparison of tribological properties of CrN, TiCN and TiAlN coatings sliding against SiC balls in water, *Applied Surface Science* 257 (2011) 7813-7820.
- [17] Fjodor Sergejev, Priidu Peetsalu, Alina Sivitski, Mart Saarna, Eron Adoberg, Surface fatigue and wear of PVD coated punches during fine blanking operation, *Engineering Failure Analysis* 18 (2011) 1689-1697.
- [18] Ping Chuan Siow, Jaharah A. Ghani, Mariyam Jameelah Ghazali, Talib Ria Jaafar, Mohamad Asri Selamat, Che Hassan Che Haron, Characterization of TiCN and TiCN/ZrN coatings for cutting tool application, *Ceramics International* 39 (2013) 1293–1298.
- [19] Lei Shan, Yongxin Wang, Jinlong Li, He Li, Xuedong Wu, Jianmin Chen, Tribological behaviours of PVD TiN and TiCN coatings in artificial seawater, *Surface and Coatings Technology* 226 (2013) 40-50.

- [20] Oberg, E.; Jones, Franklin D.; Horton, H. L.; Ryffel, Henry H.: Machinery's Handbook, Industrial Press Inc.; 26th Edition (January 4, 2000), pp. 1332-1336.
- [21] Holmberg Kenneth, Matthews Allan; Coatings Tribology Properties, Mechanism, Techniques and Applications in Surface Engineering, Elsevier, 2nd Edition (2009).
- [22] Kuhn Howard, ASM Handbook Volume 8: Mechanical Testing and Evaluation, ASM International, (2000).
- [23] ISO 4287:1997; Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Terms, definitions and surface texture parameters.
- [24] BSi 1071-8:2004; Advanced technical ceramics – Methods of test for ceramics coatings. Part 8: Rockwell indentation test for evaluation of adhesion.
- [25] ASTM G99; Standard test method for wear testing with a pin on disk apparatus.