



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CELAYA

**ESTUDIO DEL DESEMPEÑO TRIBOLÓGICO-
MECÁNICO DE CAPAS DURAS SOBRE ACEROS
GRADO HERRAMIENTA**

PRESENTA:

LUIS DANIEL AGUILERA CAMACHO

ASESORES:

DRA. KARLA JUDITH MORENO BELLO

Septiembre de 2018

ÍNDICE

Índice de figuras	vii
Índice de tablas	x
Resumen	xi
Abstract	xiii
Introducción	xv
Capítulo 1 Marco de referencia	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del problema	7
1.3 Justificación	8
1.4 Objetivo general y específicos	9
Capítulo 2 Marco teórico	10
2.1 Aceros para herramienta	11
2.1.1 Aceros para herramientas para trabajo en frío	12
2.1.2 Aceros para herramientas para trabajo en caliente (Grupo H)	13
2.1.3 Aceros para herramientas de alta velocidad	14
2.2 Modificación superficial de aceros para herramienta	17
2.2.1 Recubrimientos duros	19
2.2.2 Nitruración	21
2.3 Dureza superficial y dureza compuesta en recubrimientos duros	22
2.4 Adhesión del recubrimiento al sustrato	25
2.4.1 Prueba por desprendimiento	26
2.4.2 Pruebas de indentación	27
2.4.3 Prueba por scratch	27
2.5 Tribología	28
2.5.1 Fricción	29
2.5.2 Desgaste	31
2.5.3 Lubricación	33
Capítulo 3 Metodología	36
3.1 Metodología para el análisis tribomecánico de aceros recubiertos con TiN y TiCN	37
3.1.1 Preparación de las probetas	37
3.1.2 Deposición de los recubrimientos	38
3.1.3 Medición del espesor del recubrimiento	40
3.1.4 Ensayos de dureza superficial y dureza compuesta	40
3.1.5 Evaluación de la adhesión de los recubrimientos duros al sustrato	41
3.1.6 Ensayo de fricción y desgaste	42

3.1.7	Cálculo del factor de desgaste	45
3.1.8	Determinación de los mecanismos de desgaste	46
3.2	Metodología para el análisis de la influencia de la rugosidad superficial en el comportamiento tribológico de un acero H13 nitrurado	46
3.2.1	Preparación de las probetas	47
3.2.2	Ensayo de rugosidad superficial	48
3.2.3	Tratamiento térmico y termoquímico	49
3.2.4	Ensayo de fricción y desgaste	49
Capítulo 4 Resultados y discusión		50
<i>Parte A: Estudio tribomecánico de aceros para herramienta recubiertos con carbonitruro de titanio (TiCN)</i>		50
4.1	Análisis de dureza del recubrimiento	53
4.2	Determinación de la clase de adhesión	55
4.3	Análisis tribológico	57
4.3.1	Coeficiente de fricción, factor de desgaste y mecanismos de desgaste de los aceros D2, M2 y M4 sin recubrimiento.	57
4.3.2	Coeficiente de fricción, factor de desgaste y mecanismos de desgaste de los aceros D2, M2 y M4 con recubrimiento de TiCN.	62
<i>Parte B: Estudio tribomecánico del acero para herramienta H13 recubierto con nitruro de titanio (TiN) y carbonitruro de titanio (TiCN)</i>		68
4.4	Análisis de dureza de los recubrimientos	70
4.5	Determinación de la clase de adhesión	73
4.6	Análisis tribológico	74
4.6.1	Coeficiente de fricción, factor de desgaste y mecanismos de desgaste de los recubrimientos de TiN y TiCN en condiciones en seco.	74
4.6.2	Coeficiente de fricción, factor de desgaste y mecanismos de desgaste de los recubrimientos de TiN y TiCN en condiciones lubricadas.	78
<i>Parte C: Influencia de la rugosidad superficial en el desempeño tribológico del acero para herramientas H13 nitrurado</i>		83
4.7	Análisis tribológico en condiciones en seco.	84
4.8	Análisis tribológico en condiciones lubricadas.	89
Conclusiones		99
Referencias		102
Anexos		110
Anexo A	Artículo (JCR) "Tribological performance of uncoated and TiCN-coated D2, M2 and M4 steels under lubricated condition."	
Anexo B	Artículo (JCR) "Tribological performance of TiN and TiCN coatings on a working tool steel."	

- Anexo C Artículo (LATINDEX) "Influencia de la rugosidad en el comportamiento tribológico de un acero H13 nitrurado."
- Anexo D Artículo (LATINDEX) "Estudio de fricción y desgaste de un acero H13 recubierto con TiCN."
- Anexo E Poster "Friction and wear performance of TiCN on M4 high speed steel for its use in fine blanking process."
- Anexo F Poster "Influence of roughness surface modification on friction and wear behavior of nitride H13 tool steel."
- Anexo G Regresiones polinomiales para el coeficiente de fricción y factor de desgaste, en acero H13 nitrurado, por el método de los mínimos cuadrados.
- Anexo H Determinación del régimen de lubricación de los aceros nitrurados con diferentes calidades superficiales.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Esquema del modelo de dureza de Chicot y Lesage.	24
Figura 2.2	Prueba de adhesión por el método de desprendimiento.	27
Figura 2.3	Esquema y equipamiento de la prueba de scratch.	28
Figura 2.4	Esquema de un tribosistema.	29
Figura 2.5	Area de contacto, a) aparente; b) real.	29
Figura 2.6	Efecto del incremento de la carga sobre el área real de contacto. H y h , son las penetraciones de las crestas, donde $H > h$.	30
Figura 2.7	Regímenes de lubricación.	34
Figura 3.1	Esquema de la metodología para el análisis tribomecánico de capas duras sobre sustratos de acero para herramientas.	38
Figura 3.2	Plano de fabricación de las probetas.	39
Figura 3.3	Equipo utilizado para el pulido de las probetas.	39
Figura 3.4	Preparación de las probetas para medición de espesor de recubrimiento: a) cortes transversales de las probetas y b) probetas montadas en baquelita.	40
Figura 3.5	a) Microscopio SEM Hitachi 1510 y b) medición del espesor del recubrimiento.	40
Figura 3.6	a) Indentador Universal de Sistemas de Medición Inteligentes y b) micrografía óptica (100X) de la huella de indentación.	41
Figura 3.7	Criterio cualitativo de adhesión en base a la norma CEN/TS 1071-8: (a) Clase 0, (b) Clase 1, (c) Clase 2 y (d) Clase 3.	42
Figura 3.8	Tribómetro CSM Instruments con configuración pin-on-disk.	43
Figura 3.9	Configuración del dispositivo de sujeción de la probeta: a) en seco y b) lubricado.	44
Figura 3.10	Gráfica del coeficiente de fricción mediante el software Tribosoft™.	44
Figura 3.11	a) Huella de desgaste y b) perfil de huella para evaluar el área de la sección transversal.	45
Figura 3.12	a) Microscopio SEM, b) micrografía SEM de la huella de desgaste y c) análisis EDS dentro de la huella de desgaste.	46
Figura 3.13	Esquema de la metodología para el análisis tribológico de aceros nitruados.	47
Figura 3.14	a) Rugosímetro y b) dirección de medición de la rugosidad en las probetas.	48
Figura 4.1	Micrografías ópticas (500X) de los aceros D2, M2 y M4 (a, b y c), respectivamente.	51
Figura 4.2	Micrografías SEM del espesor del recubrimiento de TiCN sobre los aceros D2, M2 y M4 (a, b y c), respectivamente.	52
Figura 4.3	Micrografías SEM del recubrimiento de TiCN sobre los aceros D2 y M2(a y c) y sus respectivos análisis EDS (b y d).	53

Figura 4.4	Microdureza como función de la carga aplicada para los tres aceros recubiertos con TiCN.	54
Figura 4.5	Relación t/L como función de la carga aplicada para los tres aceros recubiertos con TiCN.	55
Figura 4.6	Micrografías ópticas (100x) de las huellas de indentación Rockwell C sobre los aceros D2, M2 y M4 con recubrimiento de TiCN, respectivamente.	56
Figura 4.7	Evolución del coeficiente de fricción en función de la distancia de deslizamiento para los aceros D2, M2 y M4 bajo condiciones lubricadas.	58
Figura 4.8	Perfiles de huella y micrografías ópticas (100x) de los anchos de huella del área desgastada para los aceros D2 (a y d), M3 (b y e) y M4 (c y f).	59
Figura 4.9	Micrografías ópticas (200x) de las huellas de desgaste para los aceros sin recubrimiento: a) D2, b) M2 y c) M4.	61
Figura 4.10	Micrografías SEM y análisis EDS de la superficie desgastada del acero D2 sin recubrimiento.	62
Figura 4.11	Evolución del coeficiente de fricción en función de la distancia de deslizamiento para los aceros D2, M2 y M4 recubiertos con TiCN bajo condiciones lubricadas.	63
Figura 4.12	Perfiles de huella y micrografías ópticas (100x) de los anchos de huella del área desgastada para los aceros D2 (a y d), M3 (b y e) y M4 (c y f).	65
Figura 4.13	Micrografías ópticas (200x) de las huellas de desgaste para los aceros recubiertos con TiCN: a) D2, b) M2 y c) M4.	66
Figura 4.14	Micrografías SEM y análisis EDS de la superficie desgastada del acero D2 recubierta con TiCN.	67
Figura 4.15	Micrografías SEM de los espesores de los recubrimientos de: a) TiN y b) TiCN.	69
Figura 4.16	Concentración de elementos de los recubrimientos de: a) TiN y b) TiCN.	70
Figura 4.17	Microdureza como función de la carga aplicada para los recubrimientos de TiN y TiCN.	71
Figura 4.18	Parámetro β como función de la carga aplicada para los recubrimientos de TiN y TiCN.	72
Figura 4.19	Micrografías SEM (100x y 500x) de las huellas de indentación Rockwell D sobre los recubrimientos de TiN (a y b) y TiCN (c y d).	73
Figura 4.20	Evolución del coeficiente de fricción en función de la distancia de deslizamiento para los recubrimientos de TiN y TiCN bajo condiciones en seco.	75
Figura 4.21	Factores de desgaste de los recubrimientos de TiN y TiCN en condiciones en seco.	76
Figura 4.22	Perfiles de huella y micrografías SEM (45x) de los anchos de huella del área desgastada para los recubrimientos de TiN (a y c) y TiCN (b y d), en condiciones en seco.	76

Figura 4.23	Micrografías SEM y análisis EDS de la superficie desgastada de los recubrimientos de TiN (a y c) y TiCN (b y d), en condiciones en seco.	78
Figura 4.24	Evolución del coeficiente de fricción en función de la distancia de deslizamiento para los recubrimientos de TiN y TiCN bajo condiciones lubricadas.	79
Figura 4.25	Factores de desgaste de los recubrimientos de TiN y TiCN en condiciones lubricadas.	80
Figura 4.26	Perfiles de huella, micrografías SEM (45x) y análisis EDS de los anchos de huella del área desgastada para los recubrimientos de TiN (a, b y c) y TiCN (d, e y f), en condiciones lubricadas.	81
Figura 4.27	Coefficiente de fricción de las probetas S1, S2 y S3 como función de la distancia de deslizamiento.	84
Figura 4.28	Perfiles de la huella de desgaste: a) S1, b) S2, c) S3 y micrografías SEM (45X) de los anchos de huella de desgaste: d) S1, e) S2 y f) S3.	85
Figura 4.29	Micrografías SEM (100x) y ópticas (200x) de las superficies desgastadas: S1 (a y d), S2 (b y e) y S3 (c y f).	87
Figura 4.30	Micrografías SEM (100x) y análisis EDS de las superficies desgastadas: S1 (a y d), S2 (b y e) y S3 (c y f).	88
Figura 4.31	Coefficiente de fricción de las probetas con rugosidades L1, L2 y L3 como función de la distancia de deslizamiento.	89
Figura 4.32	Perfiles de la huella de desgaste: a) L1, b) L2, c) L3 y micrografías SEM (45X) de los anchos de huella de desgaste: d) L1, e) L2 y f) L3.	91
Figura 4.33	Micrografías SEM (500x) y análisis EDS de las superficies desgastadas: L1 (a y d), L2 (b y e) y L3 (c y f).	92
Figura 4.34	Coefficiente de fricción como función de la distancia de deslizamiento.	94
Figura 4.35	Comportamiento de coeficiente de fricción en función de la rugosidad superficial.	94
Figura 4.36	Ajuste de la curva del coeficiente de fricción en función de la rugosidad superficial.	95
Figura 4.37	Perfiles de huella y factores de desgaste en función de la rugosidad superficial.	96
Figura 4.38	Ajuste de la curva del factor de desgaste en función de la rugosidad superficial.	96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Principales grupos de aceros para herramientas y su simbología según AISI.	12
Tabla 2.2	Composición química del acero AISI D2 y sus principales características.	15
Tabla 2.3	Composición química del acero AISI M2 y sus principales características.	16
Tabla 2.4	Composición química del acero AISI M4 y sus principales características.	17
Tabla 2.5	Composición química del acero AISI H13 y sus principales características.	18
Tabla 3.1.	Composición química y dureza de los sustratos de acero tipo D2, M2, M4 y H13.	37
Tabla 3.2	Especificaciones de certificado de calidad del recubrimiento del TiCN y TiN.	39
Tabla 3.3	Observaciones en las clases de adhesión de un recubrimiento duro al sustrato según la norma CEN/TS 1071-8.	42
Tabla 3.4	Selección de la carga de indentación según la dureza del sustrato.	42
Tabla 3.5	Velocidad de deslizamiento y temperatura en función de la condición de lubricación para los diferentes ensayos de fricción.	43
Tabla 3.6	Tamaño de abrasivo y tiempo de lijado en la preparación superficial.	48
Tabla 4.1	Composición química (wt.%) y dureza (HRC) de los aceros D2, M2 y M4.	51
Tabla 4.2	Valores de la diagonal de indentación Vickers, dureza del recubrimiento y relación t/L para cada uno de los sustratos recubiertos con TiCN.	54
Tabla 4.3	Valores promedio de coeficiente de fricción, volumen perdido y factor de desgaste para los aceros D2, M2 y M4.	58
Tabla 4.4	Valores promedio de coeficiente de fricción, volumen perdido y factor de desgaste para los aceros D2, M2 y M4 con recubrimiento de TiCN.	63
Tabla 4.5	Valores de la diagonal de indentación Vickers, dureza del recubrimiento y el parámetro β para los recubrimientos de TiN y TiCN.	71
Tabla 4.6	Dureza, relación H^3/E^2 , coeficiente de fricción promedio y factor de desgaste para los recubrimientos de TiN y TiCN.	82
Tabla 4.7	Valores promedio del coeficiente de fricción y factor de desgaste para las muestras S1, S2 y S3.	86
Tabla 4.8	Valores promedio del coeficiente de fricción y factor de desgaste las probetas lubricadas L1, L2 y L3.	90
Tabla 4.9	Valores del coeficiente de fricción y factor de desgaste para todas las probetas lubricadas.	93

Resumen

El presente trabajo se centra en el análisis tribológico-mecánico de capas duras, nitruradas mediante tratamiento termoquímico y recubrimientos de carbonitruro de titanio (TiCN) y nitruro de titanio mediante deposición física de vapor sobre aceros grado herramienta AISI D2, M2, M4 y H13. Estas capas son ampliamente utilizadas para incrementar la vida útil de los herramientas en procesos de formado de metales como forja en caliente y corte fino, ya que dichos herramientas están sometidos a daño mecánico y desgaste constante, tomando en cuenta que el desgaste de herramientas tiene influencia directa en la productividad, eficiencia, confiabilidad y calidad de los productos manufacturados. Este trabajo de investigación fue dividido en tres partes:

La primera parte estudió el comportamiento de desgaste y fricción de los aceros D2, M2 y M4 sin recubrir y recubiertos con TiCN, mismos que fueron evaluados mediante una prueba de pin-on-disk en condiciones de lubricación. Con el fin de evaluar la influencia del lubricante en el desempeño del desgaste, también se realizaron pruebas de fricción en seco. Los resultados mostraron que los coeficientes de fricción fueron muy similares para los aceros sin recubrir y recubiertos con TiCN. Bajo condiciones de lubricación, el acero de herramienta D2 sin recubrir exhibió el menor coeficiente de fricción, pero el acero D2 recubierto con TiCN presentó el menor factor de desgaste. La abrasión fue el principal mecanismo de desgaste para todas los tribo-pares. Además, se llevaron a cabo mediciones de microdureza y se encontró una influencia del sustrato de acero en la dureza de los recubrimientos. Además, se llevó a cabo una prueba de adhesión que indicó una buena adhesión, clase 1 según la norma CEN / TS 1071-8, entre los sustratos y los recubrimientos de TiCN.

La segunda parte de la investigación se centró en el desempeño tribológico de recubrimientos de TiN y TiCN en un acero grado herramienta AISI H13. Además, se llevaron a cabo pruebas de adhesión y microdureza. La calidad de la adhesión de ambos recubrimientos resultó en la clase 1, de acuerdo con el estándar CEN / TS 1071-8. La microdureza compuesta se investigó mediante el análisis de la indentación relativa (β). Las pruebas de pin-on-disk se realizaron en condiciones secas y lubricadas a 100°C. Se obtuvieron bajos coeficientes de fricción de $\mu_k = 0.08$ para TiN y $\mu_k = 0.03$ para TiCN en condiciones lubricadas. Los mecanismos de desgaste se analizaron mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) observándose el desgaste

abrasivo como el principal mecanismo de desgaste en condiciones en seco, mientras que en condiciones de lubricación las marcas de desgaste apenas fueron perceptibles.

La última parte de la investigación abordó el comportamiento tribológico de un acero AISI H13 con diferentes calidades superficiales, con rugosidades desde $0.03 \mu\text{m}$ hasta $0.41 \mu\text{m}$ bajo condiciones de lubricación encontrándose que el coeficiente de fricción disminuyó conforme se incrementó la rugosidad superficial en el rango desde 0.03 hasta $0.27 \mu\text{m}$ mientras que el factor de desgaste tuvo el mismo comportamiento pero solo en el rango de 0.03 hasta $0.11 \mu\text{m}$ ya que a partir de este valor, éste aumentó conforme se incrementó la rugosidad superficial.

Abstract

The present work focuses on the tribological-mechanical analysis of hard films, nitrided by thermo-chemical heat treatment and hard coatings of titanium carbonitride (TiCN) and titanium nitride (TiN) by physical vapor deposition on tool-grade steels AISI D2, M2, M4 and H13. These films are widely used to increase the useful life of the tooling in metal forming processes such as hot forging and fine blanking, since these tools are subject to mechanical damage and wear, taking into account that tooling wear has an influence in the productivity, efficiency, reliability and quality of the manufactured products. This investigation was divided in three stages:

The first one is about the wear and friction behavior of uncoated and TiCN-coated D2, M2 and M4 steels which were evaluated by a pin-on-disk test under lubricated conditions. In order to evaluate the influence of lubricant on wear performance, dry friction tests were also performed. The results showed that friction coefficients were very similar for both uncoated and TiCN-coated steels. Under lubricated conditions, the uncoated D2 tool steel exhibited the lowest friction coefficient, but the TiCN-coated D2 steel presented the smallest wear rate. Abrasion was the main wear mechanism in all the tribo-couples. Additionally, micro-hardness measurements were carried out finding an influence of the steel substrate on the hardness of the coatings. Besides, adhesion test was conducted suggesting a good adhesion of class 1 between substrates and TiCN coatings.

The second part of the investigation is focused on the tribological performance of TiN and TiCN coatings on AISI H13 tool steel. Besides, adhesion and micro-hardness tests were carried out. The adhesion performance of both coatings resulted in class 1, according to CEN/TS 1071-8 standard, which allows observing the quality of adhesion. The composite micro-hardness was investigated by the analysis of relative indentation (β). Pin-on-disk tests were performed in dry and lubricated condition at 100 °C against tungsten carbide (WC). Low friction coefficients of $\mu_k = 0.08$ for TiN and $\mu_k = 0.03$ for TiCN were obtained in lubricated conditions. Wear mechanisms were analyzed by scanning electron microscopy (SEM). Abrasive wear was observed as the principal wear mechanism in dry condition, while in lubricated conditions wear signals seem to be scarcely noticeable.

The last part of the investigation addressed the tribological behavior of an AISI H13 steel with different surface qualities, with roughnesses from 0.03 μm to 0.41 μm under lubrication

conditions, finding that the friction coefficient decreased as the surface roughness increased in the range from 0.03 to 0.27 μm while the wear factor had the same behavior but only in the range of 0.03 to 0.11 μm since from this value, it increased as the surface roughness increased.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, el estudio de las propiedades tribológicas y mecánicas tiene gran importancia en los procesos de deformación de materiales ya que las superficies entre el material y el herramienta están sometidas a grandes presiones de contacto, esfuerzos mecánicos y térmicos, desgaste, etc. Cuando dos superficies están en contacto y existe movimiento relativo entre ellas, se producen fenómenos como la fricción y desgaste; las propiedades tribológicas se refieren a esas interacciones. Por otro lado, las propiedades mecánicas se refieren a la respuesta de los materiales cuando éstos se someten a esfuerzos externos. Las respuestas del material pueden ser de diferente naturaleza, por ejemplo, si se excede la resistencia a la fluencia del material éste se deformará permanentemente, o si se excede la resistencia a la fractura el material se fracturará.

En la industria, más precisamente en los procesos de corte y conformado de metales, lo que se busca es que los herramientas tengan una vida útil bastante prolongada y esto sólo se logra a través de mejores propiedades del material. Una forma de incrementar esas propiedades es a través de tratamientos térmicos superficiales y/o recubrimientos duros.

El estudio del comportamiento tribológico y mecánico de las superficies de los materiales es de vital importancia en el diseño de herramientas para procesos de conformado y/o corte de metales con la finalidad de reducir deformaciones, fisuras y desgaste de dichos herramientas debido a los esfuerzos a que están sometidos.

Este trabajo tiene como finalidad principal el estudio tribológico en condiciones en seco y con lubricación así como el estudio del comportamiento mecánico de aceros para herramienta modificados superficialmente. La estructura consta de seis capítulos los cuales son descritos brevemente a continuación: El primer capítulo aborda los antecedentes, el planteamiento del problema y la justificación de su estudio así como los objetivos generales y específicos. En el capítulo dos se hace una breve descripción de los aceros para herramienta así como los métodos de endurecimiento superficial más utilizados en los procesos de conformado y corte de metales. También se describen los fenómenos de fricción, desgaste y lubricación. Además, se presentan algunos modelos de dureza compuesta aplicados en recubrimientos duros. En el capítulo tres se presenta la metodología empleada en esta investigación donde se detallan los equipos empleados así como los parámetros seleccionados para cada una de las pruebas. También se describe la forma en que se determinarán los valores de dureza compuesta,

adhesión, coeficiente de fricción, volumen perdido, factor de desgaste y mecanismos de desgaste. En el capítulo cuatro se muestran los resultados de esta investigación ya sea de manera numérica o en forma de gráficas o micrografías.

Adicionalmente, en los anexos desde A hasta F se presentan las carátulas de las publicaciones relacionadas con esta investigación, siendo los dos primeros anexos, A y B, artículos indizados JCR; los anexos C y D son artículos indizados en LATINDEX y los anexos E y F son publicaciones en congresos internacional y nacional, respectivamente.

Por último, los anexos G y H muestran información de vital importancia como complemento de la parte C del capítulo de resultados para un mejor entendimiento de los mismos.

CAPÍTULO 1

MARCO DE REFERENCIA

Este capítulo tiene como propósito principal establecer el marco de referencia de la investigación: los antecedentes permitieron encontrar lo que otros autores han escrito o investigado sobre el desgaste en aceros modificados superficialmente para saber cómo lo han abordado y a que conclusiones han llegado con la finalidad de delimitar de manera clara el problema que se está investigando.

El planteamiento del problema, la justificación de la investigación y por último los objetivos fueron producto de la extensa revisión bibliográfica acerca del tema.

1.1 Antecedentes

Los aceros para herramientas, además de utilizarse para la fabricación de elementos de máquinas, se emplean para la fabricación de herramientas destinados a modificar la forma, tamaño y dimensiones de los materiales por arranque de viruta, cizallamiento, conformado, embutición, extrusión, laminación e impacto [1]. Los procesos de fabricación en la industria son cada vez más exigentes, por lo que el desgaste se ha convertido en un problema que ha ido

en aumento; por ejemplo, el proceso de conformado de un material sólido es realizado mediante deformación plástica por la superficie del herramental de conformado por lo que la calidad de la pieza conformada así como los herramentales tales como matrices, punzones y rodillos está considerablemente influenciada por el comportamiento de desgaste y la fricción en la superficie de la herramienta [2]. Los valores bajos de dureza y, por lo tanto, la menor resistencia al desgaste abrasivo son las principales restricciones para los materiales utilizados para la conformación de chapa metálica [3]. Schmid y Wilson [4] establecieron que las temperaturas elevadas, las altas velocidades de procesamiento, los exigentes requisitos de acabado y fiabilidad de la superficie y las consideraciones medioambientales juegan un papel determinante en la vida útil de las herramientas, la calidad estética de la superficie del producto (por ejemplo, brillo) y las propiedades funcionales de la superficie. De lo anterior se deduce que, en la mayoría de los casos, la dureza, tenacidad, resistencia al desgaste y dureza en caliente constituyen los factores más importantes a considerar en la elección de los aceros para herramientas [5].

Recientemente se han desarrollado diferentes alternativas para mejorar el desempeño de este tipo de materiales cuando son sometidos a esfuerzos de contacto elevados, desgaste severo, gradientes altos de temperatura pero sobre todo a largos periodos de carga. Dichas alternativas incluyen el tratamiento térmico o termoquímico de las superficies de los herramentales o deposición de recubrimientos duros que posean propiedades superiores a las de los aceros para herramienta. El progreso de la industria requiere el mejoramiento de las propiedades relevantes de los materiales (resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión, etc.) las cuales pueden conseguirse mediante recubrimientos duros utilizando métodos de deposición física de vapor (PVD, por sus siglas en inglés) [6-7].

Los recubrimientos cerámicos se usan ampliamente no solo para incrementar la resistencia al desgaste sino para muchas aplicaciones de ingeniería de superficies, por ejemplo, el TiN es un recubrimiento ampliamente utilizado en aplicaciones industriales de corte y formado de metales [8], para sistemas de materiales refractarios [9] o como capa protectora para herramientas debido a su resistencia al desgaste y a la corrosión [10]. El carbonitruro de titanio (TiCN) es un recubrimiento 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) [11-15]. 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 [16]. El carbonitruro de titanio también tiene una alta estabilidad química y una alta conductividad eléctrica [17-19].

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 et al. [20] 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 [21]. También señalan que la resistencia a la adhesión del recubrimiento está relacionada con el espesor del recubrimiento. Bressan et al. [22] 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 [23] mejoran su resistencia al desgaste y que los factores de desgaste disminuyen con el incremento de carbono en las partículas de TiCN.

Por otra parte, Ma et al. [24] realizaron ensayos de desgaste en recubrimientos multicapa TiN/Au, TiN/MoS₂ y TiN/TiCN donde observaron que cuando existe lubricante sobre la capa dura de TiN se reduce la fricción y se observan menores esfuerzos de corte en la interfase entre sustrato y recubrimiento. De igual forma, Bull et al. [25] 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 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 [26]. Meng et al. [27] estudiaron tribológicamente dos tipos de cermet, 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 esas altas temperaturas. Más recientemente, se han analizado recubrimientos dúplex TiN/TiCN sobre aceros nitrurados [28] encontrando que durezas y tenacidades más altas de las capas dúplex favorecieron una mejor resistencia a la erosión. Wang et al. [29] 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.

Investigaciones tribológicas de recubrimientos de TiCN con diferentes contenidos de carbono sobre sustratos de acero inoxidable 440 se han llevado a cabo mediante pruebas de desgaste mostrando que no hay cambio significativo en el coeficiente de fricción del tribo-sistema cuando el contenido de carbono en los recubrimientos de carbonitruro de titanio es inferior a 4.6%, pero con el aumento del contenido de carbono se observa la disminución del coeficiente de fricción [30]. Sergejev et al. [31] 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 et al. [32] 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 et al. [33] 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. Por otro lado, Madaoui et al. [34] utilizaron recubrimientos de nitruro de titanio (TiN) y carbonitruro de titanio (TiCN) sobre acero 1045 y estudiaron su

comportamiento electroquímico en una solución de 3.5 % de NaCl mostrando que los recubrimientos tienen una mejor resistencia a la corrosión que el sustrato solo. También se han llevado a cabo investigaciones acerca del efecto del tiempo de nitrurado y el potencial de nitrógeno sobre la resistencia de las capas nitruradas donde se ha observado que con tiempos cortos y potenciales altos pueden obtenerse espesores de capa pequeños pero con resistencias al desgaste superiores que para tiempos de nitrurado más largos [35].

Uno de los parámetros más importantes que tiene influencia en el comportamiento tribológico de una superficie recubierta es la dureza del recubrimiento y su relación con la dureza del sustrato [36-37] por lo que también han sido estudiadas por diferentes investigadores. Su et al. [21] investigaron la dureza en recubrimientos multicapa de TiN/TiCN/TiN empleando carburo de tungsteno como sustrato utilizando un probador de microdureza Vickers (Matsuzawa MXF70) bajo cargas de 100 g_f y 50 g_f, encontrando durezas entre 2670 HV y 2830 HV. Por otro lado, Cheng et al. [30] investigaron recubrimientos de TiCN con diferentes contenidos de C que se depositaron utilizando una técnica de deposición de arco filtrado de área extensa (LAFAD); fueron caracterizados por nano-indentación donde encontraron que con un aumento del contenido de C en los recubrimientos la dureza aumentaba hasta un máximo con un contenido de C de 2.8 en% alcanzando un valor de 39.5 GPa. Mientras tanto, Shan et al. [33] realizaron ensayos de nanoindentación en recubrimientos de TiN y TiCN depositados en acero inoxidable y carburos cementados WC encontrando una dureza promedio y un módulo elástico del de TiCN de 31.6 GPa y 409.7 GPa, respectivamente. Para el recubrimiento de TiN, la dureza promedio y el módulo de elasticidad disminuyeron a 27.7 GPa y 394.4 GPa. Observaron una contribución significativa del sustrato a la microdureza a medida que aumentaba la profundidad de la indentación. La mayor dureza del recubrimiento de TiCN en comparación con TiN podría atribuirse en parte al efecto de la solución sólida del carbono en la red cristalina de TiN. Además del efecto de solución sólida, la alta tensión residual de compresión contribuye a la dureza en el recubrimiento de TiCN.

También, Madaoui et al. [34] investigaron la dureza en un recubrimiento de TiCN depositado en sustratos de acero XC48 utilizando la técnica de pulverización catódica con magnetrón mediante nanoindentación usando un sistema de nanoindentador (CSM) con un penetrador de diamante Berkovich. El instrumento fue operado en el modo de rigidez continua con una carga

máxima de 100 mN. Cuando la tensión de polarización del sustrato (VSB) cambia de 0 a -100 V, la dureza de TiCN aumenta de 16 GPa a un máximo de aproximadamente 39 GPa y lo atribuyeron a la estructura microcristalina inducida en el recubrimiento de nanocompuestos.

Zhu et al. [26] investigaron la dureza de un revestimiento de PVD TiCN en material de sustrato de acero de alta velocidad M2. Utilizaron microindenador para las mediciones de dureza Vickers. Seleccionaron una carga de 100 g y obtuvieron valores de dureza de 820 HV y 1900 HV para el sustrato y recubrimiento de TiCN, respectivamente. Por otro lado, los valores de dureza de los compuestos de una matriz metálica basados en acero de alta velocidad M3/2 y reforzados con dos porcentajes diferentes de TiCN (2.5% y 5% en peso) fabricados siguiendo una metalurgia de polvo convencional, fueron 47 HRC, 50 HRC y 53 HRC para M3/2, M3/2 + 2.5% TiCN y M3/2 + 5% TiCN, respectivamente. La mejora de los valores de dureza fue influenciada por la buena dispersión de las partículas de refuerzo en la matriz [23].

Finalmente, Bull et al. [25] determinaron la dureza de recubrimientos de TiCN depositados en sustratos de carburo cementado (grado H-21) mediante seis métodos de deposición diferentes. El espesor del recubrimiento varió de 1 a 5 mm, dependiendo del proveedor. La microdureza compuesta se determinó realizando mediciones de microdureza Vickers usando un probador de microdureza Leco. Se emplearon cargas de 50, 100, 200 y 300 g y se mantuvieron durante 15 s en la superficie del recubrimiento. Los resultados de microdureza compuesta para todos los revestimientos se presentan como una función del logaritmo de la profundidad relativa de indentación. A partir de estos resultados, se observa una importante contribución del sustrato a la dureza medida en todos los métodos y condiciones de prueba.

Por otra parte, la resistencia de la unión adhesiva entre el recubrimiento y el sustrato son cruciales para la funcionalidad de una superficie recubierta. Cuando esas uniones se rompen, una parte del revestimiento se desprenderá y el material del sustrato quedará expuesta a la superficie contraria en el contacto tribológico. Los mecanismos básicos de la adhesión del recubrimiento al sustrato han sido objeto de varios estudios en profundidad, tales como Thouless [38], Bull [39], Bhushan [40], Maugis [41] y Malzbender et al. [42]. Más recientemente, Sergejev et al. [31] investigaron el recubrimiento de TiCN en punzones producidos con acero Böhler S390 Microclean. Usaron dos técnicas diferentes de preparación de superficie: pulido en húmedo (rugosidad superficial alta) y pulido en seco (rugosidad

superficial baja). Utilizaron la indentación Rockwell C para estudiar la adhesión entre el punzón y el recubrimiento de TiCN. Observaron una clase de adhesión 2 y no se encontraron diferencias visibles en las propiedades de adhesión entre los recubrimientos con rugosidad superficial pequeña (M) y grande (H). Por otro lado, Bull et al. [25] emplearon el método de rayado (*scratch*) para caracterizar la adhesión de recubrimientos de TiCN depositados en sustratos carburo cementado (grado H-21) mediante seis métodos de deposición diferentes y encontraron que la carga crítica para el desprendimiento del recubrimiento depende del espesor del mismo.

Zuckerman et al. [28] realizaron mediciones de adhesión en recubrimientos de TiCN sobre acero PH15-5 nitrurado en plasma con el aparato Micro Scratch Tester (CSEM, Suiza, MST). Antes del proceso de recubrimiento, las muestras fueron nitruradas por uno de los dos métodos: plasma RF o plasma de frecuencia dual MW-RF. Posteriormente, realizaron rayones a una carga progresiva en cada muestra con una punta de diamante Rockwell C (radio de 50 μm), utilizando una velocidad de carga de 30 N/min y una longitud de prueba de 5 mm. Las cargas críticas fueron 20 N y 23 N, para las capas de TiCN/RF nitrurado y TiCN/MW-RF, respectivamente. Shan et al. [33] determinó la fuerza de adhesión de recubrimientos de TiN y TiCN que se depositaron en acero inoxidable y carburos cementados WC por iones de arco mediante el uso de probador de *scratch* (CSM Revetest) con una punta de diamante cónica de 0.2 mm de radio y ángulo de 120° empleando una velocidad de la mesa de 6 mm/min, velocidad de carga 118 N/min, escala de carga 0-100 N y longitud de rayado 5 mm. La delaminación completa de los recubrimientos de TiCN y TiN se produjo a los 42 N y 50 N, respectivamente.

1.2 Planteamiento del problema

Los procesos de fabricación destinados al corte o conformado de metales son cada vez más exigentes por lo que los herramientas utilizados están sometidos a constante desgaste y daño mecánico. El desgaste de herramientas ha llegado a ser un problema que va incrementándose en la industria del formado de metales, como resultado de la utilización de aceros más resistentes y el reducido uso de lubricantes por razones ambientales [43-44].

El corte fino es un proceso donde la holgura entre el punzón y la matriz se reduce con la finalidad de mejorar la calidad de la superficie de corte [45]. Por lo tanto, los herramientas

utilizados en el corte fino están bajo altos niveles de esfuerzo en el área de corte lo cual conlleva a un desgaste agravado. El uso extendido de aceros de alta velocidad como materiales para herramientas incrementa la presión de contacto sustancialmente, dando lugar a una disminución de la vida de la herramienta o incluso su fractura [46]. Por otro lado, el proceso de forja en caliente es uno de los procesos de formado de metal más usados en la producción de partes críticas en varias industrias [47]. Una desventaja de este proceso es que los herramientas están expuestos a altos esfuerzos térmicos y mecánicos. Estos esfuerzos causan la falla de los dados debido a desgaste y fatiga termo mecánica [48-52].

Por lo anteriormente mencionado, en esta investigación se plantea un estudio tribológico-mecánico de aceros para herramienta, en particular aceros D2, M2, M4 y H13, los cuales son de uso frecuente en la manufactura de herramientas, modificados superficialmente con recubrimientos de nitruro de titanio (TiN), carbonitruro de titanio (TiCN) y nitrurado, con el objetivo de incrementar su resistencia al desgaste. Este estudio permitirá establecer bajo qué condiciones las modificaciones superficiales realizadas a los aceros cumplen el objetivo de prolongar la vida útil de los herramientas.

1.3 Justificación

El desgaste de partes de maquinaria y herramientas tiene influencia directa en la productividad, eficiencia, confiabilidad y calidad de los productos manufacturados [22]. Debido al impacto económico que representa el problema de desgaste de herramientas, se han realizado numerosos estudios encaminados a caracterizar el desempeño al desgaste de materiales para herramientas y tratamientos superficiales [43-44], mismos que mejoran las propiedades mecánicas de la superficie del material tales como dureza, resistencia al desgaste, fatiga y fricción.

Si bien es cierto que existen gran cantidad de investigaciones acerca del desgaste de aceros para herramienta, con y sin recubrimientos duros, la mayoría de ellas no se realizan en condiciones cercanas a las de los correspondientes procesos de fabricación. En este trabajo se pretende aproximar lo más posible a las condiciones reales, es decir, tomando en cuenta las cargas, temperaturas y regímenes de lubricación. Aparte de la caracterización tribológica, se realizará la caracterización mecánica de los aceros recubiertos: dureza, adhesión del

recubrimiento al acero, teniendo como resultado un estudio más completo que permitirá conocer, de mejor manera, el desempeño y la vida útil de los instrumentales.

1.4 Objetivo general

Investigar el comportamiento tribológico-mecánico de capas duras sobre aceros para herramienta H13, D2, M2 y M4.

Los objetivos específicos se enlistan a continuación:

- Caracterizar las propiedades mecánicas y superficiales de los sustratos de acero para herramienta (dureza y rugosidad superficial)
- Caracterizar superficialmente las capas duras sobre los sustratos de acero para herramienta (rugosidad y espesor de capa)
- Determinar la dureza de los recubrimientos de TiN y TiCN y evaluar la influencia del sustrato mediante el análisis de la dureza compuesta
- Evaluar la adhesión del recubrimiento (TiN y TiCN) al sustrato de acero para herramienta de manera cualitativa.
- Determinar el coeficiente de fricción, volumen perdido de material, factor de desgaste y mecanismos de desgaste de los sustratos de acero para herramienta D2, M2 y M4, tanto en condiciones en seco como lubricadas.
- Determinar el coeficiente de fricción, volumen perdido de material, factor de desgaste y mecanismos de desgaste de los recubrimientos de TiN y TiCN, tanto en condiciones en seco como lubricadas.
- Determinar el coeficiente de fricción, volumen perdido de material, factor de desgaste y mecanismos de desgaste del acero H13 nitrurado, en condiciones en seco y lubricadas.
- Relacionar la rugosidad superficial con el comportamiento tribológico del acero H13 nitrurado en condiciones en seco y lubricadas.

CAPÍTULO 2

MARCO DE TEÓRICO

En este capítulo se describen brevemente los aceros para herramienta y los recubrimientos duros de TiN y TiCN; sus características y principales aplicaciones de los mismos. Posteriormente, se explican los conceptos de dureza y adhesión así como las técnicas para medir dichas propiedades mecánicas. También se definen los conceptos de la tribología incluyendo la fricción, mecanismos de desgaste que pueden presentarse en un material y su lubricación como medio para disminuir el desgaste. Los conceptos fundamentales de dureza, adhesión y tribología permitieron entender el comportamiento tribomecánico de los recubrimientos duros sobre aceros para herramienta.

El hierro y el acero sin duda han sido uno de los desarrollos tecnológicos más importantes pero no es hasta el año 1100 a.C. que llegó la edad de hierro, sustituyendo al bronce que fue el primer metal tecnológicamente importante. Sin embargo, no fue hasta la invención del alto horno que se hizo posible la producción de estos materiales en grandes cantidades. Posteriormente, con el desarrollo de procesos como el convertidor Bessemer, Siemens, horno básico de oxígeno y horno eléctrico se produjeron aceros de mejor calidad. En la actualidad, el

acero está definido como una aleación compuesta de hierro y otros elementos de aleación, donde el carbono es un elemento de aleación esencial. Por lo tanto, el acero se puede definir como una aleación de hierro y pequeñas cantidades de carbono y otros elementos [1]. Los aceros pueden clasificarse de diferentes maneras, tales como: por su composición química, el método de manufactura, el método de acabado, la microestructura, el tratamiento térmico, la forma del producto, etc. [53].

Los aceros aleados son aceros que contienen cantidades significativas de elementos de aleación, tales como: cromo, níquel, molibdeno, vanadio, entre otros, que les imparten propiedades específicas. La clasificación de este tipo de aceros es de acuerdo al tipo y porcentaje del elemento de aleación. Existen también aceros aleados especiales que están diseñados para ofrecer elevada resistencia, tenacidad al impacto y resistencia al desgaste a temperatura ambiente y elevada, llamados aceros grado herramienta. Este tipo de aceros se utiliza principalmente en el conformado y corte de metales [54]. Hay varios métodos para clasificar los aceros para herramientas. Uno es según los medios de templado que se usen, como aceros templados en agua, aceros templados en aceite y aceros templados en aire. El contenido de la aleación es otro medio de clasificación, como aceros al carbono para herramientas, aceros de baja aleación para herramientas y aceros de mediana aleación para herramientas. Un método de agrupación es el basado en la aplicación del acero para herramientas, como aceros para trabajo en caliente, aceros resistentes al impacto, aceros de alta velocidad y aceros para trabajo en frío [5].

2.1 Aceros para herramienta

Cualquier acero utilizado como herramienta puede clasificarse técnicamente como acero para herramientas; sin embargo, el término suele limitarse a aceros especiales de alta calidad utilizados para corte o conformado.

Hay varios métodos para clasificar los aceros para herramientas. Uno es según los medios de templado que se usen, como aceros templados en agua, aceros templados en aceite y aceros templados en aire. El contenido de la aleación es otro medio de clasificación, como aceros al carbono para herramientas, aceros de baja aleación para herramientas y aceros de mediana aleación para herramientas. Un método de agrupación es el basado en la aplicación del acero para herramientas, como aceros para trabajo en caliente, aceros resistentes al impacto, aceros de alta velocidad y aceros para trabajo en frío [5].

El método de identificación y tipo de clasificación de los aceros para herramientas adoptado por la AISI tiene en cuenta el método de templado, aplicaciones, características particulares y aceros para industrias específicas. Los aceros para herramientas que más se utilizan se han agrupado en siete grupos y a cada grupo o subgrupo se le ha asignado una letra del alfabeto, ver tabla 2.1 [55].

Tabla 2.1 Principales grupos de aceros para herramientas y su simbología según AISI.

GRUPO	SÍMBOLO Y TIPO	
Templados en agua	W	
Resistentes al impacto	S	
	O	Templable en aceite
Trabajo en frío	A	Mediana aleación y templable en aire
	D	Alto carbono, alto cromo
		H1 - H19, base cromo
Trabajo en caliente	H	H20 - H39, base tungsteno
		H40 - H59, base molibdeno
	T	Base tungsteno
Alta velocidad	M	Base molibdeno
	P	Aceros para moldes
Moldes	L	Baja aleación
Propósitos especiales	F	Carbono-tungsteno

2.1.1 Aceros para herramientas para trabajo en frío

Este es el grupo más importante de los aceros para herramientas, ya que la mayoría de las aplicaciones para herramientas pueden efectuarlas uno o más de los aceros de este grupo [5]:

- El tipo de acero aleado de baja aleación y templable en aceite (Grupo O) contiene manganeso y menores cantidades de cromo y tungsteno. Tiene muy buenas propiedades de rigidez y es menos probable que se doble, distorsione o tenga fisuras durante el tratamiento térmico, como sucede con los aceros templados al agua. Estos aceros no son relativamente costosos y su contenido de carbono produce una adecuada resistencia al desgaste para aplicaciones de vaciados cortos en la temperatura ambiente. La principal función del alto contenido de silicio en estos aceros es inducir la

grafitización de parte del carburo, mejorando, por tanto, la maquinabilidad en la condición de recocido.

- El tipo de acero de mediana aleación (Grupo A), con 1 % de carbono, contiene hasta 3 % de manganeso, hasta 5% de cromo y 1 % de molibdeno. El contenido de aleación aumentado, sobre todo el manganeso y el molibdeno, le da marcadas propiedades de endurecimiento en aire y templabilidad aumentada. Este grupo tiene excelentes propiedades de no deformación, buena resistencia al desgaste y regular tenacidad, dureza al rojo y resistencia a la descarburización, pero suele poseer de regular a deficiente maquinabilidad. Estos aceros se utilizan para punzonar, para formado y dados para tallar cuerdas.
- Los tipos de acero con mucho carbono y cromo (Grupo D) contienen hasta 2.25 % de carbono y 12 % de cromo; además, pueden contener molibdeno, vanadio y cobalto. La combinación de alto carbono y alto cromo da excelente resistencia al desgaste y propiedades de no deformación; además, tienen una buena resistencia a la abrasión y el mínimo de cambio dimensional en el templado, lo cual hace que estos aceros se empleen mucho en dados de punzonar y en perforaciones; en dados para estirar alambres, barras, tubos; en dados para roscas; y en calibradores maestros.

2.1.2 Aceros para herramientas para trabajo en caliente (Grupo H)

En muchas aplicaciones, la herramienta se somete a calor excesivo, porque el material se está trabajando, como la forja en caliente y la extrusión, piezas fundidas en dados y moldeo plástico. Los aceros para herramientas para estas aplicaciones se conocen como aceros para trabajo en caliente y tienen buena dureza al rojo.

Los elementos de aleación más importantes, porque proporcionan dureza al rojo, son el cromo, el molibdeno y el tungsteno; sin embargo, la suma de estos elementos debe ser de por lo menos el 5 % antes de que la propiedad de dureza al rojo sea apreciable. Los aceros para trabajo en caliente pueden dividirse [5]:

- *Trabajo en caliente de base cromo*, con un mínimo de 3.25 % de cromo y menores cantidades de vanadio, tungsteno y molibdeno. Tienen buena dureza al rojo debido a su contenido medio de cromo, además de los elementos formadores de carburo, como el vanadio, tungsteno y molibdeno. Mayores contenidos de tungsteno y molibdeno aumentan la dureza al rojo pero disminuyen ligeramente la tenacidad. Tales aceros se

adaptan especialmente para funcionar con todo tipo de troqueles al calor, especialmente troqueles de extrusión, troqueles para piezas fundidas, troqueles para forja, mandriles y cizallas en caliente.

- *Trabajo en caliente de base tungsteno*, que contiene por lo menos 9 % de tungsteno y de 2 a 12 % de cromo. Tales aceros se pueden endurecer en aire para baja distorsión, o templarse en aceite o en sal caliente, para minimizar la formación de escamas. Aunque tienen mayor tenacidad, estos aceros poseen muchas de las características de los aceros para herramientas de alta velocidad. Se han utilizado a altas temperaturas en mandriles y troqueles para extrusión para latón, aleaciones de níquel y acero.
- *Trabajo en caliente de base molibdeno*, con 8 % de molibdeno, 4 % de cromo y menores cantidades de tungsteno y vanadio. Estos aceros son similares a los aceros al tungsteno para trabajo en caliente y tienen características y usos casi idénticos. En composición, se parecen a los diversos tipos de aceros para herramientas al molibdeno de alta velocidad, aunque tienen menor contenido de carbono y mayor tenacidad. Su principal ventaja sobre los aceros al tungsteno para trabajos en caliente es que tienen menor costo. Estos aceros son más resistentes a las fisuras por el calor que los grado tungsteno.

2.1.3 Aceros para herramientas de alta velocidad

Estos aceros son de los más altamente aleados para herramientas y generalmente contienen grandes cantidades de tungsteno o molibdeno conjuntamente con cromo, vanadio y algunas veces cobalto. El contenido de carbono varía entre 0.70 y 1 %, aunque algunos tipos poseen alrededor de 1.5 % de carbono.

Los aceros de alta velocidad se aplican principalmente en herramientas de corte, pero también para hacer troqueles de extrusión, herramientas para pulir, en punzones y dados.

Las composiciones de los aceros de alta velocidad se han diseñado para proporcionar excelente dureza en rojo y razonablemente buena resistencia al impacto. Tienen buenas propiedades de no deformación y pueden templarse en aceite, aire o sales fundidas. Se clasifican como de endurecimiento profundo, tienen buena resistencia al desgaste, regular maquinabilidad, y de regular a poca resistencia a la descarburización [5].

A continuación se describen brevemente las principales características y propiedades de los aceros AISI D2, M2, M4 y H13, que se emplean principalmente en los procesos de conformado y corte de metal.

El *acero AISI D2* es un acero para herramienta con alto contenido de cromo, alto contenido de carbono, con propiedades extremadamente resistentes al desgaste. Es un acero de endurecimiento muy profundo y estará prácticamente libre de cambios de tamaño después de un tratamiento adecuado. El alto porcentaje de cromo le da propiedades de resistencia a la corrosión en la condición endurecida. Algunas de sus aplicaciones pueden ser: herramientas de conformado, troqueles, herramientas de corte, troqueles de extrusión y laminado, punzones, etc. La tabla 2.2 muestra la composición química para el acero D2 así como algunas de sus características más importantes [56].

Tabla 2.2 Composición química del acero AISI D2 y sus principales características.

Carbono (C)	1.40 - 1.60
Manganeso (Mn)	0.60 máx.
Silicio (Si)	0.60 máx.
Molibdeno (Mo)	0.70 - 1.20
Cromo (Cr)	11.0 - 13.0
Vanadio (V)	1.10 máx.
Cobalto (Co)	1.0 máx.
Níquel (Ni)	0.30 máx.
Resistencia al desgaste	Alta - Muy alta
Tenacidad	Baja
Resistencia al reblandecimiento por temperatura elevada	Media - Alta
Profundidad de endurecimiento	Profunda
Maquinabilidad	Baja
Distorsión en el tratamiento térmico	Muy baja
Resistencia a la descarburización	Media

El *acero AISI M2* es un acero de alta velocidad de tungsteno-molibdeno y es empleado popularmente para aplicaciones de corte. Tiene un rango más amplio de tratamiento térmico que la mayoría de los aceros de alta velocidad de base molibdeno, junto con una resistencia a la descarburización que es característica de los aceros con contenido de tungsteno. Este acero ofrece una excelente combinación de dureza, tenacidad y resistencia al desgaste en rojo.

Algunas de sus aplicaciones típicas son herramientas de conformado, punzones, brocas, fresas, rimas, avellanadores, herramientas de torneado y cepillado, etc. La tabla 2.3 muestra la composición química del acero AISI M2 así como también sus características más importantes [56].

Tabla 2.3 Composición química del acero AISI M2 y sus principales características.

Carbono (C)	0.78 - 0.88
Manganeso (Mn)	0.15 - 0.88
Silicio (Si)	0.20 - 0.45
Tungsteno (W)	5.50 - 6.75
Molibdeno (Mo)	4.50 - 5.50
Cromo (Cr)	3.75 - 4.50
Vanadio (V)	1.75 - 2.20
Níquel (Ni)	0.30 máx.
Resistencia al desgaste	Muy alta
Tenacidad	Baja
Resistencia al reblandecimiento por temperatura elevada	Muy Alta
Profundidad de endurecimiento	Profunda
Maquinabilidad	Media
Distorsión en el tratamiento térmico	Baja - Media
Resistencia a la descarburización	Alta

El acero *AISI M4 PM*, un miembro de la familia de aceros molibdeno-tungsteno de alta velocidad, es un grado de propósito especial que utiliza su mayor contenido de carbono y vanadio para desarrollar una excelente resistencia a la abrasión. El acero M4 PM se produce mediante el proceso de metalurgia de polvos y permite una adición de 0.06 - 0.08 de azufre que proporciona una dispersión uniforme de pequeños sulfuros en toda la estructura y mejora la maquinabilidad. Estos factores, junto con una mayor tenacidad, son ideales para aplicaciones de trabajo en frío de trabajo pesado. Entre sus aplicaciones más importantes están herramientas de formado, punzones, herramientas de torno, fresas, escariadores, etc. La tabla 2.4 muestra la composición química del acero AISI M4 así como también sus características más importantes [56].

El acero H13 es un acero al cromo para trabajo en caliente el cual es usado ampliamente en aplicaciones para herramientas de trabajo en frío y en caliente. El molibdeno y vanadio

presentes en el acero H13 actúan como agentes que proporcionan resistencia. El contenido de cromo le ayuda a resistir el ablandamiento cuando se usa a temperaturas elevadas. Sus aplicaciones típicas son dados de extrusión, punzones de conformado, dados para forja en caliente, moldes para inyección de plástico, etc. Debido a su excelente combinación de alta tenacidad y resistencia a la fatiga, el acero H13 para trabajo en caliente se usa más que cualquier otro acero en aplicaciones de herramientas. La tabla 2.5 muestra la composición química del acero AISI H13 y también sus principales características [56].

Tabla 2.4 Composición química del acero AISI M4 y sus principales características.

Carbono (C)	1.30
Manganeso (Mn)	0.30
Silicio (Si)	0.40
Tungsteno (W)	5.50
Molibdeno (Mo)	4.50
Cromo (Cr)	4.50
Vanadio (V)	4.0
Azufre (S)	0.07
Resistencia al desgaste	Muy Alta
Tenacidad	Baja
Resistencia al reblandecimiento por temperatura elevada	Muy Alta
Profundidad de endurecimiento	Profunda
Maquinabilidad	Media
Distorsión en el tratamiento térmico	Baja
Resistencia a la descarburización	Media

2.2 Modificación superficial de aceros para herramienta

Los aceros para herramienta están sujetos a desgaste severo, altos esfuerzos, temperaturas elevadas y ambientes corrosivos. Estos aceros son diseñados - mediante el contenido de aleación, procesos termo-químicos y tratamientos térmicos - para resistir tales fuerzas destructivas no sólo en la interfase herramienta-pieza de trabajo sino también a una considerable profundidad debajo de esa interfase. A pesar de las propiedades logradas mediante el diseño de los aceros para herramienta, la superficie de la herramienta y las regiones cercanas a ella están sujetas a las fuerzas más destructivas, y, casi desde el comienzo

de la aplicación extendida de los aceros para herramienta se han evaluado diferentes formas de mejorar sus propiedades superficiales.

Tabla 2.5 Composición química del acero AISI H13 y sus principales características.

Carbono (C)	0.32 - 0.45
Manganeso (Mn)	0.20 - 0.50
Silicio (Si)	0.80 - 1.25
Molibdeno (Mo)	1.10 - 1.75
Cromo (Cr)	4.75 - 5.50
Vanadio (V)	0.80 - 1.20
Níquel (Ni)	0.30 máx.
Resistencia al desgaste	Media
Tenacidad	Muy alta
Resistencia al reblandecimiento por temperatura elevada	Alta
Profundidad de endurecimiento	Profunda
Maquinabilidad	Media - Alta
Distorsión en el tratamiento térmico	Muy Baja
Resistencia a la descarburización	Media - Alta

En la actualidad están disponibles muchas tecnologías para la modificación de las superficies con la finalidad de mejorar el comportamiento de los aceros para herramienta. Existen cuatro clases de procesos: implantación, chapado y recubrimiento, termo-químicos y térmicos. La *implantación* cambia químicamente la superficie, similar a las técnicas termo-químicas, pero debido al procesamiento único está asociado a capas superficiales endurecidas muy poco profundas, la implantación a menudo se considera una clase separada de tratamiento superficial. El *chapado*, especialmente la deposición química de vapor (**CVD**) y la deposición física de vapor (**PVD**), son procesos de gran importancia para los aceros para herramienta; se depositan capas delgadas de materiales duros, tales como nitruros o carburos sobre los sustratos de acero. Aparte del recubrimiento, se produce poco cambio químico en la superficie. Los tratamientos termo-químicos, tales como el **nitruado** y **carburizado** causan cambios químicos significativos en la superficie por la difusión de átomos de carbono o nitrógeno dentro del acero [55].

2.2.1 Recubrimientos duros

Los recubrimientos duros son películas de espesores delgados que son empleados para recubrir las superficies de piezas empleadas en aplicaciones industriales con la finalidad de incrementar su dureza, su resistencia al desgaste y a la corrosión y en algunos casos disminuir el coeficiente de fricción. Generalmente esos recubrimientos tienen espesores que van desde la escala nanométrica hasta unos cuantos micrómetros y se realizan por medio de procesos de deposición de vapor.

La deposición de vapor es un proceso en el que el sustrato (superficie de la pieza) se somete a reacciones químicas mediante gases que contienen compuestos químicos del material que se va a depositar. El espesor del recubrimiento suele ser de unos pocos μm , que es mucho menor que los espesores que se obtienen con tratamientos térmicos superficiales.

Los materiales depositados pueden ser metales, aleaciones, carburos, nitruros, boruros, cerámicas u óxidos. Es importante controlar la composición, espesor y porosidad del recubrimiento. El sustrato puede ser de metal, plástico, vidrio o papel. Las aplicaciones normales de la deposición de vapor son el revestimiento de herramientas de corte, brocas, escariadores, fresas, punzones, dados y superficies de desgaste. Hay dos procesos principales de deposición de vapor: deposición física y deposición química [54].

La deposición química de vapor (CVD) es un proceso termoquímico. En una aplicación normal, como la de recubrir herramientas de corte con nitruro de titanio (TiN), las herramientas se colocan en una bandeja de grafito y se calientan entre 950 y 1050 °C a presión atmosférica, en una atmósfera inerte. A continuación se introducen tetracloruro de titanio (gas en las condiciones de deposición), hidrógeno y nitrógeno a la cámara. Las reacciones químicas producen nitruro de titanio en las superficies de la herramienta. Para recubrir con carburo de titanio se usa metano en lugar de los gases mencionados anteriormente.

Los recubrimientos depositados químicamente suelen ser mas gruesos que los depositados físicamente. Un ciclo normal de deposición química es largo, y está formado por a) tres horas de calentamiento, b) cuatro horas de recubrimiento y c) de seis a ocho horas para enfriar a temperatura ambiente. El espesor del recubrimiento depende de los flujos de los gases empleados, del tiempo y de la temperatura [54].

Por otra parte, el proceso de deposición física de vapor (PVD) puede clasificarse en tres tipos básicos que son: a) evaporación al vacío o de arco, b) pulverización catódica, y c) deposición

iónica. En la deposición física de vapores, las partículas por depositar se arrastran físicamente a la pieza y no mediante reacciones químicas, como en la deposición química de vapor [54].

Las aplicaciones de las capas duras resultan imprescindibles en la actualidad en gran cantidad de procesos tecnológicos. A continuación se enlistan algunos de los más significativos [55]:

- Matrices de conformado y embutición
- Herramientas de corte de alta velocidad
- Moldes de inyección de plásticos
- Moldes de inyección de metales
- Componentes sometidos a deslizamientos a gran velocidad

Entre los recubrimientos más utilizados en los procesos de conformado y corte están los recubrimientos de nitruro de titanio (TiN) y carbonitruro de titanio (TiCN) los cuales se describen brevemente.

El nitruro de titanio (TiN) primeramente se empleó para recubrir comercialmente herramientas mediante el método CVD. Se usa principalmente en herramientas de acero de alta velocidad para corte de metales, pero también ha encontrado otras aplicaciones tribológicas, como en herramientas de formado, cojinetes, sellos y como capa de protección contra la erosión. Una atracción importante con el nitruro de titanio es su color dorado que también ha fomentado su uso en aplicaciones decorativas [57].

El recubrimiento de TiN es muy duro, con valores de dureza de 1500 a 2500 HV, medido para recubrimientos en el rango de espesor de 1 a 12 μm en sustratos de acero o cerámicos. El módulo elástico de los recubrimientos de TiN puede variar de 160 a 600 GPa. La relación de Poisson es típicamente 0.22, pero los valores en el rango de 0.2 a 0.232 aparecen en la literatura [57]. Las tensiones residuales de compresión en los recubrimientos de TiN a menudo son muy altas, en el rango de 1 a 6 GPa [58-63]. En general, los recubrimientos de TiN tienen un bajo coeficiente de fricción, alta dureza, resistencia a la corrosión y desgaste adhesivo [64-66]. Los recubrimientos de TiN fabricados mediante diferentes técnicas de deposición poseen propiedades microestructurales y físicas distintas [67].

Por otra parte, los recubrimientos delgados de TiCN tienen una alta dureza, estabilidad química y térmica superior que los de TiN. Son utilizados en la industria para mejorar la resistencia al desgaste en aplicaciones tales como herramientas de corte para mejorar su vida de servicio [68-69]. Los recubrimientos de TiCN son muy interesantes porque combinan la

alta dureza las fases del TiC y la alta tenacidad de las fases de TiN [14,70]. Estas propiedades únicas hacen TiCN películas delgadas una buena solución para aplicaciones que requieren alta abrasión y resistencia al desgaste. Este recubrimiento tiene una dureza más alta que el TiN, aproximadamente de 2700 a 3500 HV, un módulo de elasticidad de 310 GPa y espesores aproximados de 0.5 μm a 6 μm . Al igual que en los recubrimientos de TiN, los parámetros del proceso de deposición tienen una influencia sobre las propiedades de los recubrimientos de TiCN tales como microestructura, dureza, tenacidad a la fractura y adhesión al sustrato. La selección óptima de los parámetros del proceso es necesaria para lograr combinaciones de propiedades particulares. El TiCN es superior al TiN especialmente en aplicaciones tribológicas, donde la abrasión es el dominante mecanismo de desgaste. Esto se debe a su mayor dureza y a la presencia de carbono que actúa como un lubricante que reduce la fricción y el desgaste [16].

2.2.2 Nitruración

La nitruración es un tratamiento mediante el cual se difunde nitrógeno en las superficies de los aceros de aleación especial, para producir una delgada capa dura sin templado. Para una mayor efectividad, el acero debe contener ciertos elementos aleantes tales como aluminio (0.85 a 1.5%) o cromo (5% o más). Estos elementos forman nitruros que precipitan como partículas muy finas en la superficie del acero endurecido. Los métodos de nitruración incluyen la nitruración gaseosa, en la cual las partes de acero a tratar se calientan en una atmósfera de gas amoníaco (u otra mezcla rica en nitrógeno), y nitruración líquida en la cual las partes se sumergen en baños de sales fundidas de cianuro. Ambos procesos se llevan a cabo a temperaturas alrededor de los 510 °C. El espesor va desde 0.025 mm hasta cerca de 0.5 mm, con durezas de hasta 70 HRC [71].

El nitrurado se aplica comúnmente a aceros al mediano carbono que contienen elementos formadores de nitruros tales como cromo, aluminio, vanadio, tungsteno y molibdeno, los cuales son en su mayoría componentes de los aceros para herramienta. Por lo tanto, aceros para herramienta – incluyendo los aceros para trabajo en caliente H11, H12 y H13; los aceros templables en aire A2, A6, D2, D3 y S7; los aceros rápidos M2 y M4; y el acero para moldes P20 – se benefician con el proceso de nitrurado [55].

2.3 Dureza superficial y dureza compuesta en recubrimientos duros

Convencionalmente, la dureza de un material se define como la resistencia a la deformación permanente [72]. La prueba de dureza de un recubrimiento puede ser de varias maneras, pero los diferentes métodos de prueba pueden obtener diferente dureza. Los métodos comunes para medir la dureza generalmente se dividen en dos tipos: estáticos (indentación) y dinámicos. Las durezas estáticas incluyen dureza Brinell, dureza Rockwell, dureza Vickers, y otras, mientras durezas dinámicas incluyen el martillo, dureza Shore, etc., [73]. Las medidas de dureza más comunes utilizadas para los revestimientos son la microdureza de Vickers o Knoop, que normalmente utiliza cargas de entre 10 y 500 g, que difieren en la forma del diamante utilizado para la indentación [57]. Hay que tener en cuenta dos aspectos cuando se mide experimentalmente la dureza de las cerámicas de ingeniería, Bikramjit y Mitjan [72]:

- La carga de indentación debe ser tal que no produzca grietas en las esquinas o bordes de las incisiones, así como una indentación estable o bien desarrollada, desarrollada sin desprendimiento o daños alrededor de la indentación.
- La dureza de una nueva composición de cerámica o de una cerámica procesada utilizando una nueva ruta de síntesis (sinterización) debe medirse utilizando cargas de guiado variables. Esto puede revelar cualquier "efecto de tamaño de sangría" y se puede obtener una estimación conservadora de "dureza verdadera".

La microindentación, con cargas de indentación desde 10 gr hasta 2 kg, puede utilizarse como método para determinar la dureza de recubrimientos duros con espesores delgados aunque debe considerarse que el valor de la dureza superficial estará influenciado por la dureza del sustrato por lo que es necesario separar las contribuciones del recubrimiento y el sustrato en la dureza compuesta.

Desafortunadamente, la medición de la dureza por medios convencionales no es posible para un amplio rango de cargas debido a que para cargas grandes la deformación plástica ocurrida en el proceso de indentación la sufre el sustrato. Con frecuencia se asume que éste fenómeno involucra ambos materiales y es más notorio para cargas tales que la profundidad de indentación excede la décima parte del espesor del recubrimiento. Bajo ésta situación, la dureza calculada será el resultado de las contribuciones del recubrimiento y del sustrato [74,75]. Con la finalidad de determinar la dureza verdadera del recubrimiento es necesario separar éstas contribuciones. Recientemente, se han propuesto numerosos modelos

matemáticos, empíricos y racionales para tal efecto, sin embargo, cualquiera que sea la hipótesis, la mayoría de los modelos tienen en común suponer una ley aditiva lineal para la expresar la dureza compuesta H_c como función de la dureza del recubrimiento H_f y la dureza del sustrato H_s [76]:

$$H_c = H_s + a(H_f + H_s) \quad (2.1)$$

donde el coeficiente a está asociado a la contribución del recubrimiento.

La diferencia entre los modelos proviene solo de la expresión utilizada para describir la variación del coeficiente a en función de la carga aplicada. Uno de los primeros trabajos fue el de Bückle [77], quien definió el parámetro a como una función de un factor de ponderación asociado al volumen de cada capa de la zona de influencia afectada por la indentación. Un modelo más exitoso se debió a Jönsson y Hogmark [78] que consideran las áreas de soporte de carga bajo la indentación asociadas al sustrato y al recubrimiento donde la deformación del recubrimiento se ajusta a la del sustrato bajo la impronta de indentación y que la energía disipada por la deformación se localiza en los lados de la impronta, ecuación 2.2.

$$H_c = H_s + \left(\frac{A_f}{A}\right) (H_f + H_s) \quad (2.2)$$

Considerando que este modelo no representa el comportamiento de la deformación real durante la indentación, algunos autores buscado como vincular el coeficiente a con el volumen de las zonas plásticas bajo indentación. Una de las primeras propuestas para modificar esa ley de mezclas de áreas por volúmenes, ecuación 2.3, fue propuesta por Burnett y Rickerby [79,80] y Bull y Rickerby [81] basados en el trabajo de Sargent [82]:

$$H_c = H_F \left(\frac{V_f}{V}\right) + H_S \left(\frac{V_s}{V}\right) \quad (2.3)$$

Por otro lado, Chicot y Lesage [83] propusieron igualmente un modelo basado en una ley de mezclas de volúmenes deformados plásticamente por el indentador. Para describir la contribución del recubrimiento y el sustrato en el proceso de deformación supusieron dos sistemas hipotéticos representados en la figura 2.1.

La expresión resultante es:

$$H_c = \alpha_1 \left(\frac{V_{FF}}{V_F} + \frac{V_{SF}}{V_S}\right) H_F + \alpha_2 \left(\frac{V_{FS}}{V_F} + \frac{V_{SS}}{V_S}\right) H_S \quad (2.4)$$

En esta relación, la dureza compuesta muestra un término para la influencia del sustrato en la deformación del recubrimiento y la influencia del recubrimiento se toma en cuenta de la misma forma en la deformación del sustrato. La condición sobre los coeficientes a y b es que $(a + b) = 1$, con $\alpha_1, \alpha_2 = 1/2$.

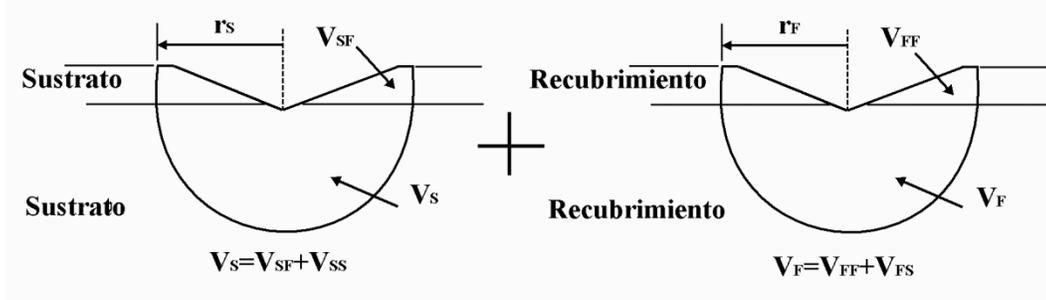


Figura 2.1 Esquema del modelo de dureza de Chicot y Lesage.

Por otra parte, el modelo de Korsunsky et al. [84] está basado en consideraciones de trabajo de indentación asociadas a la energía de deformación de dos materiales y sus interfaces bajo el indentador. La energía necesaria para producir una indentación de profundidad δ está dada por:

$$W_{Total} = \int_0^{\delta} P dx = \frac{H_C \delta^3}{3k} \quad (2.5)$$

donde H_C es la dureza mensurable, k es un parámetro que describe la geometría del indentador y δ es la profundidad ($d/7$ para indentador Vickers). El modelo supone que la energía total disipada durante una prueba de indentación se compone de dos partes: las energías de deformación plástica en el sustrato (W_S) y en el recubrimiento (W_F), tal que:

$$W_{Total} = W_S + W_F \quad (2.6)$$

Para expresar la energía necesaria para deformar el recubrimiento, los autores se basan en observaciones experimentales realizadas en diversos materiales y consideran que la contribución de la energía total debido a la fractura del recubrimiento está dada por:

$$W_F = \lambda_1 G_C t \delta \quad (2.7)$$

Donde G_C es un parámetro de la tenacidad del recubrimiento, λ_1 es un parámetro de fractura y t el espesor del recubrimiento. En el caso de que la deformación plástica sea prominente en el recubrimiento, la contribución total de la energía debido a esta deformación estará dada por:

$$W_F = \frac{\lambda_1 H_F t^2 \delta}{3k} \quad (2.8)$$

De tal modo que Korsunsky et al. expresan el parámetro a de la dureza compuesta como:

$$a = \frac{1}{1 + k\beta^2} \quad (2.9)$$

donde k es un parámetro de suavizado y $\beta = \delta/t$ es llamada profundidad relativa de indentación.

2.4 Adhesión del recubrimiento al sustrato

La adhesión es la capacidad de un recubrimiento para permanecer unido al sustrato en la condición de funcionamiento requerida y esto es claramente vital. Muchos usan las palabras "adhesión" o "fuerza de unión" para describir esta capacidad, pero el tema es mucho más complejo de lo que podría sugerir la descripción de un único parámetro de fuerza. La adherencia entre el recubrimiento y el sustrato no debe mezclarse con la adhesión entre la superficie superior del recubrimiento y la contracara deslizante, que está relacionada con la fricción adhesiva y el desgaste del adhesivo. El fracaso de la adhesión del recubrimiento al sustrato da como resultado una separación interfacial que para los materiales frágiles a menudo se denomina agrietamiento [57]. La nucleación de la grieta y la propagación a una falla de la superficie más grande se debe a los niveles de carga locales y las direcciones, las condiciones de tensión, deformación y deformación resultantes. A veces, una falla que se conoce como adhesivo puede de hecho ser una falla cohesiva cuando se produce el agrietamiento en el recubrimiento o en el sustrato. De hecho, la complejidad es tal que es poco probable que una sola medida o prueba pueda diferenciar satisfactoriamente entre la capacidad de diferentes recubrimientos de permanecer unidos a diferentes sustratos en diferentes condiciones de aplicación.

Desde un punto de vista científico, es preferible pensar en la adhesión como una propiedad fundamental que puede cuantificarse de acuerdo con los datos conocidos sobre las fuerzas de unión atómica. Romper las uniones entre el recubrimiento y el sustrato producirá una grieta lateral. El crecimiento de esta grieta es equivalente al crecimiento de grietas en la mecánica de la fractura y, por lo tanto, el término resistencia superficial a la fractura se usa cada vez más para describir la fuerza de la adhesión del revestimiento [57].

La definición de adhesión utilizada por la Sociedad Americana de Pruebas de Materiales (ASTM) es "el estado en el que dos superficies se mantienen juntas por fuerzas interfaciales que pueden consistir en fuerzas de valencia o fuerzas de enclavamiento o ambas". Fue el reconocimiento de las insuficiencias de una visión teórica o idealizada de la adhesión por lo que se definió la "adhesión práctica", en oposición a la "adhesión básica", para tener en cuenta factores externos como el estrés interno la película o la presencia de defectos. Sin embargo, dado que la adherencia práctica dependerá del método de aplicación o prueba, se ha sugerido que un término alternativo podría ser "adherencia efectiva" para tener en cuenta el hecho de que diferentes condiciones de carga superficial pueden resultar en diferentes mecanismos para recubrir la unión del sustrato. Por lo tanto, al establecer cualquier medida de la capacidad relativa para que un recubrimiento permanezca unido a un sustrato, es importante definir con precisión las condiciones de contacto [57].

La adhesión puede ser la propiedad de recubrimiento más importante, ya que si la adhesión del recubrimiento al sustrato es inadecuada, se puede perder toda la funcionalidad de la superficie. Se han sugerido muchas técnicas para la evaluación de la adhesión. Algunos de estos tienen su origen en tecnologías en las que las fuerzas de unión son comparativamente bajas, como la pintura, y por lo tanto, están limitadas en su alcance. Otros son deficientes por otras razones, como se describe a continuación. Los antecedentes teóricos de la adhesión al recubrimiento y la evaluación de la adhesión han sido revisados por Bull [85], Matthews [86], Bhushan [40] y Ollendorf et al. [87].

2.4.1 Prueba por desprendimiento

Una prueba muy básica es la reportada por Kuwahara et al. [88], donde el extremo de una varilla cilíndrica de acero se adhiere en ángulo recto a la superficie del recubrimiento con cemento epoxi. Después del curado, se aplica una carga en el extremo de la varilla, paralela al recubrimiento. La carga a la cual la varilla cae y desprende el recubrimiento da una medida de la adhesión. Es importante asegurarse de que la carga sea puramente normal y que no se apliquen momentos de flexión en la interfaz. El Shabasy [89] describió la disposición mostrada en la figura 2.2 en la que la película y el sustrato están intercalados entre dos varillas que están alineadas y, por lo tanto, no deben aplicar ninguna fuerza de flexión o cizallamiento paralela a la superficie del recubrimiento.

La limitación de todas estas técnicas que usan epoxi u otros agentes de unión es claramente que la máxima adhesión que se puede medir debe ser menor que la resistencia del propio material de unión.

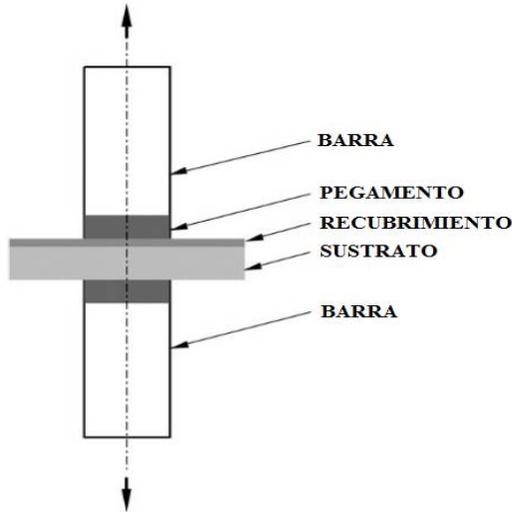


Figura 2.2 Prueba de adhesión por el método de desprendimiento.

2.4.2 Pruebas de indentación

Las pruebas de indentación tienen un uso bastante extendido en la industria, como un medio rápido y conveniente de obtener una indicación cualitativa de la adhesión. Estas generalmente consisten en una indentación Rockwell C a 150 kg_f y la observación mediante microscopía óptica (100X) alrededor de la huella resultante la cual es comparada con un criterio gráfico de resultados aceptables y no-aceptables [90]. La deficiencia de este método es que se basa en la propagación de las grietas sobre la superficie, mismas que deben observarse, pero es posible que se origine desunión del recubrimiento sin presentar agrietamiento visible de la superficie.

2.4.3 Prueba por scratch

Esta prueba consiste en un arrastrar un indentador a lo largo de la superficie de un recubrimiento bajo una carga normal que va incrementándose hasta que ocurra el desprendimiento del recubrimiento, la figura 2.3 muestra el principio de operación de este instrumento. La carga correspondiente a la falla del recubrimiento proporciona una guía de la resistencia de la adhesión y regularmente está referenciada como la carga crítica. 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 [57].

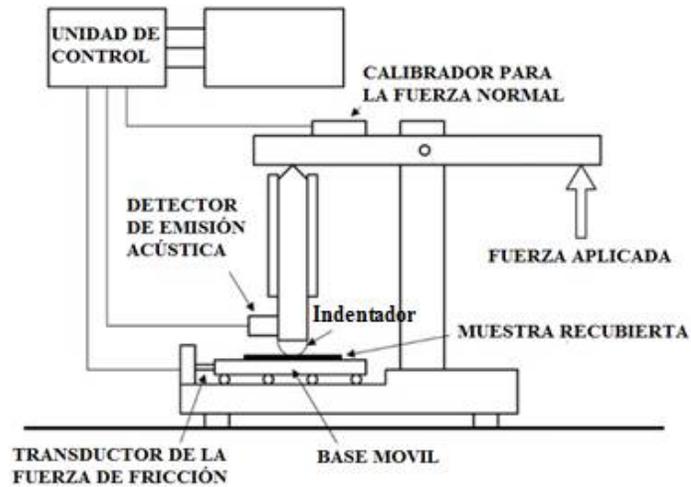


Figura 2.3 Esquema y equipamiento de la prueba de scratch.

2.5 Tribología

La palabra tribología, etimológicamente hablando, significa estudio de los fenómenos de fricción o rozamiento. El concepto de tribología fue usado por primera vez en un informe elaborado por la Comisión del Ministerio de Educación y Ciencias de la Gran Bretaña, por el profesor Peter Jost el marzo de 1966, definiéndola como: “la ciencia y la tecnología que estudia las superficies que están en contacto y movimiento relativo así como los fenómenos que de ello se derivan” [91].

El comportamiento de los fenómenos de fricción y desgaste que se manifiestan en las superficies de los sólidos que se encuentran en contacto y movimiento relativo, es consecuencia del tribosistema donde se localizan, ver figura 2.4, así como de las propiedades geométricas, mecánicas, físicas y químicas de los mismos. Las primeras involucran lo referente a las formas y al contacto de las superficies así como de su distribución y configuración de las asperezas en la superficie. Las segundas, incluyen los módulos de elasticidad, dureza, parámetros de fatiga, etc. Mientras las terceras se ocupan de las características de endurecimiento y las constantes de difusión de los materiales. Por último, las propiedades químicas hacen referencia a la composición de las superficies.

El contacto mecánico se encuentra dentro de los parámetros geométricos, se presenta cuando dos superficies se encuentran deslizando una con respecto a otra, donde existen dos áreas de

contacto, la aparente y la real, donde la primera es el área de las superficies que están en contacto, como lo muestra la figura 2.5a, mientras que para el área real es necesario considerar que las superficies no son completamente planas y presentan rugosidades, lo que ocasiona que el contacto solo ocurra en algunos puntos donde coinciden las crestas respectivas de ambas superficies. Para determinar esta área, es necesario sumar todos los micro-contacts, los cuales son una pequeña parte del área aparente de contacto de dichas superficies, como se muestra en la figura 2.5b.

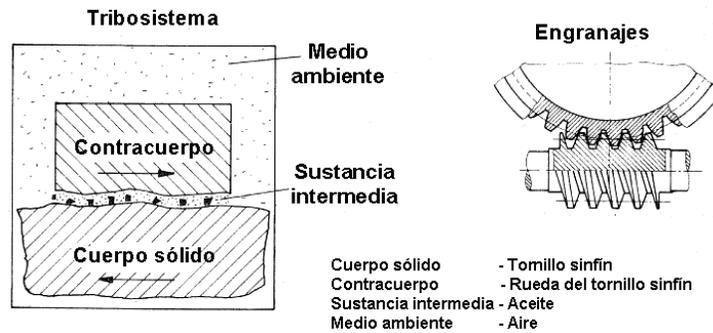


Figura 2.4 Esquema de un tribosistema.

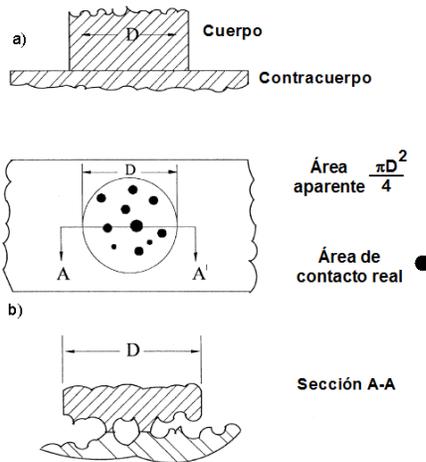


Figura 2.5 Área de contacto, a) aparente; b) real.

En la figura 2.6, se observa como varía el área real de contacto cuando se incrementa la fuerza normal [92].

2.5.1 Fricción

La fricción se define como la resistencia al movimiento que es experimentada durante el deslizamiento cuando un cuerpo se mueve tangencialmente sobre otro con el cual está en

contacto. La fuerza tangencial resistiva, la cuál actúa en una dirección directamente opuesta a la dirección del movimiento, es llamada fuerza de fricción [72].

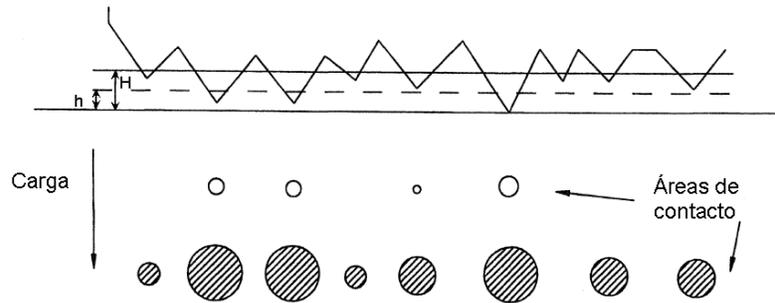


Figura 2.6 Efecto del incremento de la carga sobre el área real de contacto. H y h , son las penetraciones de las crestas, donde $H > h$.

Si dos cuerpos se colocan en contacto, el valor de la fuerza tangencial que es requerido para iniciar el movimiento es la fuerza de fricción estática. La fuerza tangencial requerida para mantener el movimiento relativo es conocida como la fuerza de fricción cinética o dinámica. La fuerza de fricción estática es mayor que la fuerza de fricción cinética. La fricción no es una propiedad del material, es una respuesta del sistema.

Existen tres leyes básicas de fricción que se cumplen en un amplio rango de aplicaciones. Dos de estas leyes son conocidas como Leyes de Amontons, la primer persona en presentarlas de manera clara y sencilla, aunque se sabe hoy en día que el mismo fenómeno fue tratado y estudiado anteriormente por Da Vinci, cuyas escritos fueron, sin embargo, descubiertos más tarde [72].

La primer ley de Amontons establece que la fuerza de fricción es directamente proporcional a la fuerza normal. La segunda ley de Amontons establece que la fuerza de fricción es independiente del área aparente de contacto entre dos cuerpos en contacto (pero no del área real de contacto) [72]. A estas dos leyes se añade una tercera ley, que es con frecuencia atribuida a Coulomb. Esta ley estipula que la fuerza de fricción cinética es independiente de la velocidad de deslizamiento una vez que el movimiento empieza. Con esto, Coulomb hace clara la distinción entre fricción estática y fricción cinética. Es decir, es bien conocido que la fuerza de fricción requerida para comenzar el movimiento de un cuerpo es más grande que la requerida para mantenerlo [72].

2.5.2 Desgaste

El desgaste es el daño progresivo que envuelve la pérdida de material, el cual ocurre sobre la superficie de un material como resultado del movimiento relativo para partes que trabajan con contacto entre sí. Para ser más precisos, se considera al desgaste como el desprendimiento de partículas de la superficie de un cuerpo y/o el desplazamiento del material de zonas de contacto hacia zonas libres de carga. A continuación se describen brevemente los diferentes tipos de desgaste [40].

Desgaste adhesivo

El desgaste adhesivo es una forma de deterioro que se presenta entre dos superficies en contacto deslizante.

Según la teoría adhesiva, bajo la acción de las cargas normales aplicadas, las crestas de las asperezas de las dos superficies en contacto sufren fluencia plástica y soldadura en frío. Al producirse el movimiento, las uniones soldadas se rompen por cizalladura, tomando lugar la separación en el cuerpo de menor dureza. De esta manera, la superficie más dura se cubre de una película transferida del material del contracuerpo, a la vez que se desprenden partículas en el proceso.

Desgaste abrasivo

El desgaste abrasivo sucede cuando asperezas de una superficie dura o bien partículas libres duras deslizan sobre una superficie más blanda y producen daño en esta superficie por deformación plástica y fractura.

En el primer caso, la superficie más dura de las dos que están en contacto (abrasión de dos cuerpos) produce abrasión en la superficie más blanda y en el segundo caso, la parte dura es un tercer cuerpo, generalmente pequeñas partículas abrasivas atrapadas entre las dos superficies y lo suficientemente duras como para producir abrasión en una o ambas superficies que están en contacto (abrasión por tercer cuerpo).

Desgaste por fatiga

La fatiga en la superficie y sub-superficie se observa durante el deslizamiento repetido. Los repetidos ciclos de carga y descarga a los cuales los materiales son expuestos pueden inducir la formación de grietas superficiales y sub-superficiales, que eventualmente, después de un número crítico de ciclos resultarán en la fractura de la superficie con la formación de grandes

fragmentos, dejando grandes orificios en la superficie. Antes de este punto crítico, el desgaste del material es despreciable, lo que no sucede con el desgaste causado por un mecanismo adhesivo o abrasivo, donde el desgaste causa un deterioro gradual del material desde el inicio del proceso. Por lo tanto, la cantidad de material removido debido a la fatiga no es un parámetro útil. Mucho más relevante es la vida útil en términos del número de revoluciones o ciclos de trabajo antes de que ocurra la falla por fatiga.

Desgaste por impacto.

El desgaste por impacto comprende dos amplios tipos de fenómenos de desgaste: el erosivo (partículas al azar) y el percusivo (impactos repetidos en un punto). La erosión puede ocurrir por chorros y flujos de partículas sólidas pequeñas transportadas por un fluido, en general aire o agua, o también por gotas líquidas. La percusión ocurre por impactos repetidos de cuerpos sólidos de tamaño mayor. Esto es una forma de abrasión, que generalmente se trata diferente porque la presión del contacto crece con la energía cinética del flujo de partículas en un chorro de aire o líquido cuando encuentra la superficie. La velocidad de las partículas, el ángulo de impacto y el tamaño medio de las partículas de abrasivo dan una medida de la energía cinética de las partículas que chocan.

Desgaste químico.

El desgaste químico o corrosivo ocurre cuando el deslizamiento entre dos superficies tiene lugar en un ambiente corrosivo. En aire, el medio corrosivo más dominante es el oxígeno. Por lo tanto, el desgaste químico en aire generalmente es llamado desgaste oxidativo. En la ausencia de deslizamiento, los productos químicos de corrosión (es decir, óxidos) podrían formar una película que detendría la corrosión, pero la acción por deslizamiento desgasta la película, así que el ataque químico puede continuar. De esta forma, el desgaste químico requiere ambas: la reacción química (corrosión) y rozamiento.

Desgaste por vibración “fretting”.

Este tipo de desgaste ocurre cuando hay un movimiento oscilatorio de baja amplitud en dirección tangencial entre superficies en contacto que están nominalmente en reposo (amplitud de oscilación desde nanómetros hasta unos pocos micrómetros).

La ocurrencia de este tipo de desgaste es común en la mayoría de maquinaria que está sujeta a vibración durante su operación, básicamente el desgaste por vibración es una forma de

desgaste adhesivo ó abrasivo, donde la carga normal causa adhesión entre las asperezas y el movimiento oscilatorio causa su fractura. El desgaste por vibración más común está combinado con corrosión, en este caso el modo de desgaste es conocido como corrosión por vibración.

2.5.3 Lubricación

El propósito de la lubricación es separar las superficies con deslizamiento relativo entre sí de tal manera que no se produzca daño entre ellas; se intenta con ello que el proceso de deslizamiento sea con el rozamiento más pequeño posible.

Para conseguir esto se intenta, siempre que sea posible, que haya una película de lubricante de espesor suficiente entre las dos superficies en contacto para evitar el desgaste. La película lubricante separa las superficies en movimiento, la fricción ocurre, no entre las superficies metálicas, sino entre los planos moleculares del lubricante. Esta acción se conoce como *cizallamiento*. Entre las funciones que tiene un lubricante, se enlistan las principales:

- Reducir la fricción
- Reducir el desgaste
- Amortiguar cargas repentinas
- Reducir la temperatura de operación
- Minimizar la corrosión
- Proteger contra partículas contaminantes

Existen diferentes regímenes de lubricación, los cuales se describen brevemente a continuación. En la figura 2.7 pueden verse esquemáticamente éstos mismos.

Lubricación capa límite. Ocurre a baja velocidad relativa entre los componentes y cuando no hay una capa completa de lubricante cubriendo las partes. Durante la lubricación de capa límite, hay contacto físico entre las superficies y hay desgaste.

Mixto. La transición entre los regímenes de lubricación hidrodinámico/elastohidrodinámico y capa límite es conocido como lubricación mixta en la cual dos mecanismos de lubricación pueden estar funcionando. Este régimen es también llamado algunas veces como cuasi-hidrodinámico, fluido parcial o película delgada.

Lubricación hidrodinámica. Este régimen de lubricación ocurre cuando las superficies están completamente cubiertas con una película lubricante. En esta condición, la capa lubricante se mantiene entre las partes y la presión del lubricante crea una cuña de lubricante delante de la película que impide el contacto entre las superficies.

Lubricación elastohidrodinámica. Cuando el lubricante se lleva hasta la zona de convergencia de las superficies, o de dos asperezas, la presión sobre el lubricante causa un incremento en viscosidad que es suficiente para separar las superficies, o asperezas, en el punto de encuentro. Debido al incremento en viscosidad, y al tiempo tan corto que se requiere para llevar al lubricante a través del área de contacto, este no puede escapar, y las superficies metálicas permanecen separadas, deformándose elásticamente bajo la presión del lubricante. Esta presión aumenta la superficie de contacto con el lubricante, y la efectividad del mismo. Este régimen de lubricación, que ocurre en cojinetes de rodamiento y en engranes.

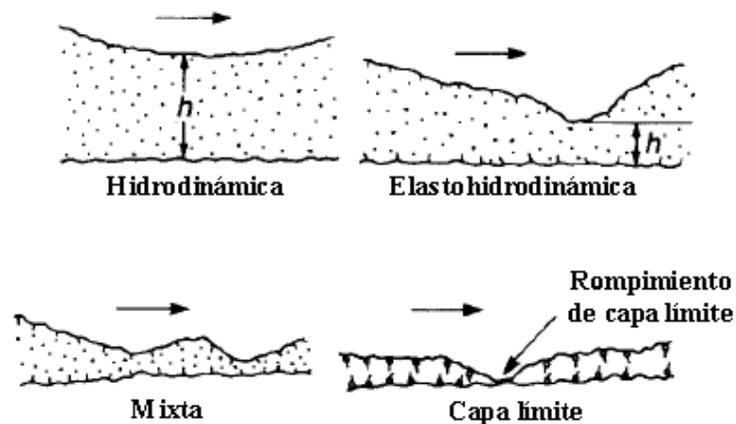


Figura 2.7 Regímenes de lubricación.

La fricción y el desgaste son dos fenómenos que están relacionados, debido a la influencia que puede producir uno sobre otro. En el desgaste se producen partículas que quedan atrapadas entre las superficies que están en contacto, influyendo en la fricción. Además, en las uniones se generan temperaturas muy altas en períodos cortos de tiempo, afectando al proceso de deformación y por lo tanto, al desgaste. Las altas temperaturas se deben al calor que se genera durante el proceso de desgaste, dependiendo de las condiciones de funcionamiento, carga, velocidad y rapidez con la que se elimine el calor, por lo que dependerá de las propiedades térmicas de las superficies que están en contacto. La fricción es un fenómeno que está

relacionado con el contacto superficial, donde es notable la influencia de la naturaleza de las superficies, su composición y microestructura.

La fricción y el desgaste son sensibles a los mismos parámetros y en general a los mismos tipos de fenómenos. El hecho de observar cómo evoluciona la fricción en un sistema nos puede ayudar a distinguir procesos o cambios en los mecanismos de desgaste, por lo que su observación en conjunto nos da información valiosa sobre el comportamiento tribológico del material. Por ello, la fricción y el desgaste deben considerarse fenómenos relacionados pero no equivalentes, aunque no sean independientes. El desgaste puede dar lugar a modificaciones superficiales que influyan sobre la fricción, tales como formación de películas y cambios de rugosidad. Por su parte, la fricción, mediante un efecto de calentamiento o de esfuerzos de tracción, puede modificar el comportamiento del material y, por tanto, influir en el desgaste.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y TRIBOLÓGICAS DE ACEROS PARA HERRAMIENTA MODIFICADOS SUPERFICIALMENTE

En este capítulo se presenta la metodología de investigación para la caracterización de las propiedades mecánicas y tribológicas de aceros para herramienta que fueron modificados superficialmente. La metodología está dividida en dos: la primera parte corresponde al análisis tribomecánico de los sustratos que fueron modificados mediante un recubrimiento duro de nitruro de titanio (TiN) o carbonitruro de titanio (TiCN) por la técnica de deposición PVD mientras que la segunda corresponde al análisis sobre la influencia de la rugosidad superficial en el comportamiento tribológico de los sustratos a los cuales se les aplicó un tratamiento termoquímico de nitrurado.

En ambas partes se hace una breve descripción del equipo utilizado así como una descripción detallada de los procedimientos seguidos para desarrollar los ensayos de dureza, adhesión, fricción y desgaste. También se describe qué parámetro es el que se obtiene en cada una de las pruebas.

La metodología descrita permitió conducir los experimentos de forma sistemática, en base a estándares establecidos para cada uno de ellos, así como representar de manera adecuada los resultados para una mejor comprensión de los mismos.

3.1 Metodología para el análisis tribomecánico de aceros recubiertos con TiN y TiCN

La figura 3.1 muestra a manera de esquema la metodología empleada para el análisis tribomecánico de capas duras, de TiN y TiCN, sobre sustrato de acero para herramientas.

Para el desarrollo de esta investigación los materiales utilizados fueron aceros para herramienta. La composición química y la dureza se presentan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Composición química y dureza de los sustratos de acero tipo D2, M2, M4 y H13.

	Composición química (wt.%)					Dureza (HRC)
	C	Cr	V	W	Mo	
D2	1.5	12.0	1.0	---	1.0	54-61
M2	0.85-1.0	4.0	2.0	6.0	5.0	60-65
M4	1.3	4.0	4.0	5.5	4.5	61-66
H13	0.40	4.85	0.91	---	1.25	50-52

3.1.1 Preparación de las probetas

Las probetas empleadas para los ensayos de fricción y desgaste fueron manufacturadas a partir de una barra redonda de 25.4 mm de diámetro y sus dimensiones se indican en la figura 3.2. Para el corte y maquinado de las probetas debe tomarse en cuenta que estas operaciones tienen que realizarse en condiciones tales que no afecten la estructura superficial de la misma. Por lo tanto, se debe cuidar que la temperatura del material no se eleve demasiado durante este proceso, por tal motivo tanto el corte como el maquinado del material se llevaron a cabo en presencia de un medio refrigerante.

Las probetas fueron lijadas y pulidas gradualmente mediante lijas de carburo de silicio de diferentes tamaños mediante el uso de una pulidora LaboPol-1 marca Struers hasta obtener una rugosidad media de 0.09 μm . Las probetas se apoyan ligeramente sobre la superficie del abrasivo el cual se coloca sobre el disco rotativo de la pulidora y se hace girar a 250 rpm; durante la operación se deja correr agua la cual limpia la zona de pulido de los pequeños desprendimientos de material y al mismo tiempo refrigera la zona desbastada (figura 3.3).

Cabe mencionar que al cambiar de un abrasivo a otro se lava bien la probeta para no transportar partículas desprendidas del abrasivo anterior; la probeta se gira 90° de tal manera que el nueva superficie de lijado sea perpendicular a la anterior.

3.1.2 Deposición de los recubrimientos

El procedimiento para el recubrimiento de nitruro de titanio (TiN) y carbonitruro de titanio (TiCN) de las piezas se realiza con un proveedor externo a la institución.

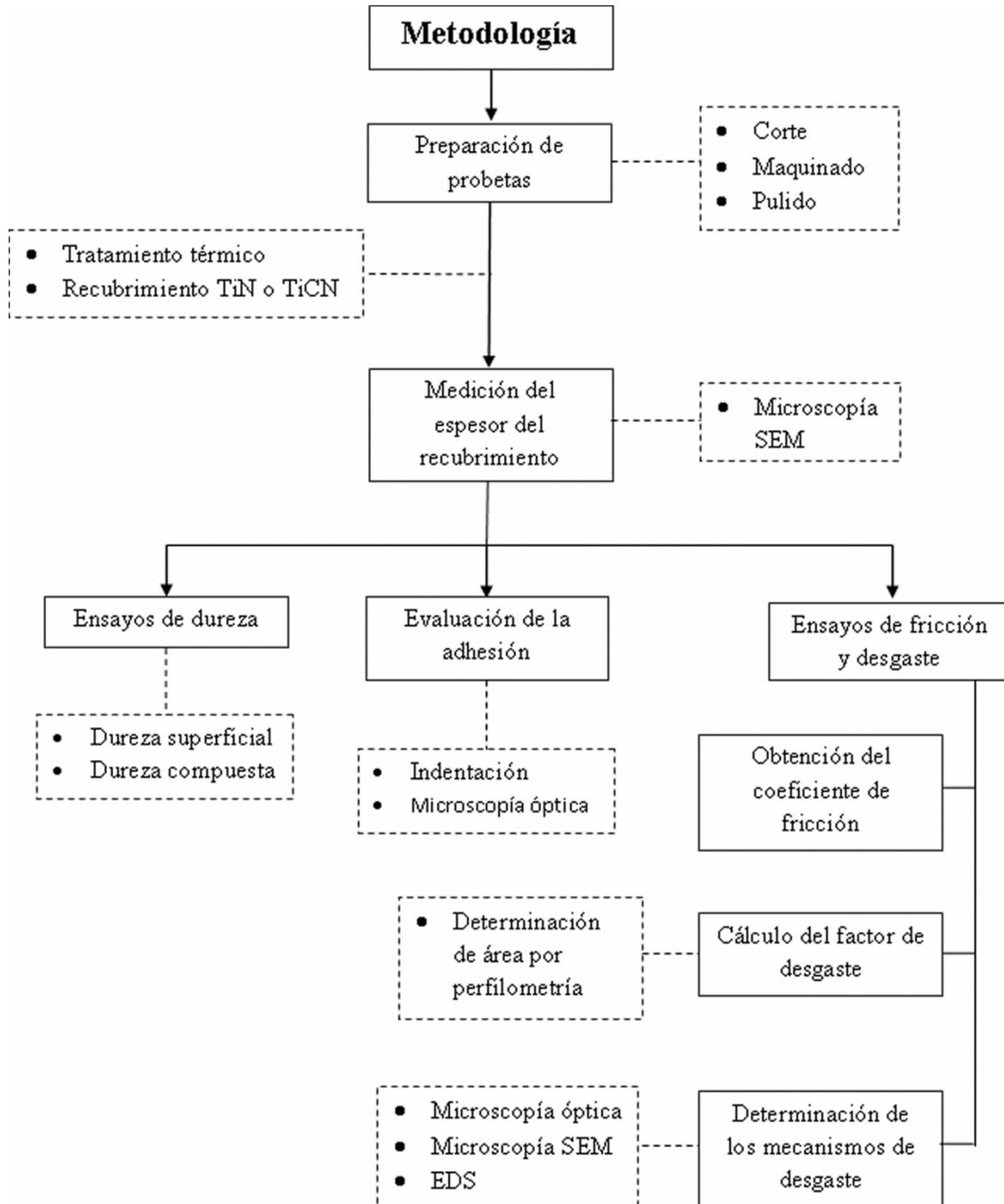


Figura 3.1 Esquema de la metodología para el análisis tribomecánico de capas duras sobre sustratos de acero para herramientas.

Previo al proceso de deposición de los recubrimientos es necesario realizar un tratamiento térmico de temple y revenido térmico que tienen por objetivo incrementar la dureza del sustrato para mejorar la adhesión del recubrimiento al sustrato.

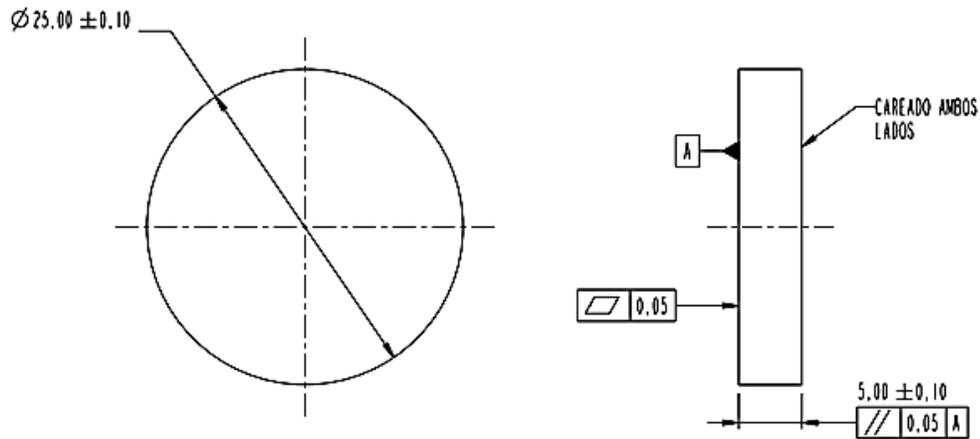


Figura 3.2 Plano de fabricación de las probetas.



Figura 3.3 Equipo utilizado para el pulido de las probetas.

Las especificaciones proporcionadas por el proveedor de los recubrimientos se muestran en la tabla 3.2.

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

Recubrimiento	TiCN	TiN
Color Característico	Azul	Dorado
Espesor	4.02 μm	5 μm
Dureza	3000 (HV 0.05)	2300 (HV 0.05)
Adherencia	Buena	Buena

3.1.3 Medición del espesor del recubrimiento

Para la medición del espesor, se cortaron por mitad las probetas recubiertas tal como se muestra en la figura 3.4a; durante el corte fueron refrigeradas con agua para no afectar las propiedades superficiales de las probetas por la elevación de la temperatura durante el corte.

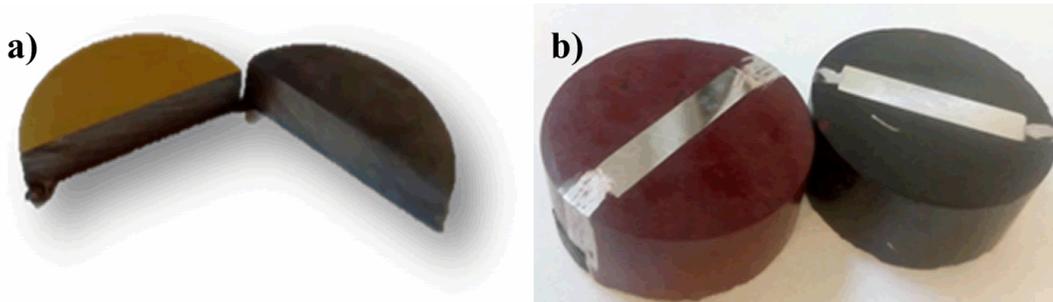


Figura 3.4 Preparación de las probetas para medición de espesor de recubrimiento:
a) cortes transversales de las probetas y b) probetas montadas en baquelita.

Posteriormente fueron montadas en baquelita, ver figura 3.4b, dejando expuesta el área donde se realizó el corte para la medición del espesor del recubrimiento. Una vez realizado el montaje en la baquelita se realizó el pulido hasta llegar a un acabado espejo, para finalmente ser observada mediante un microscopio SEM Hitachi 1510 (figura 3.5a) y realizar las mediciones correspondientes, ver figura 3.5b.

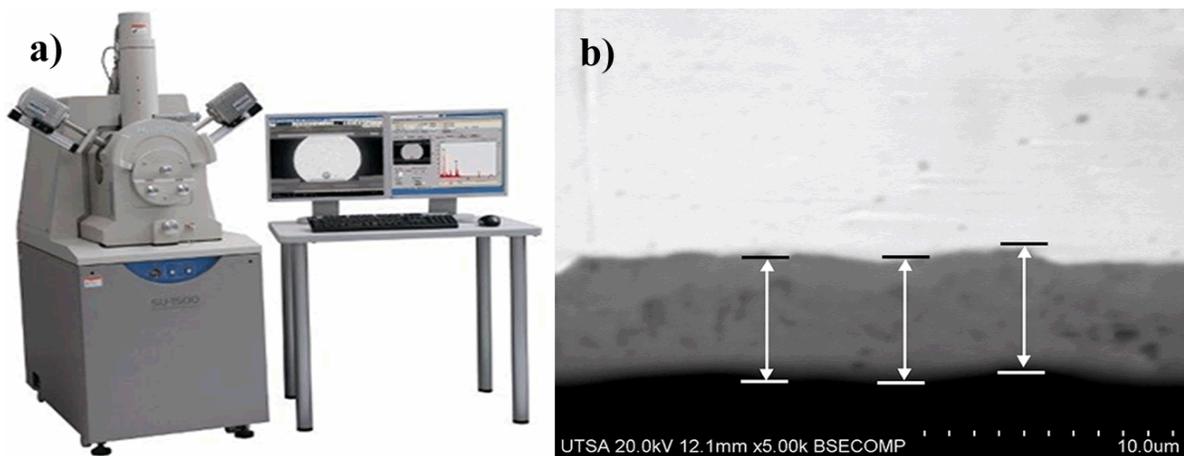


Figura 3.5 a) Microscopio SEM Hitachi 1510 y b) medición del espesor del recubrimiento

3.1.4 Ensayos de dureza superficial y dureza compuesta

Las mediciones de microdureza se realizaron mediante indentaciones tipo Vickers usando un microindentador Vickers- Knoop Auto SMVK-1000ZS en un rango de carga de 0.98 a 9.8 N durante un tiempo de 15 segundos. Se tomaron cinco mediciones para cada carga obteniéndose

dos diagonales para cada ensayo; utilizando un microscopio Carl Zeiss Axio Image se determinaron las longitudes de estas diagonales. Posteriormente, el valor de la microdureza HV se calculó a partir de la longitud diagonal media d y la carga P para cada una de las indentaciones:

$$HV = 1.8544 \frac{P}{d^2} \quad (3.1)$$

La influencia de la dureza del sustrato en la dureza del recubrimiento fue estudiada mediante la investigación propuesta por Tuck et al. [93]. Se determinó el parámetro adimensional beta (β) que corresponde a la relación entre δ y el espesor del recubrimiento t , donde la profundidad máxima de indentación, δ , viene dada por la relación $d/7$, suponiendo que no hay recuperación elástica de la longitud diagonal durante la descarga.

3.1.5 Evaluación de la adhesión de los recubrimientos duros al sustrato

La adhesión de los recubrimientos duros al sustrato de acero para herramienta fue evaluada mediante un ensayo de dureza Rockwell, basado en la norma CEN/TS 1071-8 [94]. Este procedimiento consistió en realizar una huella de indentación en la superficie del recubrimiento mediante el uso de un indentador universal del proveedor Sistemas de Medición Inteligentes, ver figura 3.6a; dicha huella (figura 3.6b) fue observada mediante microscopía óptica a una magnificación de 100X y después se relacionó con la clasificación cualitativa de acuerdo a la norma CEN/TS 1071-8, ver figura 3.7 y tabla 3.3.

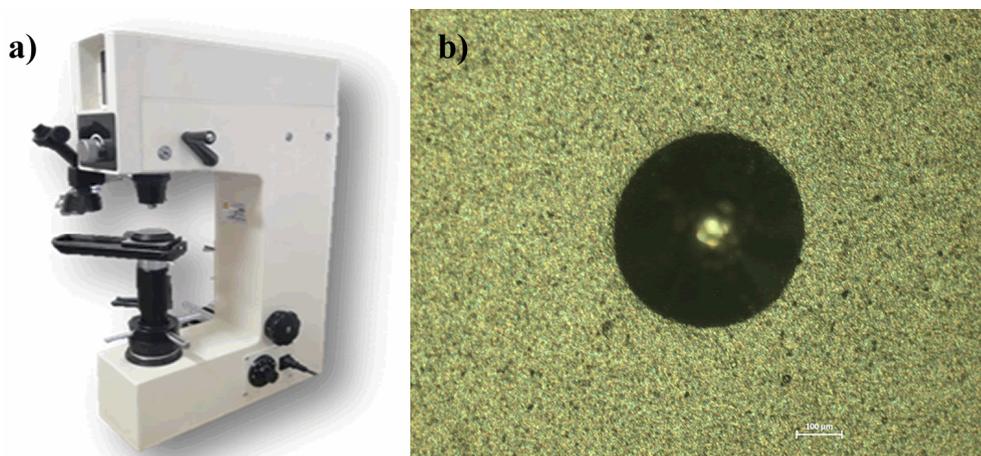


Figura 3.6 a) Indentador Universal de Sistemas de Medición Inteligentes y b) micrografía óptica (100X) de la huella de indentación.

La carga para los ensayos de indentación se seleccionó dependiendo de la combinación de sustrato-recubrimiento. Para sustratos metálicos más duros que 54 HRC se seleccionó una

escala Rockwell C que corresponde a una carga de 150 kgf mientras que para sustratos metálicos menos duros de 54 HRC se seleccionó una escala Rockwell D a la cual le corresponde una carga de 100 kgf [94]. La tabla 3.4 muestra las cargas aplicadas según el sustrato utilizado.

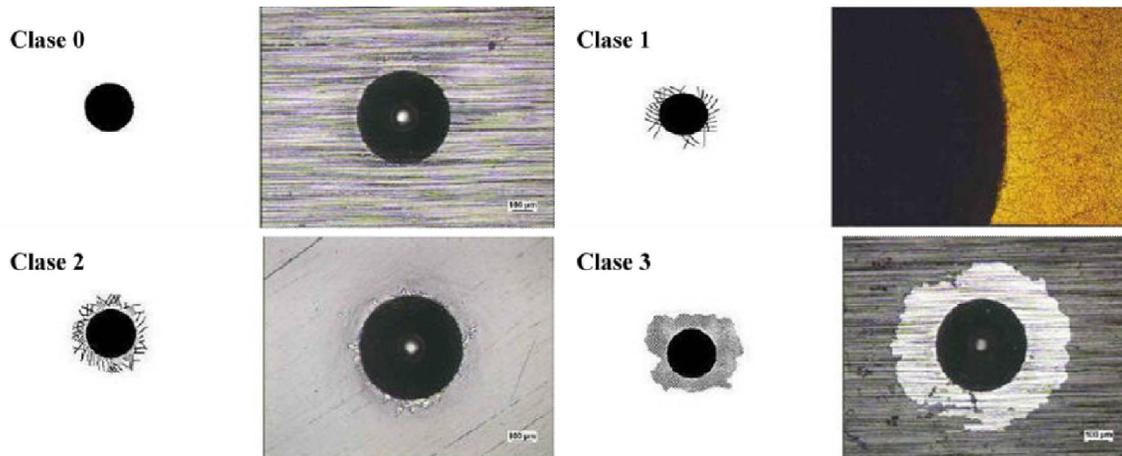


Figura 3.7 Criterio cualitativo de adhesión en base a la norma CEN/TS 1071-8: (a) Clase 0, (b) Clase 1, (c) Clase 2 y (d) Clase 3.

Tabla 3.3 Observaciones en las clases de adhesión de un recubrimiento duro al sustrato según la norma CEN/TS 1071-8 [94].

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

Tabla 3.4 Selección de la carga de indentación según la dureza del sustrato.

Sustrato	Dureza	Recubrimiento	Carga de indentación (kg _f)
D2	54-61	TiCN	150
M2	60-65	TiCN	150
M4	61-66	TiCN	150
H13	50-52	TiN y TiCN	100

3.1.6 Ensayo de fricción y desgaste

Los ensayos de fricción se llevaron a cabo en un tribómetro CSM Instruments mediante una configuración *Pin-On-Disk* de acuerdo a la norma ASTM G99 [95], ver figura 3.8, con la

finalidad de obtener el coeficiente de fricción cinético μ_k (cada ensayo de fricción se realizó 3 veces con el objetivo de tener repetibilidad en los resultados). La carga normal aplicada en todos los casos fue de 10 N; dicha carga genera un esfuerzo de contacto de aproximadamente 1200 MPa mismo que es cercano a la resistencia a la fluencia de los aceros para herramienta utilizados en esta investigación. Este valor de fuerza aplicada se determinó empleando las ecuaciones de esfuerzos de contacto de Hertz.



Figura 3.8 Tribómetro CSM Instruments con configuración pin-on-disk.

Como contraparte del tribosistema se utilizó un pin de carburo de tungsteno (WC) con diámetro, microdureza, rugosidad y módulo de elasticidad de 6 mm, 1370 (HV_{0.5}), 0.02 μm y 670 GPa, respectivamente. El radio de la huella de desgaste y la distancia de deslizamiento fueron establecidos en 2 mm y 1000 m, respectivamente.

Tabla 3.5 Velocidad de deslizamiento y temperatura en función de la condición de lubricación para los diferentes ensayos de fricción.

Sustrato	Recubrimiento	Velocidad de deslizamiento (cm/s)		Temperatura (°C)		Tipo de lubricante
		Seco	Lubricado	Seco	Lubricado	
D2	TiCN	5	2.5	25	50	Aceite mineral para proceso de corte y formado
M2	TiCN	5	2.5	25	50	
M4	TiCN	5	2.5	25	50	
H13	TiN	2.5	2.5	25	100	Disolución de grafito en aceite mineral para proceso de forja
	TiCN	2.5	2.5	25	100	

En la tabla 3.5 se enlistan el resto de las condiciones de los ensayos de fricción para las condiciones en seco y lubricada de los diferentes sistemas *sustrato-recubrimiento*.

La temperatura para las pruebas en seco fue controlada por medio de aire acondicionado del espacio donde se encuentra el tribómetro mientras que para la condición lubricada es necesaria una copa para contener el lubricante y adicionalmente una celda de temperatura para elevar la temperatura del lubricante. El montaje de la probeta sobre el tribómetro en condiciones en seco y lubricado se muestra en la figura 3.9.

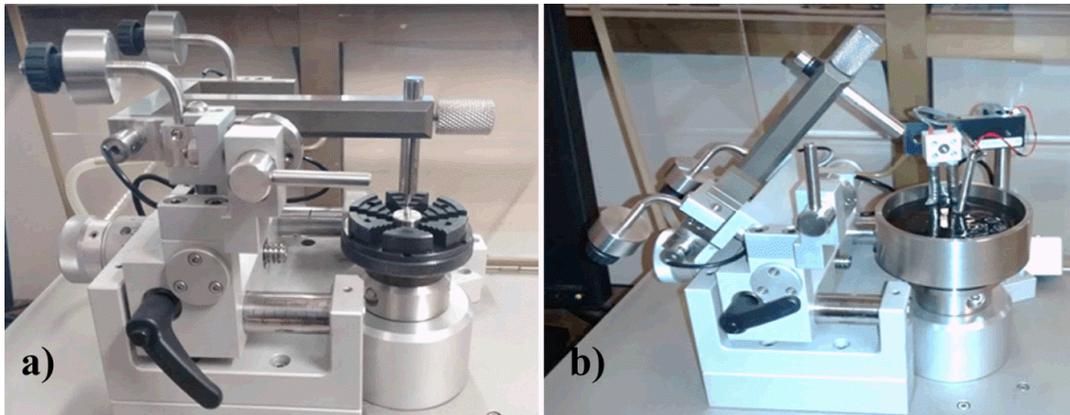


Figura 3.9 Configuración del dispositivo de sujeción de la probeta: a) en seco y b) lubricado.

Al finalizar las pruebas, independientemente de la condición, se limpian las probetas y el pin para eliminar todo rastro de partículas de desgaste o de lubricante adherido para la condición lubricada como resultado de la interacción entre la probeta y el pin.

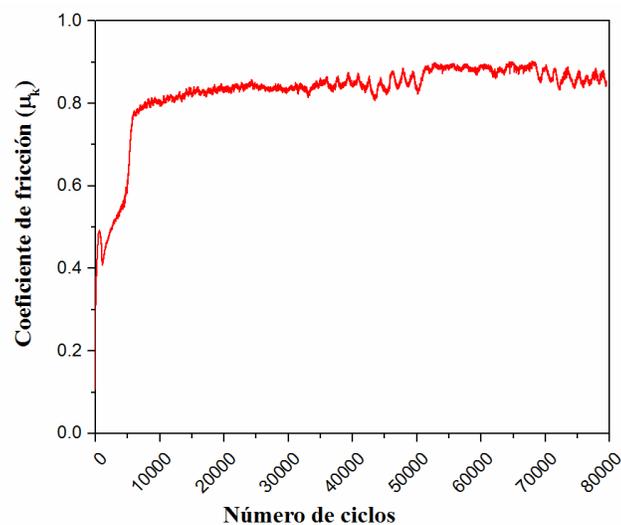


Figura 3.10 Gráfica del coeficiente de fricción mediante el software Tribbox™.

El coeficiente de fricción es obtenido directamente desde el software TriboX™ utilizado por el tribómetro, el cual es la interfase entre el tribómetro y el usuario. Como resultado se obtiene un gráfico que muestra el comportamiento de coeficiente de fricción, tal como se muestra en la figura 3.10.

3.1.7 Cálculo del factor de desgaste

Después de las pruebas de fricción, es necesario tener algún parámetro cuantitativo para evaluar el desgaste. Para este propósito se utilizó la expresión:

$$K = \frac{V}{FS} \quad (3.2)$$

donde V es la pérdida de volumen, F corresponde a la carga aplicada y S es la distancia de deslizamiento total. El volumen perdido de material se determinó por perfilometría de contacto mediante el uso de un Rugosímetro SJ-400. El perfil de huella se obtuvo deslizando el palpador del rugosímetro del centro de la probeta pasando por encima de la huella de desgaste, ver figura 3.11a, para obtener un perfil como se muestra en la figura 3.11b y evaluar el área de la sección transversal.

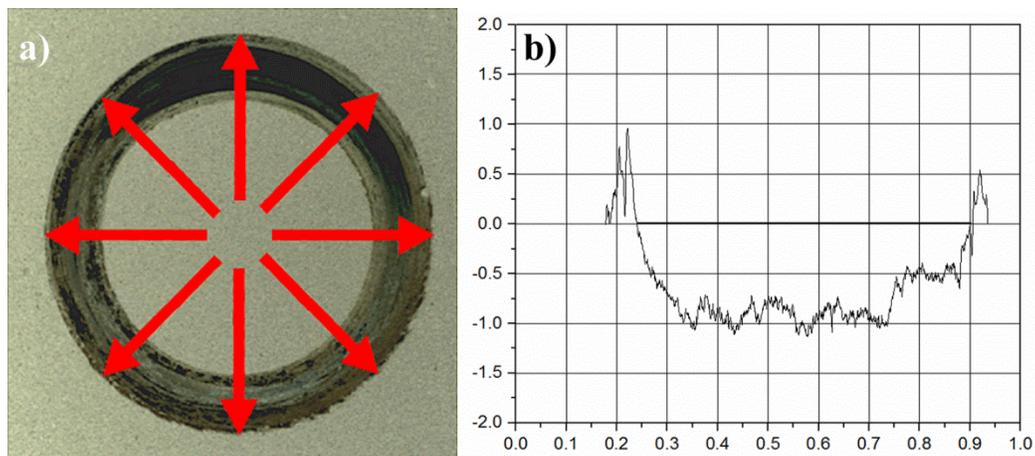


Figura 3.11 a) Huella de desgaste y b) perfil de huella para evaluar el área de la sección transversal.

Dicho procedimiento se realizó 10 veces por cada probeta desgastada y se obtuvo un valor promedio del área. Posteriormente, para determinar el volumen perdido de material, éste valor promedio se multiplicó por el perímetro de la huella de desgaste. Con las consideraciones anteriores, la ecuación 3.2 se reescribió como:

$$K = \frac{2\pi r A}{FS} \quad (3.3)$$

donde A es el valor promedio del área de la sección transversal de la huella de desgaste, r es el radio de la huella de desgaste; F y S siguen siendo la fuerza aplicada y la distancia total de deslizamiento, respectivamente.

3.1.8 Determinación de los mecanismos de desgaste

Para analizar los mecanismos de desgaste presentes durante las pruebas de tribología, se empleó microscopía SEM. Por medio de un microscopio SEM Hitachi 1510 como el que se observa en la figura 3.12a se obtuvieron imágenes de la huella de desgaste, ver figura 3.12b, con la finalidad de observar los mecanismos de desgaste presentes para cada una de las probetas. Adicionalmente, se hicieron análisis de espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS) para verificar si hubo transferencia de material del pin a las probetas, ver figura 3.12c.

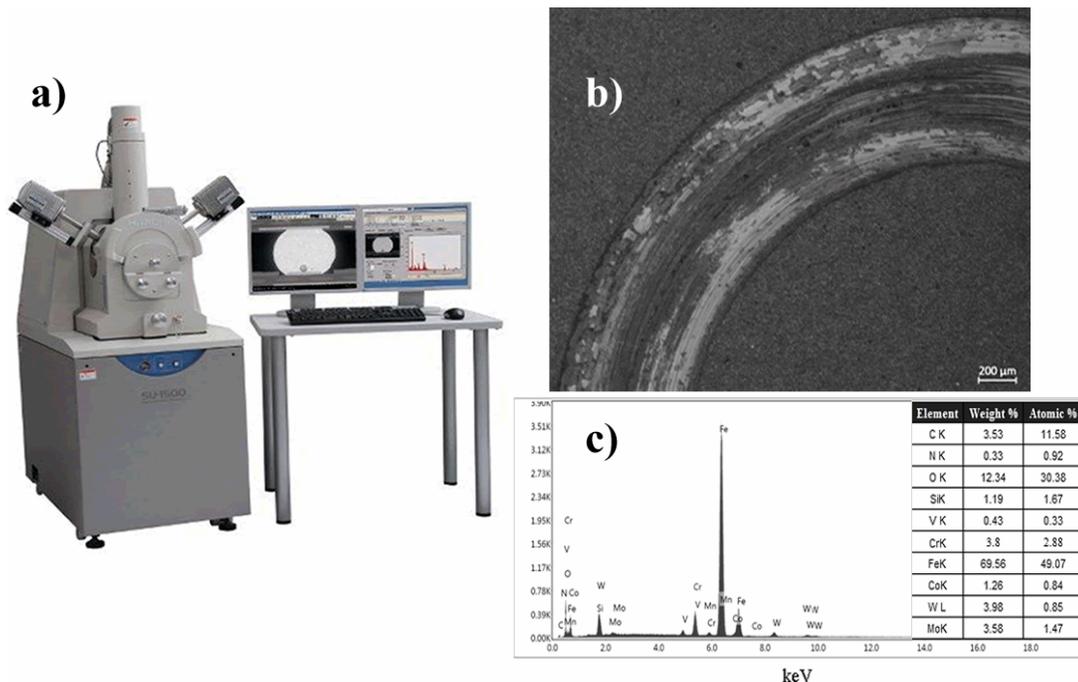


Figura 3.12 a) Microscopio SEM, b) micrografía SEM de la huella de desgaste y c) análisis EDS dentro de la huella de desgaste.

3.2 Metodología para el análisis de la influencia de la rugosidad superficial en el comportamiento tribológico de un acero H13 nitrurado.

La metodología para investigar la influencia que tiene la rugosidad superficial en el comportamiento tribológico de un acero H13 nitrurado se muestra de manera esquemática en la figura 3.13.

Para el desarrollo de esta investigación el material utilizado fue un acero para herramienta tipo AISI H13 con composición química (0.4wt.% C, 4.9 wt.% Cr, 0.5 wt.% Mn, 1.25 wt.% Mo, 1wt.% Si, 0.9 wt.% V, y Fe balance).

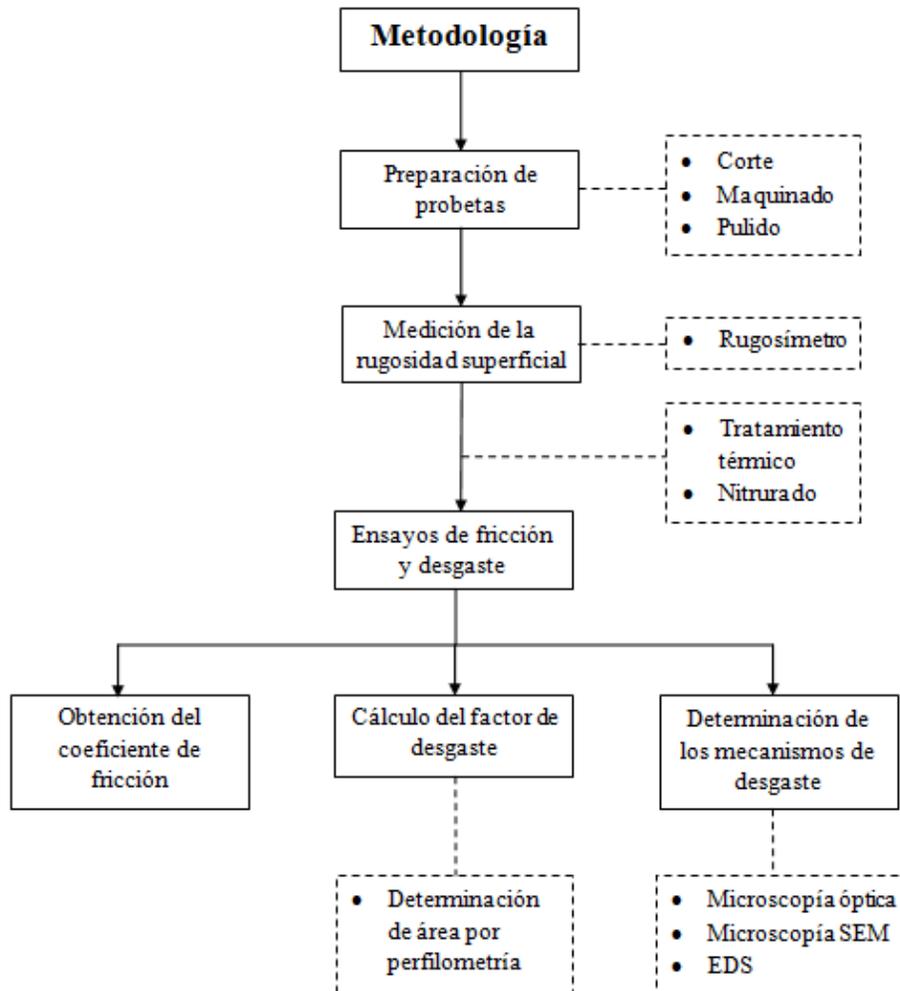


Figura 3.13 Esquema de la metodología para el análisis tribológico de aceros nitrurados.

3.2.1 Preparación de las probetas

El proceso de corte y maquinado de las probetas usadas para los ensayos de fricción y desgaste fue el mismo que el empleado en la sección 3.1.1. Ya que el objetivo de este estudio es

investigar la influencia que tiene la rugosidad superficial en el comportamiento tribológico del acero H13 nitrurado, fue necesario preparar diferentes calidades superficiales siguiendo la metodología de lijado descrita en la sección 3.1.1. Los diferentes tamaños de lija, tiempos de lijado y rugosidades superficiales se indican en la tabla 3.6.

3.2.2 Ensayo de rugosidad superficial

Las probetas fueron limpiadas con etanol y colocadas en una mesa anti-vibratoria, el palpador del rugosímetro surfstest SJ-400 marca Mitutoyo fue situado en la superficie de la muestra y se realizó el ensayo de rugosidad en base a la norma ISO 4287:1997 [96] con una longitud de evaluación de 4.0 mm (figura 3.14a) para obtener la rugosidad media Ra; este ensayo es realizado tres ocasiones para cada probeta como se observa en la figura 3.14b y se obtiene un promedio de las tres mediciones.

Tabla 3.6. Tamaño de abrasivo y tiempo de lijado en la preparación superficial.

Categoría	Tamaño de grano del abrasivo	Tiempo (s)	Rugosidad media Ra (µm)
Rugosidad 1	80	90	0.41
	120	60	
Rugosidad 2	80	90	0.11
	120	60	
	400	60	
Rugosidad 3	80	90	0.07
	120	60	
	400	60	
	600	60	
	800	60	
	1000	60	

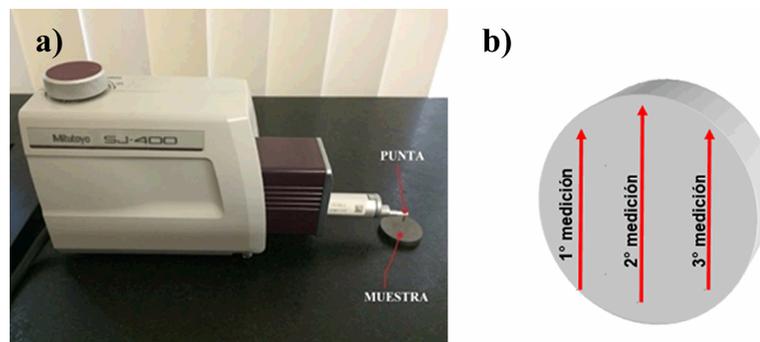


Figura 3.14 a) Rugosímetro y b) dirección de medición de la rugosidad en las probetas.

3.2.4 Ensayo de fricción y desgaste

Los ensayos de fricción se llevaron a cabo en un tribómetro CSM Instruments mediante una configuración *Pin-On-Disk* de acuerdo a la norma ASTM G99 los cuales se llevaron a cabo en condiciones en seco y lubricadas, con temperaturas ambiente y 100°C, respectivamente, obteniéndose en ambos casos el coeficiente de fricción cinético μ_k . Para la condición lubricada se emplearon 70 ml de disolución de grafito base aceite aplicado por inmersión.

Se empleó un pin de carburo de tungsteno (WC) con diámetro, microdureza, rugosidad y módulo de elasticidad de 6 mm, 1370 (HV_{0.5}), 0.02 μm y 670 GPa, respectivamente, como contraparte del tribosistema. La velocidad de deslizamiento, distancia de deslizamiento y radio de la huella fueron establecidas en 2.5 cm/s, 1000 m y 2 mm, respectivamente.

La obtención del coeficiente de fricción así como la determinación del factor de desgaste y mecanismos de desgaste se realizaron siguiendo las metodologías descritas en las secciones 3.1.6, 3.1.7 y 3.1.8, respectivamente.

CAPÍTULO 4

PARTE A: ESTUDIO TRIBOMECÁNICO DE ACEROS PARA HERRAMIENTA RECUBIERTOS CON TiCN

Los recubrimientos cerámicos se utilizan para controlar la fricción y el desgaste de aceros para herramienta con el objetivo de incrementar la vida de servicio de los herramientas. Se evaluó el comportamiento tribológico de aceros D2, M2 y M4 sin recubrimiento y con recubrimiento de TiCN, bajo condiciones lubricadas, mediante el método de pin-on-disk. Los coeficientes de fricción fueron muy similares tanto para los aceros sin recubrir como los recubiertos con TiCN, aunque estos últimos presentaron menores factores de desgaste. El mecanismo de desgaste principal fue la abrasión para ambos casos, con y sin recubrimientos de TiCN. Adicionalmente, los ensayos de adhesión muestran una buena adhesión del recubrimiento de TiCN a cada uno de los sustratos de acero indicando una adhesión clase 1. Además, en las pruebas de dureza se encontró que existe una influencia del sustrato de acero en la dureza del recubrimiento de TiCN.

En esta parte de la investigación, se estudió el comportamiento tribomecánico de los aceros D2, M2 y M4 con y sin recubrimiento de carbonitruro de titanio (TiCN) y determinar si los aceros D2 o M2 podrían utilizarse como materiales para manufacturar herramientas de corte

fino. Antes de realizar los ensayos mecánicos y tribológicos, fue necesario determinar la microestructura de los diferentes sustratos de acero, D2, M2 y M4, así como el espesor y composición química del recubrimiento de TiCN.

En la figura 4.1a se puede observar para el acero D2 una microestructura con carburos primarios alargados y buena distribución de carburos secundarios mientras que la microestructura del acero M2 (figura 4.1b) presenta una segregación de carburos, es importante mencionar que estos sustratos de acero se obtuvieron por proceso de fusión mientras que el acero M4 es preparado mediante metalurgia de polvos, lo que da las diferentes microestructuras, como se observa en la figura 4.1c donde se puede ver una concentración mayor de carburos con distribución uniforme. La composición química y la dureza de los aceros para herramienta se enumeran en la tabla 4.1.

Posteriormente, a los tres aceros se les aplicó un recubrimiento de carbonitruro de titanio (TiCN) a través de una empresa especializada. El espesor y microdureza de los recubrimientos TiCN proporcionados por el proveedor fueron 5 μm y 30GPa ($\text{HV}_{0.05}$), respectivamente; sin embargo, se verificó el espesor del recubrimiento y la concentración de los elementos presentes en el recubrimiento de TiCN usando un microscopio electrónico de barrido equipado con EDS, para cada sustrato de acero recubierto de TiCN.

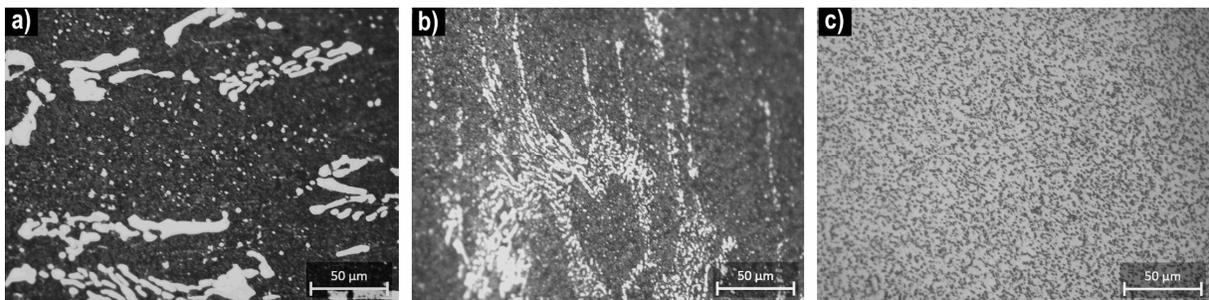


Figura 4.1 Micrografías ópticas (500X) de los aceros D2, M2 y M4 (a, b y c), respectivamente.

Tabla 4.1 Composición química (wt.%) y dureza (HRC) de los aceros D2, M2 y M4.

Acero	C	Cr	V	W	Mo	Fe	Dureza (HRC)
D2	1.5	12.0	1.0	---	1.0	Balance	60
M2	0.85-1.0	4.0	2.0	6.0	5.0	Balance	65
M4	1.3	4.0	4.0	5.5	4.5	Balance	61

La figura 4.2 muestra las micrografías de la sección transversal de los aceros recubiertos con TiCN en las cuales se observan espesores uniformes y que están dentro del rango de las

especificaciones técnicas proporcionadas por el proveedor. Los espesores del recubrimiento de TiCN sobre los aceros D2, M2 y M4 son 4.57, 5.12 y 5.05 μm , respectivamente.

Adicionalmente, el análisis de EDS para cada sistema mostró la misma concentración de elementos del recubrimiento de TiCN independientemente del sustrato de acero utilizado. Las imágenes superiores de la figura 4.3 (a y c) muestran las características de las microestructuras para el recubrimiento de TiCN y se observan de manera similar entre los dos sustratos metálicos, se pueden ver también superficies planas con algunos poros. Por otro lado, los resultados del análisis de EDS muestran que no hay variación en el contenido de Ti en cada sistema; el Carbono y Nitrógeno presentan una concentración similar lo que sugiere una fase de TiCN homogénea para cada sustrato de acero.

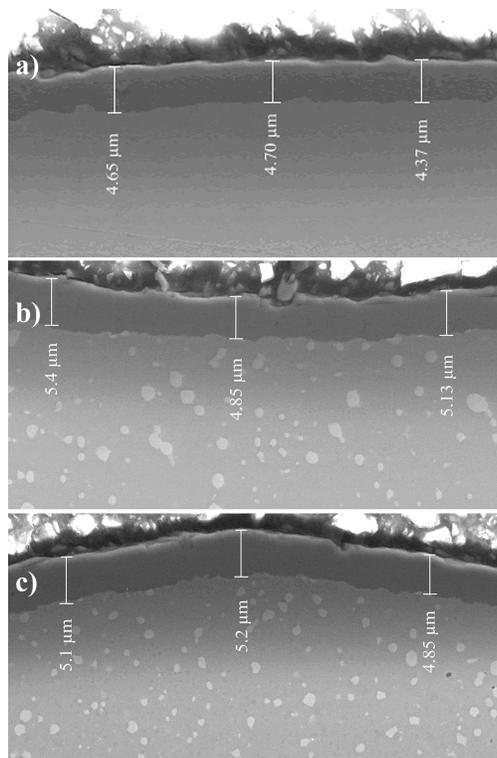


Figura 4.2 Micrografías SEM del espesor del recubrimiento de TiCN sobre los aceros D2, M2 y M4 (a, b y c), respectivamente.

El estudio tribomecánico de aceros para herramienta recubiertos con TiCN constó de 3 fases siendo la primera el análisis de la dureza del recubrimiento y posteriormente se determinó la clase de adhesión del recubrimiento. Por último se realizó el estudio tribológico en condiciones lubricadas.

4.1 Análisis de dureza del recubrimiento

Las cargas aplicadas a los recubrimientos que se seleccionaron para las pruebas de indentación fueron menores que 10 N ya que se ha reportado que recubrimientos de TiCN han presentado microgrietas para cargas más altas que 10N [97].

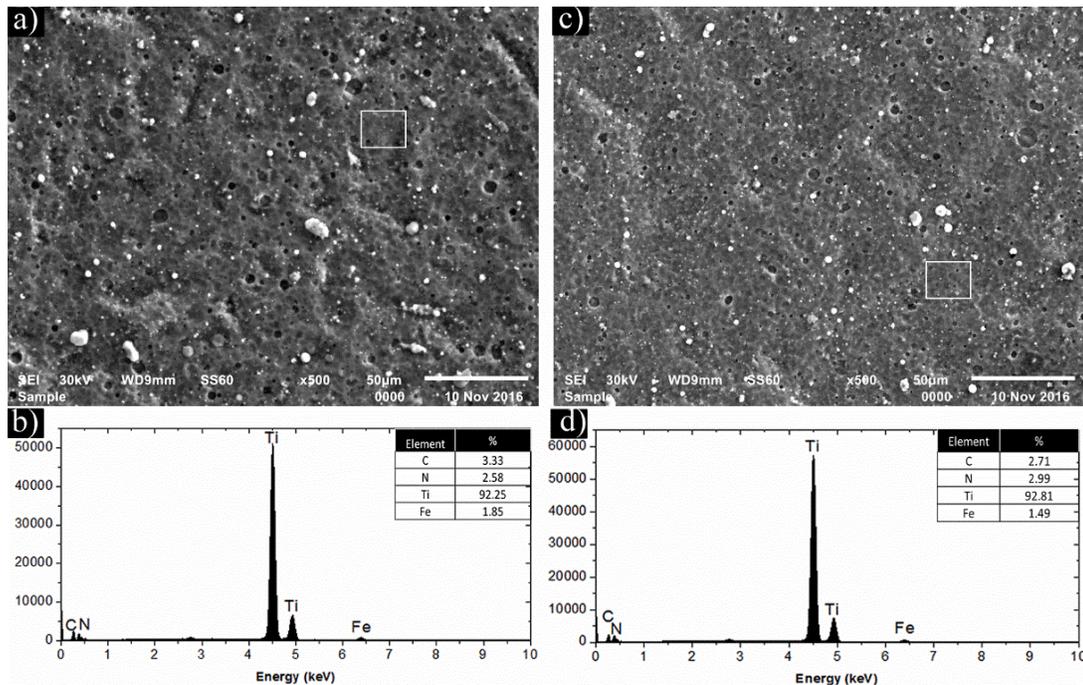


Figura 4.3 Micrografías SEM del recubrimiento de TiCN sobre los aceros D2 y M2(a y c) y sus respectivos análisis EDS (b y d).

En la figura 4.4 se representa la dureza como una función de la carga aplicada. Pueden apreciarse valores de dureza del recubrimiento de TiCN similares a los proporcionados por el proveedor para una carga de 0.49 N. Puede observarse también que para una carga de 1.96 N la dureza se reduce hasta casi la mitad para cada uno de los tres aceros, mientras que en el rango desde 1.96 hasta 9.81 N la dureza presenta un decremento gradual conforme la carga se incrementa. Este comportamiento es debido a que los valores de dureza obtenidos representan una dureza compuesta, es decir, los valores de dureza del recubrimiento de TiCN están influenciados por la dureza de cada uno de los sustratos de acero.

De acuerdo a Lesage et al. [98], una manera de observar la contribución de la dureza del sustrato en una dureza compuesta es a través de la relación t/L , donde t es el espesor del recubrimiento y L es la longitud de la diagonal de la impronta. Cabe señalar que esta relación debe estar en el rango de 0 a 1. La tabla 4.2 muestra los valores de dureza, longitud de la

diagonal y la relación t/L para los aceros D2, M2 y M4, recubiertos con TiCN, en función de la carga aplicada.

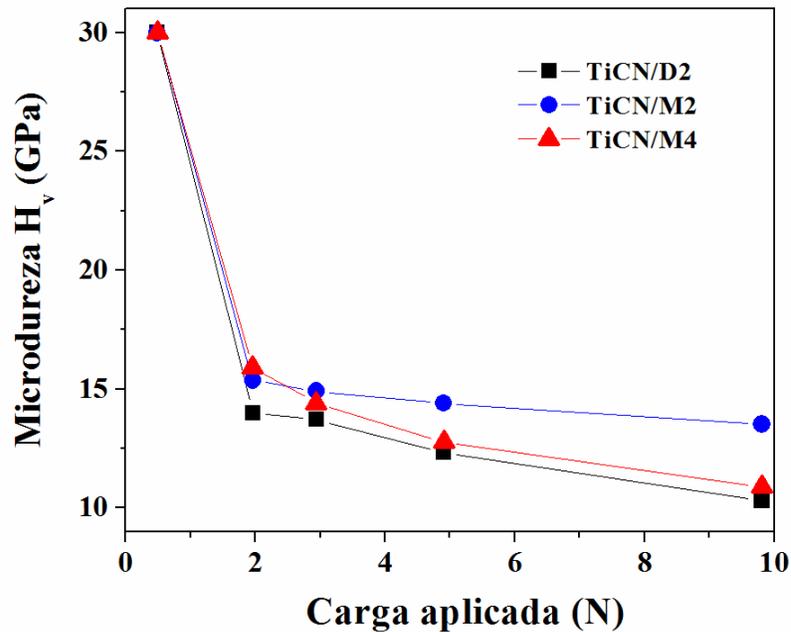


Figura 4.4 Microdureza como función de la carga aplicada para los tres aceros recubiertos con TiCN.

Tabla 4.2 Valores de la diagonal de indentación Vickers, dureza del recubrimiento y relación t/L para cada uno de los sustratos recubiertos con TiCN.

Sustrato	Carga (N)	Diagonal (L)	Espesor (t)	Dureza (GPa)	t/L
D2	1.96	16.66	4.57	13.99	0.27
	2.94	20.24	4.57	13.71	0.23
	4.91	27.21	4.57	12.34	0.17
	9.81	42.23	4.57	10.29	0.11
M2	1.96	15.47	5.12	15.37	0.33
	2.94	19.20	5.12	14.91	0.27
	4.91	25.26	5.12	14.40	0.20
	9.81	36.80	5.12	13.52	0.14
M4	1.96	15.22	5.05	15.92	0.33
	2.94	19.78	5.05	14.40	0.26
	4.91	27.17	5.05	12.77	0.19
	9.81	41.03	5.05	10.89	0.12

La figura 4.5 muestra la relación de t/L como una función de la carga aplicada para cada uno de los tres sustratos recubiertos con TiCN. Puede notarse que esta relación decrece conforme

la carga se incrementa, tendiendo a cero, lo cual significa que la dureza obtenida y reportada en la tabla 4.2 tiende a ser la dureza del sustrato y no del recubrimiento.

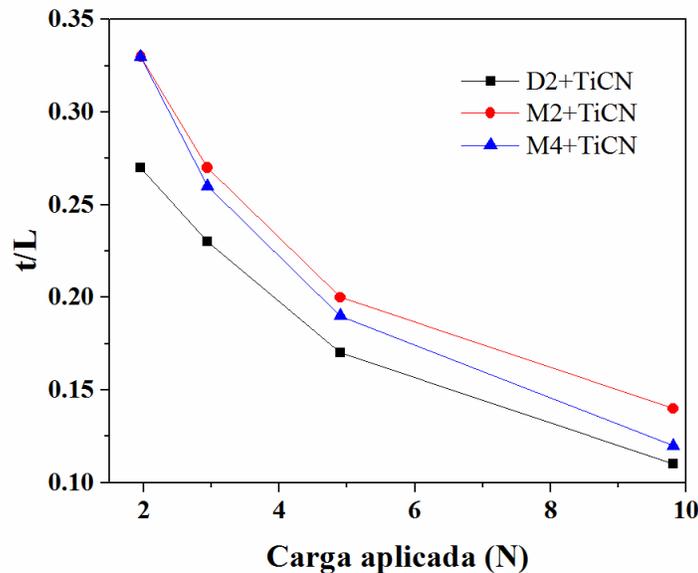


Figura 4.5 Relación t/L como función de la carga aplicada para los tres aceros recubiertos con TiCN.

4.2 Determinación de la clase de adhesión

En la figura 4.6 se muestran las imágenes de las indentaciones de los aceros D2, M2 y M4 recubiertos con TiCN mediante las cuales se busca evaluar la clase de adhesión del recubrimiento al sustrato conforme a la norma CEN/TS 1071-8:2004. Las figuras 4.6a, 4.6b y 4.6c muestran las huellas características de la prueba de indentación Rockwell C, con una carga de 150 kg_f, en los aceros para herramienta recubiertos de TiCN. No se observa delaminación visible alrededor de las huellas; pueden apreciarse marcas circunferenciales alrededor de la huella de indentación en cada uno de los tres aceros recubiertos lo cual significa un acumulamiento de material debido al desplazamiento del mismo en la zona de la huella. Los resultados muestran una clase de adhesión 1 según la prueba estándar CEN/TS 1071-8 [94]. Vidakis et al. [99] consideran que el tipo y el volumen de la falla del recubrimiento mediante ensayos de indentación presentan a primera vista la adhesión del recubrimiento y, en segundo lugar, la fragilidad del recubrimiento. Además, establecen que los recubrimientos bien adheridos pueden soportar esfuerzos cortantes en la interfase sustrato-recubrimiento cuando se aplica la carga debido a fuerzas interfaciales fuertes. De este modo, la

adhesión del recubrimiento al sustrato se muestra por el tipo de falla en la zona del recubrimiento.

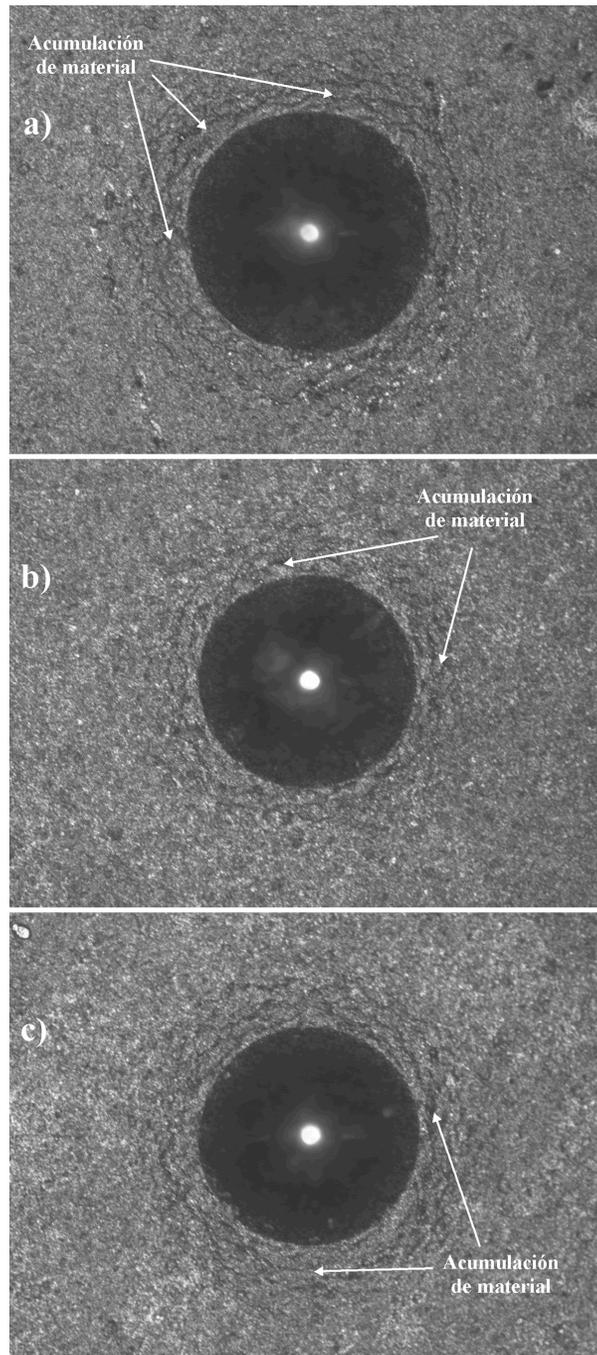


Figura 4.6 Micrografías ópticas (100x) de las huellas de indentación Rockwell C sobre los aceros D2, M2 y M4 con recubrimiento de TiCN, respectivamente.

De acuerdo con Vidakis et al. [99], la clase de adhesión para este recubrimiento con cada uno de los tres sustratos representa fuertes lazos interfaciales entre el recubrimiento y los sustratos.

También puede observarse que la huella de indentación para el acero D2 recubierto con TiCN (figura 4.6a) es ligeramente más grande que para las otras dos, M2 y M4, debido a su menor dureza. A pesar de esto, no es visible una diferencia en el comportamiento de adhesión entre los tres aceros para herramienta recubiertos con TiCN.

Se han realizado investigaciones para evaluar la adhesión de recubrimientos de TiCN sobre punzones producidos con acero Böhrler S390 Microclean bajo las mismas condiciones que las reportadas en esta investigación [31]. En dicho estudio se utilizaron dos técnicas diferentes de preparación de las superficies: pulido en húmedo (alta rugosidad superficial) y pulido en seco (baja rugosidad superficial). Los resultados de estos ensayos de indentación Rockwell C bajo la norma CEN/TS 1071-8 [94] mostraron una clase de adhesión 2. La diferencia en la clase de adhesión de los recubrimientos de TiCN entre los resultados reportados por Sergejev et al. [31] y esta investigación podría estar relacionada con el tipo de sustratos utilizados y los espesores del recubrimiento de TiCN.

4.3 Análisis tribológico

Este análisis está dividido en dos partes: en la primera parte se realizan los ensayos de fricción bajo condiciones lubricadas para los aceros sin recubrimiento y posteriormente se incluyen los ensayos de los aceros con recubrimiento de TiCN comparando sus desempeños entre sí.

4.3.1 Coeficiente de fricción, factor de desgaste y mecanismos de desgaste de los aceros D2, M2 y M4 sin recubrimiento.

La evolución del coeficiente de fricción (μ_k) en función de la distancia de deslizamiento se muestra en la figura 4.7 para los aceros de herramientas D2, M2 y M4 sin recubrimiento bajo condiciones lubricadas con aceite a una temperatura de 50°C. Se observa que los coeficientes de fricción de los aceros M2 y M4 disminuyen durante toda la distancia de deslizamiento alcanzando valores medios de 0.15 y 0.14, respectivamente. Se puede ver también que el coeficiente de fricción del acero D2 disminuye durante los primeros 150 m y luego fluctúa los próximos 100 m para alcanzar un coeficiente de fricción estable de aproximadamente 0.1.

Aunque el acero para herramienta D2 presenta el coeficiente de fricción más bajo entre los tres aceros, puede verse en la tabla 4.3 que el acero M4 presenta el menor factor de desgaste.

Es importante recordar, de acuerdo con la ecuación 3.2, que el factor de desgaste depende de la aplicación de la carga, la distancia de deslizamiento y volumen perdido; entre estos tres parámetros, sólo cambia el tercero. En este punto, el volumen perdido puede determinarse de

acuerdo con la norma ASTM G99-05 [95] midiendo el ancho de la huella de desgaste o por medio de perfilometría de contacto.

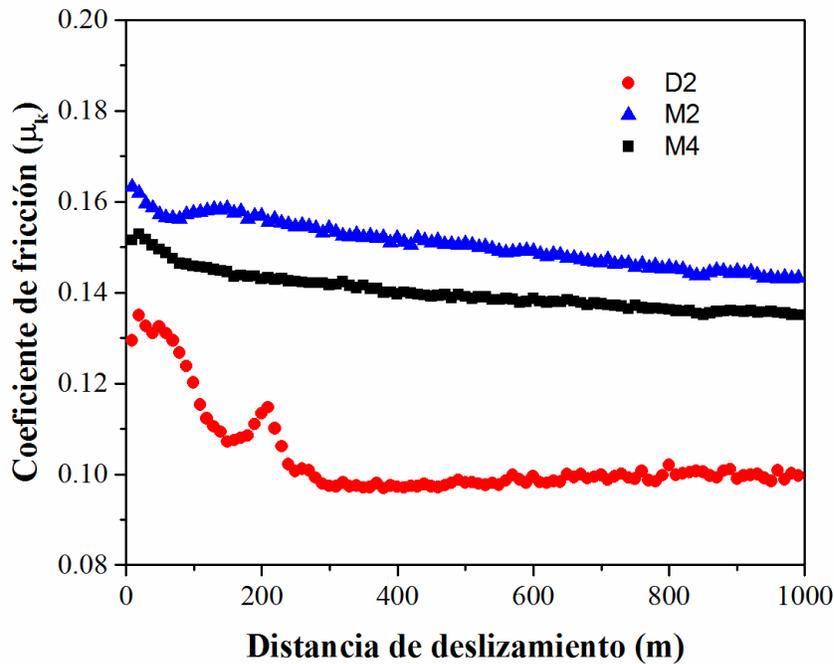


Figura 4.7 Evolución del coeficiente de fricción en función de la distancia de deslizamiento para los aceros D2, M2 y M4 bajo condiciones lubricadas.

Tabla 4.3 Valores promedio de coeficiente de fricción, volumen perdido y factor de desgaste para los aceros D2, M2 y M4.

Muestra	Condición	Coeficiente de fricción (μ_k)	Volumen perdido (mm^3)	Factor de desgaste ($\text{mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$) 10^{-8}
D2	Aceite a 50°C	0.103 ± 0.010	46.11 ± 0.15	46.11 ± 0.1
M2		0.150 ± 0.007	59.06 ± 0.6	59.06 ± 0.5
M4		0.140 ± 0.007	38.45 ± 0.6	38.45 ± 0.6

El volumen perdido en esta investigación fue calculado por perfilometría de contacto, donde los perfiles de huella claramente ofrecen una mayor información del volumen perdido después de las pruebas de fricción. Se optó por este método ya que en algunas ocasiones el ancho de huella puede ser un poco engañoso ya que algunos materiales pueden generar huellas muy anchas pero poco profundas y viceversa, huellas no tan anchas pero lo bastante profundas. Lo anterior arrojaría valores de volumen perdido que no serían reales.

En la figura 4.8 se presentan los perfiles y micrografías de las huellas de desgaste para los tres aceros. Puede observarse una huella más ancha y profunda para el acero M2 (figura 4.8b y 4.8e), lo cual, como consecuencia, hace que este acero tenga el factor de desgaste más alto.

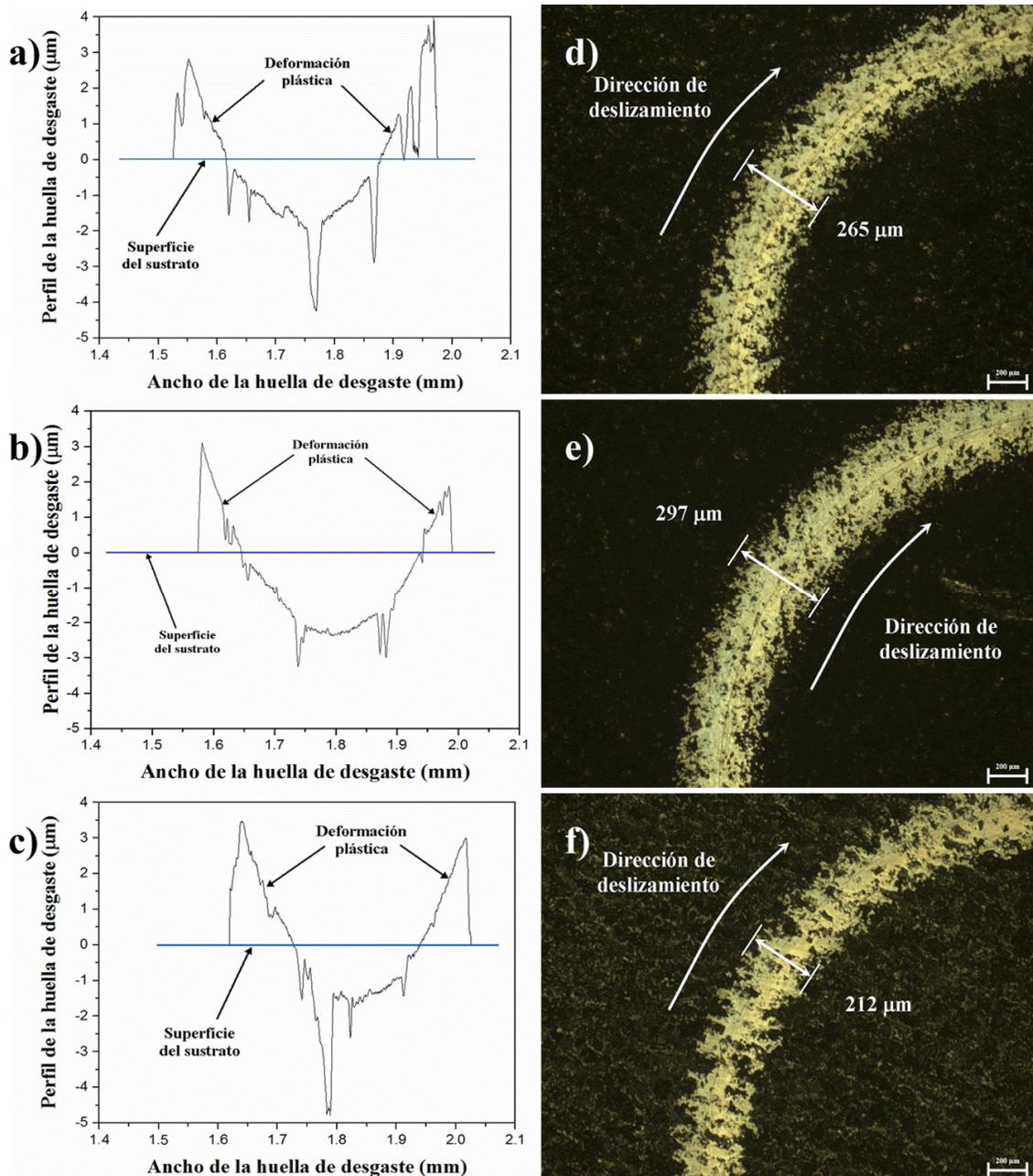


Figura 4.8 Perfiles de huella y micrografías ópticas (100x) de los anchos de huella del área desgastada para los aceros D2 (a y d), M3 (b y e) y M4 (c y f).

El acero M2, aparte de tener el factor de desgaste más alto también tiene el coeficiente de fricción más elevado; este comportamiento se debe al hecho de que el sustrato M2 exhibe una

mayor dureza entre los tres aceros y por consecuencia el tribosistema estuvo sometido a una condición de abrasión severa en una etapa inicial. Una mayor cantidad de partículas de desgaste quedaron atrapadas entre el sustrato y la contraparte durante el ensayo de fricción y actuaron como un tercer cuerpo, incrementando el coeficiente de fricción y el desgaste del sustrato.

Para el caso de los aceros D2 y M4, en la figura 4.8 (a y d) se muestra una huella ligeramente más ancha y profunda para el acero D2 con respecto al acero M4 (4.8c y 4.8f); esto significa un mayor factor de desgaste del acero D2 y puede estar relacionado con una mayor deformación plástica dentro de la huella durante el contacto deslizante debido a la dureza inferior del sustrato D2 en comparación con la dureza del sustrato M4.

Los perfiles de las huellas (figura 4.8a, b y c) muestran también una acumulación de material por encima de la superficie del sustrato pero no toda esa acumulación de material se debe al desplazamiento de material del sustrato debido a la deformación plástica durante el contacto sino también a las partículas de desgaste generadas por abrasión en el tribosistema (pin y sustrato) que no quedaron atrapadas entre ellas y se fueron acumulando fuera de la huella.

La figura 4.9 muestra las zonas desgastadas para cada uno de los aceros sin recubrir. Las superficies de las huellas de desgaste son similares para los tres aceros y se pueden observar surcos o marcas de arado, paralelas a la dirección de deslizamiento, y que son características de un mecanismo de desgaste por abrasión. Las zonas más oscuras dentro de la huella no representan ningún tipo de desgaste, más bien son zonas donde no hubo desgaste. En los perfiles de las huellas (figuras 4.8 a, b y c) tampoco se aprecia otro tipo de desgaste por lo que puede concluirse que el mecanismo de desgaste principal en estos aceros sin recubrimiento es la abrasión.

Para profundizar en los mecanismos de desgaste, se llevó a cabo un análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) para cada sustrato donde para los sustratos metálicos M2 y M4 no se observa un mecanismo de desgaste distinto al observado en las imágenes ópticas; sólo se pueden identificar pequeñas marcas de material aplastado; sin embargo, este mecanismo fue más evidente para el sustrato D2, que podría estar relacionado con el hecho de que el D2 tiene la dureza más baja, lo que permite un mayor desgaste. Las imágenes SEM de la huella de desgaste del acero D2 son representativas de éste análisis.

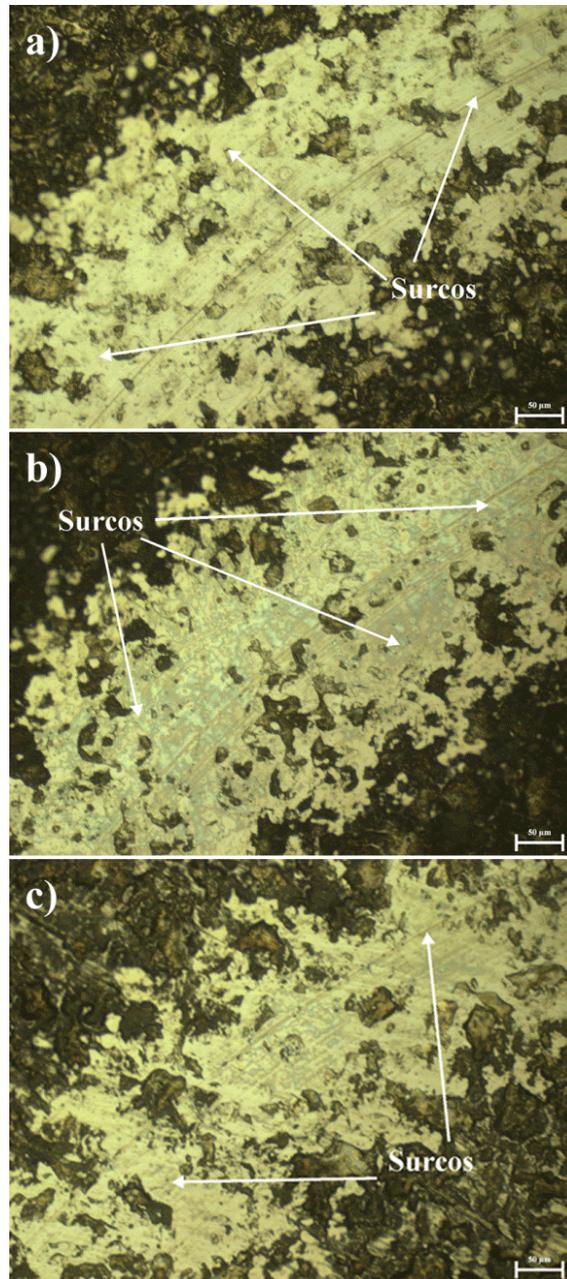


Figura 4.9 Micrografías ópticas (200x) de las huellas de desgaste para los aceros sin recubrimiento: a) D2, b) M2 y c) M4.

La figura 4.10 muestra la micrografía SEM de la superficie desgastada para acero de herramienta D2 así como su análisis EDS tanto fuera como dentro de la huella de desgaste. Puede observarse que de acuerdo a la morfología de la superficie, la mayor parte de la superficie fueron primeramente aplastadas por el contacto continuo del pin y después, las partículas de desgaste que quedaron atrapadas entre los pares en contacto formaron las marcas

(surcos) característicos de un mecanismo por abrasión lo cual confirma lo mencionado anteriormente en las micrografías ópticas.

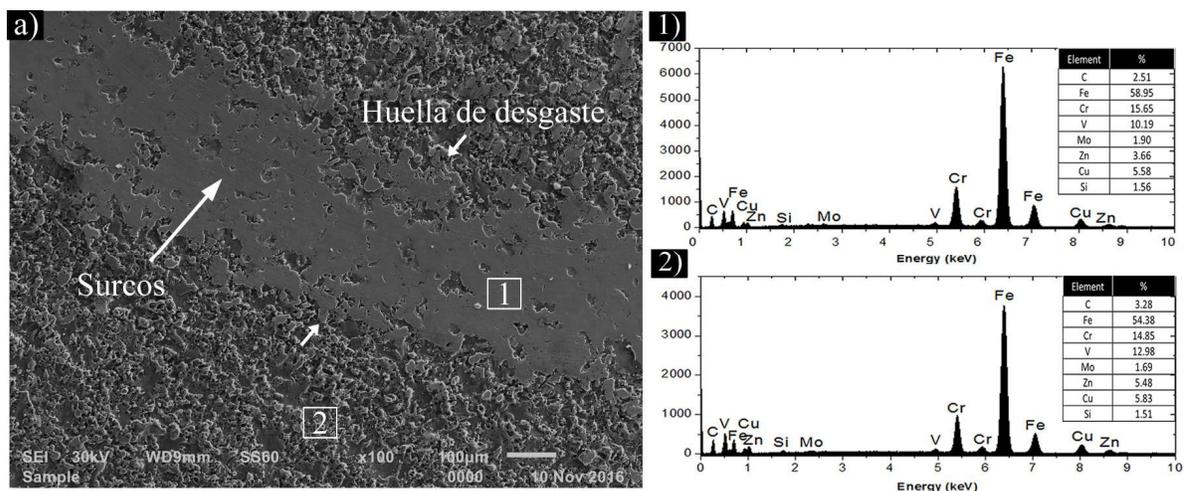


Figura 4.10 Micrografías SEM y análisis EDS de la superficie desgastada del acero D2 sin recubrimiento.

Por otro lado, el análisis EDS muestra que el contenido de los elementos dentro y fuera de la huella de desgaste es característico del acero D2. Adicionalmente, se puede observar un desgaste no-homogéneo dentro de la huella de desgaste que puede deberse a las irregularidades de la superficie de las muestras de acero lo cual podría estar relacionado con la rugosidad y textura superficial.

4.3.2 Coeficiente de fricción, factor de desgaste y mecanismos de desgaste de los aceros D2, M2 y M4 con recubrimiento de TiCN.

La figura 4.11 muestra el comportamiento del coeficiente de fricción de los aceros D2, M2 y M4 recubiertos con TiCN en condiciones de lubricación a temperatura de 50°C donde se observa un comportamiento similar para todos ellos durante los ensayos de fricción, alcanzando la etapa de estado estable después de aproximadamente 250 m, con valores medios del coeficiente de fricción de 0.13, 0.1 y 0.11 para los aceros D2, M2 y M4 recubiertos con TiCN, respectivamente.

A partir de la tabla 4.4 puede observarse que en condiciones lubricadas para aceros recubiertos con TiCN, el acero M2 presenta el coeficiente de fricción más bajo, pero el acero D2 presenta el menor factor de desgaste. Este comportamiento pudiera estar relacionado a que la dureza

del sustrato D2 es menor que las de los aceros M2 y M4, por lo que el recubrimiento puede tener una deformación plástica mayor sin llegar a fracturarse.

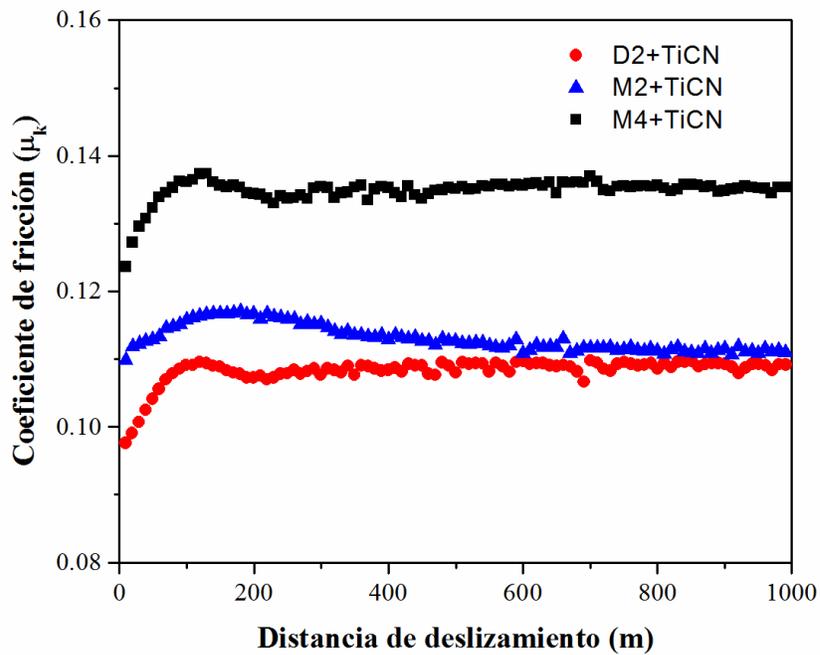


Figura 4.11 Evolución del coeficiente de fricción en función de la distancia de deslizamiento para los aceros D2, M2 y M4 recubiertos con TiCN bajo condiciones lubricadas.

Tabla 4.4 Valores promedio de coeficiente de fricción, volumen perdido y factor de desgaste para los aceros D2, M2 y M4 con recubrimiento de TiCN.

Muestra	Condición	Coeficiente de fricción (μ_k)	Volumen perdido (mm^3)	Factor de desgaste ($\text{mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$) 10^{-8}
D2+TiCN	Aceite a 50°C	$0.134 \pm .004$	8.64 ± 0.4	8.64 ± 0.4
M2+TiCN		0.108 ± 0.004	10.43 ± 0.4	10.43 ± 0.4
M4+TiCN		0.112 ± 0.003	11.77 ± 0.5	11.77 ± 0.5

Sin embargo, existiría un límite en el valor de la dureza del sustrato ya que durezas muy bajas llevarían a la ruptura del recubrimiento porque éste, al ser más duro, no tendría la misma tasa de deformación plástica.

Se han realizado investigaciones para evaluar las propiedades tribológicas del acero para herramienta M2, sin recubrimiento y recubierto con TiCN, utilizando un acero AISI 1019 como contraparte bajo condiciones lubricadas mediante una prueba de desgaste de cilindros cruzados obteniendo coeficientes de fricción de 0.18 y 0.1 para los tribosistemas sin recubrir y con recubrimiento, respectivamente [26]. Ambos valores de coeficiente de fricción son muy

similares a los obtenidos en esta investigación (0.15 y 0.1). También, Wang et al. [29] ha investigado el comportamiento de fricción de recubrimientos de TiCN depositados sobre carburos cementados WC usando un tribómetro con una configuración de *pin-on-disk*, empleando agua desionizada como lubricante a temperatura ambiente. En ese estudio, la carga normal varió en el intervalo de 3 N a 12 N y la velocidad de deslizamiento fue desde 0.1 m/s hasta 0.4 m/s. La distancia de deslizamiento total fue de 1000 m y se usaron pines de carburo de silicio (SiC) como contraparte. Específicamente, cuando los recubrimientos de TiCN se deslizaron contra los pines de SiC, empleando 9 N y 0.1 m/s como carga normal y velocidad de deslizamiento, respectivamente, los valores del coeficiente de fricción obtenidos por Wang et al. oscilaron entre 0.25 y 0.26. Cabe hacer notar que esas condiciones de carga, velocidad y distancia de deslizamiento son similares a las empleadas en esta investigación. Las diferencias entre los valores obtenidos por [29] y el presente estudio pueden deberse al material de la contraparte y al tipo de lubricante utilizado en las pruebas de fricción.

La figura 4.12 muestra las micrografías ópticas de las superficies desgastadas para aceros de herramienta recubiertos de TiCN bajo condiciones lubricadas. En comparación con los aceros sin recubrimiento, ver figura 4.8, es evidente que los anchos de las huellas de desgaste son menores por lo que los factores de desgaste serán más pequeños en los aceros para herramienta recubiertos con TiCN lo cual indica una mejoría en la resistencia al desgaste y esto se relaciona con la mayor dureza del recubrimiento de TiCN.

También puede observarse que un perfil de huella más ancho no significa un mayor factor de desgaste (ver tabla 4.4), como en el caso del acero D2 recubierto con TiCN de la figura 4.12 (a y d). Entre los tres aceros es el que tiene un ancho de huella más grande pero muy poca profundidad. En los perfiles de las huellas (figuras 4.12 a, b y c) puede observarse que las profundidades de las huellas son 1, 4 y 3 μm aproximadamente, para los aceros TiCN D2, M2 y M4 recubiertos con TiCN, respectivamente. Estos valores se vuelven importantes ya que si se comparan con los espesores de los recubrimientos, obtenidos en la sección inicial, puede concluirse que el desgaste solo fue del recubrimiento y no llegó hasta los sustratos.

La figura 4.13 muestra las huellas de desgaste para cada uno de los aceros con recubrimiento de TiCN. Al igual que en el caso de los aceros sin recubrimiento, en las superficies de las zonas desgastadas de los tres aceros recubiertos con TiCN se observan surcos o marcas de

arado, paralelas a la dirección de deslizamiento, aunque esas marcas no se aprecian tan profundas.

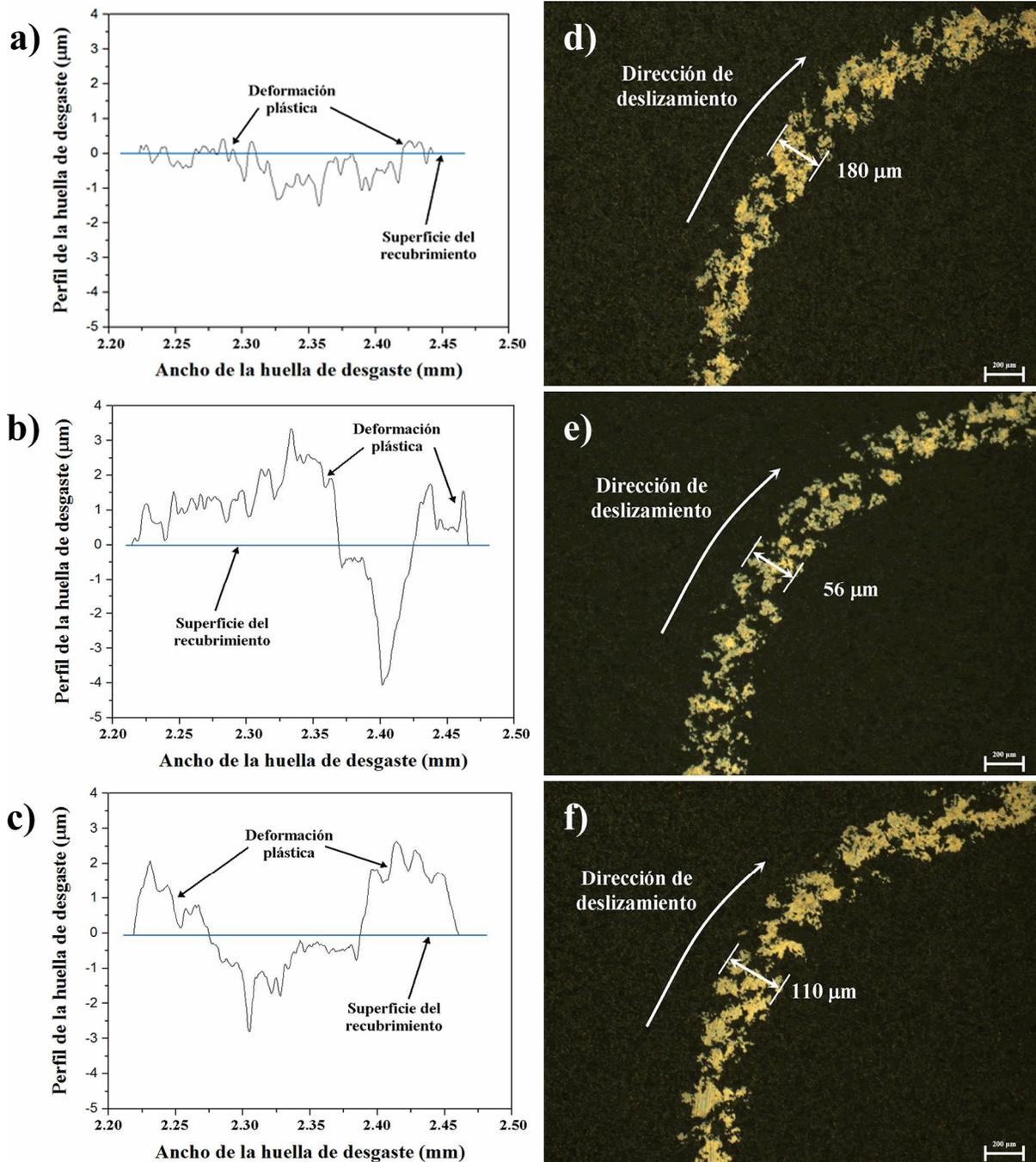


Figura 4.12 Perfiles de huella y micrografías ópticas (100x) de los anchos de huella del área desgastada para los aceros D2 (a y d), M3 (b y e) y M4 (c y f).

Al igual que en el caso de los aceros sin recubrimiento, no se observó algún mecanismo distinto a la abrasión para los aceros recubiertos con TiCN. De manera representativa, en la

figura 4.14 se muestra la micrografía SEM de la huella de desgaste para el acero D2 recubierto con TiCN donde se observan zonas aplastadas por el contacto continuo del pin sobre la superficie. Además, se pueden ver surcos característicos del desgaste abrasivo.

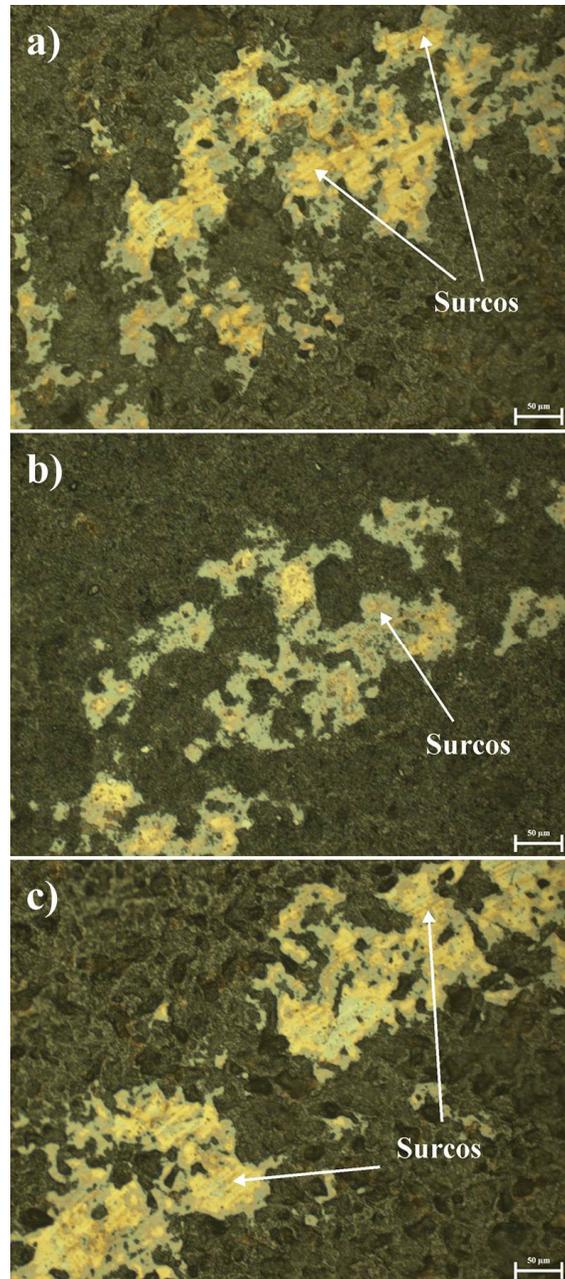


Figura 4.13 Micrografías ópticas (200x) de las huellas de desgaste para los aceros recubiertos con TiCN: a) D2, b) M2 y c) M4.

El análisis EDS hace evidente que el desgaste del recubrimiento es mínimo si se comparan con las concentraciones de Titanio (Ti) inicial (ver figura 4.3b). Este análisis EDS en conjunto con

la observación del perfil de huella para el acero D2 recubierto con TiCN (figura 4.12a) refuerza la conclusión hecha acerca de la integridad del recubrimiento.

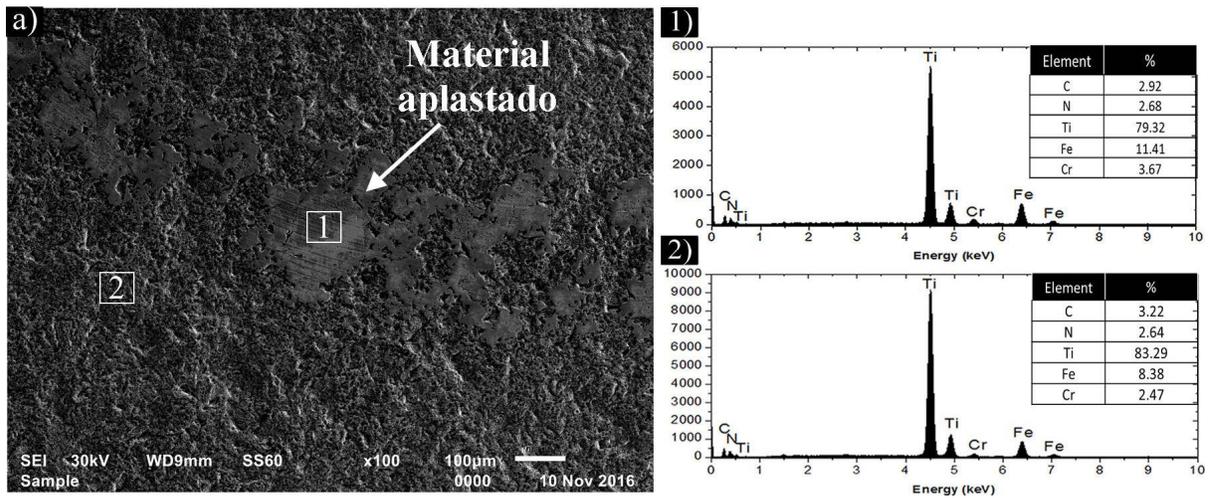


Figura 4.14 Micrografías SEM y análisis EDS de la superficie desgastada del acero D2 recubierta con TiCN.

En esta investigación, la fuerza normal aplicada, la velocidad de deslizamiento, la humedad relativa y la lubricidad fueron constantes; por lo tanto, los mecanismos de desgaste observados dependen únicamente de la naturaleza de los materiales (sustratos) y las características mecánicas de las superficies.

Realizando un análisis comparativo entre los aceros sin recubrir y los aceros con recubrimiento de TiCN, bajo condiciones de lubricación, los coeficientes de fricción en ambos casos tienen valores promedio similares aunque los que están recubiertos mostraron factores de desgaste más bajos, alrededor de un orden de magnitud, y esto básicamente se debe a la mayor dureza superficial del recubrimiento. En ambos casos, el mecanismo de desgaste principal fue abrasivo.

CAPÍTULO 4

PARTE B: ESTUDIO TRIBOMECÁNICO DEL ACERO PARA HERRAMIENTA H13 RECUBIERTO CON TiN Y TiCN

Las aplicaciones de los recubrimientos de TiN y TiCN son extensas debido sus propiedades mecánicas y tribológicas mismas que están influenciadas por los sustratos en los que están depositados. En ese sentido, se estudió el desempeño tribológico de recubrimientos de TiN y TiCN en un acero para herramienta de trabajo en caliente AISI H13. Además, se llevaron a cabo pruebas de adhesión y microdureza encontrándose que la adhesión de ambos recubrimientos resultó en clase 1, según el estándar CEN/TS 1071-8. La microdureza compuesta fue investigada mediante un análisis de indentación relativa (β). Las pruebas de pin-on-disk se realizaron en condiciones secas y lubricadas a 100°C obteniéndose bajos coeficientes de fricción de 0.08 para el TiN y 0.03 para TiCN bajo condiciones lubricadas. La abrasión se presentó como mecanismo de desgaste en condiciones secas, mientras que en condiciones de lubricación las señales de desgaste parecen ser apenas perceptibles.

El objetivo del presente capítulo fue investigar el comportamiento tribológico-mecánico de recubrimientos de nitruro de titanio (TiN) y carbonitruro de titanio (TiCN) sobre sustratos de acero AISI H13, para ampliar las aplicaciones de estos recubrimientos protectores en los procesos de fabricación. Para ello se han realizado ensayos de microdureza y adhesión, se

investigó también el comportamiento tribológico en contacto seco y lubricado con temperatura.

La determinación de los espesores y composición química de los recubrimientos fue una etapa inicial antes del desarrollo de los ensayos mecánicos y tribológicos. Los espesores de los recubrimientos se estimaron también mediante análisis de imágenes SEM a partir de la sección transversal de los recubrimientos de TiN y TiCN (figura 4.15); se determinó un espesor medio de 5 μm para el recubrimiento de TiN y 2.5 μm para el de TiCN. También se puede observar que el primero presenta un espesor más homogéneo que el recubrimiento de TiCN. La rugosidad de la superficie después de la deposición del recubrimiento se incrementó hasta 0.25 μm para ambos recubrimientos.

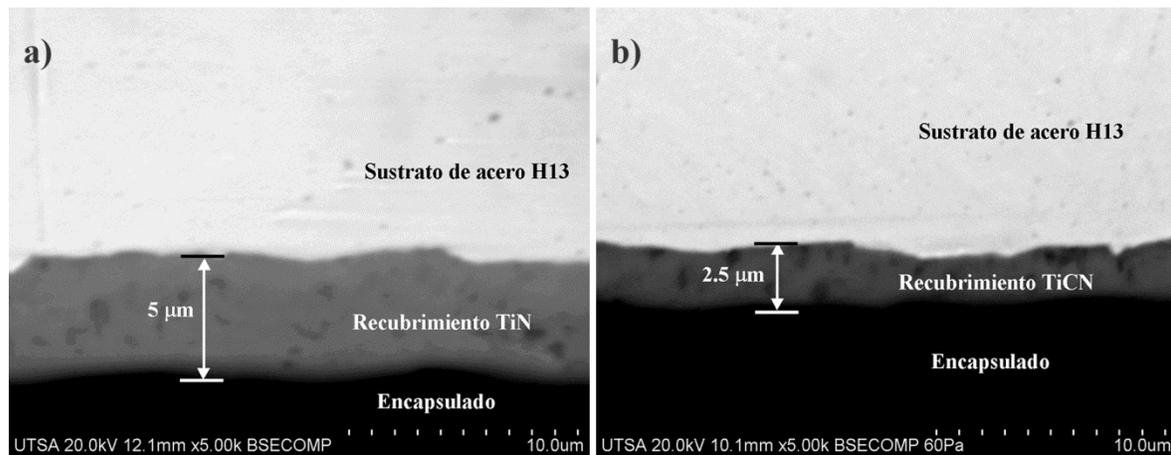


Figura 4.15 Micrografías SEM de los espesores de los recubrimientos de: a) TiN y b) TiCN.

La concentración de elementos de los recubrimientos de TiN y TiCN se determinó mediante el uso de un microscopio electrónico de barrido (SEM) equipado con EDS. La figura 4.16 muestra el análisis EDS con la concentración de elementos correspondiente a cada recubrimiento con la finalidad de conocer su composición inicial. La determinación de los espesores así como la concentración de elementos para cada uno de los recubrimientos será de vital importancia para explicar los mecanismos de desgaste.

El estudio tribomecánico del acero H13 recubierto con TiN y TiCN constó de 3 etapas donde el análisis de la dureza del recubrimiento fue la primera en llevarse a cabo. También se evaluó la adhesión de los recubrimientos al sustrato y por último se realizó el estudio tribológico tanto en condiciones en seco como lubricadas.

4.4 Análisis de dureza de los recubrimientos

La figura 4.17 muestra las variaciones de los valores de dureza de los recubrimientos TiN y TiCN sobre acero H13 en función de la carga aplicada. Se pueden observar valores más altos de dureza para el recubrimiento de TiCN que para el de TiN; estos valores están en el intervalo de 14.9 a 12.2 GPa y 11.3 a 8 GPa para los recubrimientos de TiCN y TiN, respectivamente. Se puede observar una disminución gradual de la dureza en ambos recubrimientos conforme la carga aplicada aumenta. Este comportamiento está relacionado con una dureza compuesta y es un fenómeno que se presenta comúnmente en sistemas recubiertos.

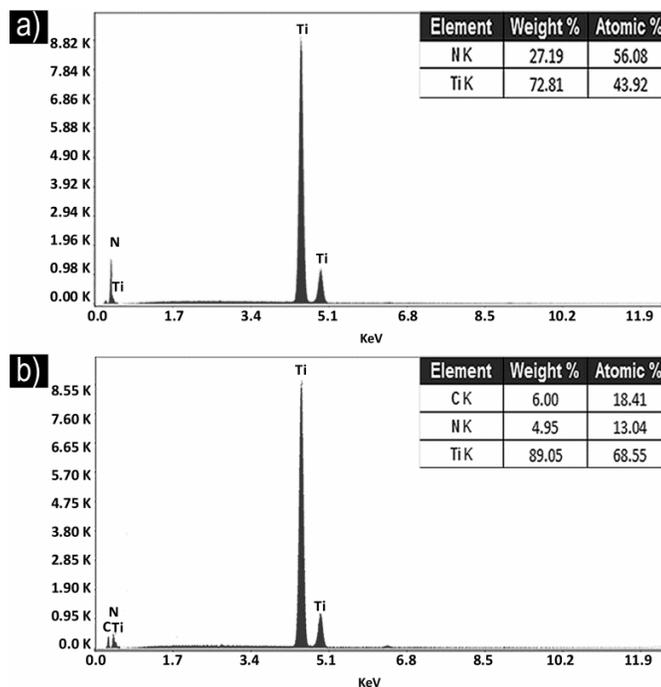


Figura 4.16. Concentración de elementos de los recubrimientos de: a) TiN y b) TiCN.

De acuerdo a Tuck et al. [93], cuando la dureza del recubrimiento está influenciada por la dureza del sustrato es conveniente definir el parámetro β para identificar cual es la contribución de la dureza del sustrato en la dureza compuesta. Los valores de $\beta > 1$, implican que el indentador deformó y penetró en el recubrimiento; por lo tanto, las propiedades del sustrato dominan la respuesta del sistema. Por otra parte, cuando $\beta < 0.1$ la influencia del sustrato sobre la deformación es pequeña; para este valor y profundidades de indentación más bajas, sólo se observa la respuesta del recubrimiento. Por lo tanto, los valores de β en el rango

entre 0.1 y 1, son de mayor interés para estudiar la contribución del sustrato en la dureza compuesta [93].

La tabla 4.5 muestra los valores de dureza, longitud de la diagonal y el parámetro β para los recubrimientos de TiN y TiCN depositados sobre el sustrato de acero H13, en función de la carga aplicada.

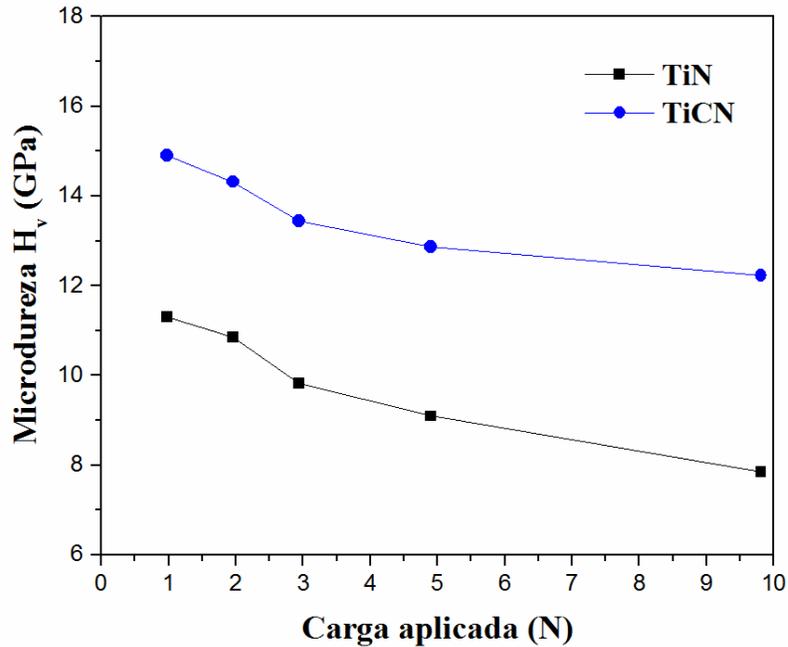


Figura 4.17 Microdureza como función de la carga aplicada para los recubrimientos de TiN y TiCN.

Tabla 4.5 Valores de la diagonal de indentación Vickers, dureza del recubrimiento y el parámetro β para los recubrimientos de TiN y TiCN.

Sustrato	Carga (N)	Diagonal (L)	Dureza (GPa)	β
TiN	0.98	12.74	11.30	0.36
	1.96	18.31	10.85	0.52
	2.94	23.64	9.82	0.68
	4.91	31.66	9.09	0.90
	9.81	48.22	7.84	1.38
TiCN	0.98	11.12	14.90	0.64
	1.96	15.96	14.32	0.91
	2.94	20.16	13.44	1.15
	4.91	26.63	12.87	1.52
	9.81	38.59	12.22	2.20

En ese sentido, la figura 4.18 representa el parámetro β frente a la carga aplicada para el sustrato de acero H13 recubierto con TiN y TiCN. En general, se muestra un incremento del parámetro β conforme se incrementa la carga aplicada para ambos recubrimientos. Se observan también pocos valores en el rango de 0.1 a 1 en cargas bajas de indentación; mientras que por encima de 3 N hay una mayor contribución del sustrato para estas cargas aplicadas, en este punto, los valores de microdureza a la carga más baja serían sólo de la contribución de los recubrimientos.

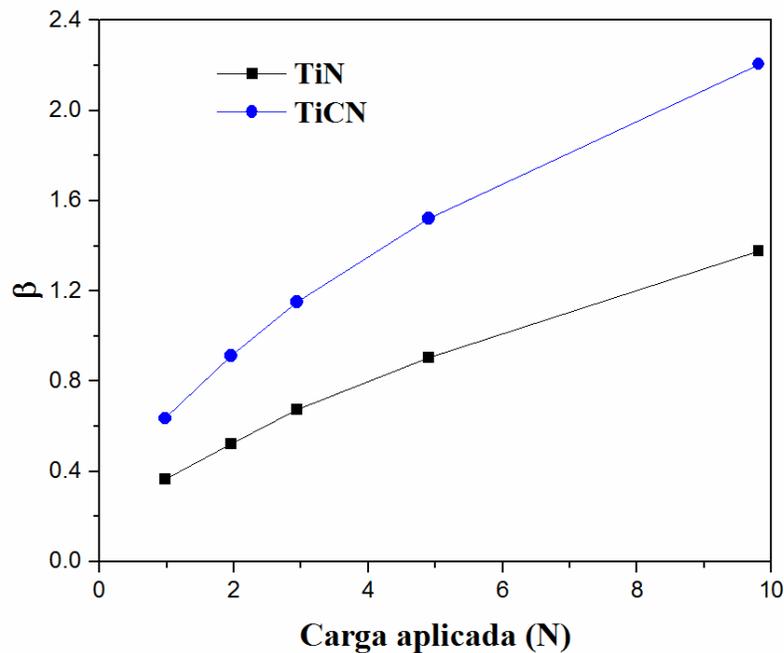


Figura 4.18 Parámetro β como función de la carga aplicada para los recubrimientos de TiN y TiCN.

Se han reportado una amplia gama de valores de microdureza para los recubrimientos de TiN y TiCN; estos pueden variar dependiendo de las condiciones de fabricación para ambos recubrimientos así como de la concentración de carbono en el caso del recubrimiento de TiCN. Sin embargo, los resultados de esta investigación son similares (1153 HV_{0.1} para TiN y 1520 HV_{0.1} para TiCN) a los reportados recientemente por P. Mi et al. [100] los cuales obtuvieron valores de microdureza de 1311 HV_{0.1} y 1674 HV_{0.1} para los recubrimientos de TiN y TiCN, respectivamente; dichos recubrimientos fueron preparados por plasma pulverizado sobre acero Q235 con espesores mayores que los recubrimientos reportados en este trabajo.

4.5 Determinación de la clase de adhesión

En la figura 4.19 se muestra una comparación de las improntas producidas por las pruebas de indentación Rockwell D, con una carga aplicada de 100 kgf, sobre los recubrimientos de TiN y TiCN con la finalidad de evaluar la calidad de la adhesión de dichos recubrimientos al sustrato de acero H13, conforme a la norma CEN/TS 1071-8 [94].

Para el recubrimiento de TiN (4.19a y 4.19b), se pueden ver gran cantidad de pequeñas grietas radiales (50 μm de longitud aproximadamente) alrededor de la huella. A diferencia del recubrimiento de TiN, se observaron menos grietas radiales pero con longitudes superiores a las del TiN, aproximadamente 150 μm de longitud, en el recubrimiento de TiCN (4.19c y 4.19d). Este comportamiento era de esperarse ya que la dureza del recubrimiento de TiCN es mayor que la del recubrimiento de TiN, lo que lo hace menos deformable y por lo tanto más frágil y susceptible al agrietamiento.

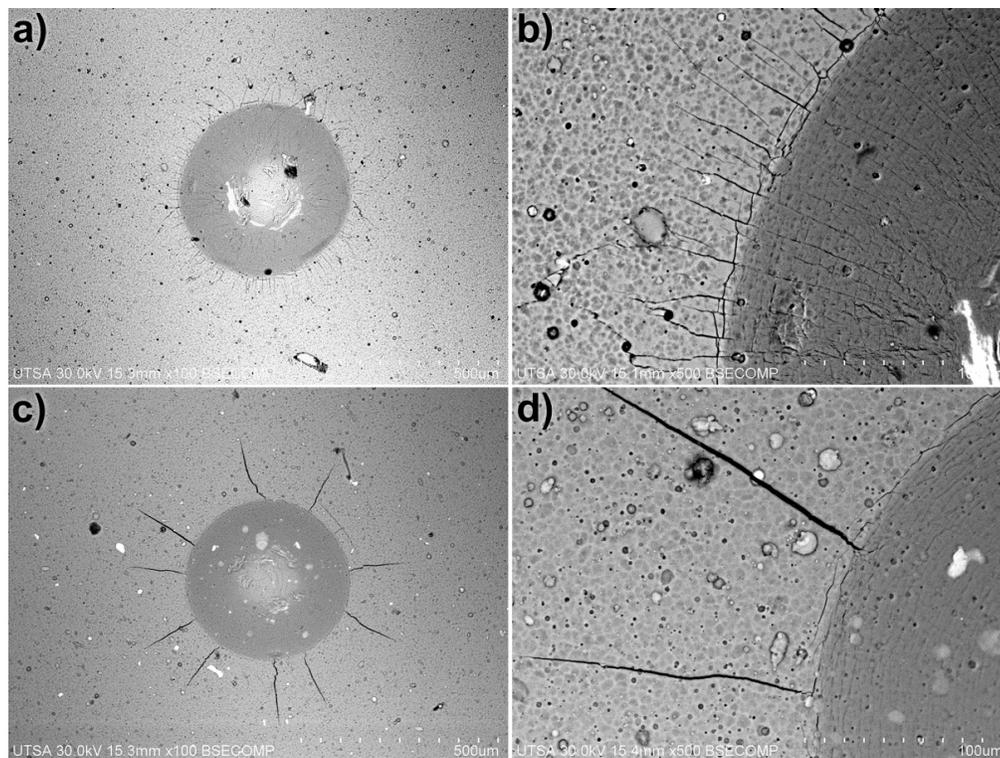


Figura 4.19 Micrografías SEM (100x y 500x) de las huellas de indentación Rockwell D sobre los recubrimientos de TiN (a y b) y TiCN (c y d).

Se han realizado investigaciones que reportan que el desempeño de este tipo de sistemas recubiertos está influenciado por las propiedades mecánicas del sustrato [101], de hecho, una manera de limitar este fenómeno es disminuir la diferencia en dureza entre el sustrato y el

recubrimiento. Además, se ha investigado que si la superficie a recubrir, incluso con alta dureza, tiene alta plasticidad y baja tenacidad; el recubrimiento se flexionaría demasiado y colapsaría bajo altas cargas específicas durante el desempeño a la fricción [101].

A pesar de que ambos recubrimientos presentan grietas, no se observó ningún tipo de falla en el recubrimiento. La relación entre las huellas de las improntas y la clasificación dada por la norma [94] sugiere una clase de adhesión 1, que representa un recubrimiento bien adherido debido a los fuertes lazos interfaciales entre el sustrato y el recubrimiento.

4.6 Análisis de tribológico

El estudio de fricción y desgaste está estructurado de manera que en una primera parte se evalúa el análisis tribológico de los recubrimientos de TiN y TiCN en condiciones en seco (sin lubricación) y posteriormente se realiza en condiciones lubricadas para finalmente hacer un comparativo entre ellos.

4.6.1 Coeficiente de fricción, factor de desgaste y mecanismos de desgaste de los recubrimientos de TiN y TiCN en condiciones en seco.

En la figura 4.20 se muestra la variación del coeficiente de fricción de los recubrimientos de TiN y TiCN en condiciones secas. Puede verse un comportamiento inestable del coeficiente de fricción en seco para ambos recubrimientos durante las primeras etapas del ensayo.

En una primera etapa (hasta 250 m), ambos recubrimientos presentan una variación mínima, mostrando valores de coeficientes de fricción alrededor de 0.80 y 0.32 para el TiN y el TiCN, respectivamente. Por encima de 300 m, el coeficiente de fricción del recubrimiento de TiN aumenta gradualmente con la distancia de deslizamiento, alcanzando la etapa estable después de 700 m con un valor de $\mu_k = 0.89$. Mientras tanto, el coeficiente de fricción del TiCN presenta un incremento súbito a después de los 300 m y fluctúa los próximos 200 m; por encima de esta etapa hay un aumento gradual con la distancia de deslizamiento alcanzando un valor final de $\mu_k = 0.7$.

Este comportamiento inestable para ambos recubrimientos podría estar asociado con la presencia de partículas en la superficie del recubrimiento debido al desprendimiento de material. Además, se pueden apreciar coeficientes de fricción más bajos para el recubrimiento de TiCN que para el de TiN, este comportamiento no es extraño; se han reportado varias investigaciones con coeficientes de fricción más bajos para el recubrimiento de TiCN que de TiN, bajo diferentes condiciones tribológicas [33,101,102]. Este efecto se ha relacionado con

el hecho de que los recubrimientos de TiCN presentan una dureza mayor que el TiN; además de eso, la presencia de carbono en la superficie funciona como lubricante reduciendo la fricción y el desgaste [33,100].

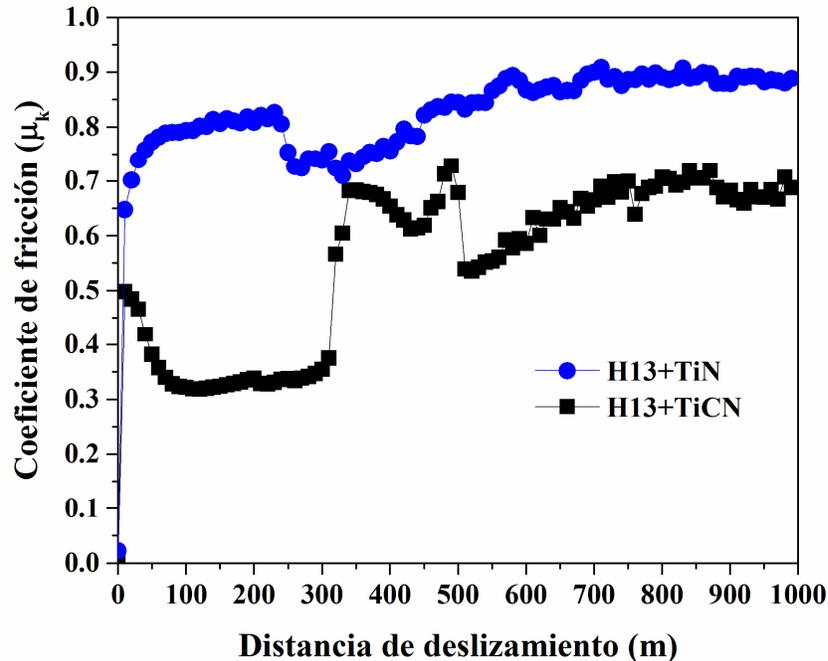


Figura 4.20 Evolución del coeficiente de fricción en función de la distancia de deslizamiento para los recubrimientos de TiN y TiCN bajo condiciones en seco.

La figura 4.21 representa los valores de los factores de desgaste en seco para los recubrimientos de TiN y TiCN, mostrando una concordancia con el comportamiento de fricción, en condiciones secas; el valor correspondiente al recubrimiento de TiN es alrededor de $60 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$, mientras que para el recubrimiento de TiCN es $30 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$, aproximadamente.

La figura 4.22 muestra las huellas de desgaste y perfiles de huella para los recubrimientos de TiN y TiCN en condiciones en seco. Las micrografías SEM muestran las superficies desgastadas mientras que los perfiles de las huellas de desgaste muestran anchos similares de aproximadamente $420 \mu\text{m}$ para los recubrimientos de TiN y TiCN (figuras 4.22a y 4.22b). Además, se puede observar que las huellas de desgaste son más profundas para el recubrimiento de TiN que el TiCN, de tal manera que la diferencia de $0.5 \mu\text{m}$ de profundidad implica mayores factores de desgaste para los recubrimientos de TiN de aproximadamente dos veces los valores del recubrimiento de TiCN tal como se observó en la figura 4.21, tomando

en cuenta que, según la ecuación 3.3, los valores de los factores de desgaste se determinaron evaluando el área transversal de la huella de desgaste.

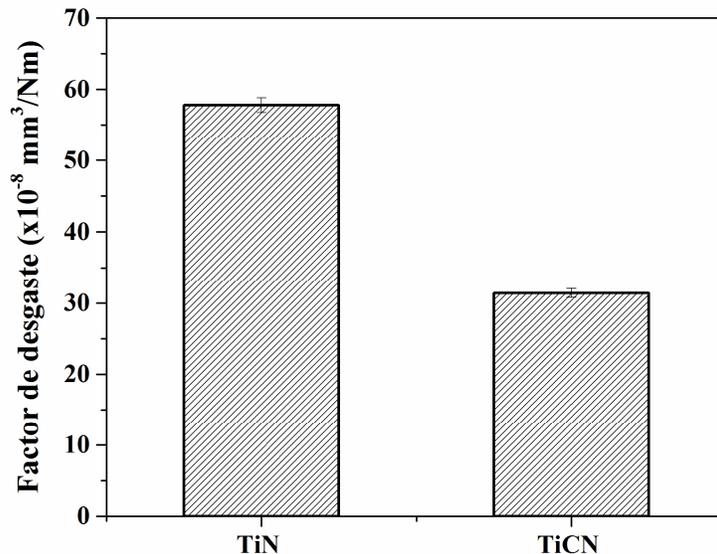


Figura 4.21 Factores de desgaste de los recubrimientos de TiN y TiCN en condiciones en seco.

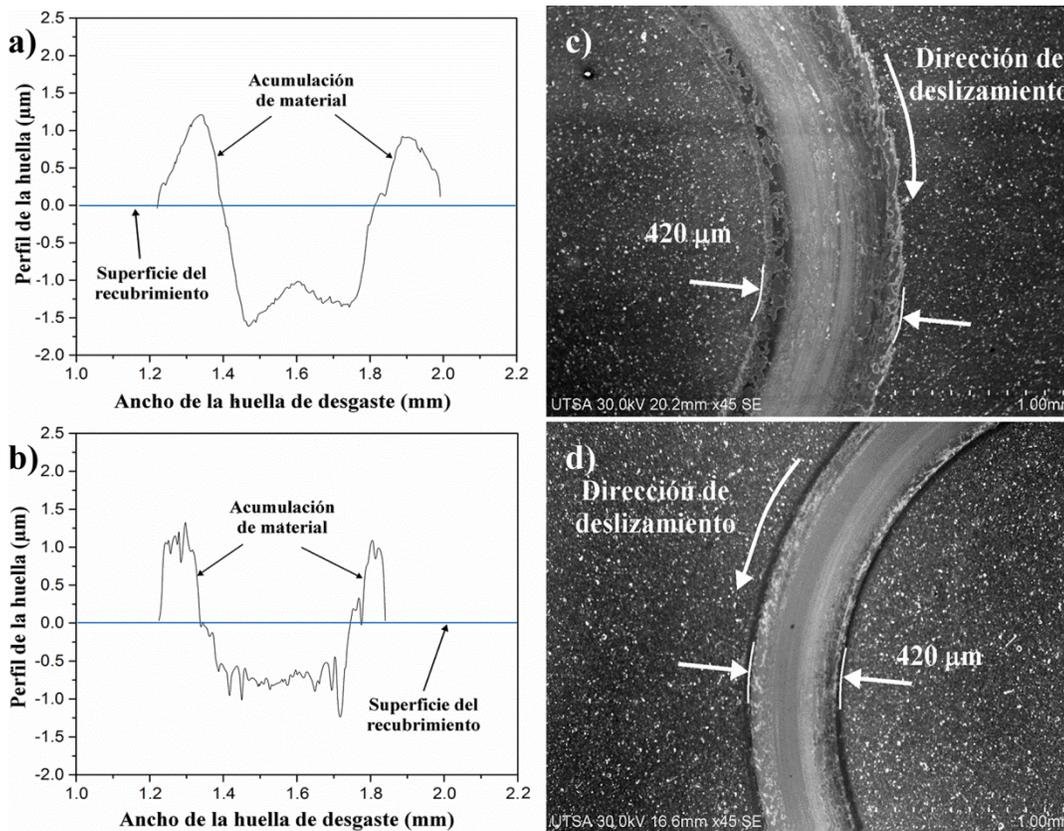


Figura 4.22 Perfiles de huella y micrografías SEM (45x) de los anchos de huella del área desgastada para los recubrimientos de TiN (a y c) y TiCN (b y d), en condiciones en seco.

Esta profundidad inferior en los perfiles de las huellas de desgaste de los recubrimientos de TiCN puede explicarse sobre la base del estudio realizado por Leyland y Matthews [103]. Ellos establecen que la relación H/E es un indicador fiable de una buena resistencia en un recubrimiento; y de acuerdo con Tsui et al. [104], la relación H^3/E^2 es proporcional a una resistencia del material a la deformación plástica durante el contacto donde valores más altos de la relación H^3/E^2 significa una mayor resistencia a fallas mecánicas. Por lo tanto, en primera instancia, se determinó la relación H^3/E^2 utilizando los valores de dureza de 24 GPa para el recubrimiento de TiN y 30 GPa para el recubrimiento de TiCN, lo que corresponde a la dureza del recubrimiento únicamente, obteniéndose valores para esta relación de 0.18 y 0.21 para el TiN y TiCN, respectivamente. Sin embargo, en una aplicación real, un componente recubierto funciona como un sistema de *recubrimiento-sustrato*, por lo que se determinó de nuevo esta relación, pero ahora con los valores de dureza de 11.3 GPa y 14.9 para los recubrimientos de TiN y TiCN, respectivamente (como se muestra en la figura 4.17). Con esta consideración, se han obtenido valores de 0.023 para el TiN y 0.027 para el TiCN. Aunque, estos valores de la relación H^3/E^2 están fuera de lo establecido por Tsui et al. [104], el valor para el recubrimiento de TiCN permanece más alto que para el de TiN.

Este efecto también se puede ver en la mecánica del desgaste, la cual fue mostrada en las figuras 4.23a y 4.23b, demostrando la mejor resistencia del recubrimiento de TiCN. Estas imágenes muestran las micrografías de las superficies desgastadas en las que se puede observar el desgaste abrasivo a través de los surcos paralelos a la dirección de deslizamiento causada por las partículas atrapadas entre las superficies de contacto o las asperezas de la contraparte. Además, los perfiles de las huellas de desgaste para ambos recubrimientos (figuras 4.22a y 4.22b) muestran acumulación de material en los bordes de la huella, esto no sólo se debe a la deformación plástica, sino también a las partículas de desgaste que salen fuera de la huella de desgaste en la zona de contacto debido a la velocidad de deslizamiento donde es evidente que hay un poco más de deformación plástica para el recubrimiento de TiN que de TiCN; mientras que algunas partículas de desgaste se eliminaron del área de contacto, muchas de ellas se acumularon en la zona de contacto entre la parte y la contraparte del tribosistema, compactándose y adhiriéndose dentro de la huella de desgaste como pequeños fragmentos planos.

Puede observarse también, para ambos sistemas, que en algunas zonas de la huella de desgaste el recubrimiento fue retirado completamente de la superficie. De acuerdo con el análisis de EDS (Figuras 4.23c y 4.23d), correspondientes a los números 1 y 2, indicados en las superficies desgastadas para cada recubrimiento (Figuras 4.23a y 4.23b), hay más concentración de elementos correspondiente a la composición del sustrato de acero H13 que de los recubrimientos de TiN y TiCN. Sin embargo, el análisis EDS muestra pequeñas cantidades de Ti y N, lo que sugiere aún la presencia de ambos recubrimientos sobre el sustrato H13.

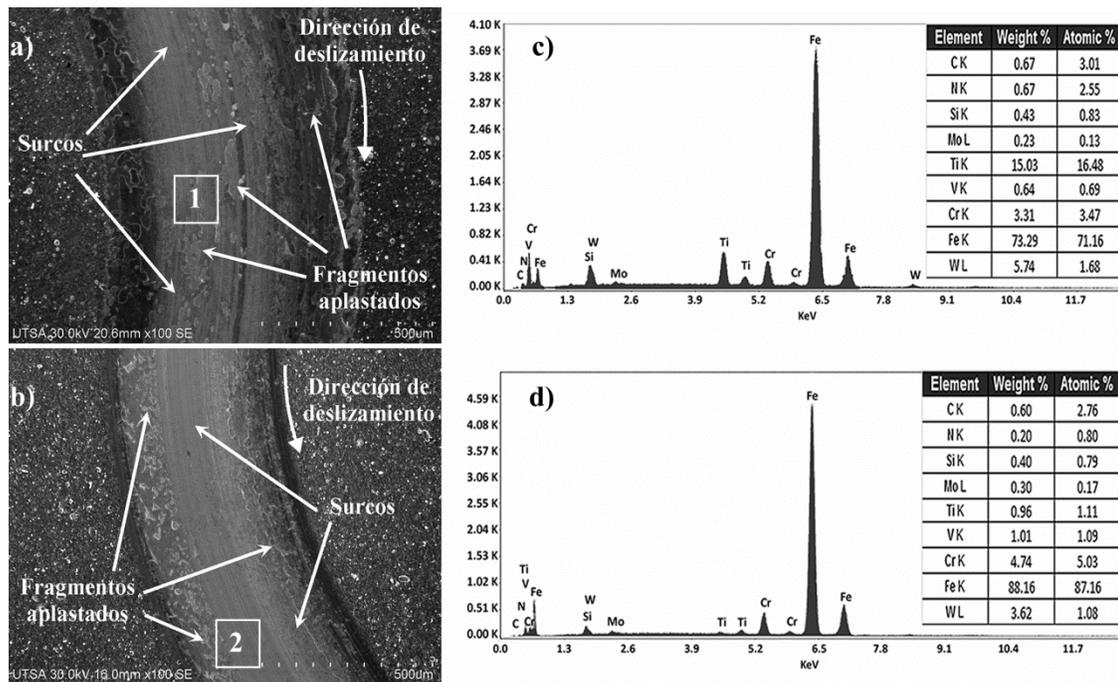


Figura 4.23 Micrografías SEM y análisis EDS de la superficie desgastada de los recubrimientos de TiN (a y c) y TiCN (b y d), en condiciones en seco.

4.6.2 Coeficiente de fricción, factor de desgaste y mecanismos de desgaste de los recubrimientos de TiN y TiCN en condiciones lubricadas

Por otra parte, en estado lubricado, los coeficientes de fricción de ambos recubrimientos disminuyeron considerablemente; aunque los coeficientes de fricción son relativamente cercanos entre sí, en comparación con los valores de fricción observados en condiciones en seco, el coeficiente de fricción del recubrimiento de TiCN permanece más bajo que el de TiN, ver figura 4.24. Este efecto ha sido observado por otros investigadores que han reportado bajos valores de coeficiente de fricción en medios lubricados como agua, agua de mar artificial y

lubricantes sintéticos tanto para recubrimientos de TiN como de TiCN [29,33,105]. Sin embargo, los coeficientes de fricción reportados por ellos son mayores que los reportados en este trabajo, es decir, Lei Shan et al. [33] encontraron valores de coeficiente de fricción $\mu_k \approx 0.10$ para ambos recubrimientos. Por otro lado, Lorenzo-Martin et al. [105] evaluaron el comportamiento de fricción y desgaste para recubrimientos de TiCN y TiN sobre un acero cementado y endurecido 4120 usando diferentes lubricantes. También obtuvieron coeficientes de fricción más altos con variación en las etapas iniciales, alcanzando un estado estable después de 30-60 min de duración del ensayo, los coeficientes de fricción oscilaban entre 0.15 y 0.065. Ellos reportaron un coeficiente de fricción en estado estable alrededor de $\mu_k \approx 0.09-0.10$ utilizando un lubricante de transmisión sintético que tiene un aditivo para la protección contra el desgaste.

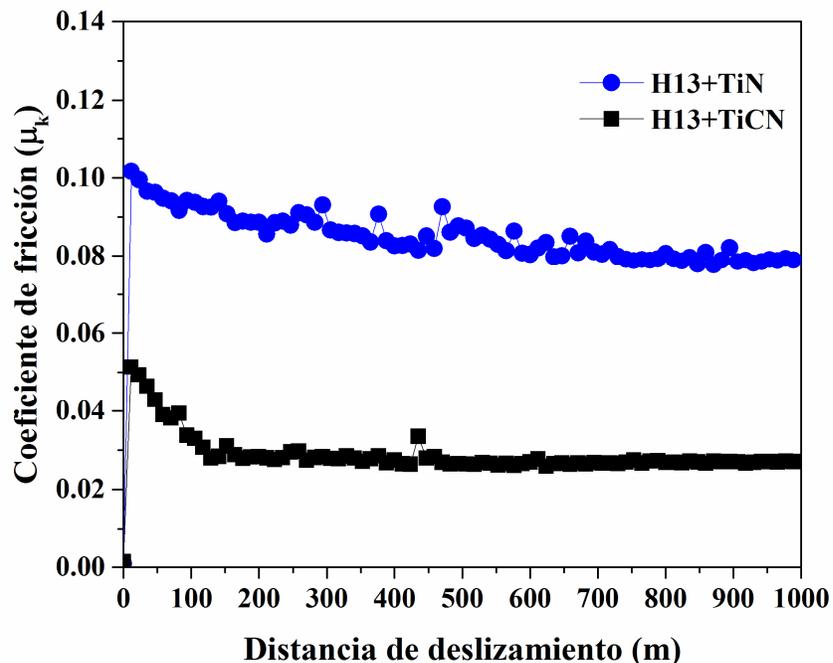


Figura 4.24 Evolución del coeficiente de fricción en función de la distancia de deslizamiento para los recubrimientos de TiN y TiCN bajo condiciones lubricadas.

La diferencia entre los valores obtenidos por [105] y esta investigación podría atribuirse a las propiedades del lubricante utilizado, recordando que en los sistemas lubricados se ha reportado que la película de fluido soporta una parte de la carga normal y parte de la fuerza de fricción está soportada por la fuerza de fricción de la película lubricante [106].

Además, las condiciones de los ensayos de fricción también influyen en los parámetros de medición; por ejemplo, los trabajos mencionados anteriormente se realizaron con mucho menor tiempo de deslizamiento y se llevaron a cabo en contacto deslizante alternativo.

En condiciones lubricadas, los valores del factor de desgaste disminuyeron considerablemente hasta llegar a $3.18 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ y $3.02 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ para el recubrimiento de TiN y TiCN, respectivamente, ver figura 4.25; estos valores son inferiores a los reportados recientemente por otros trabajos [33].

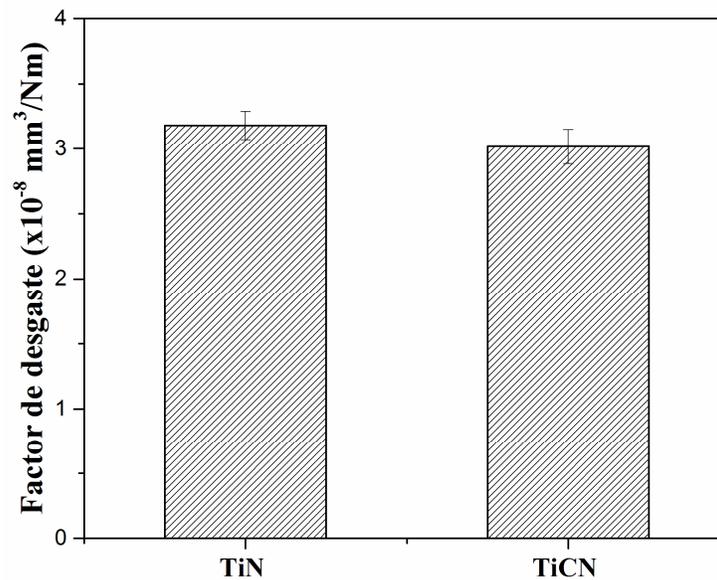


Figura 4.25 Factores de desgaste de los recubrimientos de TiN y TiCN en condiciones lubricadas.

En la figura 4.26 se muestran los perfiles de huella y las huellas de desgaste donde se aprecia que los anchos de las huellas disminuyeron considerablemente en comparación con la condición seca, $150 \mu\text{m}$ y $200 \mu\text{m}$. También las profundidades de las huellas de desgaste disminuyeron a valores entre $0.3 \mu\text{m}$ y $0.2 \mu\text{m}$ para los recubrimientos de TiN y TiCN, respectivamente; este comportamiento era de esperarse ya que fue empleado un medio lubricante durante los ensayos de fricción.

A diferencia de las huellas de desgaste en condiciones secas, no se observan cambios morfológicos visibles a primera vista en las zonas desgastadas en condiciones lubricadas (sólo se pueden percibir marcas de luz que se señalan entre flechas blancas), ver figuras 4.26b y 4.26e. Sin embargo, algunos surcos paralelos pueden apreciarse dentro de las huellas de desgaste y algo de deformación plástica en los perfiles de las huellas (figuras 4.26a y 4.26d). Estos surcos sugerirían que el principal mecanismo de desgaste fue la abrasión. Sin embargo,

este mecanismo de desgaste no afectó la integridad de los recubrimientos ya que según el análisis EDS, para ambos recubrimientos (figuras 4.26c y 4.26f) sobre las huellas desgastadas, sólo muestra la concentración de los elementos correspondientes a los recubrimientos TiN y TiCN, respectivamente.

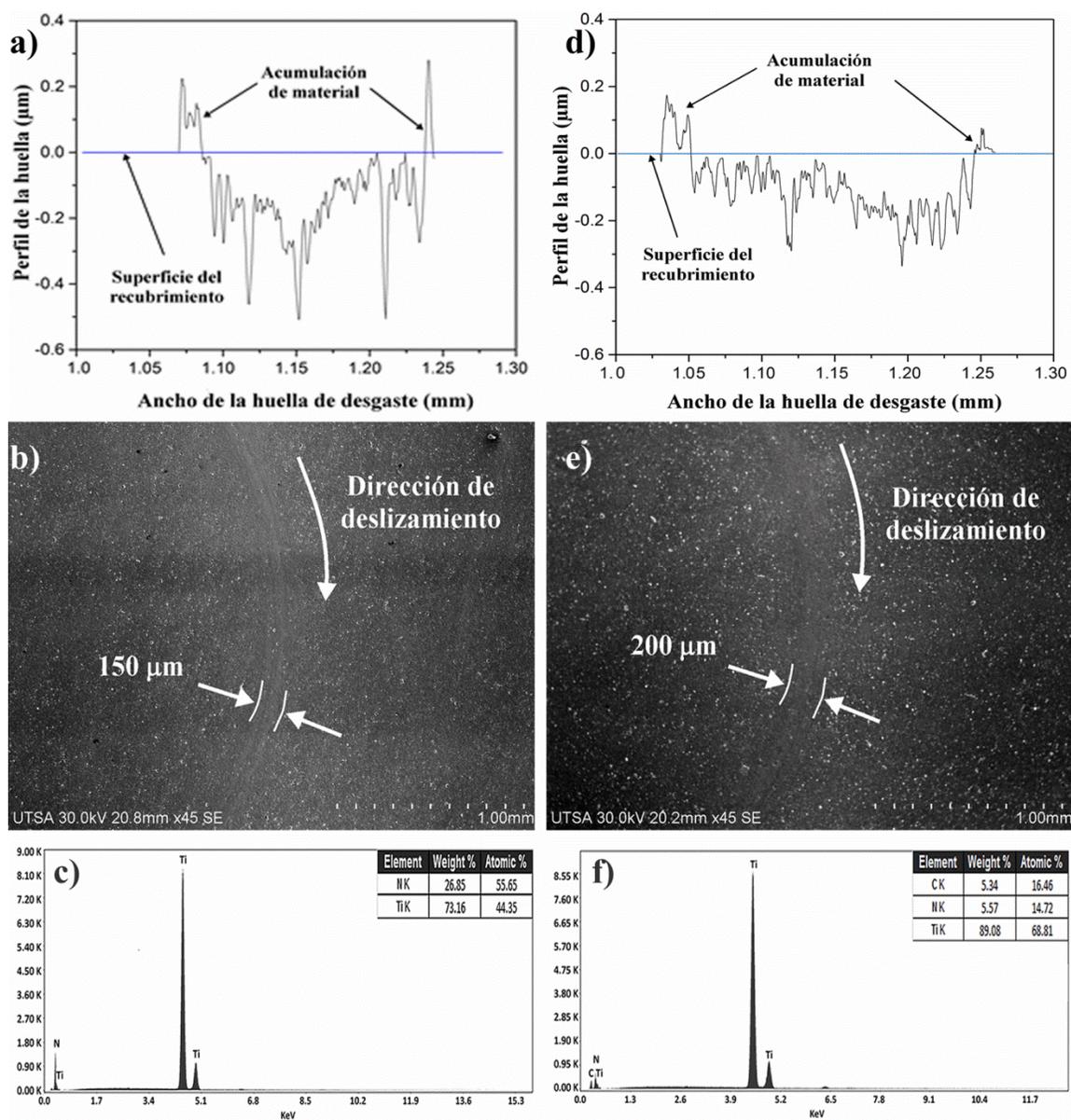


Figura 4.26 Perfiles de huella, micrografías SEM (45x) y análisis EDS de los anchos de huella del área desgastada para los recubrimientos de TiN (a, b y c) y TiCN (d, e y f), en condiciones lubricadas.

De manera general, después de los análisis de adhesión, dureza y tribológico se puede concluir que ambos recubrimientos tuvieron un buen desempeño tribológico-mecánico aunque fue

mejor para recubrimiento de TiCN. Ambos recubrimientos mostraron buena adhesión al sustrato de acero H13, lo cual es de vital importancia para su desempeño tribológico. Se evidenció que la dureza reportada en realidad es una dureza compuesta, es decir, la dureza del recubrimiento está influenciada por la dureza del sustrato; en el rango de carga de 1 a 3 N se apreció una menor contribución del sustrato en ambos recubrimientos.

Por otro lado, los coeficientes de fricción y factores de desgaste obtenidos, tanto en condiciones en seco como lubricadas, fueron menores para el recubrimiento de TiCN. Incluso dichos coeficientes fueron más bajos que los reportados por otros investigadores para este mismo tipo de recubrimientos, ver tabla 4.6.

Tabla 4.6 Dureza, relación H^3/E^2 , coeficiente de fricción promedio y factor de desgaste para los recubrimientos de TiN y TiCN.

Recubrimiento	Dureza HV _{0.1} (GPa)	Relación H^3/E^2	Coeficiente de fricción promedio (μ_k)		Factor de desgaste ($\text{mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$) $\times 10^{-8}$	
			Seco	Lubricado	Seco	Lubricado
TiN	11.3	0.023	0.828±0.065	0.085±0.007	57.80±0.40	3.18±0.1
TiCN	14.9	0.027	0.559±0.148	0.029±0.005	31.41±0.31	3.01±0.09

El principal mecanismo de desgaste fue la abrasión para ambos recubrimientos aunque también se observó deformación plástica en los perfiles de la huella de desgaste en condiciones en seco. En condiciones lubricadas, la integridad de los recubrimientos se mantuvo y fue confirmada mediante el análisis de imágenes SEM y el análisis EDS.

CAPÍTULO 4

PARTE C: INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL EN EL DESEMPEÑO TRIBOLÓGICO DEL ACERO PARA HERRAMIENTAS H13 NITRURADO

Las superficies de cualquier producto presentan irregularidades que son características del proceso utilizado para su fabricación, por ejemplo, en el proceso de forja, la pieza es formada por deformación plástica, aplicando fuerzas de compresión a través de un herramental. Así pues, la superficie del herramental estará en contacto durante la manufactura de la pieza, por lo que la rugosidad de éste influirá en el acabado de la pieza formada. En ese sentido, se evaluó el comportamiento tribológico de un acero AISI H13 con diferentes calidades superficiales, con rugosidades desde $0.03 \mu\text{m}$ hasta $0.41 \mu\text{m}$ bajo condiciones de lubricación. Se encontró que el coeficiente de fricción disminuye conforme se incrementa la rugosidad superficial en el rango desde 0.03 hasta $0.27 \mu\text{m}$ mientras que el factor de desgaste tuvo el mismo comportamiento pero solo en el rango de 0.03 hasta $0.11 \mu\text{m}$ ya que a partir de este valor, éste se incrementa conforme se incrementa la rugosidad superficial.

El objetivo de este trabajo fue realizar el análisis tribológico de un acero H13 nitrurado, que es un acero para herramienta utilizado para la fabricación de herramientas en los procesos de forja, con diferentes calidades superficiales con la finalidad de encontrar una rugosidad superficial óptima en el material y poder determinar bajo qué condiciones superficiales se limita el desgaste al mínimo y por consecuencia los costos por reposición de herramientas.

El análisis tribológico se llevó a cabo en dos grandes etapas que corresponden primero a las condiciones en seco y posteriormente lubricadas.

4.7 Análisis tribológico en condiciones en seco

La figura 4.27 muestra la evolución del coeficiente de fricción como función de la distancia de deslizamiento para las muestras con rugosidades superficiales Ra 0.41, Ra 0.11 y Ra 0.07, que por cuestiones prácticas serán nombradas S1, S2 y S3, respectivamente. La muestra S1, que tiene la rugosidad promedio más alta de las tres, alcanza un valor promedio de 0.82, teniendo ligeras fluctuaciones pero siempre con tendencia a incrementar durante el desarrollo de toda la prueba. Las muestras S2 y S3 por el contrario mantienen un comportamiento más estable desde los 100 m hasta el final de la distancia de deslizamiento, alcanzando valores de coeficiente de fricción muy similares de 0.68 y 0.69, respectivamente, ver tabla 4.7.

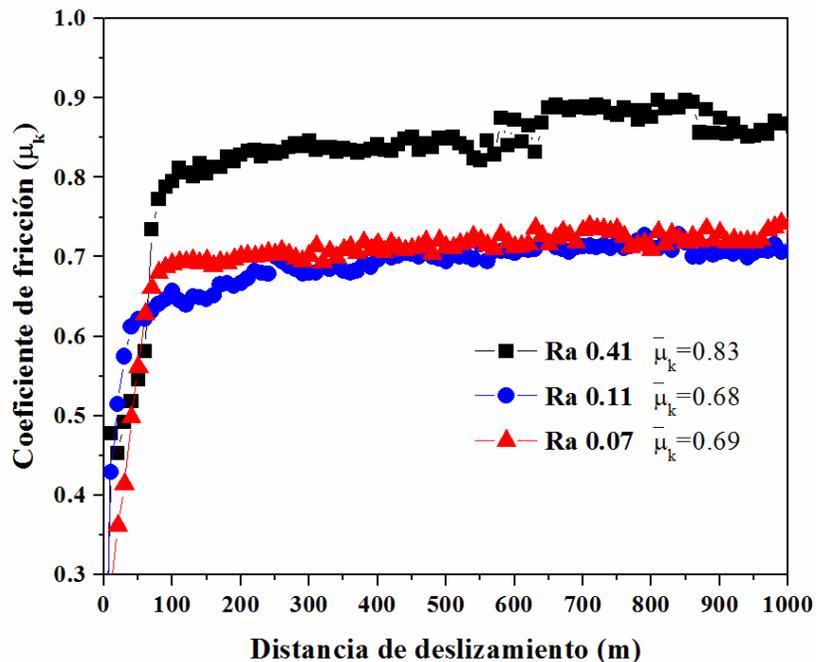


Figura 4.27 Coeficiente de fricción de las probetas S1, S2 y S3 como función de la distancia de deslizamiento.

Como pudo observarse, el coeficiente de fricción fue mayor para la rugosidad más alta y este comportamiento podría atribuirse a que las partículas desprendidas durante las pruebas de fricción quedan atrapadas en las marcas del desgaste abrasivo, mismas que actúan como nuevas superficies rugosas que incrementan el coeficiente de fricción.

En las figuras 4.28a, 4.28b y 4.28c se muestran las imágenes representativas de los perfiles de la huella de desgaste donde puede apreciarse que para las tres rugosidades superficiales se tiene una profundidad de huella muy similar, alrededor de 1 μm , aunque para la rugosidad más alta esa profundidad de huella es prácticamente en todo su ancho (figura 4.28a), sin embargo, para las probetas S2 y S3, esa profundidad solo es en el centro de la huella.

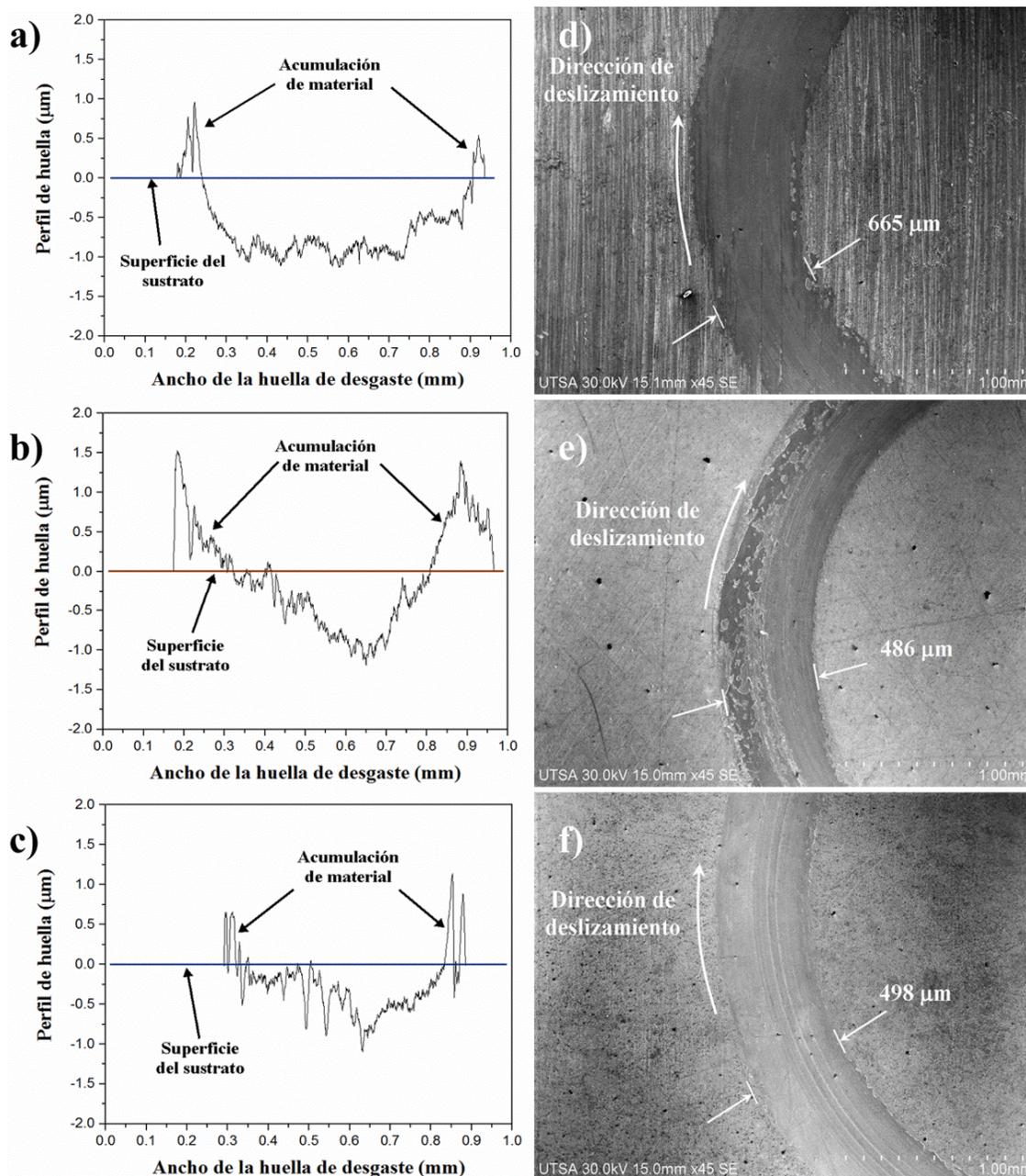


Figura 4.28 Perfiles de la huella de desgaste: a) S1, b) S2, c) S3 y micrografías SEM (45X) de los anchos de huella de desgaste: d) S1, e) S2 y f) S3.

También se observa una acumulación de material que no solo es debida a la deformación plástica del material por los elevados esfuerzos de contacto sino también a las partículas de desgaste que se van adhiriendo por la acción de la fuerza aplicada a ese mismo material desplazado; esta acumulación de material es más evidente para la probeta S2 (figura 4.28b).

En ese mismo sentido, las figuras 4.28d, 4.28e y 4.28f muestran los anchos de huella para las probetas S1, S2 y S3, respectivamente. Se puede observar una huella más ancha para la probeta S1, alrededor de 665 μm , mientras que para las otras dos rugosidades el ancho de huella disminuyó alrededor de un 25%, alcanzando valores de 486 y 498 μm para las probetas S2 y S3, respectivamente. Con valores más grandes tanto en la altura del perfil como en el ancho de huella era de esperarse que la probeta S1 mostrara un factor de desgaste mayor que las otras dos probetas, alcanzando un valor de aproximadamente $63.54 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ mientras que las probetas S2 y S3, los valores de factor de desgaste disminuyeron un 52% y 62%, respectivamente, ver tabla 4.7.

Tabla 4.7 Valores promedio del coeficiente de fricción y factor de desgaste para las muestras S1, S2 y S3.

Muestra	Rugosidad promedio (μm)	Coefficiente de fricción (μ_k)	Factor de desgaste (mm^3/Nm) $\times 10^{-8}$
S1	0.41	0.826 ± 0.092	63.54
S2	0.11	0.684 ± 0.048	30.17
S3	0.07	0.696 ± 0.078	23.93

Existen investigaciones sobre la relación que existe entre la rugosidad de la superficie y el coeficiente de fricción. Por ejemplo, Maatta et al. [107] observaron que pulir las superficies en contacto para minimizar la rugosidad de la superficie reduce el coeficiente de fricción. En ese mismo sentido, Menezes et al. [108] encontró que el coeficiente de fricción disminuye drásticamente cuando el valor de la rugosidad superficial es muy bajo (para muestras pulidas aleatoriamente). Por el contrario, Myshkin et al. [109] argumentan que una superficie más rugosa reducirá el coeficiente de fricción. En esta investigación se observa que no puede establecerse claramente una tendencia para los valores de coeficiente de fricción a aumentar o disminuir con respecto a la rugosidad superficial (de las tres rugosidades) tal como lo describen Maatta, Menezes y Myshkin.

Por otro lado, el factor de desgaste muestra una correlación con la rugosidad superficial ya que para la probeta más rugosa (Ra 0.41) se calculó el factor de desgaste más elevado que para las otras dos probetas, es decir, se observa una tendencia del factor de desgaste a aumentar conforme se incrementa la rugosidad superficial. Este comportamiento ha sido descrito por otros investigadores [110] en diferentes materiales metálicos y en recubrimientos para elementos de máquinas [111], ver tabla 4.7.

La figura 4.29 muestra las micrografías SEM y ópticas de las superficies desgastadas de las probetas S1, S2 y S3, en las cuales se observan surcos en dirección del deslizamiento, característicos de un desgaste abrasivo (figura 4.29a, 4.29b y 4.29c).

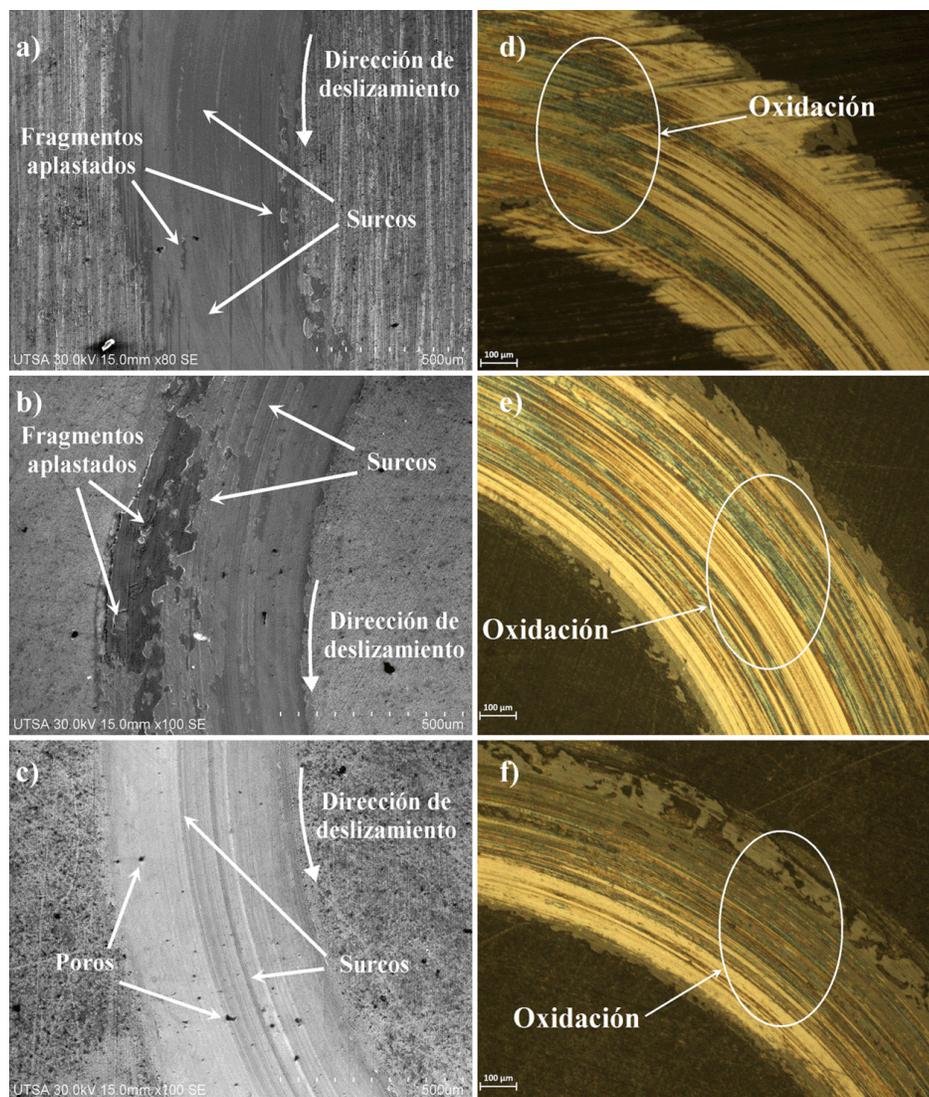


Figura 4.29 Micrografías SEM (100x) y ópticas (200x) de las superficies desgastadas: S1 (a y d), S2 (b y e) y S3 (c y f).

Se puede observar también que algunos de estos surcos presentan distintas coloraciones tales como café, azul y negro, que hacen suponer que existió oxidación en la superficie (figuras 4.29d, 4.29e y 4.29f). Este comportamiento se debe principalmente a que existió una interacción entre la superficie de la probeta y el ambiente ya que las pruebas de fricción fueron en seco. El cambio de coloración en los surcos se debe al aumento de la temperatura de la pieza a lo largo de toda la prueba debido a la fricción en la superficie desgastada.

En las figuras 4.29 (a, b y c) también se observan zonas donde hubo fragmentos aplastados que son el resultado de partículas de desgaste que quedaron atrapadas en la zona de contacto y fueron aplastadas y adheridas dentro de la huella de desgaste debido a la presión de contacto entre el pin y el sustrato.

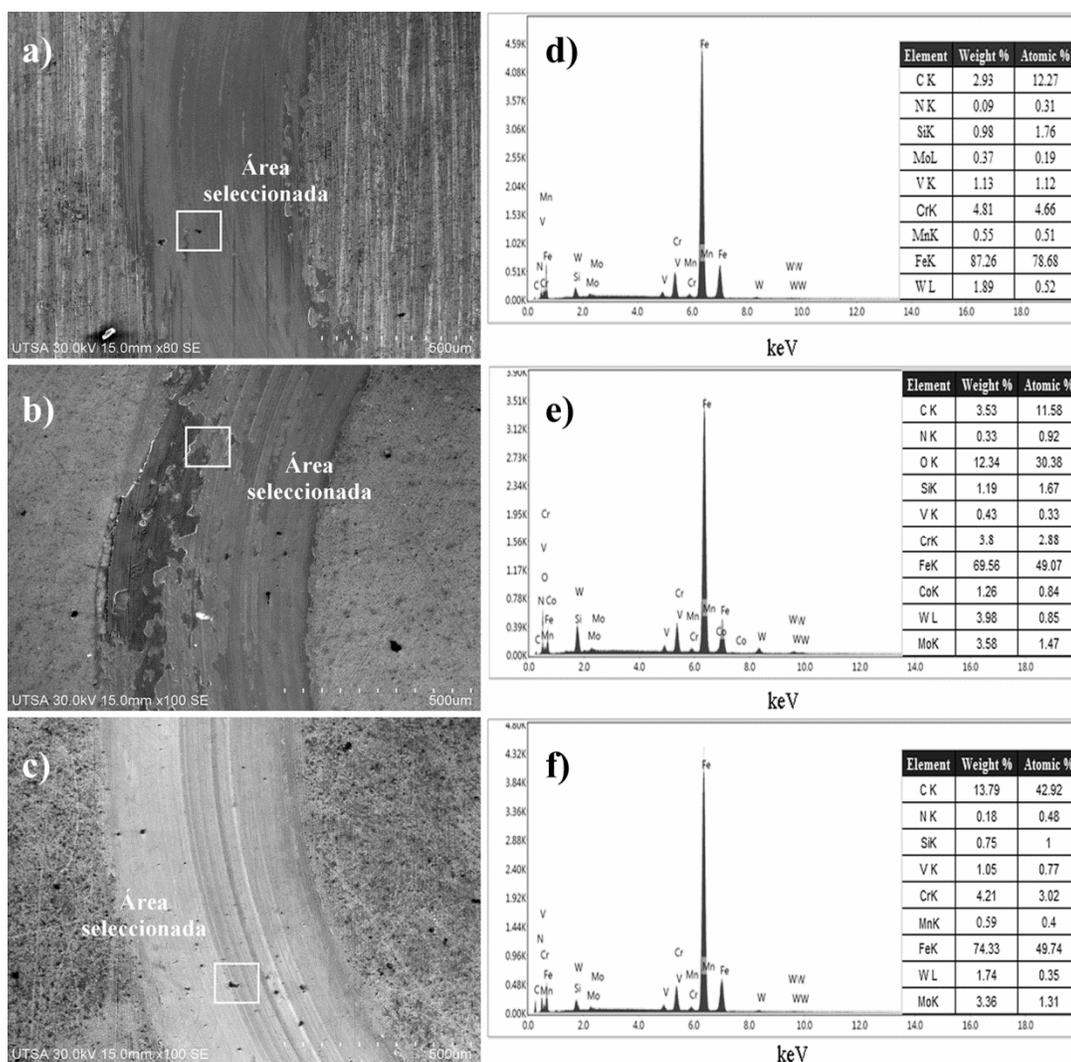


Figura 4.30 Micrografías SEM (100x) y análisis EDS de las superficies desgastadas: S1 (a y d), S2 (b y e) y S3 (c y f).

De acuerdo al análisis de EDS (figuras 4.30d, 4.30e y 4.30f) que corresponde a las áreas seleccionadas de las figuras 4.30a, 4.30b y 4.30c, respectivamente, existe la presencia de tungsteno en las zonas con fragmentos aplastados y adheridos; el tungsteno no es un elemento que esté presente en la composición química ni del acero H13 ni del tratamiento térmico de nitrurado, lo cual indica que hubo transferencia de material del pin (WC) al sustrato.

4.8 Análisis tribológico en condiciones lubricadas

La figura 4.31 muestra la variación del coeficiente de fricción en función de la distancia de deslizamiento para las muestras con rugosidades superficiales Ra 0.41, Ra 0.11 y Ra 0.07, bajo condiciones lubricadas, que para cuestiones prácticas se nombrarán L1, L2 y L3, respectivamente. La probeta L2 muestra un mejor comportamiento de fricción durante toda la distancia de deslizamiento. Puede observarse que su estado estable prácticamente lo alcanza después de los primeros 100 m con una ligera tendencia a aumentar conforme se incrementa la distancia de deslizamiento alcanzando un coeficiente de fricción promedio de 0.101.

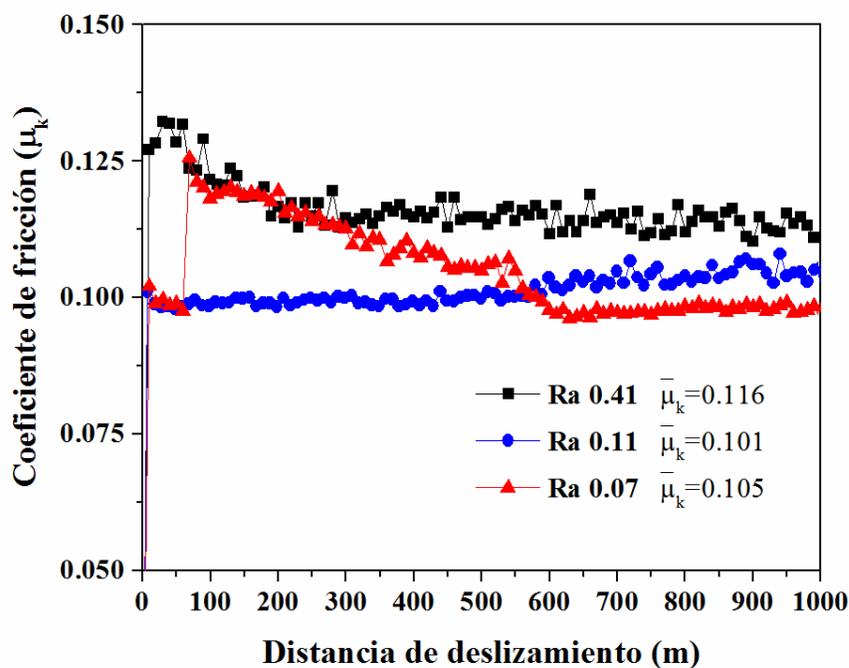


Figura 4.31 Coeficiente de fricción de las probetas con rugosidades L1, L2 y L3 como función de la distancia de deslizamiento.

Para la probeta L1 se observa un ligero incremento los primeros 50 m donde obtiene su valor más alto, en los próximos 200 m muestra su etapa más inestable disminuyendo hasta alcanzar un valor promedio de 0.116 mismo que mantendrá con pequeñas variaciones hasta el final de

la prueba. Por otro lado, la probeta L3 presentó el comportamiento más inestable de todas. Se puede observar que su valor más alto de coeficiente de fricción fue en los primeros metros alcanzando un valor de 0.12, luego entre 50 y 600 metros exhibió una disminución gradual con la distancia de deslizamiento alcanzando su estado estable después de 600 m con un coeficiente de fricción de 0.095 que se mantuvo hasta el final de la prueba. La tabla 4.8 muestra los valores promedio del coeficiente de fricción (en condiciones lubricadas) para las tres rugosidades.

Tabla 4.8 Valores promedio del coeficiente de fricción y factor de desgaste las probetas lubricadas L1, L2 y L3.

Muestra	Rugosidad promedio (μm)	Coefficiente de fricción (μ_k)	Factor de desgaste (mm^3/Nm) $\times 10^{-8}$
L1	0.41	0.116 ± 0.0051	36.3
L2	0.11	0.101 ± 0.0053	5.41
L3	0.07	0.105 ± 0.0084	25.24

En la figura 4.32 se observan los perfiles de la huella de desgaste para las tres rugosidades bajo condiciones lubricadas. Los perfiles correspondientes a las probetas L1 y L3 (figuras 4.32a y 4.32c) tienen profundidades muy similares de alrededor de $1.5 \mu\text{m}$. También se observa acumulación de material por encima de la superficie del sustrato lo cual indica que hubo deformación plástica principalmente.

Los anchos de huella para esas dos probetas, L1 y L3, también muestran valores cercanos entre sí, aproximadamente de $247 \mu\text{m}$ y $209 \mu\text{m}$, respectivamente. Un menor ancho en la huella de desgaste para la probeta L3 hace que su factor de desgaste sea menor que para la probeta L1, teniendo $24.12 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ y $36.3 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$, respectivamente. Por otro lado, para la probeta L2 ($R_a 0.11$) se tiene una huella poco profunda, alrededor de $0.5 \mu\text{m}$, y menos ancha ($139 \mu\text{m}$) por lo que su factor de desgaste es menor en aproximadamente 85 % y 77 % que para las probetas L1 y L3, respectivamente, ver tabla 4.8.

En la figura 4.33 se muestran las micrografías SEM y sus correspondientes análisis EDS de las superficies desgastadas de las probetas L1, L2 y L3; se pueden observar unas marcas ligeras en dirección del deslizamiento lo cual indica que hubo un desgaste abrasivo, ver figuras 4.33a, 4.33b y 4.33c. Este comportamiento puede también verse en la parte baja de los perfiles de huella (figuras 4.32a, 4.32b y 4.32c), es decir, las crestas y valles dentro del perfil de la huella

de desgaste son indicio de que el material removido fue a través de un mecanismo de desgaste abrasivo.

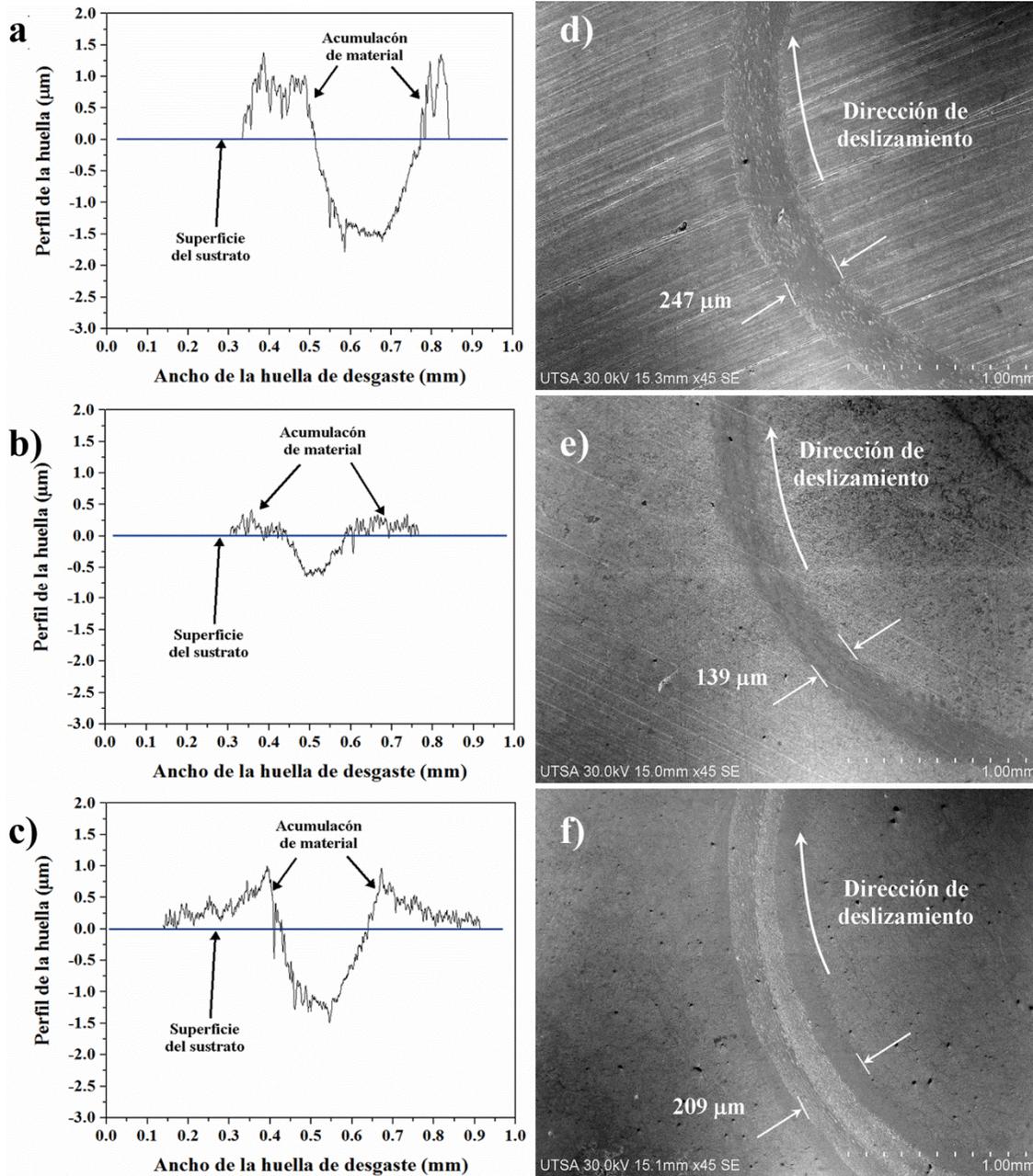


Figura 4.32 Perfiles de la huella de desgaste: a) L1, b) L2, c) L3 y micrografías SEM (45X) de los anchos de huella de desgaste: d) L1, e) L2 y f) L3.

Al igual que en condiciones en seco, se observan también algunas zonas más oscuras dentro de la huella que puede deberse a que pequeñas porciones de material desprendido hayan quedado atrapadas en la zona de contacto y posteriormente fueron adheridas a la superficie del sustrato. Al igual que en condiciones en seco, el análisis EDS (figuras 4.33d, 4.33e y 4.33f)

correspondiente a las áreas seleccionadas muestra la presencia de tungsteno el cual no es parte de la composición química del acero H13 ni del tratamiento de nitrurado por lo que hubo una transferencia de material del pin hacia el sustrato.

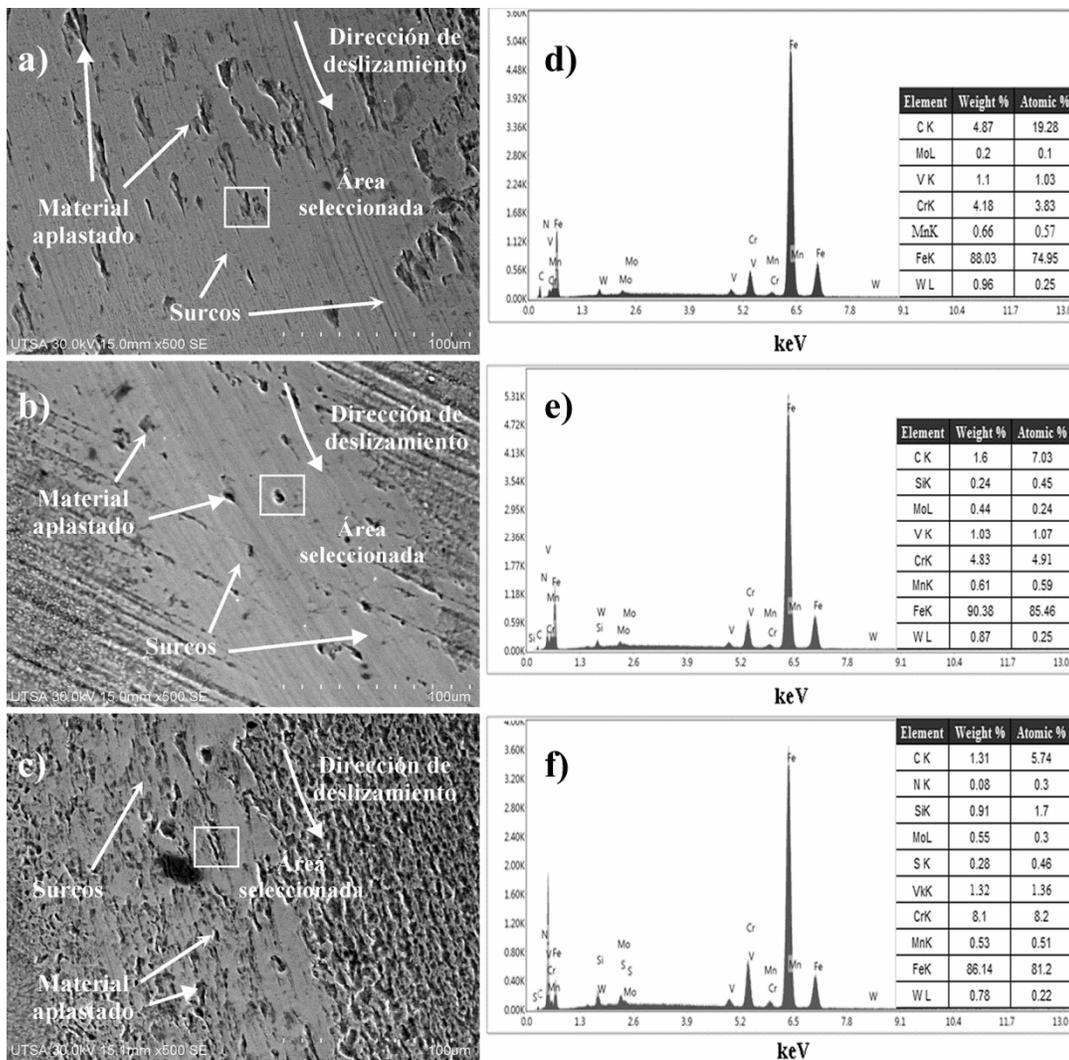


Figura 4.33 Micrografías SEM (500x) y análisis EDS de las superficies desgastadas: L1 (a y d), L2 (b y e) y L3 (c y f).

A diferencia de las condiciones en seco donde se pudo establecer una correlación entre la rugosidad superficial y el factor de desgaste, en condiciones lubricadas no se encontró algo similar. Con la finalidad de ampliar la investigación, se prepararon superficialmente dos probetas más, con rugosidades de Ra 0.27 y Ra 0.03, con el objetivo de relacionar la rugosidad superficial y el coeficiente de fricción y/o el factor de desgaste.

Los ensayos de fricción para las nuevas rugosidades se realizaron bajo las mismas condiciones y se obtuvieron los coeficientes de fricción, perfiles de las huellas de desgaste y los factores de desgaste. En la tabla 4.9 se muestran los coeficientes de fricción y factores de desgaste para cada una de las 5 rugosidades superficiales.

Tabla 4.9 Valores del coeficiente de fricción y factor de desgaste para todas las probetas lubricadas.

Rugosidad Ra (µm)	Coeficiente de fricción (µ _k)	Factor de desgaste (mm ³ /Nm)x10 ⁻⁸			
		1o.	2o.	3o.	
0.41	1 ^a .	0.1163	41.92	40.3	39.27
	2 ^a .	0.115	35.69	35.38	36.93
	3 ^a .	0.1156	33.24	33.26	30.7
0.27	1 ^a .	0.0843	24.95	24.28	24.16
	2 ^a .	0.0861	26.75	26.19	26.58
	3 ^a .	0.085	22.53	22.45	22.7
0.11	1 ^a .	0.1011	5.89	5.95	5.73
	2 ^a .	0.1017	6.96	6.83	6.19
	3 ^a .	0.1	3.85	3.34	3.93
0.07	1 ^a .	0.1053	22.24	22.5	22.7
	2 ^a .	0.1064	24.17	24.84	24.59
	3 ^a .	0.1061	27.18	28.33	30.59
0.03	1 ^a .	0.1109	36.82	37.18	37.63
	2 ^a .	0.1091	35.33	35.19	35.36
	3 ^a .	0.1106	35.83	35.52	35.73

En la figura 4.34 se muestra el comportamiento del coeficiente de fricción para todas las rugosidades bajo condiciones lubricadas. Las nuevas rugosidades, Ra 0.27 y Ra 0.03, tienen comportamientos similares; alcanzan el estado estable aproximadamente a los 100 m y tienen coeficientes de fricción promedio de 0.085 y 0.11, respectivamente.

Adicionalmente, en la figura 4.35 se muestra el comportamiento del coeficiente de fricción promedio en función de la rugosidad superficial. Para la rugosidad más elevada (Ra 0.41) se tiene el coeficiente de fricción más alto. Se observa también que en el rango de rugosidades entre 0.03 y 0.27 el coeficiente de fricción muestra una tendencia a disminuir conforme la rugosidad superficial se incrementa. Menezes et al. [108] en su investigación encontró que el

coeficiente de fricción disminuye conforme la rugosidad superficial también disminuye; él muestra que existe una mayor variación para las condiciones en seco que para las condiciones lubricadas concluyendo que el comportamiento de la fricción depende más de la textura de la superficie y no del valor de la rugosidad superficial.

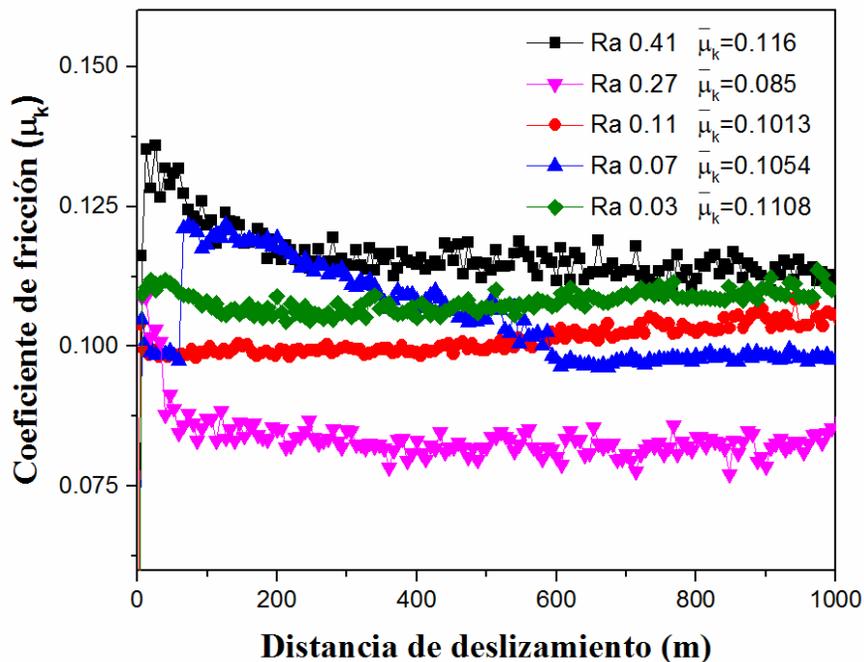


Figura 4.34 Coeficiente de fricción como función de la distancia de deslizamiento.

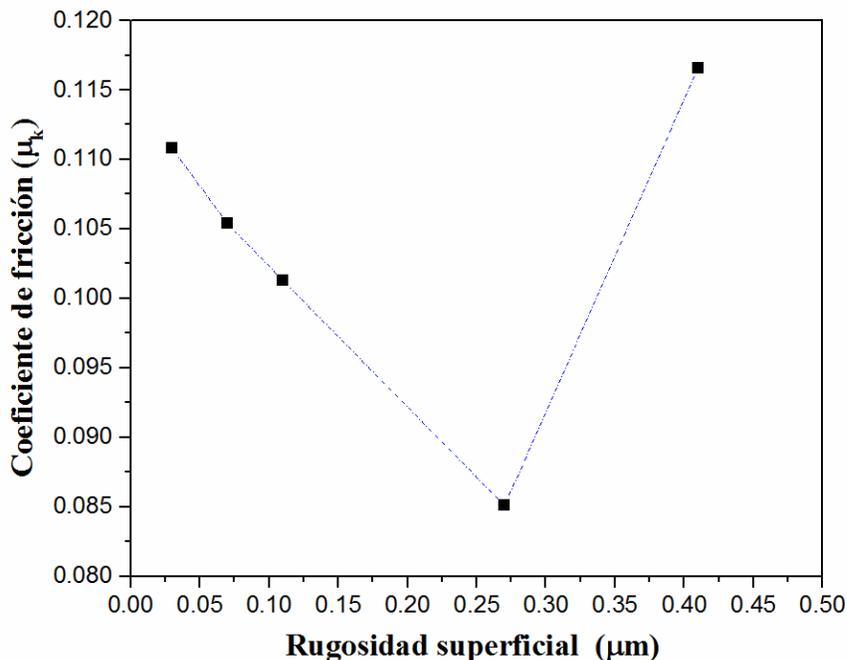


Figura 4.35 Comportamiento de coeficiente de fricción en función de la rugosidad superficial.

Se realizó un ajuste de la curva, en ese rango de rugosidades, mediante una regresión polinomial por el método de mínimos cuadrados (ver Anexo G), con la serie de datos de la tabla 4.9, con la finalidad de predecir el valor del coeficiente de fricción para una rugosidad determinada.

La ecuación mostrada en la figura 4.36 representa el comportamiento del coeficiente de fricción en función de la rugosidad superficial para un rango de rugosidades entre 0.03 μm y 0.41 μm , teniendo un coeficiente de determinación cercano a $R^2 = 0.9$, el cual implica un buen ajuste del conjunto de datos al polinomio de segundo orden.

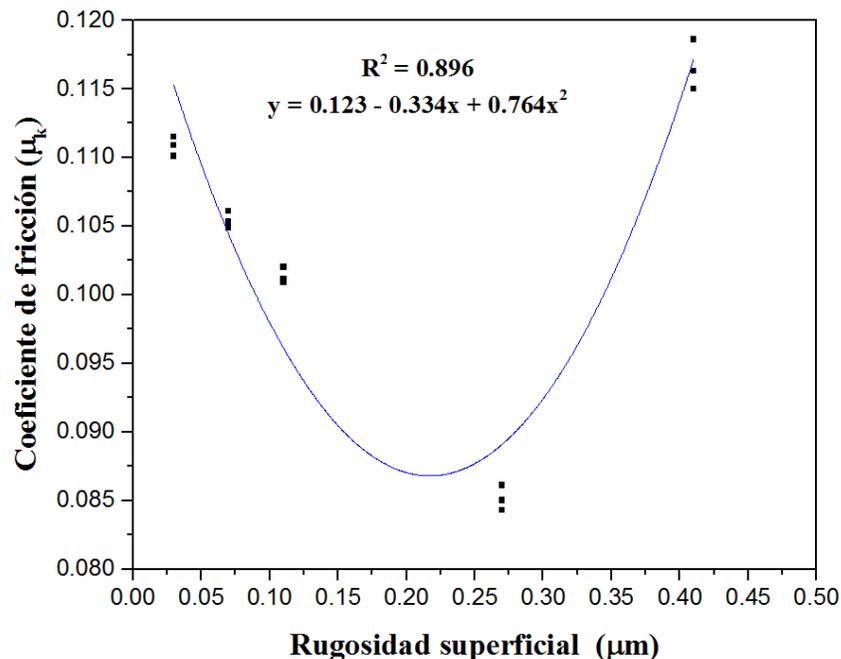


Figura 4.36 Ajuste de la curva del coeficiente de fricción en función de la rugosidad superficial.

Por otro lado, en la figura 4.37 se muestran los perfiles de huella y los factores de desgaste asociados con cada una de esas huellas de desgaste. Se observa que para una rugosidad intermedia de 0.11 μm se tiene el menor factor de desgaste con un valor aproximado de $5.41 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$. En la figura 4.37b puede verse que el factor de desgaste aumenta en un orden de magnitud para rugosidades superficiales menores que 0.11 μm , aproximadamente $36.07 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ y $25.24 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ para las rugosidades de 0.03 μm y 0.07 μm , respectivamente. De manera similar, para rugosidades superficiales mayores que 0.11 μm , el factor de desgaste incrementa hasta $24.51 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ y $36.3 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ para las rugosidades de 0.27 μm y 0.41 μm , respectivamente.

De igual manera que en el caso del coeficiente de fricción, se busca obtener una función que permita predecir el factor de desgaste para lo cual se realizó una regresión polinomial por el método de mínimos cuadrados (ver Anexo G), con la serie de datos de la tabla 4.9, ajustando los datos a un polinomio de tercer orden.

La ecuación mostrada en la figura 4.38 representa el comportamiento del factor de desgaste en función de la rugosidad superficial para un rango de rugosidades entre 0.03 μm y 0.41 μm , teniendo un coeficiente de determinación cercano a $R^2 = 0.91$, el cual implica un buen ajuste del conjunto de datos al polinomio de tercer orden.

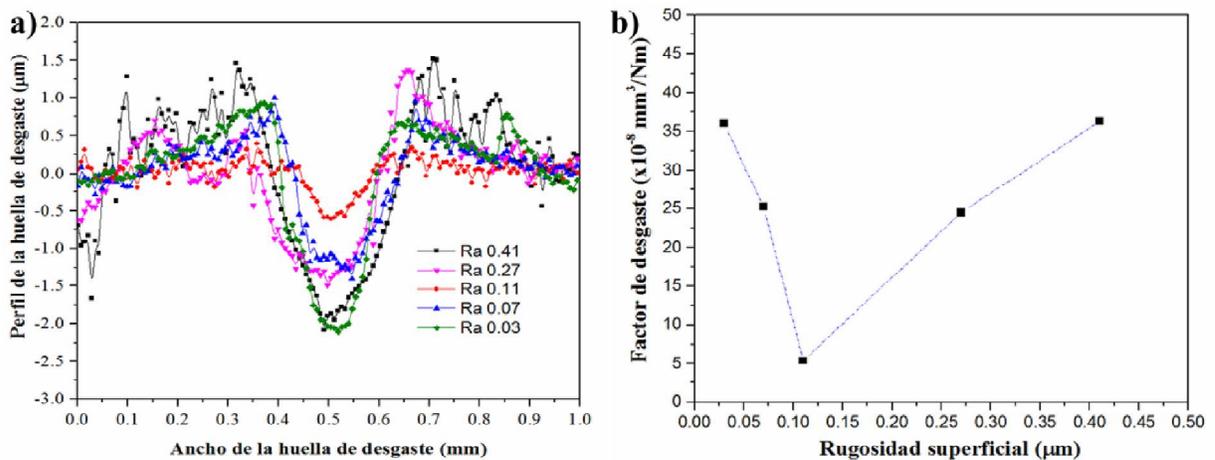


Figura 4.37 Perfiles de huella y factores de desgaste en función de la rugosidad superficial.

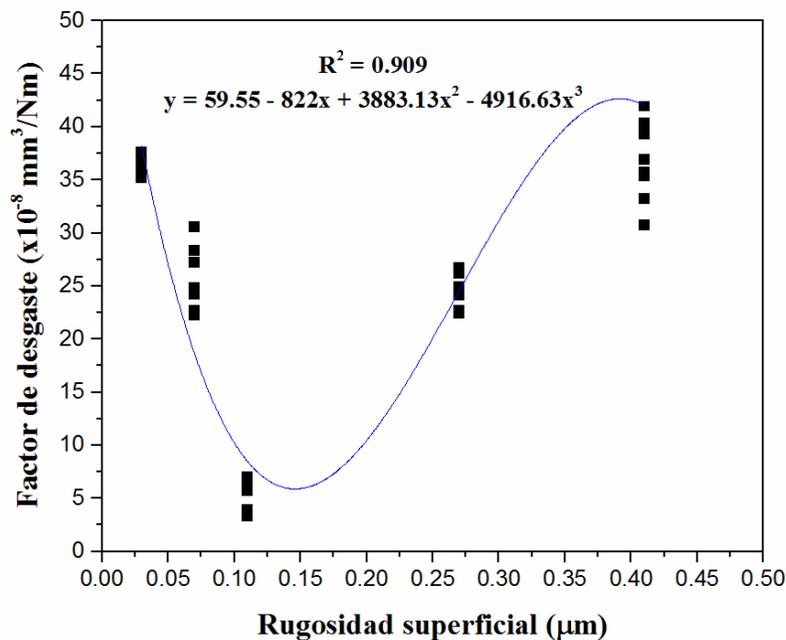


Figura 4.38 Ajuste de la curva del factor de desgaste en función de la rugosidad superficial.

Dicha ecuación permite predecir el valor del factor de desgaste para una calidad superficial determinada. De hecho, se puede observar que para dos distintas calidades superficiales, $0.07 \mu\text{m}$ y $0.27 \mu\text{m}$, se tienen valores similares del factor de desgaste; esto nos dice que se pueden tener factores de desgaste bajos con calidades superficiales más elevadas lo cual implica un ahorro en tiempo de preparación de las superficies y por lo tanto representa un ahorro económico.

Por otro lado, para entender el comportamiento tanto del coeficiente de fricción como del factor de desgaste bajo condiciones lubricadas respecto a la rugosidad superficial de las partes que están en contacto, es esencial entender que las magnitudes de la fricción y el desgaste entre dos superficies están relacionadas con el régimen de lubricación. Para todos los casos, el régimen de lubricación fue determinado siendo éste capa límite, ver Anexo H.

Cuando la lubricación es escasa como en el régimen de capa límite o en las primeras etapas de la lubricación mixta (en la región cercana a $\lambda = 1$) existe contacto entre las superficies. Cuando la rugosidad R_a tiende a ser menor, la cantidad de lubricante que queda atrapado en los valles de esa rugosidad no es suficiente para separar las superficies lo cual permite contacto entre las partes del tribosistema, desprendiendo partículas de material que actúan como nuevas superficies de contacto generando un incremento del coeficiente de fricción. Este comportamiento puede verse la gráfica de la figura 4.36; para valores de rugosidad menores a $R_a = 0.27 \mu\text{m}$, conforme la rugosidad superficial disminuye el coeficiente de fricción se incrementa.

El comportamiento del factor de desgaste puede explicarse de la misma manera que el coeficiente de fricción, mostrado en la figura 4.38. Para rugosidades menores de $0.11 \mu\text{m}$, los valles de la rugosidad superficial no son lo suficientemente profundos para mantener lubricada la superficie por lo que las partículas de desgaste desprendidas remueven una cantidad aún mayor de material lo cual incrementa el factor de desgaste. Por el contrario, para rugosidades mayores de $0.11 \mu\text{m}$, el espesor de la película lubricante no es lo suficientemente grande para evitar el contacto entre las partes del tribosistema, dicho de otra manera, las partículas desprendidas durante el ensayo de fricción quedan atrapadas durante un tiempo más prolongado en los valles y actúan como un tercer cuerpo entre las superficies en contacto generando así más desgaste.

Puede observarse que bajo condiciones lubricadas una superficie menos rugosa no necesariamente es mejor, es decir, que el factor de desgaste no solo dependerá de la calidad superficial de los pares en contacto sino también de la interacción del medio lubricante entre esas superficies. En este caso, puede establecerse que una rugosidad intermedia ($R_a 0.11$) es la rugosidad superficial óptima ya que representa un menor factor de desgaste lo cual es una ventaja ya que minimizaría el desgaste en los herramientas y por lo tanto incrementaría su vida útil disminuyendo los costos por reposición de los mismos. En ese sentido, un aspecto que debe tomarse en cuenta en el desarrollo de herramientas es la relación que existe entre la rugosidad y el desgaste pero no sólo en términos de rendimiento o vida útil de los mismos sino también en términos económicos, por ejemplo: el tiempo y costo relativo de las diferentes operaciones de acabado [112].

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en los ensayos tribológicos y mecánicos de los recubrimientos de TiCN sobre aceros para herramienta D2, M2 y M4 estudiados en este trabajo puede concluirse lo siguiente:

- La evaluación de la adhesión de los recubrimientos de TiCN sobre los diferentes sustratos de acero para herramienta D2, M2 y M4 mostró una buena adhesión (clase 1), misma que es un factor predominante para determinar el desempeño y confiabilidad de componentes mecánicos o herramientas recubiertos empleados en los procesos de corte. Una adhesión pobre entre el sustrato y el recubrimiento traería como consecuencia la falla adhesiva o cohesiva del recubrimiento.
- Los valores del coeficiente de fricción en condiciones de lubricación para los aceros sin recubrir y los recubiertos con TiCN fueron muy similares aunque éstos últimos mostraron factores de desgaste menores. En el proceso de corte fino es más importante el desgaste que puede sufrir el herramienta y no el coeficiente de fricción ya que el desgaste tiene una influencia directa tanto en el número de partes como en las dimensiones finales de la pieza manufacturada.
- Entre los tres aceros sin recubrir que fueron estudiados, los resultados muestran que el acero D2 presenta un factor de desgaste 20% mayor con respecto al acero M4 pero el acero D2 tiene un mejor costo beneficio debido al mayor precio del acero M4, que aproximadamente es mayor entre 6 y 8 veces.
- En el caso de los aceros recubiertos con TiCN, en el acero D2 también representa el mayor costo beneficio debido al menor factor de desgaste y su menor costo entre los tres aceros.
- El mecanismo de desgaste principal tanto en los aceros sin recubrir como recubiertos con TiCN fue abrasivo aunque también existió deformación plástica.
- Después de analizar los datos obtenidos de los ensayos se puede concluir que los aceros sin recubrimiento podrían ser adecuados para aplicaciones ingenieriles donde solo el comportamiento del coeficiente de fricción es importante. En el caso del proceso de corte fino, el desgaste de los herramientas tiene una influencia directa en el volumen de producción de partes; es claro que los aceros sin recubrimiento, al tener mayores factores de desgaste no pueden utilizarse como material de herramientas para

producir el mismo número de partes pero podrían emplearse para volúmenes bajos de producción.

Por otra parte, de los resultados obtenidos en los ensayos tribológicos y mecánicos de los recubrimientos de TiN y TiCN sobre acero para herramienta H13 estudiado se concluye que:

- Ambos recubrimientos mostraron buena adhesión al sustrato de acero H13, lo cual es de vital importancia para su desempeño tribológico.
- La dureza registrada es una dureza compuesta ya que está influenciada por la dureza del sustrato; se observó una menor contribución del sustrato en cargas bajas, de 1 a 3 N, para ambos recubrimientos.
- Los coeficientes de fricción y factores de desgaste obtenidos, tanto en condiciones en seco como lubricadas, fueron menores para el recubrimiento de TiCN y se debió a la presencia de carbono en ese recubrimiento.
- Se observó la abrasión como mecanismo de desgaste principal en el acero H13 recubierto con TiN y TiCN, tanto en condiciones en seco como lubricado. Además, se presentó deformación plástica en los perfiles de las huellas para ambos recubrimientos en las condiciones en seco y lubricadas.
- Bajo condiciones de lubricación, se mantuvo la integridad de los recubrimientos misma que se confirmó con el análisis SEM y EDS de las huellas de desgaste.
- De manera general, después de los análisis de adhesión, dureza y tribológico se puede concluir que ambos recubrimientos tuvieron un buen desempeño tribológico-mecánico aunque fue mejor para recubrimiento de TiCN.

Por último, analizando los resultados obtenidos en los ensayos tribológicos del acero H13 nitrurado puede concluirse que:

- Se observó que los factores de desgaste más pequeños están asociados a una rugosidad superficial menor en condiciones en seco.
- Bajo condiciones lubricadas, el coeficiente de fricción disminuye conforme se incrementa la rugosidad superficial, en un rango entre $0.03 \mu\text{m}$ y $0.27 \mu\text{m}$. Se obtuvo una ecuación de segundo orden para modelar este comportamiento.

- El factor de desgaste muestra que existe un valor mínimo para una rugosidad de 0.11 μm y que tanto para rugosidades menor y mayores de este valor, el factor de desgaste aumenta.
- Se obtuvo una ecuación polinómica de tercer orden para modelar este comportamiento donde también se puede observar que para valores de rugosidad de 0.07 μm y 0.27 μm se tienen factores de desgaste muy similares lo que implica que una calidad superficial más burda permite un factor de desgaste muy cercano al obtenido por una calidad superficial más fina, mismo que se traducirá en un ahorro de tiempo en la preparación de las superficies en contacto.

REFERENCIAS

- [1] George Krauss. Steels: Processing Structure and Performance, ASM International;
- [2] HMSO, 1986. Wear resistant surfaces in engineering. Her Majesty's Stationery Office, Department of Trade and Industry, London, pp. 171.
- [3] Matthes, B., Broszeit, E., Kloos, K.H., 1990. Wear behaviour of r.f. sputtered TiN, TiB₂ and Ti(B,N) coatings on metal forming tools in a model wear test. *Surf. Coat. Technol.* 43/44, 721–731.
- [4] Schmid, S.R., Wilson, W.R.D., 2001. Tribology in manufacturing. In: Bhushan, B. (Ed), *Modern Tribology Handbook*, vol. 2. CRC Press, New York, pp. 1385-1411.
- [5] Avner Sidney, *Introducción a la metalurgia física*, Segunda edición en español, México: McGraw-Hill; 1988.
- [6] H.P. Feng, C.H. Hsu, J.K. Lu, Y.H. Shy, Effect of PVD sputtered coatings on the corrosion resistance of AISI 304 stainless steel, *Mater. Sci. Eng., A* 347 (2003) 123–129.
- [7] S. Surviliene, S. Bellozor, M. Kurtinaitiene, V.A. Safonov, Protective properties of the chromium–titanium carbonitride composite coatings, *Surf. Coat. Technol.* (2004) 193–201.
- [8] Bergman, E., Kaufmann, H., Schmid, R. and Vogel, J., 1990. Ion-plated Titanium Carbonitride Films, *Surf. Coat. Technol.* 42, 237-251.
- [9] H. Holleck, 1986. Material Selection for Hard Coatings. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 4, 2661-2669.
- [10] Zdravecká, E., Marton, M., Gmitterko, A., Tkáčová, J., 2014. Triboanalysis in Industry for PVD-coated Stamping Dies. *Tribology in Industry*. 36, 3-8.
- [11] O. Knotek, F. Loffler, G. Kramer, *Surf. Coat. Technol.* 61 (1993) 320.
- [12] Y.Y. Guu, J.F. Lin, *Wear* 210 (1997) 245.
- [13] J.H. Hsieh, A.L.K. Tan, X.T. Zeng, *Surf. Coat. Technol.* 201 (2006) 4094.
- [14] G. Baravian, G. Sultan, E. Diamond, H. Detour, *Surf. Coat. Technol.* 76/77 (1995) 687.
- [15] E. Bergmann, H. Kaufmann, R. Schmid, J. Vogel, *Surf. Coat. Technol.* 42 (1990) 237.
- [16] C. Wei, J.F. Lin, T.H. Jiang, C.F. Ai, *Thin Solid Films* 381 (2001) 104.
- [17] K. Narasimhan, S.P. Boppana, D.G. Bhat, Development of a graded TiCN coating for cemented carbide cutting tools-a design approach, *Wear* 188 (1–2) (1995) 123–129.

- [18] Y.H. Cheng, T. Browne, B. Heckerman, Influence of CH₄ fraction on the composition, structure, and internal stress of the TiCN coatings deposited by LAFAD technique, *Vacuum* 85 (1) (2010) 89–94.
- [19] Y. Yang, W. Yao, H. Zhang, Phase constituents and mechanical properties of laser in-situ synthesized TiCN/TiN composite coating on Ti–6Al–4V, *Surface and Coatings Technology* 205 (2) (2010) 620–624.
- [20] H.L. Wang, J.L. He, M.H. Hon. Sliding wear resistance of TiCN coating on tool steel made by plasma-enhanced chemical vapour deposition. *Wear*, 169 (1993) 195-200.
- [21] Y.L. Su and W.H. Kao. Tribological behavior and wear mechanisms of TiN/TiCN/TiN multilayer coatings. *JMEPEG* (1998) 7:601-612.
- [22] 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.
- [23] 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. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 19 (2001) 319-323.
- [24] K.J. Ma, C.L. Chao, D.S. Liu, Y.T. Chen, M.B. Shieh. Friction and wear behaviour of TiN/Au, TiN/MoS₂ and TiN/TiCN/a-C:H coatings. *Journal of Materials Processing Technology* 127 (2002) 182–186.
- [25] 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.
- [26] B. Zhu, J. Mardel, and G.L. Kelly, An Investigation of Tribological Properties of CN and TiCN Coatings, *Journal of Materials Engineering and Performance* (2004) 13:481-487.
- [27] Junhu Meng, Jinjun Lu, Jingbo Wang, Shengrong Yang. Tribological behavior of TiCN-based cermets at elevated temperatures. *Materials Science and Engineering A* 418 (2006) 68–76.
- [28] I. Zukerman, A. Raveh, Y. Landau, R. Weiss, R. Shneck, Y. Shneor, H. Kalman, J.E. Klemberg-Saphieha, L. Martinu. Tribological properties of duplex treated TiN/TiCN coatings on plasma nitrided PH15-5 steel. *Surface & Coatings Technology* 201 (2007) 6171–6175.

- [29] Qianzhi Wang, Fei Zhou, Kangmin Chen, Meiling Wang, Tao Qian, Friction and wear properties of TiCN coatings sliding against SiC and steel balls in air and water, *Thin Solid Films* 519 (2011) 4830–4841.
- [30] Y.H. Cheng, T. Browne, B. Heckerman, E.I. Meletis. Influence of the C content on the mechanical and tribological properties of the TiCN coatings deposited by LAFAD technique. *Surface & Coatings Technology* 205 (2011) 4024–4029.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] Lei Shan, Yongxin Wang, Jinlong Li, He Li, Xuedong Wu, Jianmin Chen. Tribological behaviours of PVD TiN and TiCN coatings in artificial seawater. *Surface & Coatings Technology* 226 (2013) 40–50.
- [34] N. Madaoui, N. Saoula, B. Zaid, D. Saidi, A. Si Ahmed, Structural, mechanical and electrochemical comparison of TiN and TiCN coatings on XC48 steel substrates in NaCl 3.5% water solution, doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.04.167
- [35] Maycoln Depianti Conci, Antônio César Bozzi, Adonias Ribeiro Franco Jr. Effect of plasma nitriding potential on tribological behaviour of AISI D2. *Wear* 317 (2014) 188–193.
- [36] Arnell, R.D., The mechanisms of tribology of thin film systems. *Surf. Coat. Technol.*, 43/44 (1990) 674–687.
- [37] Suh, N.P., *Tribophysics*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1986. pp.489.
- [38] Thouless, M.D., 1988. The role of fracture mechanics in adhesion. *MRS Materials Research Society Symp.*, March 1988, Reno, Nevada, USA, Proc.119, 51–62.
- [39] Bull, S.J., 1992. Interfaces and adhesion. In: Gissler, W., Jehn, H.A. (Eds), *Advanced Techniques for Surface Engineering*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 31–68.

- [40] Bhushan, B., 1999. Principles and Applications in Tribology. John Wiley & Sons, New York.
- [41] Maugis, D., 2001. Adhesion of solids: mechanical aspects. In: Bhushan, B. (Ed), Modern Tribology Handbook, vol. 1. CRC Press, New York, pp. 163-203.
- [42] Malzbender, J., Den Toonder, J.M.J., Balkenende, A.R., De With, G., 2002. Measuring mechanical properties of coatings: a methodology applied to nano-particle-filled sol-gel coatings on glass. *Materials Science and Engineering*.R36, 47-103.
- [43] A. Gaard, P. Krakhmalev, J. Bergström, N. Hallbäck, Galling resistance and wear mechanisms-cold work tool materials sliding against carbon steel sheets, *Tribol. Lett.* 26 (2007) 67–72.
- [44] E. van der Heide, E.D. Stam, H. Giraud, G. Lovato, N. Akdut, F. Clarysse, P. Caenen, I. Heikilla, Wear of aluminium bronze in sliding contact with lubricated stainless steel sheet material, *Wear* 261 (2006) 68–73.
- [45] Lange K, Birzer F, Höfel P, Mukhoty A, Singer H. Cold forming and fineblanking. A handbook on cold processing material properties part design. Switzerland: Verlag Hallwag AG; 1997.
- [46] Peetsalu P, Saarna M, Adoberg E, Kulper E, Lind L, Kulu P. Evaluation of punch wear resistance during industrial test. In: Proceedings of acta metallurgica slovac conference, Starà Lesnà, Slovak Republic; 2010. p. 105–10.
- [47] K. Venkatesan, C. Subramanian, E. Summerville, Three-body abrasion of surface engineered die steel at elevated temperatures, *Wear* 203–204 (1997) 129–138.
- [48] G. Andreis, K.-D. Fuchs, I. Schruff, The wear behaviour of hot-work tool steels used in forging processes, in: Proceedings of the Fifth International Conference on Tooling, Loeben, 1999, pp. 593–600.
- [49] S. Walter, H. Haferkamp, M. Niemeyer, Fr.-W. Bach, A. Henze, Material failure mechanisms of forging dies, in: Proceedings of the Fifth International Conference on Tooling, Loeben, 1999, pp. 215–224.
- [50] D. Kircher, H. Michaud, V. Bogard, Analyse des degradations d’outillages de forge à chaud à l’aide de la simulation numérique, *Mater. Technol.* 1–2 (1999) 31–38 (in French).
- [51] S. Jean, B. Miquel, S. LeRoux, P. Lamesle, F. Rezai-Aria, Heat-checking of hot work tool steels, in: Proceedings of SF2M of Temperature–Fatigue Interaction, May 2001.

- [52] E. Doege, H. Nägele, U. Schliephake, Aspect of wear prediction in precision forging, Proc. Inst. Mech. Eng. B: J. Eng. Manuf. 208 (1994) 111–119.
- [53] ASM Metals Handbook Vol. 1 - Properties and Selection Irons
- [54] Kalpakjian Serope, Schmid Steven, Manufactura, ingeniería y tecnología, Cuarta edición en español.
- [55] George Roberts, George Krauss, Richard Kennedy, Tool Steels. 5th Edition. ASM International.
- [56] Oberg, E.; Jones, Franklin D.; Horton, H. L.; Ryffell, Henry H.: Machinery's Handbook, Industrial Press Inc.; 26th Edition (January 4, 2000), pp. 1332-1336.
- [57] Kenneth Holmberg & Allan Matthews, Coatings Tribology: Properties, mechanisms, techniques and applications in surface engineering. Ed. Elsevier, Oxford, UK, 2nd. Edition.
- [58] Diao, D.F., Kato, K., Hokkirogawa, K., Fracture mechanics of ceramic coatings in indentation. Journal of Tribology, Trans. ASME, 116 (1994b) 860–869.
- [59] Polonsky, I.A., Keer, L.M., Numerical analysis of the effect of coating microstructure on three-dimensional crack propagation in the coating under rolling contact fatigue conditions. J. Tribology, Trans. ASME, 124 (2002) 14–19.
- [60] Zoestbergen, E., De Hosson, J.T.M., Crack resistance of PVD coatings: influence of surface treatment prior to deposition. Surf. Engng, 18 (2002) 4, 283–288.
- [61] Bull, S.J., Failure mode maps in the thin film scratch adhesion test. Tribology Int., 30 (1997) 7, 491–498.
- [62] Holmberg, K., Laukkanen, A., Ronkainen, H., Wallin, K., Varjus, S., A model for stresses, crack generation and fracture toughness calculation in scratched TiN-coated steel surfaces. Wear, 254 (2003) 278–291.
- [63] Laukkanen, A., Holmberg, K., Koskinen, J., Ronkainen, H., Wallin, K., Varjus, S., Tribological contact analysis of a rigid ball sliding on a hard coated surface – Part III: Fracture toughness calculation and influence of residual stresses. Surf. Coat. Technol., 200 (2006) 3824–3844.
- [64] D.B. Lewis, S.R. Bradbury, M. Sarwar Surf. Coat. Technol., 82 (1996), p. 187
- [65] A. Leyland, A. Matthews Surf. Coat. Technol., 70 (1994), p. 19
- [66] S. Chatterjee, T.S. Sudarshan, S. Chandrashekar J. Mater. Sci., 27 (1992), p. 3409

- [67] K.S. Mogensen, N.B. Thomsen, S.S. Eskildsen, C. Mathiasen, J. Bottiger Surf. Coat. Technol., 99 (1998), p. 140
- [68] P.Eh. Hovsepian, A.P. Ehiasarian, A. Deeming, C. Schimpf, Vacuum 82 (2008) 1312.
- [69] J. Gerth, M. Larsson, U. Wiklund, F. Riddar, S. Hogmark, Wear 266 (2009) 444.
- [70] J. H. Hsieh, A. L. K. Tan, X. T. Zeng, Surf. Coat. Technol. 201 (2006) 4094.
- [71] Groover Mikell, Fundamentos de manufactura moderna, Primera edición en español, México: Prentice-Hall; 1997.
- [72] Bikramjit, B., Mitjan, K., 2011. Tribology of ceramics and composites, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- [73] Shizhu, W., Ping, H., 2012. Principles of tribology, John Wiley & Sons (Asia), Singapore.
- [74] Y. Sun, S. Zheng, T. Bell, Thin Solid Films 258 (1995) 198.
- [75] X. Cai, H. Bangert, Thin Solid Films 264 (1995) 59.
- [76] Beegan, Laugier, Application of composite hardness model to copper thin films hardness measurement, Surface & Coatings Technology 199 (2005) 32-37.
- [77] H. Bückle, in: J.W. Westbrook, H. Conrad (Eds.), The Science of Hardness Testing and its Research Applications, American Society for Materials, Metals Park, OH, 1973, p. 453.
- [78] B. Jönsson, S. Hogmark, Thin Solid Films 114 (1984) 257.
- [79] P.J. Burnett, D.S. Rickerby, Thin Solid Films 148 (1987) 41
- [80] P.J. Burnett, D.S. Rickerby, Thin Solid Films 148 (1987) 51.
- [81] S.J. Bull, D.S. Rickerby, Surf. Coat. Technol. 42 (1990) 149.
- [82] P.M. Sargent, Ph.D. Thesis, University of Cambridge, United Kingdom, 1979.
- [83] D. Chicot, J. Lesage, Thin Solid films 254 (1995) 123.
- [84] A.M. Korsunsky, M.R. McGurk, S.J. Bull, T.F. Page, Surf. Coat. Technol. 99 (1998) 171.
- [85] Bull, S.J., Interfaces and adhesion. In: Advanced Techniques for Surface Engineering. Gissler, W., Jehn, H.A. (eds), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1992, 31–68.
- [86] Matthews, A., Methods for assessing coating adhesion. Le Vide, les Couches Minces, No. Special, October, 1988a, 7–15.

- [87] Ollendorf, H., Schulke, T., Schneider, D., Testing the adhesion of hard coatings including the non-destructive technique of surface acoustic waves. In: Adhesion Measurements of Films and Coatings, Vol. 2. Mittal, M. (ed.), VSP, Utrecht, Germany,
- [88] Kuwahara, K., Hirota, H., Umemoto, N., Adhesion measurement on thin evaporated films. In: Adhesion Measurements of Thin Films, Thick Films and Bulk Coatings. Mittal, K.L. (ed.), ASTM STP 640, American Society for Testing Materials, Philadelphia, 1978, 198–207.
- [89] El Shabasy, M., Adhesion measurements of thin metallic films: comparison of the direct pull-off and the scratch methods. *Period. Polytech. Electr. Engng*, 25 (1981) 283.
- [90] VDI-Richtlinien, Beschichten von Werkzeugen der Kaltmassivumformung: CVD- und PVD-Verfahren, Entwurf, No, 3198, September, 1991.
- [91] Stolarski T.A., Tribology in machine design, Ed. Industrial Press Inc., 1991, USA.
- [92] Raymond G. Bayer, Mechanical wear prediction and prevention, Ed. Marcel Dekker, 1994, USA
- [93] J.R. Tuck, A.M. Korsunsky, R.I. Davidson, S.J. Bull, D.M. Elliott, *Surf. Coat. Technol.* 127 1 (2000).
- [94] CEN/TS 1071-8 Advanced technical ceramics – Methods of test for ceramic coatings – Part 8: Rockwell indentation test for evaluation of adhesion, British Standards (2004).
- [95] ASTM G99:2005 Standard test method for wear testing with a pin-on disk apparatus.
- [96] ISO 4287:1997 Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Terms, definitions and surface texture parameters.
- [97] Gong JH, Miao HZ, Zhao Z, *et al.* Load-dependence of the measured hardness of Ti(C,N)-based cermets. *Mater Sci Eng A* 2001, **303**: 179–186.
- [98] J. Lesage, D. Chicot, A. Pertuz, P.Y. Jouan, N. Horny, A. Soom. A model for hardness determination of thin coatings from standard micro-indentation tests. *Surface and Coatings Technology* 2005, 200: 886-889.
- [99] N. Vidakis, A. Antoniadis, N. Bilalis, J. Mater. Process. Tech. 143-144 (2003) 481–485.
- [100] P. Mi, J. He, Y. Qin, K. Chen, *Surf. Coat. Technol.* **309** 1 (2017).
- [101] F.F. Komarov, V.M. Konstatinov, A.V. Kovalchuk, S.V. Konstantinov, H.A. Tkachenko, *Wear* **352** 92 (2016).
- [102] D. Arulkirubakaran, V. Senthilkumar, *Int. J. Refract. Metals Hard Mater.* **62** 47 (2017)
- [103] A. Leyland, A. Matthews, *Wear* **246** 1 (2000).

- [104] T.Y. Tsui, G.M. Pharr, W.C. Oliver, C.C. Bhatia, R.L. White, S. Anders, A. Anders, I.G. Brown, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* **383** 383 (1995).
- [105] C. Lorenzo-Martin, O.O. Ajayi, S. Torrel, I. Shareef, G.R. Fenske, *Thin Solid Films* **569** 70 (2014).
- [106] S.M. Hsu, R.S. Gates, RS, B. Bhushan (Ed.), *Modern tribology handbook*, pp. 456-467. CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washington D.C. (2001).
- [107] Määttä, A., Vuoristo, P. and Mäntylä, T. (2001), “Friction and Adhesion of Stainless Steel Strip against Tool Steels in Unlubricated Sliding with High Contact Load,” *Tribol. Int.*, **34**, 11, pp 779-786.
- [108] Pradeep L. Menezes, Kishore, Satish V. Kailas. Influence of roughness parameters and surface texture on friction during sliding of pure lead over 080 M40 steel. *Int J Adv Manuf Technol* (2009) 43:731–743
- [109] Myshkin NK, Petrokovets MI, Chizhik SA. Simulation of real contact in tribology. *Tribology International* 1998; 31:79–86.
- [110] Al-Samarai, R.A., Haftirman, K.R.A., Ahmad, K.R., Al-Douri, Y. (2012). The influence of roughness on the wear and friction coefficient under dry and lubricated conditions. *IJSER*, Vol. 3, pp.1-6.
- [111] Svahn, F., Kassman-Rudolph, A. y Wallen E. (2003). The influence of surface roughness on friction and wear of machine element coatings. *Wear*, Vol. 254, pp.1092-1098.
- [112] Bayer, R.G. y Sirico, J.L. (1975). The influence of surface roughness on wear. *Wear*, Vol. 35, pp.251-260.
- [113] Bikramjit Basu and Mitjan Kalin (2011). *Tribology of Ceramics and Composites ... A Materials Science Perspective*, John Wiley & Sons, New Jersey.
- [114] T. E. Tallian. On competing failure modes in rolling contact. *ASLE Trans.* 10 (1967), 418–439.
- [115] B. J. Hamrock and D. Dowson. *Ball Bearing Lubrication—The Elastohydrodynamics of Elliptical Contacts*. Wiley-Interscience, New York, 1981.

ANEXOS

Artículos indexados (JCR)

Anexo A: Tribological performance of uncoated and TiCN-coated D2, M2 and M4 steels under lubricated condition.

Anexo B: Tribological performance of TiN and TiCN coatings on a working tool steel.

Artículos indexados (LATINDEX)

Anexo C: Influencia de la rugosidad en el comportamiento tribológico de un acero H13 nitrurado.

Anexo D: Estudio de fricción y desgaste de un acero H13 recubierto con TiCN.

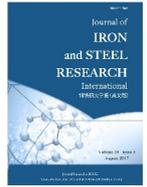
Congresos nacionales e internacionales

Anexo E: Friction and wear performance of TiCN on M4 high speed steel for its use in fine blanking process.

Anexo F: Influence of roughness surface modification on friction and wear behavior of nitride H13 tool steel.

Anexo G: Regresiones polinomiales para el coeficiente de fricción y factor de desgaste, en acero H13 nitrurado, por el método de los mínimos cuadrados.

Anexo H: Determinación del régimen de lubricación de los aceros nitrurados con diferentes calidades superficiales.



Tribological performance of uncoated and TiCN-coated D2, M2 and M4 steels under lubricated condition

Luis Daniel Aguilera Camacho, Santos García Miranda, Karla Judith Moreno*
 Instituto Tecnológico de Celaya/TNM, Apartado Postal 57, 38010-Celaya, Guanajuato, México

ARTICLE INFO

Key words:

D2 tool steel
 M2 high speed steel
 M4 high speed steel
 TiCN coating
 Friction
 Wear

ABSTRACT

Hard coatings are used to improve the wear resistance of metals which largely depends on adhesion between substrate and coating. The wear and friction behavior of uncoated and TiCN-coated D2, M2 and M4 steels were evaluated by a pin-on-disk test under lubricated conditions. In order to evaluate the influence of lubricant on wear performance, dry friction tests were also performed. The results showed that friction coefficients were very similar for both uncoated and TiCN-coated steels. Under lubricated conditions, the uncoated D2 tool steel exhibited the lowest friction coefficient, but the TiCN-coated D2 steel presented the smallest wear rate. Abrasion was the main wear mechanism in all the tribocouples. Additionally, microhardness measurements were carried out, finding an influence of the steel substrate on the hardness of the coatings. Besides, adhesion test was conducted, suggesting a good adhesion of class 1 between substrates and TiCN coatings.

1. Introduction

The tool life is an important factor in manufacturing processes such as extrusion, forging and cutting. In this point, fine blanking process is an advanced and precise cutting method by which smooth surfaces with exact geometry can be obtained. Thippakmas^[1] described it as a process where the strength, hardness and wear deformation of tool components must be improved due to the severe plastic deformation. Recently, Cheon and Kim^[2] mentioned that predicting the die and tool replacement time in the fine blanking process was very important in terms of product and cost efficiency; thus, in order to predict the tool life, tool wear must be constantly observed; in fact, they also described that most studies in this area were accomplished to understand the tool wear^[2]. High speed steels have been used as tool materials due to their excellent mechanical properties combined with high wear resistance^[3]. These properties are affected by their chemical composition, e. g., the hardness of medium carbon forging steels was increased by varying the vanadium content^[4]. Nowadays, ceramic coatings are used to control friction and wear to enhance the service life of working tools and machine parts^[5]; for example,

titanium carbonitride (TiCN) coatings exhibit excellent mechanical properties such as low friction, high hardness, high toughness, and enhanced wear resistance^[6]. Wei et al.^[7] investigated the wear performance of D2 tool steel under dry friction and high-temperature conditions, observing that a suitable combination of hardness and toughness was necessary for a good wear resistance in high-temperature conditions. Some studies have been done in the field of wear behavior of TiCN coatings on different tool steels, such as the wear behavior of metal composites based on M3/2 high speed steel which was reinforced with two different percentages of TiCN (2.5 and 5.0 wt. %) and was manufactured following a conventional powder metallurgy which was investigated by Velasco et al.^[8]. On the other hand, Bressan et al.^[9] studied the M2 high speed steel (HSS) and tungsten carbide (WC) hard metal coated with TiAlN and TiCN by using the pin-on-disk standard test with different loads in order to compare the wear behavior of these Ti-based coatings, and found a better tribological performance on TiAlN coatings. M4 tool steel has been successfully used in tooling for the fine blanking process and in high-volume production of parts, due to its excellent mechanical properties and wear resistance, but

* Corresponding author. Prof., Ph.D.

E-mail address: karla.moreno@itcelaya.edu.mx (K. J. Moreno).

Tribological performance of TiN and TiCN coatings on a working tool steel[†]M. T. Hernández-Sierra¹, L. D. Aguilera-Camacho¹, Arturo Ponce^{2,3},
J. S. García-Miranda^{1,*} and K. J. Moreno¹¹Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Celaya, Apartado Postal 57, Celaya, Guanajuato 38010, México²Department of Physics and Astronomy, University of Texas at San Antonio, One UTSA Circle, San Antonio, TX 78249, United States³National Institute of Astrophysics, Optics and Electronics, Luis Enrique Erro #1, Tonantzintla, Puebla 72840, Mexico

(Manuscript Received January 12, 2018; Revised April 17, 2018; Accepted April 20, 2018)

Abstract

Although the applications of TiN and TiCN coatings are extensive, their mechanical and tribological properties are influenced by the substrates in which they are deposited. The present work is focused on the tribological performance of TiN and TiCN coatings on a working tool steel. Besides, adhesion and microhardness tests were carried out. The adhesion performance of both coatings resulted in class 1, according to CEN/TS 1071-8 standard, which allows observing the quality of adhesion. The composite microhardness was investigated by the analysis of relative indentation (β). Pin-on-disk tests were performed in dry and lubricated condition at 100 °C against tungsten carbide (WC). Low friction coefficients of $\mu_k = 0.08$ for TiN and $\mu_k = 0.03$ for TiCN were obtained in lubricated conditions. Wear mechanisms were analyzed by scanning electron microscopy (SEM). Abrasive wear was observed as the principal wear mechanism in dry condition, while in lubricated conditions wear signals seem to be scarcely noticeable.

Keywords: Adhesion; Microhardness; TiCN; TiN; Tribology

1. Introduction

Hard coatings remain in focus due to their versatility characteristic in many different research areas [1-3]. Coating materials such as titanium nitride (TiN) and titanium carbonitride (TiCN) have gained much attention due to their mechanical compatibility with various metallic substrates. However, the preparation of these ceramics on the metallic substrates presents challenges due to the differences in mechanical properties mainly in tribological and mechanical performance [1-6]. Therefore, significant investigations have been accomplished with the goal to improve the properties of these coatings to broaden the applications of them. TiCN coatings have high thermal stability, excellent mechanical and wear behavior. Besides, they have shown low internal stress and high corrosion resistance [4, 6, 7]. Moreover, TiN coating is considered one of the most applied hard ceramic coatings for different tribological applications [5, 8-10]. Currently, both TiN and TiCN coatings continue to be used for protection of mechanical elements and cutting tools materials [8-11].

On the other hand, AISI H13 steel is a well-known hot-working tool steel commonly used to make hot extrusion dies,

extrusion mandrels, hot work punches and forging tools due to its excellent mechanical properties. Despite them, due to the extreme working conditions such as high stress, temperature and resilience time, the service lifetime performance of H13 tools is affected by some failure mechanisms. Thermal fatigue, abrasive, and adhesive wear on the surface of the working tools are the main results of this working conditions. Thus, the working tools are inevitably replaced after a period, affecting the total cost of the manufacturing processes [12, 13]. Therefore, several studies have been carried out to improve the wear resistance of the AISI H13 steel surface by nitrocarburizing methods, cryogenic treatments, and laser beam irradiation [12-14].

The goal of the present work is to investigate the behavior of TiN and TiCN coatings on AISI H13 substrate, to extend the applications of these protective coatings in the manufacturing processes. For that purpose, microhardness and adhesion tests have been performed, the tribological behavior in lubricated condition with temperature was also investigated, and it was compared in dry condition.

2. Experimental procedure**2.1 TiN and TiCN coatings deposition**

For the present study, AISI H13 steel (0.4 wt.% C, 4.9 wt.%

*Corresponding author. Tel.: +52 461 6117575, Fax.: +52 461 6117878

E-mail address: santos.garcia@itcelaya.edu.mx

[†]Recommended by Associate Editor Jin Weon Kim

© KSME & Springer 2018

INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD INICIAL EN EL COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO DE UN ACERO H13 NITRURADO

José Luis Martínez Carreño

Instituto Tecnológico de Celaya
luis_mtz_91@hotmail.com

Luis Daniel Aguilera Camacho

Instituto Tecnológico de Celaya
daniel.aguilera@itcelaya.edu.mx

Benjamín Arroyo Ramírez

Instituto Tecnológico de Celaya
benjamin.arroyo@itcelaya.edu.mx

J. Santos García Miranda

Instituto Tecnológico de Celaya
santos.garcía@itcelaya.edu.mx

Karla Judith Moreno Bello

Instituto Tecnológico de Celaya
karla.moreno@itcelaya.edu.mx

Resumen

Se investigó la influencia de la rugosidad superficial en el comportamiento tribológico de un acero AISI H13 nitrurado mediante ensayos de fricción en seco. Se prepararon tres diferentes rugosidades en los rangos de 0.04 a 0.41 μm . Se observó que para superficies más rugosas se obtienen volúmenes perdidos y factores de desgaste más elevados. Por otro lado, el coeficiente de fricción tuvo una tendencia a incrementar con rugosidades mayores a 0.1 μm ; mientras que debajo de ese valor, los coeficientes de fricción son muy similares. El mecanismo

ESTUDIO DE FRICCIÓN Y DESGASTE DE UN ACERO AISI H13 RECUBIERTO CON TICN

Virginia Campos Sanabria

Instituto Tecnológico de Celaya
vickys_0109@hotmail.com

Luis Daniel Aguilera Camacho

Instituto Tecnológico de Celaya
daniel.aguilera@itcelaya.edu.mx

José Alberto Zavala Bustos

Instituto Tecnológico de Celaya
alberto.zavala@itcelaya.edu.mx

J. Santos García Miranda

Instituto Tecnológico de Celaya
santos.garcía@itcelaya.edu.mx

Karla Judith Moreno Bello

Instituto Tecnológico de Celaya
karla.moreno@itcelaya.edu.mx

Resumen

Se investigó la influencia del lubricante en el comportamiento tribológico de un acero AISI H13 recubierto con carbonitruro de titanio mediante ensayos de fricción en seco y húmedo. Se observó que cuando existe lubricación entre los pares de contacto, el coeficiente de fricción y el factor de desgaste disminuyen en un 75 y 93%, respectivamente. Los mecanismos principales de desgaste en condiciones en seco fueron abrasión y oxidación mientras que en condiciones lubricadas no se aprecia mecanismo alguno. Adicionalmente se determinó la calidad de la adhesión

Abstract ID-78

FRICITION AND WEAR PERFORMANCE OF TiCN ON M4 HIGH SPEED STEEL FOR THEIR USE IN FINE BLANKING PROCESS

Karla Judith Moreno Bello⁽¹⁾, J. Santos García Miranda⁽¹⁾, Daniel Aguilera Camacho⁽¹⁾, Ana Arizmendi Morquecho⁽²⁾, Abad Arenas⁽¹⁾

⁽¹⁾Instituto Tecnológico de Celaya, Mexico
moreno_bello_karla@yahoo.com.mx, daniel.aguilera@itcelaya.edu.mx,
m1303087@itcelaya.edu.mx, santos.garcia@itcelaya.edu.mx

⁽²⁾Centro de Investigación de Materiales Avanzados, Mexico
ana.arizmendi@cimav.edu.mx

Keywords: TiCN, M4 High speed steel, Friction, Wear

Summary: Fine blanking process is an advanced technique of precision cutting by which can be obtained blanking parts with small dimensional tolerance, high geometry accuracy and smooth surfaces. This process has the possibility of reducing the number of process operations, reducing production time and cost as well as improving part quality and process repeatability. The fine blanking principle is based on the application of hydrostatic pressure on the workpiece through the use of a high blankholder force and a counterpunch force. The severe plastic deformation generated in the workpiece that takes places under cold working conditions caused changes in the material properties and shape of the workpieces affecting the dimension accuracy of the parts. In this point, TiCN coatings have been used as protective coatings on the surface of cutting and forming metals tools, working under heavy load/temperature conditions in high humidity or corrosive environments. The focus of the present work is to investigate the friction and wear performance of TiCN on M4 high speed steel (M4 HSS) in order to analyze their viability as working tools in fine blanking process. Friction tests were carried out on CSM Instruments Tribometer by pin-on-disk test in dry and wet conditions using oil as lubricant. The temperatures during the test for the wet conditions were maintained between $26 \pm 1^\circ\text{C}$ and $50 \pm 1^\circ\text{C}$, respectively. The values of coefficient of friction (μ) were obtained directly from the Tribbox 4.1 software. Tungsten Carbide (WC) ball with a diameter of 6 mm, roughness $R_a = 0.02 \mu\text{m}$ and hardness of 1770 HV was slid on the M4 HSS substrate coated with the TiCN. The worn surfaces of the coatings were characterized by Scanning Electron Microscopy (SEM). The best wear performance of TiCN coatings was observed with lubrication condition at $50 \pm 1^\circ\text{C}$, obtaining lower friction coefficients and volume loss than those similar under dry condition.



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

RESÚMENES



Facultad de Ingeniería Química
Cuerpo Académico Ingeniería en Materiales

Facultad de Ingeniería
Cuerpo Académico Propiedades mecánicas, electrónicas y
estructurales materiales

Marzo 2016, Puebla, Pue.

tiempos de molienda en seco 12 y 24 h respectivamente. Los polvos obtenidos fueron caracterizados mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) y difracción de rayos-x, para determinar sus características iniciales. Enseguida, se realizó un tratamiento térmico hasta 1373 K bajo atmósfera de argón, en una cámara de alta temperatura colocada en un difractómetro de rayos-x y se tomaron patrones de difracción cada 50 K a partir 473 K en el rango de 2θ de 20 a 55° . Finalmente, se observaron los compactos tratados térmicamente mediante MEB y se hicieron mediciones de microdureza. Los resultados indican que la aleación Ni_2MnSb se logró formar parcialmente durante la molienda a 24 h, sin embargo, la estabilidad de la fase L21, que proporciona las características de memoria de forma, se puede obtener únicamente durante el tratamiento térmico, en el cual se presenta un reordenamiento atómico que permite formar las fases L21 y la martensítica modular M14. El tamaño de partícula de los polvos, que es afectado por el tiempo de molienda, presentó un efecto sobre la temperatura de estabilización de la fase L21 y la microdureza del material final, teniendo mejores resultados con el menor tamaño de partícula.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la DGEST por el financiamiento para el desarrollo de este proyecto.

P8

Influence of roughness surface modification on friction and wear behavior of nitrided AISI H13 steel

José Luis Martínez Carreño, Luis Daniel Aguillera Camacho, J. Santos García Miranda y Karla Judith Moreno Bello

Instituto Tecnológico de Celaya, Tecnológico Nacional de México

AISI H13 steel is a hot-worked die steel widely applied in areas such as hot forging, hot extrusion and die-casting; however due to the severe friction and mechanical impact, besides the temperature, from manufacturing processes, is recurrent the use of nitrided treatments in order to enhance the tools lifetime; on the other hand, the surface roughness of dies plays an important role in the friction and wear performance. In this regards, the present work is focused on a comparative study of three different surface roughness for nitrided H13 steel by its tribological performance using a standard pin on disk test according to the ASTM G99, the tests were performed in a tribometer CSM maintaining controlled temperature of 25°C and 100°C , for dry and wet condition, respectively. The sliding speed was settled at 0.025 ms^{-1} , while a normal load applied was 10 N for both conditions. The results showed that in the dry condition a high roughness value has both a higher coefficient of friction and a high wear rate, while in wet condition the friction coefficient does not vary significantly; however, the wear rate presents a nonlinear behavior with respect to its roughness values. Abrasive wear was observed as main mechanism in the dry condition test.

ANEXO G

Es común que los datos experimentales se den como valores discretos y en algunas ocasiones se requiere estimar el valor de un punto entre los valores experimentales y poder realizar predicciones. Para esto, es necesario el ajuste de ese conjunto de datos a una curva aproximada. Uno de los métodos más utilizados es la regresión por el método de mínimos cuadrados.

La ecuación para un polinomio de grado n es:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n = \sum_{i=0}^n a_ix^i \quad \text{Ec. G.1}$$

Aplicando el método de los mínimos cuadrados se tiene que:

$$y_p = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n + e \quad \text{Ec. G.2}$$

Donde a_i son coeficientes y e es el error. Minimizando la suma de los cuadrados de los residuos entre la "y" medida y la "y" calculada:

$$\begin{aligned} S_r &= \sum e_i^2 = \sum (y_{i,medida} - y_{i,modelo})^2 \\ &= \sum (y_i - a_0 - a_1x - a_2x^2 - \dots - a_nx^n)^2 \end{aligned} \quad \text{Ec. G.3}$$

Derivando parcialmente S_r respecto a cada uno de los coeficientes e igualando a cero cada una de las ecuaciones resultantes, se tiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} a_0m + a_1 \sum x_i + a_2 \sum x_i^2 + \dots + a_n \sum x_i^n &= \sum y_i \\ a_0 \sum x_i + a_1 \sum x_i^2 + a_2 \sum x_i^3 + \dots + a_n \sum x_i^{n+1} &= \sum (x_i y_i) \\ a_0 \sum x_i^2 + a_1 \sum x_i^3 + a_2 \sum x_i^4 + \dots + a_n \sum x_i^{n+2} &= \sum (x_i^2 y_i) \\ a_0 \sum x_i^n + a_1 \sum x_i^{n+1} + a_2 \sum x_i^{n+2} + \dots + a_n \sum x_i^{2n} &= \sum (x_i^n y_i) \end{aligned} \quad \text{Ec. G.4}$$

Por otro lado, el coeficiente de correlación (r) cuantifica la mejora o reducción del error originado por la representación de los datos por medio del polinomio en lugar de como un valor promedio. Depende de los errores antes y después de aplicar la regresión y se calcula como:

$$r = \sqrt{\frac{S_t - S_r}{S_t}} \quad (\text{Ec. G.5})$$

Un coeficiente de correlación cercano a la unidad significa un buen ajuste mientras que si es próximo a cero, el ajuste es pobre.

La tabla G.1 muestra el conjunto de datos experimentales del coeficiente de fricción y factor de desgaste para todas las rugosidades superficiales. Como primer objetivo, se busca obtener una función que permita predecir el coeficiente de fricción para lo cual se realizó una regresión polinomial por el método de mínimos cuadrados, con la serie de datos de la tabla G.1, ajustando los datos a un polinomio de grado 2.

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 \quad (\text{Ec. G.6})$$

Tabla G.1 Valores del coeficiente de fricción y factor de desgaste para un rango de rugosidades entre 0.03 μm y 0.41 μm .

Rugosidad Ra (μm)	Coeficiente de fricción (μ_k)	Factor de desgaste (mm^3/Nm) $\times 10^{-8}$			
		1o.	2o.	3o.	
0.41	1 ^a .	0.1163	41.92	40.3	39.27
	2 ^a .	0.115	35.69	35.38	36.93
	3 ^a .	0.1156	33.24	33.26	30.7
0.27	1 ^a .	0.0843	24.95	24.28	24.16
	2 ^a .	0.0861	26.75	26.19	26.58
	3 ^a .	0.085	22.53	22.45	22.7
0.11	1 ^a .	0.1011	5.89	5.95	5.73
	2 ^a .	0.1017	6.96	6.83	6.19
	3 ^a .	0.1	3.85	3.34	3.93
0.07	1 ^a .	0.1053	22.24	22.5	22.7
	2 ^a .	0.1064	24.17	24.84	24.59
	3 ^a .	0.1061	27.18	28.33	30.59
0.03	1 ^a .	0.1109	36.82	37.18	37.63

2ª.	0.1091	35.33	35.19	35.36
3ª.	0.1106	35.83	35.52	35.73

En este caso, el conjunto de ecuaciones asociado a la suma de los cuadrados para el polinomio de la ecuación G.6 es:

$$\begin{aligned}
 a_0 n + a_1 \sum x_i + a_2 \sum x_i^2 &= \sum y_i \\
 a_0 \sum x_i + a_1 \sum x_i^2 + a_2 \sum x_i^3 &= \sum (x_i y_i) & \text{(Ec. G.7)} \\
 a_0 \sum x_i^2 + a_1 \sum x_i^3 + a_2 \sum x_i^4 &= \sum (x_i^2 y_i)
 \end{aligned}$$

En la tabla G.2 se muestran los cálculos necesarios para la formación del sistema de ecuaciones simultáneas.

Tabla G.2 Conjunto de datos (coeficiente de fricción) para la formación del sistema de ecuaciones lineales simultáneas.

n_i	X_i	Y_i	X_i²	X_i³	X_i⁴	X_i*Y_i	X_i²*Y_i
1	0.03	0.1108	0.0009	0.000027	0.00000081	0.003324	0.00009972
2	0.07	0.1054	0.0049	0.000343	0.00002401	0.007378	0.00051646
3	0.11	0.1013	0.0121	0.001331	0.00014641	0.011143	0.00122573
4	0.27	0.0851	0.0729	0.019683	0.00531441	0.022977	0.00620379
5	0.41	0.1166	0.1681	0.068921	0.02825761	0.047806	0.01960046
Total	0.89	0.5192	0.2589	0.090305	0.03374325	0.092628	0.02764616

Sustituyendo los valores correspondientes de la tabla G.2 en el sistema de ecuaciones G.7, se tiene:

$$\begin{aligned}
 5a_0 + 0.89a_1 + 0.2589a_2 &= 0.5192 \\
 0.89a_0 + 0.2589a_1 + 0.090305a_2 &= 0.092628 \\
 0.2589a_0 + 0.090305a_1 + 0.03374325a_2 &= 0.02764616
 \end{aligned}$$

Resolviendo el sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas, se obtiene:

$$\begin{aligned}
 a_0 &= 0.12376 \\
 a_1 &= -0.3342
 \end{aligned}$$

$$a_2 = 0.7641$$

Sustituyendo los valores de a_0 , a_1 y a_2 en la ecuación G.6:

$$y = 0.12376 - 0.3342x + 0.7641x^2 \quad (\text{Ec. G.8})$$

La tabla G.3 muestra el conjunto de datos necesarios para la determinación del coeficiente de correlación. Para el cálculo de este coeficiente se emplea la ecuación G.5 y las sumatorias de los errores antes y después de la regresión polinomial:

$$r = \sqrt{\frac{S_t - S_r}{S_t}} = \sqrt{\frac{5.713x10^{-4} - 5.94x10^{-5}}{5.713x10^{-4}}} = 0.94 \quad (\text{Ec. G.9})$$

Tabla G.3 Conjunto de datos (coeficiente de fricción) para la determinación del coeficiente de correlación r.

n_i	X_i	Y_i	$(Y_i - \bar{Y})^2$	e^2
1	0.03	0.1108	$4.84416x10^{-05}$	$1.31181x10^{-05}$
2	0.07	0.1054	$2.4336x10^{-06}$	$1.66211x10^{-06}$
3	0.11	0.1013	$6.4516x10^{-06}$	$2.55548x10^{-05}$
4	0.27	0.0851	$3.51188x10^{-04}$	$1.7079x10^{-05}$
5	0.41	0.1166	$1.62818x10^{-04}$	$1.98853x10^{-06}$
Total	0.89	0.5192	$5.71332x10^{-04}$	$5.94026x10^{-05}$

De igual manera que se hizo para el coeficiente de fricción, se busca obtener una función que permita predecir factor de desgaste, para lo cual se realizó una regresión polinomial por el método de mínimos cuadrados, con la serie de datos de la tabla G.1, ajustando los datos a un polinomio de grado 3.

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \quad (\text{Ec. G.10})$$

Para el caso de un polinomio de grado 3, el conjunto de ecuaciones asociado a la suma de los cuadrados es:

$$\begin{aligned} a_0n + a_1 \sum x_i + a_2 \sum x_i^2 + a_3 \sum x_i^3 &= \sum y_i \\ a_0 \sum x_i + a_1 \sum x_i^2 + a_2 \sum x_i^3 + a_3 \sum x_i^4 &= \sum (x_i y_i) \\ a_0 \sum x_i^2 + a_1 \sum x_i^3 + a_2 \sum x_i^4 + a_3 \sum x_i^5 &= \sum (x_i^2 y_i) \end{aligned} \quad (\text{Ec. G.11})$$

$$a_0 \sum x_i^3 + a_1 \sum x_i^4 + a_2 \sum x_i^5 + a_3 \sum x_i^6 = \sum (x_i^3 y_i)$$

En la tabla G.4 se muestran los cálculos necesarios para la formación del sistema de ecuaciones simultáneas.

Tabla G.4 Conjunto de datos para la formación del sistema de ecuaciones lineales simultáneas.

n_i	X_i	Y_i	X_i^2	X_i^3	X_i^4	X_i^5	X_i^6
1	0.03	36.06	0.0009	0.000027	0.00000081	2.43×10^{-08}	7.29×10^{-10}
2	0.07	25.238	0.0049	0.000343	0.00002401	1.6807×10^{-06}	1.17649×10^{-07}
3	0.11	5.408	0.0121	0.001331	0.00014641	1.61051×10^{-05}	1.77156×10^{-06}
4	0.27	24.51	0.0729	0.019683	0.00531441	0.001434891	0.00038742
5	0.41	36.3	0.1681	0.068921	0.02825761	0.01158562	0.004750104
Total	0.89	127.52	0.2589	0.090305	0.03374325	0.013038321	0.005139415

Cont...Tabla G.4 Conjunto de datos para la formación del sistema de ecuaciones lineales simultáneas.

n_i	X_i	Y_i	$X_i * Y_i$	$X_i^2 * Y_i$	$X_i^3 * Y_i$
1	0.03	36.06	1.08198	0.0324594	0.00097378
2	0.07	25.238	1.76666	0.1236662	0.00865663
3	0.11	5.408	0.59488	0.0654368	0.00719805
4	0.27	24.51	6.6177	1.786779	0.48243033
5	0.41	36.3	14.883	6.10203	2.5018323
Total	0.89	127.52	24.94422	8.1103714	3.00109109

Sustituyendo los valores correspondientes de la tabla G.4 en el sistema de ecuaciones G.11, se tiene:

$$5a_0 + 0.89a_1 + 0.2589a_2 + 0.090305a_3 = 127.522$$

$$0.89a_0 + 0.2589a_1 + 0.090305a_2 + 0.03374325a_3 = 24.94422$$

$$0.2589a_0 + 0.090305a_1 + 0.03374325a_2 + 0.01303832a_3 = 8.1103714$$

$$0.090305a_0 + 0.03374325a_1 + 0.01303832a_2 + 0.00513941a_3 = 3.00109$$

Resolviendo el sistema de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas, se obtiene:

$$a_0 = 59.557$$

$$a_1 = -822.034$$

$$a_2 = 3883.13$$

$$a_3 = -4916.63$$

Sustituyendo los valores de a_0 , a_1 , a_2 y a_3 en la ecuación G.10:

$$y = 59.557 - 822.034x + 3883.13x^2 - 4916.63x^3 \quad (\text{Ec. G.12})$$

La tabla G.5 muestra el conjunto de datos necesarios para la determinación del coeficiente de correlación para el caso del factor de desgaste. Para el cálculo de este coeficiente se emplea la ecuación G.5 y las sumatorias de los errores antes y después de la regresión polinomial:

$$r = \sqrt{\frac{S_t - S_r}{S_t}} = \sqrt{\frac{633.017 - 57.128}{633.017}} = 0.95 \quad (\text{Ec. G.13})$$

Tabla G.5 Conjunto de datos (factor de desgaste) para la determinación del coeficiente de correlación r.

n_i	X_i	Y_i	$(Y_i - \bar{Y})^2$	e^2
1	0.03	36.06	111.5473946	4.806675365
2	0.07	25.238	0.07096896	34.59922613
3	0.11	5.408	403.865293	17.36726592
4	0.27	24.51	0.98883136	0.3550535
5	0.41	36.3	116.5449794	0.013960847
Total	0.89	127.52	633.0174672	57.12822091

Como pudo observarse, para ambos casos, coeficiente de fricción y factor de desgaste, las ecuaciones obtenidas tienen un buen ajuste a los datos experimentales, obteniéndose coeficientes de correlación de 0.94 y 0.95 para el coeficiente de fricción y el factor de desgaste, respectivamente.

ANEXO H

La función principal de un lubricante es separar las superficies que están en contacto y proveer una capa lubricante protectora para disminuir la fricción y el desgaste entre esas dos superficies. Sin embargo, diferentes parámetros como la magnitud de la carga normal aplicada, la viscosidad del lubricante y la velocidad influyen en las condiciones de lubricación, las cuales pueden clasificarse dentro de los diferentes regímenes de lubricación tal como se muestran en la curva de Stribeck de la figura H.1 [113].

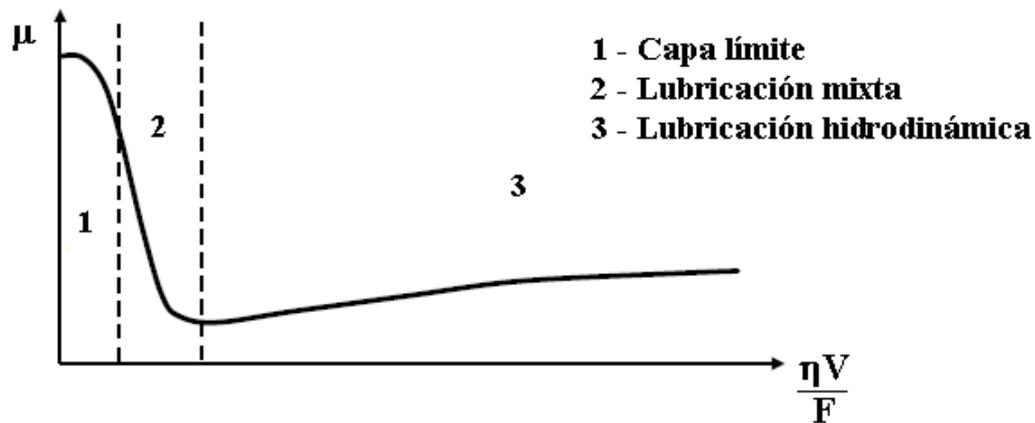


Figura H.1 Curva de Stribeck.

La curva de Stribeck muestra también las transiciones entre los diferentes regímenes de lubricación. Esta curva grafica el coeficiente de fricción como una función del parámetro de Stribeck, el cual es proporcional a la viscosidad y velocidad e inversamente proporcional a la carga aplicada. Se puede observar que a una carga más baja, o una velocidad más alta, la posición en la curva se moverá hacia el régimen de lubricación hidrodinámica. Por el contrario, a una velocidad baja o carga alta, las condiciones se aproximan al régimen de capa límite. También es claro que una más alta viscosidad de lubricante mejorará el funcionamiento de la capa lubricante. Por lo tanto, el parámetro de Stribeck también representa una manera equivalente (cualitativa) del espesor del lubricante. Por consiguiente, con ayuda de la curva de Stribeck, es posible definir las transiciones entre los regímenes de lubricación, los cuales están definidos como una función de λ , conocido como la relación de espesor de lubricante, el cual en esencia es la relación existente entre el espesor de lubricante y la rugosidad de las superficies en contacto [114]:

$$\lambda = \frac{h_{min}}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}} \quad (\text{Ec. H.1})$$

Existen diferentes relaciones entre λ y el daño en las superficies de contacto pero las transiciones de los regímenes son ampliamente aceptados de la siguiente manera [113]:

- $\lambda \leq 1$ Capa límite - daño severo y reducción de la vida de las superficies en contacto.
- $1 \leq \lambda \leq 3$ Lubricación mixta - daño escaso y limitada reducción de la vida de las superficies en contacto.
- $\lambda \geq 3$ Lubricación hidrodinámica - no hay daño o reducción de la vida de las superficies en contacto.

Aunque el cálculo del espesor del lubricante es complejo y no puede ser resuelto de manera analítica, existen ecuaciones que son muy útiles y bastante precisas. La ecuación utilizada con mayor frecuencia es la ecuación de Hamrock-Dowson [115]:

$$h_{min} = 3.63R_x U^{0.68} G^{0.49} W^{-0.073} (1 - e^{-0.68k}) \quad (\text{Ec. H.2})$$

donde:

h_{min} Es el espesor mínimo del lubricante

U Es el parámetro adimensional de velocidad
$$U = \frac{\eta_0 V_r}{E^* R_x} \quad (\text{Ec. H.3})$$

W Es el parámetro adimensional de carga
$$W = \frac{F}{E^* R_x^2} \quad (\text{Ec. H.4})$$

G Es el parámetro adimensional para los materiales
$$G = E^* \alpha_p \quad (\text{Ec. H.5})$$

k Es el parámetro adimensional para la geometría del contacto
$$k = \frac{a}{b} \quad (\text{Ec. H.6})$$

R_x Es el radio efectivo en la dirección x

En las ecuaciones desde H.3 hasta H.6, η_0 es la viscosidad a la presión atmosférica del fluido lubricante (a la temperatura de interés), V_r es la velocidad del disco, E^* es el módulo de elasticidad efectivo, α_p es el coeficiente de presión-viscosidad, F es la fuerza normal aplicada y a y b son los semiejes mayor y menor del contacto elíptico Hertziano.

Una vez que se establecieron las ecuaciones necesarias para la determinación del régimen de lubricación, se tienen los siguientes datos de entrada:

Para el lubricante a una temperatura de 100°C:	$\eta_0 = 12.6 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ $\alpha_p = 17.6 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{N}$ $V_r = 0.0125 \text{ m/s}$
Para los materiales:	Disco de acero AISI H13 $E = 210 \text{ GPa}$ $\nu = 0.27$ Pin de carburo de tungsteno $E = 670 \text{ GPa}$ $\nu = 0.22$ $R_a = 0.02 \text{ }\mu\text{m}$ Modulo efectivo $E^* = 342.75 \text{ GPa}$
Para la geometría del contacto	$k = 1$

Con los datos de entrada y las ecuaciones desde H.2 hasta H.6, se tiene:

Lubricante	U	W	k	G	h_{\min} (μm)
Grafito base aceite	7.66×10^{-14}	8.1×10^{-7}	1	6.03×10^3	0.002568

Ya que los parámetros adimensionales anteriormente calculados no cambian para las diferentes rugosidades, la tabla H.1 muestra los valores de λ , mismos que fueron calculados mediante la ecuación H.1, así como el régimen de lubricación asociado a cada rugosidad superficial:

Tabla H.1 Régimen de lubricación para las diferentes rugosidades superficiales.

Rugosidad R_a (μm)	λ	Régimen de lubricación
0.03	0.071	Capa límite
0.07	0.035	Capa límite
0.11	0.022	Capa límite
0.27	0.009	Capa límite
0.41	0.006	Capa límite