



**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TLALNEPANTLA**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**“OPTIMIZACIÓN Y MODELACIÓN MEDIANTE INTELIGENCIA ARTIFICIAL DE  
PARÁMETROS TRIBOLÓGICOS DE CAPAS DE CARBONO QUASI-DIAMANTE Y  
BORURADO SOBRE ACERO 4140”**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**

**PRESENTA:**

**MARÍA ESPERANZA ORTÍZ OCAMPO**

**DIRECTOR: DR. JOSÉ SOLIS ROMERO**  
**CO-DIRECTOR: DR. ALEJANDRO RODRÍGUEZ MOLINA**

**TLALNEPANTLA DE BAZ, ESTADO DE MÉXICO, FEBRERO DEL 2022.**





Instituto Tecnológico de Tlalnepantla

Tlalnepantla de Baz, Estado de México, 24/Enero/2022

OFICIO DEPI 024/01/2022

**ASUNTO:** Autorización de impresión de tesis

**C. MARÍA ESPERANZA ORTÍZ OCAMPO  
CANDIDATA AL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
PRESENTE.**

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **“OPTIMIZACIÓN Y MODELACIÓN MEDIANTE INTELIGENCIA ARTIFICIAL DE PARÁMETROS TRIBOLÓGICOS DE CAPAS DE CARBONO QUASI-DIAMANTE Y BORURADO SOBRE ACERO 4140”** ha informado a esta Jefatura que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le **autoriza que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.**

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

*Excelencia en Educación Tecnológica-  
“Por la Realización Tecnológica de mi Pueblo”*

**M.C. MIGUEL A. PAREDES RUEDA  
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

C.p. Dr. Oscar A. Gómez Vargas. Presidente del Consejo de Posgrado  
Estudiante  
Expediente



**Unidad Centro:** Av. Instituto Tecnológico S/N, Col. La Comunidad. C.P. 54070 Tlalnepantla de Baz, Estado de México. Tel. 55 5565 3261/  
55 5390 0209.

**Unidad Oriente:** Av. Hermilo Mena S/N, Col. Lázaro Cárdenas La Presa. C.P. 54187 Tlalnepantla de Baz, Estado de México. Tel. 55 2065  
4997.

tecnm.mx | tlalnepantla.tecnm.mx



**2022 Flores**  
Año de Magón  
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

# AGRADECIMIENTOS

---

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por permitirme experimentar la alegría de culminar con este importante proyecto. También agradezco al Instituto Tecnológico de Tlalnepantla por proporcionarme las herramientas necesarias lograr mi formación en la Maestría en Ciencias de la Ingeniería.

Gracias a todas las personas que contribuyeron con su participación en este proceso de formación. De manera muy especial quiero mencionar a mi director de tesis el Doctor José Solís Romero por su invaluable apoyo en todo momento, por su sapiencia y amistad incondicional.

El amor de mis padres son la base para mi desarrollo profesional y personal, gracias por sus enseñanzas de vida, gracias por mostrarme el camino para ser feliz.

Alejandro, mi compañero en la vida. Gracias por estar presente en este momento tan importante de mi vida, tal y como lo haces en todo instante de nuestras vidas, ofreciéndome siempre la mejor versión de tu persona.

Aldo y Alan, ustedes también son una parte importante en este proyecto. Espero que este trabajo sirva para motivarlos a continuar con su superación.

A mis hermanos; Bernardo, Martha, Raymundo, Laura, Juanita, Roberto, Cecilia, Patricia y Reyna; gracias por el amor fraternal que nos profesamos y que me da la fuerza para seguir adelante. También agradezco mis cuñados y sobrinos por su apoyo.

Gracias a todas las personas que en menor o mayor grado me apoyaron y motivaron para alcanzar este sueño

# RESUMEN

En el presente trabajo se estudia la caracterización microestructural y mecánica de un recubrimiento carbonoso hidrogenado como si fuera diamante, mejor conocido como H-DLC, depositado secuencialmente sobre la superficie de un acero AISI 4140 por medio de la deposición química de vapores por plasma mejorado (PECVD). La arquitectura del revestimiento o película delgada comprendió una capa adherente de Cr, otra capa de WC y una última de H-DLC con un espesor total de  $\sim 3 \mu\text{m}$ . El recubrimiento se analizó con interferometría de luz blanca para conocer los esfuerzos residuales que no fueron mayores que 1 GPa. La estructura carbonosa se analizó con espectroscopía Raman, indicando que la película que se produjo y depositó sobre el acero AISI 4140 consistió en una estructura amorfa. Se realizaron pruebas de adherencia por medio de la técnica de rayado o *scratch*, resultado en un nivel más que aceptable en virtud de observarse una carga crítica superior a los 80 N. La película amorfa se analizó desde el punto tribológico con el método perno sobre placa, en términos de las fuerzas friccionantes que ocurrieron como un efecto del deslizamiento entre las superficies AISI 52100/H-DLC. De esta forma, se investigó el efecto que tiene la aplicación de carga normal sobre la fricción y desgaste en condiciones secas y a temperatura ambiente ( $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ) con un rango de humedad relativa de 35-50%. Los resultados muestran que el coeficiente de fricción ( $\mu$ ) del H-DLC disminuyó de 0.21 a 0.13 con el incremento de la carga (110 a 190 MPa de presión máxima aplicada). Por medio de la espectroscopía Raman y la microscopía electrónica de barrido se confirmó el contacto carbón-carbón, debido a la formación de una tribocapa sobre las huellas de desgaste de la contraparte de deslizamiento.

# CONTENIDO

Agradecimientos .....	i
Resumen.....	ii
Contenido.....	iii

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	2
1.2 REVISIÓN DE LITERATURA.....	2
1.3 JUSTIFICACIÓN .....	4
1.4 OBJETIVO GENERAL.....	5
1.4.1 Objetivos específicos .....	5
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES .....	5

## CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1 TEORÍA ELEMENTAL DE LA DEPOSICIÓN EN MATERIALES METÁLICOS .....	7
2.1.1 Deposición Física (PVD) y Química de Vapores (CVD) .....	7
2.1.2 Deposición por pulverización catódica (Sputtering/Magnetron Sputtering) .....	8
2.2 RECUBRIMIENTOS DE CARBÓN QUASI-DIAMANTE (DLC “Diamond Like-Carbon”).....	10
2.2.1 Descripción.....	10
2.2.2 Propiedades estructurales y mecánicas.....	11
2.2.3 Factores que controlan las propiedades tribológicas.....	12
2.3 TEORÍA ELEMENTAL DE LA DIFUSIÓN EN MATERIALES METÁLICOS.....	12
2.3.1 Borurado .....	12
2.4 SISTEMAS DE EQUILIBRIO .....	13
2.4.1 Hierro puro.....	14
2.4.2 Sistema FeB.....	15
2.5 PARÁMETROS DE LA DISFUSIÓN (LEYES DE FICK) .....	15
2.6 TRIBOLOGÍA .....	16
2.6.1 Propiedades .....	16
2.6.2 Mecanismos .....	17
2.6.3 Fricción y desgaste .....	23
2.7 DISEÑO DE EXPERIMENTOS .....	24
2.7.1 Arreglos ortogonales.....	24
2.7.2 Taguchi .....	26
2.7.3 Método de gris relacionado.....	26
2.8 INTELIGENCIA ARTIFICIAL.....	28
2.8.1 Lógica difusa.....	28
2.8.2 Inferencia difuso .....	28
2.8.3 Reglas difusas.....	29
2.8.4 Método Mamdani .....	30
2.8.5 Método Takagi & Sugeno.....	30
2.9 RED NEURONAL ARTIFICIAL .....	31
2.9.1 Modelo general de Neurona Artificial .....	31

## CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1	MATERIALES Y DEPOSICIÓN.....	35
3.1.1	Caracterización del recubrimiento.....	35
3.2	PARÁMETROS TRIBOLÓGICOS. ....	39
3.3	MICROSCOPIA DE BARRIDO, DE FUERZA ATÓMICA Y RAMAN. ....	41

## CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL. ....	43
4.2	CARACTERIZACIÓN MECÁNICA. ....	46
4.2.1	Adherencia.....	46
4.2.2	Comportamiento tribológico en términos de fricción.....	47

## CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1	CONCLUSIONES.....	59
5.2	RECOMENDACIONES.....	60
	<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>61</b>

# **CAPÍTULO**

# **1**

## **INTRODUCCIÓN**

---

## **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

La falla de un material metálico sujeto a cargas mecánicas o químicas en la mayoría de los ambientes ingenieriles usualmente se suscita en la superficie. Para contrarrestar el efecto nocivo se emplean, entre otros, procesos por deposición que incluyen carburos, nitruros carbonitruros etc. los cuales modifican las propiedades superficiales del material base a través de procesos limpios como la deposición física y química de vapores por plasma frío de microondas. Los recubrimientos DLC se ubican en el estado del arte por sus características trascendentales en términos de resistencia al desgaste y a la corrosión. Las películas DLC se emplean en la industria manufacturera, automotriz aeronáutica y bioquímica. Una característica notable es que son proclives de utilizar en ambientes donde está restringido el uso aceite o componentes flamables; en virtud de que se les asocia como lubricantes sólidos. La investigación con DLC en cuanto a la optimización de los parámetros de proceso y los parámetros funcionales ya sean mecánicos o químicos representa un área de oportunidad para adicionar conocimiento básico por la escasa participación de este tema en la literatura. Las metodologías novedosas como algoritmos evolutivos y la lógica difusa podrían intervenir para alcanzar modelos matemáticos con apego a la información obtenida en la experimentación. Particularmente cuando se trata de conectar procesamiento con funcionalidad. Son pocos los trabajos que abordan la modelación matemática que incluya fricción y desgaste de las películas delgadas DLC. Particularmente si se trata de películas amorfas hidrogenadas (a-C:H) que emplean adherente como el Cr y componentes de fortalecimiento como el tungsteno. Entonces se trata de un problema completo donde existe una protección superficial multicapa.

Los recubrimientos de boro, acorde con la literatura, crean un impacto positivo sobre las propiedades tribológicas de un material metálico, las cuales se utilizan en la industria automotriz, naval, manufacturera, etc. La evaluación del proceso de borurado mediante la inteligencia artificial podría establecer una relación entre los parámetros de proceso y los parámetros funcionales. Además, la modelación matemática expone un interés científico en aplicaciones del ámbito ingenieril, exhibiendo una temática debatible sobre la deposición de capas multicomponente de boro.

## **1.2 REVISIÓN DE LITERATURA**

El interés de los componentes de ingeniería durante el servicio se rige en gran medida por las características de las capas superficiales y cercanas a la superficie, además de sus capacidades de carga y condiciones de trabajo, ya que la falla comienza principalmente en la superficie o en las regiones cercanas a la superficie. Lo anterior, corresponde al área de la "ingeniería de superficies", que se relaciona principalmente con la ciencia y la tecnología de modificar las características de la superficie



según las necesidades, a fin de mejorar la vida útil del producto [1]. La necesidad de lograr las características deseadas en las regiones de la superficie de un componente principalmente se ajusta a las condiciones de servicio y la funcionalidad del componente [2]. La trascendencia de la ingeniería de superficies comprende cuatro aspectos fundamentales; (a) el diseño de la superficie a desarrollar, (b) el desarrollo o modificación del sustrato, (c) la caracterización de las superficies diseñadas o modificadas, y (d) la aplicación para el propósito previamente diseñado.

El recubrimiento de carbono quasi-diamante (DLC por Diamond Like-Carbon) ofrece propiedades como dureza, baja rugosidad y adhesión en componentes de alto desgaste [3-6]. El DLC puede ser carbono amorfo (a-C) o carbono amorfo hidrogenado (a-C:H) con una alta fracción de enlace de carbono sp<sup>3</sup> [3, 7, 8]. También se encuentran variantes de DLC aleados con otros elementos como Si, metales o B, N y F [9-11]. Por otra parte, estos recubrimientos también se están utilizando como lubricantes sólidos en el campo industrial para mejorar el comportamiento tribológico en componentes de máquinas bajo atmósferas muy limpias o donde no se permiten lubricantes líquidos [12]. A pesar de las propiedades sobresalientes de los recubrimientos DLC, el coeficiente de fricción y los mecanismos de desgaste dependen significativamente de: método de deposición y los parámetros de procesamiento, la variación en el ambiente, ya sea en el vacío o en la atmósfera ambiente, la humedad relativa, el sustrato, y los materiales de la contra parte, las diversas arquitecturas de revestimiento, como capas múltiples o en gradiente, y muy importante, las condiciones de uso, es decir, en seco, agua, aceite o una combinación de estos [13-16]. Debido al número de variables y la naturaleza estocástica del proceso por deposición se presenta un comportamiento no lineal [17, 18]. Generalmente, los parámetros están interrelacionados por muchos de ellos y tienen que ser controlados para conseguir una reproducibilidad en la estructura del recubrimiento y propiedades, sin mencionar las características funcionales. Sin embargo, en la literatura no se encuentran modelos matemáticos que contemplen las variables de entrada y salida, debido a esta complejidad de datos. Yu-Sen Yang, *et. al* [19] desarrolló un método exitoso para optimizar las propiedades multiobjetivo de recubrimientos Zr-DLC. Los factores que afectaron la resistencia al desgaste consistieron en el coeficiente de fricción, dureza y anti-adherencia. Los parámetros experimentales del procesamiento se manipularon empleando diseño de experimentos con un arreglo ortogonal. Para la optimización se combinaron los enfoques grey, lógica difusa y Taguchi. J.-g. Zhai *et. al* [20] instrumentó un análisis numérico mediante un modelo bidimensional de simetría de eje de elementos finitos (FE). Los resultados proporcionaron una idea del mecanismo de fractura de las películas DLC sobre sustratos de cerámica. También encontró que el recubrimiento DLC más grueso aumenta la dureza Vickers y la tenacidad a la fractura. Una investigación acerca de la influencia de los parámetros del proceso en las propiedades mecánicas de las películas de Ti-DLC pulverizadas con magnetrones, utilizó un diseño experimental factorial fraccionado. Los parámetros involucrados fueron: voltaje de polarización del sustrato, caudal de acetileno y presiones parciales de argón y nitrógeno, permitiendo esclarecer la relación entre el espesor de película relativo y las cargas críticas aplicadas para los mecanismos de falla del recubrimiento, de acuerdo con P. Villiger *et al.* [21].

El borurado es un tratamiento termoquímico controlado por la difusión de átomos de boro, que modifica las propiedades del material, ya que se generan superficies duras y derivado de este proceso es el efecto positivo sobre las propiedades tribológicas. La deposición de un recubrimiento de nitruro de boro reveló una mayor resistencia al desgaste en una carga aplicada en condiciones secas.[22]. M. Ortiz-Domínguez et al [23] desarrolló dos enfoques matemáticos para establecer el valor de la energía de activación de las capas del Fe<sub>2</sub>B sobre acero ASTM-A36 durante el borurado de empaques de polvo de hierro. I. Campos et al. [24] utilizó los métodos de lógica difusa Mamdani y Takagi-Sugeno para evaluar la fase de crecimiento de Fe<sub>2</sub>B durante el proceso de borurado de la pasta. El contraste de los resultados con ambos métodos permitió concluir que la técnica de lógica difusa es la mejor opción para el modelado del crecimiento de fases boruradas.

### 1.3 JUSTIFICACIÓN

La mayoría de las técnicas por deposición o difusión para la protección superficial generalmente muestran un comportamiento no lineal, debido al número de variables y la naturaleza estocástica del proceso [17]. Generalmente las variables se interrelacionan y tienen que ser controladas para conseguir una reproducibilidad en la estructura y propiedades del recubrimiento. Por esta razón, el desarrollo de métodos rápidos y eficientes para optimizar las propiedades de los resultados tiende a ser muy solicitado. Taguchi desarrolló un método robusto de diseño experimental basado en el análisis estadístico, denominado método Taguchi [25, 26]. Este método puede determinar de manera eficiente los parámetros experimentales óptimos mediante el análisis de la respuesta y la calidad, pero, el método Taguchi se enfoca en resolver la respuesta de salida única. Para optimizar múltiples propiedades, por ejemplo, la tasa de desgaste, y la velocidad de deposición, evidentemente es necesario el desarrollo de un enfoque óptimo de múltiples objetivos. Los problemas óptimos multiobjetivo se discuten ampliamente en una variedad de aplicaciones [27], pero rara vez se aplican al proceso de deposición/difusión. Estos problemas se pueden dividir en dos categorías: parámetros de proceso óptimos (OPP) y predicción de resultados. Generalmente, los métodos para resolver OPP incluyen el método de Taguchi [28], el sistema de inferencia difusa [18], las redes polinomiales [29], el análisis relacional gris [30], algoritmos genéticos [31], y los nuevos algoritmos híbridos: Taguchi-lógica difusa [17]. No obstante, en la literatura son escasas las aplicaciones ingenieriles que incluyen la integración de FIS con el método Taguchi para optimizar las múltiples propiedades de recubrimientos [32]. En esta propuesta, se pretende aplicar este método híbrido para resolver múltiples respuestas de salida y reducir el costo y el tiempo experimentales para la optimización del comportamiento tribológico de difusión/deposición de películas delgadas en acero.

## **1.4 OBJETIVO GENERAL**

Caracterizar los parámetros tribológicos de las capas depositadas tipo DLC y difundidas por borurado sobre el acero 4140, en condiciones secas y húmedas para optimizar las relaciones de procesamiento y funcionales utilizando la inteligencia artificial.

### **1.4.1 Objetivos específicos**

1. Identificar los parámetros/factores y niveles de los procesos a investigar.
2. Diseñar el experimento utilizando un arreglo ortogonal.
3. Realizar la deposición carbonosa tipo DLC sobre la superficie del acero 4140.
4. Llevar a cabo el borurado sobre la superficie del acero 4140.
5. Caracterizar microestructural y mecánicamente los recubrimientos DLC.
6. Caracterizar microestructural y mecánicamente acero 4140 borurado.
7. Optimizar los parámetros de procesamiento de las capas DLC y borurado, aplicando las metodologías grey, Taguchi, y algoritmos evolutivos.

## **1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES**

La presente investigación se limita a la deposición de recubrimientos exclusivamente para materiales ferrosos, particularmente para aceros AISI 4140. Los recubrimientos que se evalúan son del tipo H-DLC y borurado. No se logró realizar análisis con métodos de inteligencia artificial.

Las principales limitaciones para el desarrollo de esta investigación se refieren a las restricciones impuestas por el virus COVID19. No existieron condiciones adecuadas por los constantes aumentos de contagios, lo que no permitió un desplazamiento oportuno para la realización de los experimentos.

**CAPÍTULO**

**2**

**MARCO TEÓRICO**

---

## 2.1 TEORÍA ELEMENTAL DE LA DEPOSICIÓN EN MATERIALES METÁLICOS.

La ciencia de los materiales, en la rama de ingeniería de superficies, que utiliza usualmente los métodos de deposición física de vapor (PVD, por sus siglas en inglés "*Physical Vapor Deposition*") o deposición química de vapor (CVD, por sus siglas en inglés "*Chemical Vapor Deposition*"); para la aplicación de recubrimientos sobre diferentes tipos de superficies metálicas y no metálicas. Las metodologías antes citadas, están apoyadas en la generación de un vapor del material a imponer, con objetivo de que el vapor se condense sobre la superficie de la base formando una película delgada. El procedimiento debe consumarse en vacío o en atmósfera controlada, evitando de esta forma la interacción del vapor con la atmósfera del aire [33]. Las técnicas de PVD se limitan a películas relativamente delgadas; en cambio, el proceso de CVD, además de las películas delgadas también se utiliza para recubrimientos que exceden el grosor de 1 mm. Es importante resaltar que este tipo de recubrimientos, además de las aplicaciones ingenieriles tienen otras aplicaciones en otros campos, tales como: dispositivos electrónicos y ópticos, decoración de productos, arquitectura, etc. [34]. De acuerdo con lo anterior, el desarrollo de los revestimientos de superficies se está direccionando hacia los grandes mercados que involucran los campos antes citados, y con la finalidad de cumplir con un conjunto especial de requisitos, surgen continuamente técnicas híbridas de PVD y CVD.

### 2.1.1 Deposición Física (PVD) y Química de Vapores (CVD)

El proceso de PVD, tiene su fundamento en la producción de vapor del material que se pretende depositar en forma de una película delgada (que van de  $10^{-7}$  m). Para lograr lo anterior, el material en estado sólido es sujeto a un proceso de calentamiento para obtener la vaporización, o se 'pulveriza' debido al bombardeo intenso de iones (bombardeo catódico o 'sputtering'), En el caso del bombardeo catódico, los iones emanan de una descarga eléctrica entre dos electrodos en forma de aluminoide, utilizando comúnmente un gas inerte (argón), donde es viable bombardear el espécimen con un haz de iones procedentes de una fuente externa, mediante este procedimiento se puede modificar la energía y la intensidad con la que los iones alcanzan la superficie del material a depositar; esta metodología es la más usada a nivel industrial para producir recubrimientos con bajo nivel del coeficiente de fricción [33]. Así mismo, se puede usar la fuente de iones para bombardear directamente la superficie del sustrato durante el proceso de evaporación, con la finalidad de proporcionar mayor energía a los átomos evaporados y así, optimizar las propiedades del recubrimiento depositado (adherencia, densidad, etc.). Este procedimiento se le conoce como "deposición asistida mediante haces de iones" se ha utilizado favorablemente para depositar capas de carbono (DLC "Diamond Like-Carbon") y de compuestos de dos elementos y triples de la familia carbono-boro-nitrógeno [34].

En el caso de CVD, es una técnica de deposición tanto para materiales metálico, como no metálicos. Esta metodología permite a el sustrato permanecer expuesto a uno o más precursores volátiles, es decir, la substancia que se depositará y que entra en contacto con el sustrato caliente, reacciona o se descompone formando una fase sólida con el sustrato, y al reaccionar con el material en la superficie se genera el depósito esperado. La CVD se emplea en el campo de los semiconductores para aplicar películas o recubrimientos muy delgados sobre superficies [34, 35].

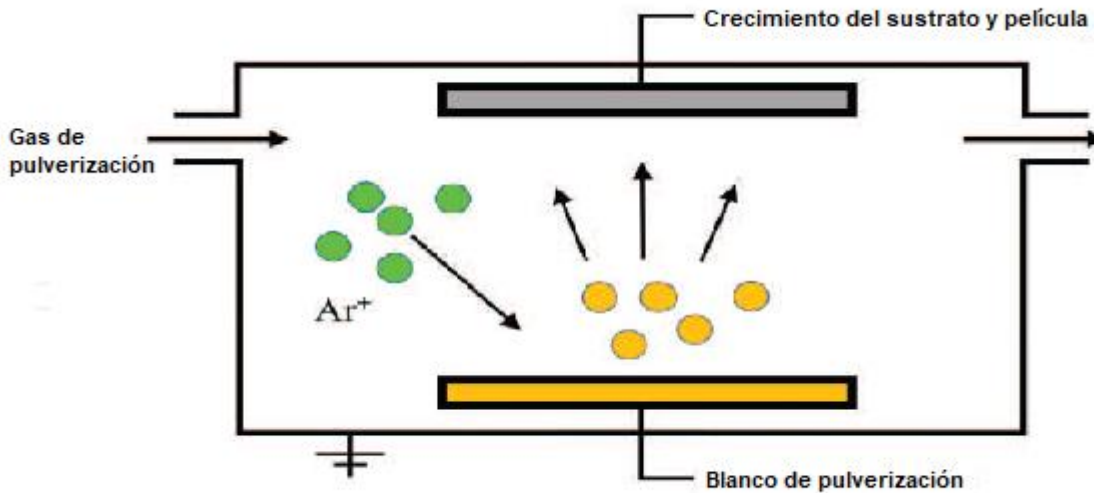
### 2.1.2 Deposición por pulverización catódica (Sputtering/Magnetron Sputtering)

La deposición de película delgada mediante el proceso de pulverización catódica es parte de la familia de la PVD. La pulverización consiste en la alteración de una superficie mediante un bombardeo con iones energéticos. Los iones pueden ser generados por una fuente de iones (pulverización catódica por haz de iones) o en un plasma de baja presión, los cuales chocan con la superficie de un objetivo y provocan la expulsión de átomos por transferencia de propulsión en una cascada de colisión, el cual fue observado por primera vez en 1852 por Grove como un "efecto de suciedad" no deseado; investigó la naturaleza de las descargas de gas a baja presión y encontró películas metálicas en el tubo de vidrio cerca del cátodo. Cabe señalar que la pulverización catódica no es un proceso de evaporación, ya que existe una metamorfosis directa de la fase sólida a la fase vapor (sublimación) desde un objetivo frío.

El método de pulverización catódica con magnetrón desarrollado en la década de 1970 consigue alta velocidad, baja temperatura y bajo daño, al agregar un campo magnético cerrado paralelo a la superficie del objetivo en la pulverización catódica bipolar, el electrón secundario se une a un área específica de la superficie del blanco para mejorar la eficiencia de ionización por medio del campo electromagnético ortogonal formado en la superficie del objetivo, aumentando la densidad de iones y energía, y finalmente se presenta la pulverización catódica de alta velocidad. La declaración anterior es el concepto de pulverización catódica con magnetrón.

La pulverización catódica con magnetrón es una técnica dominante para hacer crecer películas delgadas porque se puede preparar una gran cantidad de películas delgadas con una pureza relativamente alta a un costo bajo. Esto implica expulsar material de un "objetivo" que es una fuente sobre un "sustrato" como una hoja de silicio, como se muestra en la Fig. 2.1.

La pulverización catódica de magnetrón es el proceso de colisión entre las partículas incidentes y los objetivos. Dado que la pulverización catódica de alta velocidad se realiza a baja presión, es necesario aumentar de manera efectiva la tasa de ionización del gas. La partícula incidente se somete a un complejo proceso de dispersión en el objetivo, choca con el átomo objetivo y transmite parte del impulso al átomo objetivo, que a su vez choca con otros átomos objetivo para formar un efecto en cascada, y en este proceso, ciertos átomos objetivo cerca de la superficie ganan suficiente impulso para realizar el movimiento hacia afuera y son expulsados del objetivo. La pulverización catódica con magnetrón aumenta la densidad del plasma al introducir un campo magnético en la superficie del cátodo objetivo y utilizar las limitaciones del campo magnético en las partículas cargadas para aumentar la tasa de pulverización catódica.



**Figura 2.1** Diagrama esquemático de la pulverización catódica del magnetrón [4].

La pulverización catódica de magnetrón incluye muchos tipos, tales como: la pulverización catódica de magnetrón de corriente continua (CC) y la pulverización catódica de magnetrón de radiofrecuencia (RF), cada uno tiene un principio de funcionamiento y objetos de aplicación diferentes. La principal ventaja de la pulverización catódica con magnetrón de RF sobre la pulverización catódica con magnetrón de CC es que no requiere que el objetivo como electrodo sea eléctricamente conductor. Por lo tanto, cualquier material puede depositarse por pulverización catódica teóricamente utilizando la pulverización catódica con magnetrón de RF.

Existe una cosa en común para cualquier tipo de pulverización catódica de magnetrón: la interacción entre los campos magnético y eléctrico hace que los electrones giren en espiral en las proximidades de la superficie objetivo, lo que aumenta la probabilidad de que los electrones golpeen el gas argón para generar iones. Los iones generados chocan con la superficie del objetivo bajo la acción de un campo eléctrico para bombardear el blanco. La fuente de destino se divide en dos tipos: las equilibradas y no equilibradas; la fuente objetivo equilibrada está revestida uniformemente, mientras que la capa de revestimiento desequilibrada y el sustrato se conservan unidos mediante una gran fuerza.[36]

### 2.1.3 Deposición Química de Vapores por Plasma Mejorado (PECVD)

La PECVD y los tratamientos con plasma se utilizan cada vez más para la fabricación de materiales en forma de películas delgadas individuales, multicapas, capas de índice gradual [37], nanocompuestos [38], superficies con patrones y otras formas [39]. La capacidad de depositar películas delgadas de diamante rápidamente sobre sustratos con un alto grado de uniformidad utilizando la técnica PECVD es un objetivo tecnológico de alta prioridad [40].

Existen diferentes procedimientos para sintetizar películas delgadas; pero una de las técnicas más ensayadas utiliza la activación por plasma, conocida como PECVD para disminuir la temperatura del sustrato. La mayoría de las veces estos procesos se realizan a baja presión, normalmente alrededor de 0.01 a 1 kPa, donde las reacciones están bien controladas y las características del recubrimiento son bien conocidas [41]

En la PECVD se inicia una descarga luminiscente dentro de la cámara donde se realiza la reacción. La separación del gas en el plasma ocurre debido a la naturaleza no equilibrada de éste, el cual presenta temperatura alta en los electrones y, temperatura de gas baja. La mayor ventaja de esta tecnología es que la descomposición del plasma permite que la deposición de la película se produzca a temperaturas considerablemente más bajas que las usadas en la CVD atmosférica que utiliza reacciones de descomposición. En PECVD, la presión se reduce considerablemente por debajo de la presión atmosférica, aunque el rango de presiones empleadas varía en un rango más amplio y puede llegar a unos pocos cientos de Pascales. La descarga suele ser excitada por un campo de RF, aunque también en CC como en microondas, incluso se han utilizado campos de frecuencia. La energía promedio de los electrones son del orden de varios eV, lo que es suficiente para provocar la ionización y descomposición de las moléculas de gas [42, 43]

## 2.2 RECUBRIMIENTOS DE CARBÓN QUASI-DIAMANTE (DLC “Diamond Like-Carbon”)

### 2.2.1 Descripción

Los recubrimientos DLC son películas que cuentan con un carbono de forma de  $sp^2$  (como grafito) y  $sp^3$  (como diamante) y enlaces de hidrógeno y las propiedades tanto física como química cambian abruptamente con la variación del cociente de la relación de  $sp^2$  y  $sp^3$  [44]. Las películas procedentes de gases de origen de hidrocarburos logran obtener grandes cantidades de hidrógeno en sus microestructuras amorfas, las cuales, normalmente se les denomina DLC hidrogenadas [45]. La Fig. 2.2 presenta las diversas formas que tiene el DLC a través del diagrama ternario de fases, observando

como sus tipos varían de acuerdo con la relación  $\frac{sp^3}{sp^2}$  y la presencia de concentración de hidrógeno [46]. Ciertos DLC contienen hasta 50% de hidrógeno, se distinguen como a-C:H, otros con bajo contenido de hidrogeno, entre 1 y 2% se distinguen en su nomenclatura como a-C.



**Figura 2.2** Diagrama de fase ternario de revestimientos de carbono amorfo [14].



La proporción relativa de átomos de carbono unidos  $sp^2$  frente a  $sp^3$  varía ampliamente de un recubrimiento DLC a otro. Los DLC con una alta proporción de átomos de carbono con enlaces  $sp^2$  tienden a ser relativamente blandos y se comportan más como el grafito durante las pruebas tribológicas, mientras que las películas con más carbonos con enlaces  $sp^3$  se parecen más al diamante y, por lo tanto, son muy duras y proporcionan propiedades tribológicas impresionantes [44, 45].

Tribológicamente los recubrimientos DLC proporcionan bajos coeficientes de fricción y desgaste, son extremadamente duros con una excelente inercia química, lo que los hace resistentes a la corrosión y oxidación. Estos hechos los hacen populares en numerosas aplicaciones industriales, las cuales pueden ser de índole mecánica hasta electrónica, ópticas a biomédicas [45]. Por otra parte, estos recubrimientos también se están utilizando como lubricantes sólidos en el campo industrial para mejorar el comportamiento tribológico en componentes de máquinas bajo atmósferas muy limpias o donde no se admiten lubricantes. [35]. Lo anterior se debe a su excelente rendimiento tribológico, el cual contribuye al ahorro de combustible; aumenta la durabilidad del componente y coadyuva con el ambiente. El uso de recubrimientos DLC con bajos niveles de fricción y alta resistencia al desgaste, consiente reducir la dependencia de los modificadores de fricción y los aditivos antidesgaste que contienen los elementos dañinos azufre (S) y fósforo (P) [47]. El uso de los recubrimientos DLC tiene un gran potencial en el ámbito industrial. A principios de los años 90s una de las industrias con mayor impacto es la relacionada con productos electrónicos. A partir de entonces, se han realizado investigaciones para entender el comportamiento tribológico de las películas DLC en condiciones secas, obteniendo avances importantes, pero sin que el conocimiento generado hasta el momento sea definitivo. Así mismo, la creciente demanda por el ahorro de combustible ha dirigido las investigaciones científicas para producir estos recubrimientos, con la idea de las películas DLC trabajen como una película auto lubricante, sustituyendo a los lubricantes durante un proceso en condiciones secas [48].

### **2.2.2 Propiedades estructurales y mecánicas**

La reducción de la fricción de las superficies en contacto en movimiento relativo se puede lograr mediante el uso de revestimientos lubricantes sólidos. El control de la fricción y el desgaste a través de recubrimientos DLC está sujeto en gran medida a las condiciones ambientales y a la naturaleza del recubrimiento, acorde con lo determinado por el proceso de deposición [49]. El rendimiento tribológico de los recubrimientos DLC depende de las variables que mezclan el método de deposición, el carbono utilizado, el dopaje y las propiedades físicas mecánicas.

Las técnicas comúnmente utilizadas para la deposición de recubrimientos de DLC son haz de iones, arco catódico, deposición de láser pulsado, deposición iónica por pulverización catódica de magnetron desequilibrado de campo cerrado y deposición de vapor químico mejorada con plasma (PECVD) [49]. La estructura y propiedades de los recubrimientos DLC dependen en gran medida de la técnica de deposición y los parámetros de deposición relacionados (energía iónica y temperatura del sustrato); también algunos otros factores como densidad de flujo, tipo de sustrato, ángulo de incidencia de las especies bombardeadoras, etc.

La presencia de hidrógeno a partir del gas de hidrocarburo precursor durante el proceso de deposición estabiliza la red covalente aleatoria de DLC y evita su colapso en una fase de grafito durante la deposición [49]. Pero, la interconexión molecular no se puede formar ante la presencia de un alto contenido de hidrógeno, es decir, entre más alto contenido de hidrógeno más baja es la dureza. La Fig.

2.2 obtenida por Robertson [46] presenta las diversas formas y tipos de DLC mediante *el diagrama ternario de fases*, y como varían dependiendo de la relación de  $sp^3 / sp^2$  y la presencia de concentración de hidrógeno. Las distintas formas de los DLC se pueden apreciar en el diagrama antes aludido. La mayoría de los recubrimientos a-C:H se ubican a la mitad del diagrama, mientras que los recubrimientos a-C se sitúan por el lado izquierdo y sus diversos tipos de acuerdo con la relación  $sp^3/sp^2$ .

### 2.2.3 Factores que controlan las propiedades tribológicas

El rendimiento tribológico de los recubrimientos DLC estriba de la formación de la capa de transferencia interfacial. Los componentes que influyen en la formación de la capa de transferencia son los tipos de recubrimientos DLC y las condiciones tribológicas (presión de contacto, velocidad, ambiente, temperatura, etc.).[45]

Las propiedades mecánicas como la rugosidad y el tercer cuerpo (restos de desgaste) intervienen de manera importante en el rendimiento de los recubrimientos DLC como para cualquier recubrimiento [50]. Se tiene conocimiento de que, las superficies más rugosas tienen mayores pérdidas por fricción y desgaste y que la rugosidad de los revestimientos depende de la suavidad del sustrato e igualmente del método de deposición del revestimiento. Al mismo tiempo, la rugosidad de la película permanece influenciada por los mecanismos de desgaste posteriores, tales como el desgaste por pulido durante el contacto deslizante que mejora la rugosidad de la superficie; mientras que el desgaste por desconchado deteriora el acabado de la superficie [45]. Las partículas remanentes producidas durante el contacto de deslizamiento quedan atrapadas entre las superficies de deslizamiento y sufren un pulido mecánico que influye en el comportamiento de fricción de la superficie; y la formación de estos desechos (ya sean de fibra o de grafito) depende de las fuerzas de contacto y la velocidad. Recordando que las propiedades físicas de los DLC dependen de la relación  $\frac{sp^3}{sp^2}$  y el contenido de hidrógeno en la estructura [46], por lo que los recubrimientos DLC se dividen en dos categorías: recubrimientos DLC hidrogenados (a-C: H) y sin hidrógeno (a-C), según su porcentaje de hidrógeno, lo que ha demostrado que el contenido de hidrogeno DLC juega un papel central en sus propiedades tribológicas [51].

## 2.3 TEORÍA ELEMENTAL DE LA DIFUSIÓN EN MATERIALES METÁLICOS

### 2.3.1 Borurado

El desgaste y la corrosión son las principales causas del tiempo de inactividad de la maquinaria y la pérdida de material en la industria, lo propicia la disminución de las ganancias. El aumento de la dureza del material es una forma común de lograr una mejor resistencia al desgaste, pero conduce a una pérdida de la resistencia al impacto, lo cual resulta muy costoso. El desgaste es un fenómeno de la superficie de los materiales, el uso de recubrimientos duros puede ser una solución eficiente, porque consiente que el sustrato mantenga su resistencia al impacto y el recubrimiento logre resistir el

desgaste, la corrosión, las abrasiones y las cargas térmicas y, al mismo tiempo, reducir los costos utilizando cantidades diminutas de materiales duros [52]. El borurado es un tratamiento termoquímico intervenido por la difusión de átomos de boro, que modifica las propiedades del material, ya que se generan superficies duras y derivado de este proceso es el efecto positivo sobre las propiedades tribológicas. La deposición de un recubrimiento de nitruro de boro reveló una mayor resistencia al desgaste en una carga aplicada en condiciones secas [53]. Una de las principales ventajas de las capas de boruro es que pueden obtener valores de dureza elevados (1800 y 2000 HV). La alteración por abrasión y adherencia son formas de desgaste por contacto entre una partícula y un material sólido, siendo la consecuencia característica de la mayoría de los tipos de esfuerzos mecánicos. Los aceros borurados son resistentes a la abrasión debido a su extrema dureza en la superficie; dicha característica los crea idóneos para su aplicación en sistemas de transporte neumático; matrices para estampar; componentes de máquinas de procesamiento de plástico, como tornillos de extrusión; cojinetes para bombas de extracción de aceite; válvulas de bola; émbolos para su uso en la fabricación de vidrio; y componentes en maquinaria textil. En la práctica, existen muchas técnicas de modificación de la superficie a través del borurado, tales como: el borurado en polvo, el borurado en pasta, el borurado gaseoso, el borurado con plasma, el borurado con pasta de plasma y el borurado por láser [54].

## 2.4 SISTEMAS DE EQUILIBRIO

### Sistemas

Un sistema físico consiste en una sustancia (o un grupo de sustancias) que está aislada de su entorno, concepto que se utiliza para facilitar el estudio de los efectos del estado. “Aislado” significa que no hay intercambio de masa entre la sustancia y su entorno. Las sustancias en los sistemas de aleación, por ejemplo, pueden ser dos metales, como el cobre y el zinc; un metal y un no metal, como hierro y carbono; un metal y un compuesto intermetálico, como hierro y cementita; o varios metales, como aluminio, magnesio y manganeso. Estas sustancias constituyen los componentes que componen el sistema y no deben confundirse con las diversas fases que se encuentran dentro del sistema. Sin embargo, un sistema también puede constar de un solo componente, como un elemento o un compuesto [55].

### Equilibrio

El equilibrio describe especialmente a estados de estabilidad o de balanceo de las propiedades o características de dos cuerpos, estos cuerpos tienen aspectos particulares que los diferencian entre sí, lo cual representa un problema para que se produzca el equilibrio entre estas entidades. Entonces para propiciar un estado de equilibrio, es necesario que los sistemas mantengan las mismas reglas, características y estar en igualdad de condiciones. A continuación, se expone un caso en el que se presentan las condiciones de equilibrio; bajo el contexto de física-química, específicamente sobre el equilibrio termodinámico, el cual estipula que, en un sistema determinado, los factores externos vinculados con los factores internos no generan ningún otro tipo de cambio a el sistema, tal como son la presión y la temperatura. De manera puntual se exhibe la ley cero de la termodinámica que establece lo siguiente: si un cuerpo con cierta temperatura entra en contacto con otro a una temperatura distinta, ambos intercambian calor hasta que sus temperaturas se igualan, es decir, la estabilidad o estado de

equilibrio se presenta cuando los cuerpos logran la misma temperatura y están en igualdad de condiciones.[23].

### 2.4.1 Hierro puro

El hierro es un metal apreciado por sus características, particularmente porque puede alearse con una diversidad de elementos incluidos en la tabla periódica, aunque no todas las aleaciones se pueden utilizar con fines prácticos. Los hierros y aceros mejoran su rendimiento, dependiendo de componentes aleados, los cuales, ligados a su estructura, morfología y arreglo cristalino, contribuyen a modificar sus propiedades mecánicas. El hierro puro posee ventajas sobre los hierros y aceros aleados, dado que no muestra oposición a la difusión de elementos de aleación durante un tratamiento termoquímico. Para resaltar la importancia del hierro y sus productos, es importante destacar que el mayor componente de los aceros es el hierro. Aunque no existe un diagrama para el hierro puro, se utiliza el diagrama de hierro-carbono para determinar la solubilidad del hierro y el porcentaje de carbono tienen los diferentes derivados del hierro, ver la Fig. 2.3. Al observar dicho diagrama se aprecia que el hierro forma diferentes estructuras cristalinas conforme la temperatura varía. Si la temperatura se mueve en un rango de los 723°C a 912°C el hierro es conocido como ferrita alfa (ferrita  $\alpha$ ) y presenta una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (BCC por sus siglas en inglés). También se presenta la misma estructura BCC cuando la temperatura oscila entre 1394°C a 1539°C, y el hierro está presente en su forma ferrita delta ( $\delta$  ferrita), y el punto de fusión del hierro se exhibe a 1530°C. Ahora bien, si la temperatura varía entre los 912°C hasta 1394°C se tiene a el hierro como austenita o fase gama (hierro  $\gamma$ ), el cual tiene una estructura cristalina conocida como cúbica centrada en la cara (FCC por sus siglas en inglés).[55].

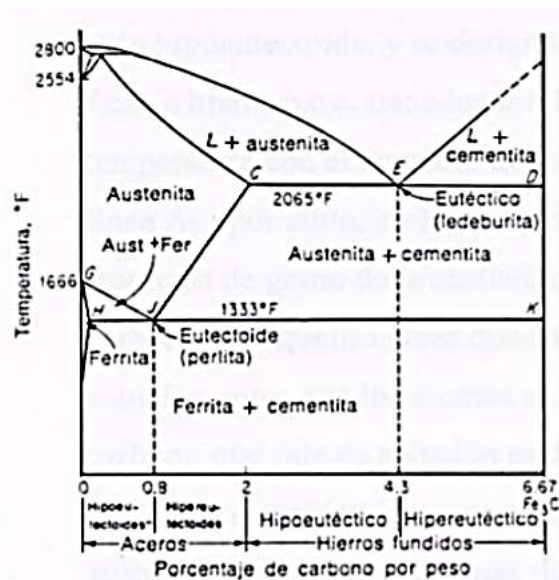
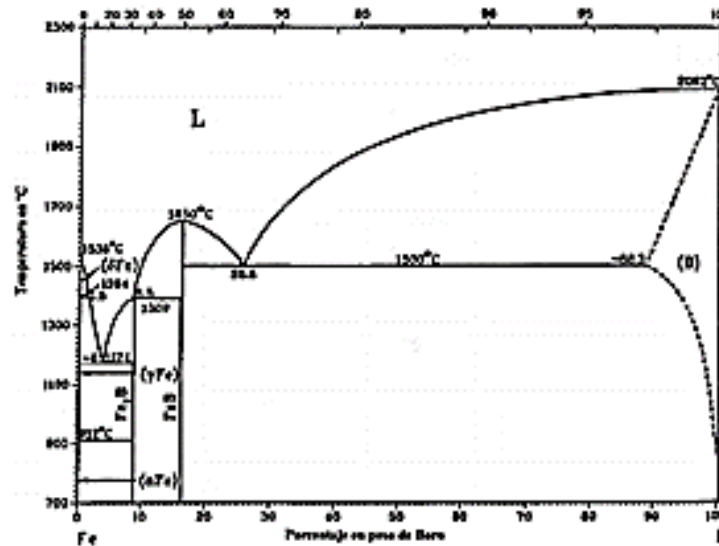


Figura 2.3 Diagrama de fases Hierro-Carbono [15]

## 2.4.2 Sistema FeB

En el sistema hierro-boro, y de acuerdo con el diagrama de fase FeB, la introducción de boro (debido a su tamaño pequeño) por difusión termoquímica en la red de Fe permite la formación de dos especímenes de boruros de hierro ( $\text{FeB}$  y  $\text{Fe}_2\text{B}$ ) con una composición de boro estrecha y restringida [56]. La fase monofásica del FeB, tiene una estructura ortorrómbica y se forma bajo esfuerzos de tensión, ver Fig. 2.4, la cual es estable aproximadamente a los  $800^\circ\text{C}$ . La fase bifásica  $\text{Fe}_2\text{B}$ , presenta una estructura tetragonal centrada en el cuerpo y se produce esencialmente bajo esfuerzos de compresión y es estable hasta los  $1000^\circ\text{C}$ .



**Figura 2.4** Diagrama de fases de Hierro-Boro [15]

La formación de ambas fases depende de la disponibilidad del boro en el medio borurante. Razonablemente la FeB, vasta en boro permanece en la parte externa de la capa y fase bifásica  $\text{Fe}_2\text{B}$  permanece por debajo de FeB. Ambas capas manifiestan una morfología aserrada, debido a la dirección de difusión preferente, lo cual representa un beneficio al mejorar la adherencia de la fase sobre el sustrato del material. Esta fase FeB no es muy deseable debido a su dureza, esta ostenta una microdureza de 1400 hasta 1800HV; mientras que la fase  $\text{Fe}_2\text{B}$  muestra un rango de microdureza de 1200 hasta 1600HV.

## 2.5 PARÁMETROS DE LA DISFUSIÓN (LEYES DE FICK)

Los parámetros de difusión consideran varias características, entre las cuales están: la temperatura del sustrato, las características del tratamiento termoquímico, el tiempo de difusión, etcétera. Lo anterior, sumado a las características propias del sustrato (composición, microestructura, topografía)

determinan las características de la capa, es decir, el espesor, la composición química, la microestructura y la topografía. La influencia del substrato está relacionada a la nucleación y crecimiento de la capa, y a la topografía de esta. Razonablemente, el material del substrato y la preparación de la superficie son cruciales para la topografía y adhesión del recubrimiento, y a su vez, para el desempeño del material recubierto.

Adolf Fick, fue un fisiólogo que obtuvo y dio a conocer las leyes que rigen a el transporte de masas por un medio difusivo en 1855. Fue Thomas Graham quien impulso la investigación de Fick, debido a los experimentos que realizo previamente, los cuales son el cimiento para las leyes de Fick por la que es conocido en la actualidad [57]. -

La primera ley de Fick asevera el soluto fluye desde una región de alta concentración a una de baja concentración atravesando un gradiente de concentración y se da en una única dimensión (espacial). Mientras que la segunda ley de Fick pronostica la manera en que la difusión provoca que la concentración cambie a través del tiempo.

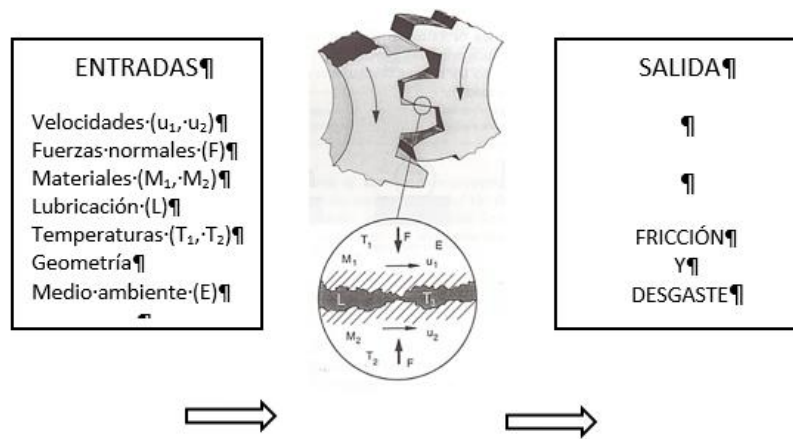
## **2.6 TRIBOLOGÍA**

La tribología es la ciencia que asociada con la investigación y avances especializados, estudia las características tribológicas de superficies metálicas, tales como la fricción, el desgaste y lubricación, las cuales se presentan en superficies solidas en movimiento y que permanezcan en contacto. Actualmente en los ámbitos industriales y de acuerdo la globalización, está la imperiosa necesidad de minimizar o controlar las características tribológicas mencionadas; con la finalidad de incrementar la eficiencia de las máquinas para reducir el mantenimiento de estas, el objetivo de obtener productos innovadores y especializados, optimizar el uso de los insuficientes recursos materiales, reducir el uso de energía y coadyuvar a la mejora del desarrollo sustentable. La tribología aunada a la disciplina de la ingeniería de superficies ha favorecido dos factores principales. El primero ha sido el desarrollo de nuevos métodos de recubrimiento y tratamiento, que proporcionan características de recubrimiento y propiedades tribo-químicas que antes eran inalcanzables. El segundo, el reconocimiento por parte de ingenieros y científicos de materiales de que la superficie es la parte más importante en muchos componentes de ingeniería. Es en la superficie donde se originan la mayoría de las fallas, ya sea por desgaste, fatiga o corrosión. La superficie tiene una influencia dominante en el costo y el rendimiento de la vida útil, incluida la capacidad de mantenimiento de la maquinaria.

### **2.6.1 Propiedades**

Un material modificado en su superficie presenta mejora en sus propiedades tribológicas, entre las que destacan el coeficiente de fricción y desgaste; se presentan como consecuencia de la interacción de dos superficies en contacto y movimiento, puede ser por acción del contacto adhesivo, también por impacto repetitivo, etc. Estas propiedades son determinadas por las características propias del material que se deposita o del material que se difunde, bajo el supuesto de que la película es una capa delgada, por lo tanto también serán por las propiedades del sustrato. Así pues, se puede concluir que la respuesta tribológica de un componente con superficie modificada en operación se determina de acuerdo con las propiedades tribológicas esperadas de la operación [58]. Los requerimientos de ingreso

en una operación de contacto en movimiento constante afectan directamente el estado tribo-físico y químico del procedimiento, el cual controla las características tribológicas del metal, ver la Fig. 2.5.



**Figura 2.5** Varios materiales, condiciones de contacto y parámetros de entrada ambientales influyen en los procesos dinámicos de contacto tribofísico y triboquímico que controlan la fricción y el desgaste [18].

Las características tribológicas más significativas son: (1) resistencia al rayado, (2) resistencia al desgaste abrasivo, (3) resistencia a la erosión de partículas, (4) resistencia al desgaste por deslizamiento, y (5) resistencia al desgaste por rodamiento [58].

### 2.6.2 Mecanismos

Los recubrimientos se utilizan ampliamente para intervenir y mediar la fricción y el desgaste en cualquier situación de contacto. Se han logrado muchos resultados excelentes en aplicaciones de desplazamiento industrial. Entre los recursos más sobresalientes, está la reducción del coeficiente de fricción, por ejemplo; revistiendo una superficie de acero, que se desliza contra una superficie de contacto de acero, con una capa delgada de disulfuro de molibdeno o DLC; también el desgaste se redujo en varios órdenes de magnitud.

#### Mecanismos de fricción macromecánicos

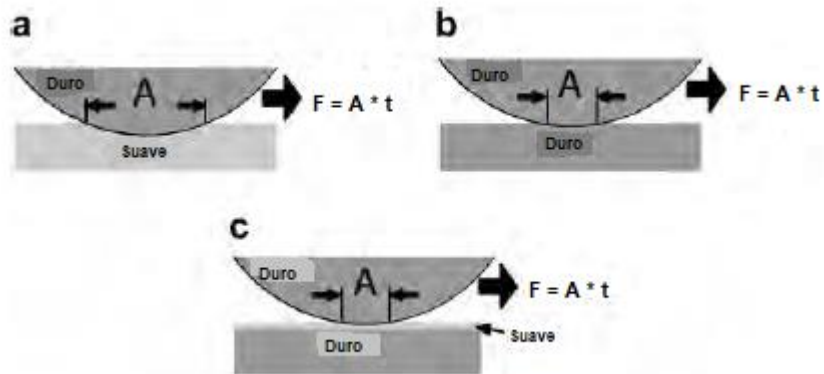
Los mecanismos de fricción macromecánicos describen los fenómenos de fricción y desgaste considerando las distribuciones de esfuerzos y deformaciones en todo el contacto, las deformaciones elásticas y plásticas totales que producen y el proceso de formación de partículas de desgaste total y su dinámica. En contactos con una o dos superficies recubiertas, se pueden definir cuatro parámetros principales que controlan el proceso de contacto tribológico, los cuales son:

1. La relación entre la dureza del revestimiento y el sustrato
2. El grosor del revestimiento
3. La rugosidad de la superficie
4. El tamaño y la dureza de los desechos en el contacto

La relación entre estos cuatro parámetros da como resultado una serie de condiciones de contacto diferentes y caracterizadas por mecanismos de contacto tribológicos específicos.

## 1. Dureza del revestimiento

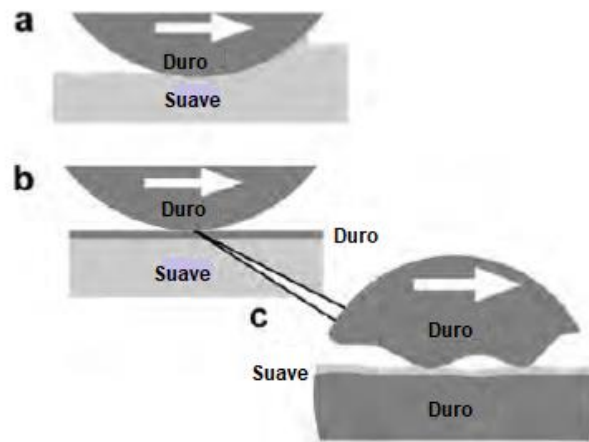
Uno de los parámetros más relevantes que modifican el comportamiento tribológico de una superficie recubierta es la dureza propia del revestimiento y su relación con la dureza del sustrato. Cuando una bola se desliza sobre una placa, la potencia de fricción es idóneamente el producto de la resistencia al corte y el área de contacto, como se muestra en la Fig. 2.6a. Un material de superficie más dura dará como resultado una menor área de contacto, pero una mayor resistencia al cizallamiento y, por lo tanto, el efecto sobre la fricción es menor (Fig. 2.6b). Se puede obtener una disminución de la fricción agregando una capa fina y suave a la placa, que reduce tanto la superficie de contacto como la resistencia al corte interfacial, como se muestra en la Fig. 2.6c.



**Figura 2.6** La fricción no depende en gran medida de la dureza, pero se puede obtener una fricción baja depositando una película fina y suave sobre una placa dura en un contacto deslizante idealizado [18]

Un recubrimiento duro sobre un sustrato más blando puede reducir el desgaste al evitar el rayado tanto a macro como a microescala, como se muestra en la Fig. 2.7. Por tanto, los revestimientos duros son particularmente útiles en entornos abrasivos. Se puede lograr una baja fricción con recubrimientos duros si se forma un microfilm de baja resistencia al cizallamiento en la parte superior del recubrimiento. Por tanto, el corte se producirá dentro del microfilm y la carga estará bien soportada por el revestimiento duro, como se muestra en la Fig. 2.7c.





**Figura 2.7** (a) Un deslizador duro que se mueve sobre una superficie blanda da como resultado un arado. (b) rasgado se puede inhibir utilizando un revestimiento duro sobre el sustrato blando. (c) Un microfilm suave en la parte superior del recubrimiento duro da como resultado una menor fricción [18]

## 2. Grosor del revestimiento

Es un parámetro importante que influye en los esfuerzos de la superficie y en el desgaste y la fricción. El grosor de la capa de la superficie revestida suele ser fácil de controlar durante el proceso de deposición, pero la complejidad de los mecanismos de contacto hace que sea difícil averiguar qué grosor de revestimiento sería tribológicamente óptimo para una determinada aplicación. A continuación, se analizan los principales mecanismos de fricción relacionados con el espesor del revestimiento.

**Cizallamiento.** Primero, se considera una película fina y suave sobre un sustrato duro con superficies lisas y sin residuos presentes, como se muestra en la Fig. 2.8b. Cuando la película es lo suficientemente delgada, el efecto de rasgado de la película es pequeño. Por tanto, la fricción está definida por la resistencia al corte de la película y el área de contacto, que está relacionada con las propiedades de deformación del sustrato.

El coeficiente de fricción es una función del espesor de la película y tiene un valor mínimo para recubrimientos blandos, como el plomo, típicamente en espesores de película de aproximadamente 1 micrómetro. El crecimiento de la fricción juntamente con la disminución del espesor de la película por debajo del óptimo está asociado con la ruptura de la película por asperezas de acoplamiento.

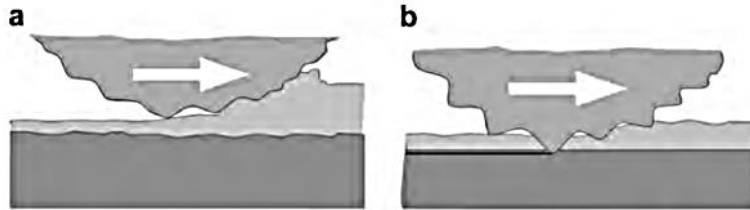
## 3. La rugosidad de la superficie

Como ya se conoce, las superficies idealmente lisas son raras en aplicaciones de ingeniería. Ahora, si se consideran los efectos de la fricción para contactos revestidos con superficies rugosas, se tiene: rugosidad para recubrimientos blandos gruesos, la rugosidad del sustrato puede despreciarse si es considerablemente menor que el espesor de la película y la película es lo suficientemente rígida para soportar la carga, como se muestra en la Fig. 2.8a.

## 4. El tamaño y la dureza de los desechos en el contacto

Las partículas sueltas o los desechos suelen estar presentes en los contactos deslizantes que pueden tener su origen en el entorno circundante o ser generados por diferentes mecanismos de desgaste en el contacto deslizante. Su influencia sobre la fricción es considerable en algunas condiciones de contacto, dependiendo del diámetro de partícula, el espesor del revestimiento y la relación de rugosidad de la superficie y la relación de dureza de las partículas, revestimiento y sustrato.

#### Mecanismos de desgaste micromecánicos

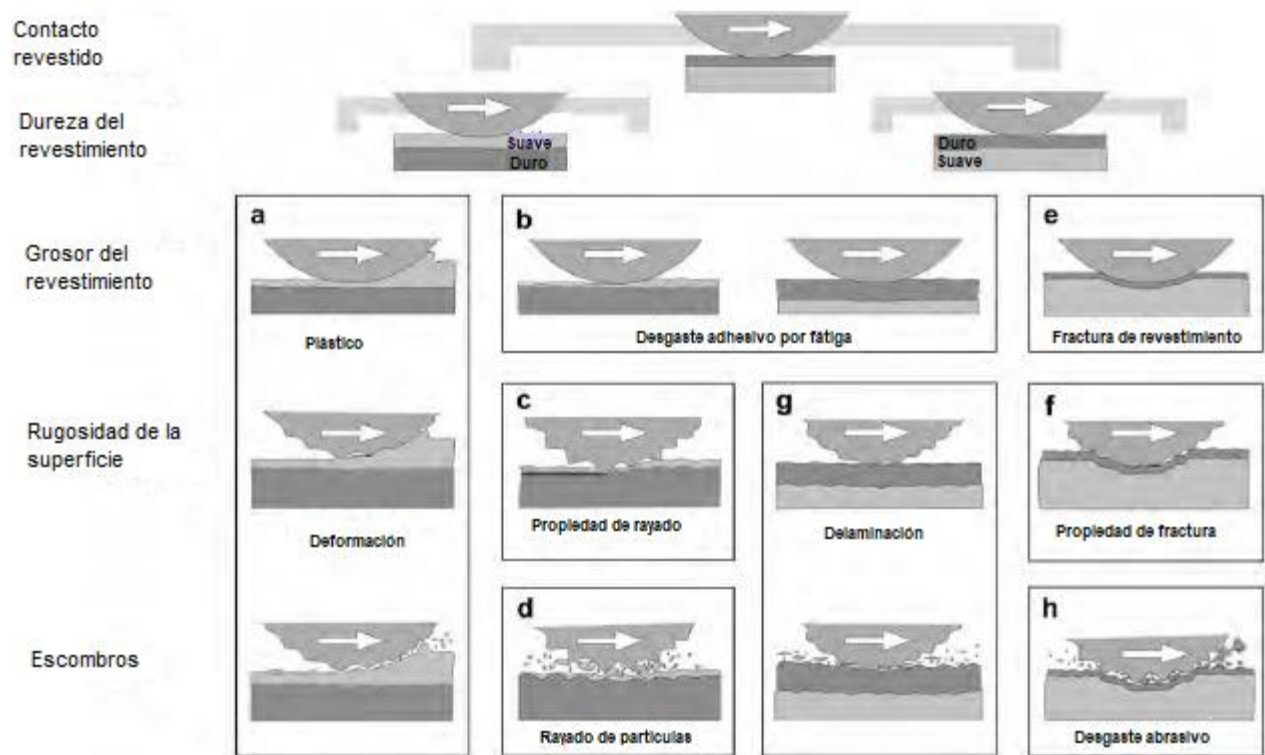


**Figura 2.8** El contacto de un deslizador duro que se mueve sobre una superficie plana dura recubierta por un revestimiento blando tanto con superficies rugosas se caracteriza por (a) rayado para revestimientos gruesos y (b) penetración para revestimientos delgados [18]

Las 12 situaciones de contacto diferentes se pueden agrupar para representar ocho componentes de desgaste característicos, como se muestra en la Fig. 2.9.

#### Deformación plástica.

Cuando una contraparte dura se mueve sobre un revestimiento grueso y suave que es lo suficientemente rígido para soportar la carga, el resultado será una ranura en el revestimiento como se muestra en la Fig. 2.9a [18].



**Figura 2.9** Los componentes de desgaste macromecánicos en contacto con superficies revestidas dependen de cuatro parámetros principales: la relación de dureza, el espesor de la película, la rugosidad de la superficie y los residuos en el contacto. Los procesos de desgaste característicos se muestran esquemáticamente en subfiguras a-h

### Desgaste adhesivo y por fatiga.

El desgaste adhesivo está presente hasta cierto punto en varias situaciones de contacto. Incluso si todos los demás mecanismos de desgaste se han eliminado mediante un buen diseño tribológico, todavía existirá un desgaste adhesivo menor. El desgaste adhesivo es típico de una esfera dura que se desliza sobre un revestimiento duro grueso o sobre un sustrato duro cubierto con un revestimiento fino y suave, como se muestra en la Fig. 2.9b.

### Propiedad rayado

En contacto con superficies rugosas y películas delgadas y blandas, domina el mecanismo de penetración de aspereza y arado. Las asperezas en la superficie de una contraparte rugosa que se mueve sobre un sustrato duro con un recubrimiento suave, como se muestra en la Fig. 2.9c, penetra el recubrimiento y se desliza directamente sobre el sustrato. Si las asperezas son más duras que el sustrato, también penetrarán en el sustrato y producirán surcos al arar tanto en el revestimiento como en el sustrato.

### Rayado de partículas.

Ahora se presenta la situación cuando partículas duras del mismo tamaño que el grosor de la película y la rugosidad de área se introducen en el contacto de una esfera rugosa que se desliza sobre un sustrato rugoso cubierto con una capa fina y suave, como se muestra en la Fig. 2.9d. Las partículas son atrapadas por la rugosidad de la superficie y causan microplumas y rayaduras tanto en el revestimiento blando como en el sustrato duro de forma similar al efecto de las asperezas duras que penetran en el revestimiento descrito anteriormente.

Fractura de revestimiento.

El uso de recubrimientos duros delgados es a menudo una solución muy adecuada para el desgaste, pero si el sustrato no es lo suficientemente duro para soportar la carga, se producirá una deformación plástica o elástica en el sustrato debajo del contacto. Las tensiones aumentadas dentro del revestimiento o en la interfaz entre el revestimiento y el sustrato, a medida que el revestimiento se deforma junto con la superficie del sustrato, pueden ser más altas que la oposición a la tracción o al cizallamiento del metal, dando como resultado la nucleación y propagación de grietas. Esta situación de contacto se ilustra en la Fig. 2.9e.

Propiedad de fractura

En el contacto entre un deslizador y un revestimiento duros, ambos con superficies de alta rugosidad y ángulos de aspereza pronunciados como se muestra en la Fig. 2.9f, hay una fuerte tendencia a la aspereza entrelazada con alta fricción al inicio del deslizamiento. Se producirá un desgaste inicial considerable al romper los picos de aspereza y así alisar las superficies. Los residuos de desgaste duros y afilados pueden afectar considerablemente el desgaste durante el deslizamiento continuo.

Delaminación.

Una situación más común es el movimiento de un deslizador duro contra un revestimiento duro con topografía de ángulos de dureza baja, que se encuentra típicamente en superficies de ingeniería, como se representa en la Fig. 2.9g. La acción de deslizamiento tiene lugar en la parte superior de las rigideces en contacto. Se deforman principalmente plásticamente, aunque la tensión de contacto general puede ser menor que la tensión de fluencia de los materiales, porque las tensiones locales en las áreas de aspereza pequeñas son mucho mayores.

Desgaste abrasivo.

El desgaste abrasivo se caracteriza por un deslizador duro y rugoso que se desliza sobre un revestimiento con las mismas características que el deslizador, con partículas duras de tamaños mayores que la magnitud de la rugosidad de la superficie presente en el contacto, como se observa en la Fig. 2.9h. Las partículas atrapadas tienen un efecto de rayado en ambas superficies, y al llevar parte de la carga provocarán picos de presión concentrados en ambas superficies al intentar penetrarlas.

Mecanismos tribológicos micromecánicos

El origen de los fenómenos de fricción y desgaste que observamos en macro nivel se encuentra en los mecanismos que tienen lugar en micro nivel. La integración de todos los mecanismos micromecánicos da como resultado los mecanismos macromecánicos discutidos anteriormente.

Los mecanismos tribológicos micromecánicos consideran la tensión y deformación a nivel de aspereza, la generación y propagación de fisuras, la liberación de material y la formación de partículas

individuales, como se muestra en la Fig. 2.10. En los contactos típicos de ingeniería, estos fenómenos tienen un tamaño de aproximadamente 1 micrómetro o menos hasta el nivel nanométrico.



**Figura 2.10** Los mecanismos tribológicos micromecánicos consideran la tensión, la deformación, la generación y propagación de grietas y la formación de partículas individuales en un micro nivel, por lo general esto es lo que ocurre en los contactos de rugosidad [18].

### Mecanismos triboquímicos

Cuando están en contacto dos superficies y se deslizan entre sí en repetidas ocasiones, ocurren reacciones químicas que modifican la estructura y las propiedades mecánicas de la capa superficial más externa de estas; lo que influye inmensamente sobre sus propiedades tribológicas porque están definidas por diferentes sucesos como el cizallamiento, agrietamiento y entrelazado de dureza, todo esto ocurre en la capa superior de la superficie. Las reacciones químicas en las superficies están influenciadas por las altas presiones particulares y las temperaturas de flash, que a menudo consiguen llegar a 1000°C y para algunas superficies cerámicas duras incluso hasta 2000 ° C, ocurriendo en puntos de colisiones de dureza.

Los mecanismos triboquímicos que se han estudiado en los contactos tribológicos se pueden dividir en cuatro peculiaridades superficiales transcendentales para los que los efectos químicos son fundamentales. Estos son:

1. Formación de microfilms delgados sobre los recubrimientos
2. Oxidación de revestimientos blandos
3. Formación de capas límite reactivas en contactos lubricados
4. Tribocorrosión de superficies revestidas

### 2.6.3 Fricción y desgaste

El movimiento controlado de una superficie en relación con otra, o en términos de ingeniería de un componente en relación con otro, se logra típicamente mediante elementos de la máquina como cojinetes, articulaciones, engranajes, deslizadores y mecanismos de leva y empujadores. En los procesos de fabricación, como el corte de metal o la extrusión, la superficie de la herramienta está expuesta a condiciones severas por una superficie de contacto que se encuentra en un estado líquido o plástico de alta temperatura que se mueve rápidamente [58].

Las superficies que interactúan en movimiento relativo, por lo tanto, ocurren de manera cotidiana en nuestro entorno. Muchas de sus funciones clave, especialmente en nuestra comunidad industrializada, dependen de ellas. La variedad de condiciones en las que se espera que las superficies cumplan requisitos exigentes es, por lo tanto, extremadamente amplia. Es importante tener en cuenta las dimensiones de los diferentes elementos de la superficie cuando se consideran problemas relacionados con superficies en movimiento relativo. El tamaño es un parámetro que influye en la interacción de diferentes elementos de la superficie, como películas superficiales, escombros, uniones y espacios. La interacción entre las superficies mediante un movimiento relativo propicia el análisis de dos conceptos relevantes, los cuales son: fricción y desgaste que se hacen presenta durante el contacto de los planos.

### Fricción

La fricción es la oposición al movimiento que se aprecia cuando un cuerpo se mueve indirectamente sobre otro con el que está en contacto. Entonces, la fricción no es una propiedad material; es una respuesta del procedimiento en forma de fuerza de reacción. El coeficiente de fricción,  $\mu$ , es la fuerza de fricción tangencial  $F$  entre la carga normal  $w$  durante el contacto:

$$\mu = \frac{F}{W} \dots\dots\dots (1)$$

Básicamente, la fricción se puede dividir en dos componentes, una fuerza de adherencia,  $F_a$ , debido a la adherencia entre las dos superficies, y una fuerza de deformación,  $F_d$ , debido a la deformación de las superficies de modo que; la fuerza de deformación se denomina "fricción de rugosidad" cuando tiene lugar en una macro escala y "deformación por rugosidad" cuando tiene lugar en una microescala.

### Desgaste

El desgaste se define como la eliminación de material en superficies sólidas como resultado del contacto y un movimiento relativo entre dos superficies. Así mismo tanto la fricción como el desgaste son simultáneamente derivados del mismo proceso de contacto tribológico que tiene lugar entre dos superficies móviles. Sin embargo, su interrelación no se comprende bien. Es común encontrar que una baja fricción corresponde a un bajo desgaste.

El desgaste es un daño progresivo, donde la lubricación es la interposición efectiva de un sólido, líquido o gas entre dos cuerpos para reducir la fricción y/o el desgaste cuando uno se mueve sobre el otro. En el caso de una situación de deslizamiento sin lubricar, el desgaste se somete a la carga normal; mientras que la velocidad de deslizamiento relativa, la temperatura inicial y las propiedades térmicas, mecánicas y químicas de los materiales en contacto [58].

## 2.7 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

### 2.7.1 Arreglos ortogonales

Estos arreglos fueron diseñados y formulados por Taguchi, su singular la característica es la perpendicularidad. Un arreglo ortogonal es un arreglo matricial, en el cual las columnas son linealmente independientes, cuya propiedad elemental es: la multiplicación de dos de cualquiera de las columnas

es igual a cero, lo que determina la ortogonalidad de las columnas. Es importante mencionar que los diseños factoriales tradicionales poseen la misma característica de la ortogonalidad, entre estos arreglos están los diseños factoriales completos, fraccionados o mixtos, esto es dependiendo del número de factores del caso a estudiar. Por ejemplo, el arreglo  $L_8 2^7$  Taguchi enumera realizar ocho corridas experimentales, además de poder analizar de dos hasta siete factores con dos niveles cada uno (Fig. 2.11). En el caso de experimentar con siete factores, se utiliza un diseño factorial fraccionado  $2^{7-3}_{III}$ , sin embargo, para la situación de tener dos factores, se usaría un factorial completo  $2^2$  con dos réplicas. En un arreglo ortogonal, los factores principales y de control poseen el mismo peso [59].

Arreglo $L_8$ (fracción $2^{7-4}$ )							
Núm. de corrida	Núm. de columna						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

2 factores: columnas 1, 2.  
3 factores: columnas 1, 2, 4.  
4 factores: columnas 1, 2, 4, 7.  
5 factores: columnas 1, 2, 4, 7, 6.  
6 factores: columnas 1, 2, 4, 7, 6, 5.  
7 factores: las siete columnas.

**Figura 2.11** Arreglo ortogonal  $L_8$  propuesto por Taguchi [19].

La matriz ortogonal se denota como  $L_a (b)^c$ , donde a es el número de combinación de factores en el experimento, b es el número de nivel para los factores y c representa el número de factores en el experimento. En lugar de experimentos completos, el número de experimentos se reduce drásticamente en función del diseño de matrices ortogonales. Se selecciona una matriz ortogonal conveniente al número de factores y la cantidad de niveles para cada factor en el experimento [60]. Con la idea de estudiar el diseño ortogonal, Taguchi presenta un estadístico de desempeño, nombrado el cociente de razón señal/ruido (signal-to-noise ratio), véase la Fig. 2.12, que deduce cada combinación de los factores controlables y posteriormente se estudia como cualquier variable de respuesta. La combinación más robusta de los niveles de los factores controlables es la que maximiza el estadístico de desempeño [59].

Tipo de característica	Razón señal/ruido (S/R)
Mientras más pequeña es mejor	$-10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right]$
Mientras más grande es mejor	$-10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right]$
Su valor nominal es lo mejor (tipo I)	$10 \log \left( \frac{\bar{Y}^2}{S^2} \right)$
Su valor nominal es lo mejor (tipo II)	$-10 \log (S^2)$
Proporción de defectuosos	$-10 \log \left( \frac{p}{(1-p)} \right)$

**Figura 2.12** Razón de señal/ ruido para diferentes tipos de variables de respuesta [19]

## 2.7.2 Taguchi

El ingeniero de origen japonés Genichi Taguchi, desarrolló una filosofía de calidad y aporta grandes contribuciones en este rubro a inicios de 1950; los cuales cimientan los precedentes del diseño robusto. Se considera su mayor aporte se da en el diseño de, mediante la introducción del concepto de diseño de parámetros que actualmente es conocido como diseño robusto. Un experimento que contiene factores de no controlables o de ruido, los cuales pueden ser apreciados de forma evidente o sobreentendida, y se pretende minimizar indirectamente sus efectos, con la finalidad de hallar la combinación de niveles de los factores del proceso que, si se puedan controlar, esperando que el efecto de dichos factores de ruido sea el menor; este tipo de experimento es prototipo de un diseño robusto. El objetivo primordial de un diseño robusto es hallar la combinación de niveles de los factores controlables, en donde los factores de ruido no perturben al proceso, sin importar que estos últimos no se controlen. La aplicación de la palabra robusto en este apartado va dirigida a lograr que el proceso o producto insensible sea resistente a los factores de ruido y que no podemos controlar [59].

El método Taguchi fue presentado por primera vez por Genichi Taguchi y está diseñado para realizar experimentos con alta eficiencia para reducir los costos experimentales. En lugar de la supervisión permanente durante la producción, Taguchi propone a través de su método, que se diseñe la calidad del producto; usando menos experimentos y determinando previamente la mejor combinación de factores de fabricación a través de matrices ortogonales [60].

## 2.7.3 Método de gris relacionado

El análisis del método gris relacionado (MGR) es una rama importante de la teoría del sistema gris (TSG) que se usa para descubrir el grado de relación entre factores de acuerdo con las similitudes en su geometría. Las similitudes más altas en la forma geométrica de una línea o curva sugieren grados relacionales más altos entre los factores de estudio A medida que la teoría MGR ha madurado, ha



utilizado considerablemente como un instrumento de investigación en las prácticas económicas y de producción de la sociedad. De acuerdo con diferentes perspectivas de investigación, el modelo MGR relacional se puede categorizar como (1) próximo, (2) similar y (3) integral. Los modelos relacionales próximos miden principalmente el grado de relación entre factores según la distancia entre secuencias. Ejemplos de modelos relacionales próximos incluyen el modelo relacional general de Deng y el modelo relacional absoluto. En el modelo relacional general de Deng, las magnitudes de proximidad y las tendencias entre factores se midieron utilizando distancias euclidianas o coeficientes relacionales que definieron el grado relacional general [61].

El método gris relacionado (MGR) es un método eficaz con la capacidad de solventar problemas que contemplan múltiples variables y objetivos en diversas ramas de la ingeniería. Esta propuesta insta a que el blanco simboliza toda la información acerca de cualquier proceso, y que el negro representa que no existe información. entonces, una información catalogada como gris está ubicada entre el blanco y el negro, indicando que la información está incompleta y es precaria. En una situación compleja, las relaciones entre las múltiples variables resultan muy complicadas e insuficiente claras, razón por que la correspondencia entre tipo de datos se conoce como relación gris. El análisis relacional gris está basado en minimizar la distancia máxima entre una secuencia objetiva (una colección de mediciones o resultados experimentales) y una secuencia de referencia (valor objetivo) en el sistema gris. La relación resultante de las dos secuencias se conoce como coeficiente gris relacional (CGR). El proceso de análisis gris relacionado incluye:

1. Normalizar una secuencia de datos en un rango de los valores de 0 y 1, esto se realiza con la finalidad de llevar a una misma unidad de medida y escala a las diferentes series de datos. Esta normalización depende de las particularidades deseadas en la salida de la sucesión de datos. Las expresiones matemáticas por utilizar para la normalización pueden expresarse como sigue:

Característica entre más grande-lo-mejor:

$$x_i^*(k) = \frac{x_i(k) - \min x_i(k)}{\max x_i(k) - \min x_i(k)} \dots\dots\dots(2)$$

Característica entre más pequeño-lo-mejor:

$$x_i^*(k) = \frac{\max x_i(k) - x_i(k)}{\max x_i(k) - \min x_i(k)} \dots\dots\dots(3)$$

Y para la mejor característica nominal:

$$x_i^*(k) = 1 - \frac{|x_i(k) - x_t(k)|}{\max x_i(k) - \min x_i(k)} \dots\dots\dots(4)$$

Donde  $x_i^*(k)$  es el valor obtenido de grey relacionado;  $\max x_i(k)$  y  $\min x_i(k)$  son los valores máximo y mínimo de la serie original  $x_i(k)$  para la réplica  $k^i$  i-ésima respectivamente.

2. Cálculo del coeficiente de gris relacionado ( $\xi_i$ )

Los CGR del estudio muestran el grado relacional entre lo ideal y los resultados experimentales actuales (donde el 1= lo ideal). De los valores normalizados, se establecen CGR empleando la siguiente expresión:

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{min} + r\Delta_{max}}{\Delta_{oi}(k) + r\Delta_{max}} \dots\dots\dots(5)$$

Donde  $\Delta_{oi}(k) = \|x_i(k) - x_i^*(k)\|$  es el valor de la diferencia absoluta de los valores de la secuencia generados y experimentales.  $\Delta_{min}$  y  $\Delta_{max}$  son los valores máximo y mínimo de las diferencias absolutas, ( $\Delta_{oi}(k)$ ) de todas las secuencias comparadas. En la ec. (5), el término r es el coeficiente característico que se utiliza para ajustar la diferencia del coeficiente relacionado, generalmente  $r \in (0,1)$  [61]. Entre más bajo el valor de r, más alta la habilidad de distinción.

3. Cálculo del grado de gris relacionado promediando los coeficientes de gris relacionado correspondientes.
4. Selección de los niveles óptimos de los parámetros del proceso.

Al generar CGR, se genera cierto grado de indecisión al definir las características de respuesta, como mayor es mejor, menor es mejor y nominal es mejor. Ahora, para eliminar esta incertidumbre y optimizar este problema de respuesta múltiple [62].

## 2.8 INTELIGENCIA ARTIFICIAL

### 2.8.1 Lógica difusa

Esta teoría fue presentada por primera vez por Zadeh (1965). El elemento fundamental de la lógica difusa (LD) es la introducción del concepto "variable lingüística", que es una variable que los valores asignados son palabras en lugar valores numéricos. En el razonamiento difuso, el difusor utiliza inicialmente funciones de pertenencia para difuminar el CGR para cada variable de respuesta. Una función de pertenencia (FP) determina cómo se asignará una entrada a un valor de membresía o determinará su "grado de membresía" entre el intervalo [0,1]. El motor de inferencia difusa o también nombrado sistema de inferencia difusa, demanda de la base de reglas difusas que se ha predefinido para generar un valor difuso. Por último, el defuzzificador convierte la salida difusa en un valor "nítido", es decir, un valor no difuso que se denomina aquí grado de razonamiento gris difuso o simplemente GGD [62]. En la LD, se obtiene un nivel de cumplimiento de la pertinencia, esto es, entre más cercano a cero, será menos pertinente y cuando sea más cercano a 1 será más pertinente [63].

### 2.8.2 Inferencia difuso

La inferencia difusa es el procedimiento para exponer el mapeo de una entrada dada a una salida mediante la aplicación de lógica difusa. El mapeo representa las actividades significativas del proceso para proveer una base que facilita la toma disposiciones y/o discriminar patrones. La metodología de la inferencia difusa incluye todas los elementos que permanecen descritas en las funciones de pertenencia (FP), operaciones lógicas y reglas IF-THEN [64]. El funcionamiento del sistema de inferencia difuso Mandani, consta de tres fases, las cuales completan el montaje del sistema [65, 66] se muestran en la Fig. 2.13, y aquí se describen:

## Fase 1 Fusificación

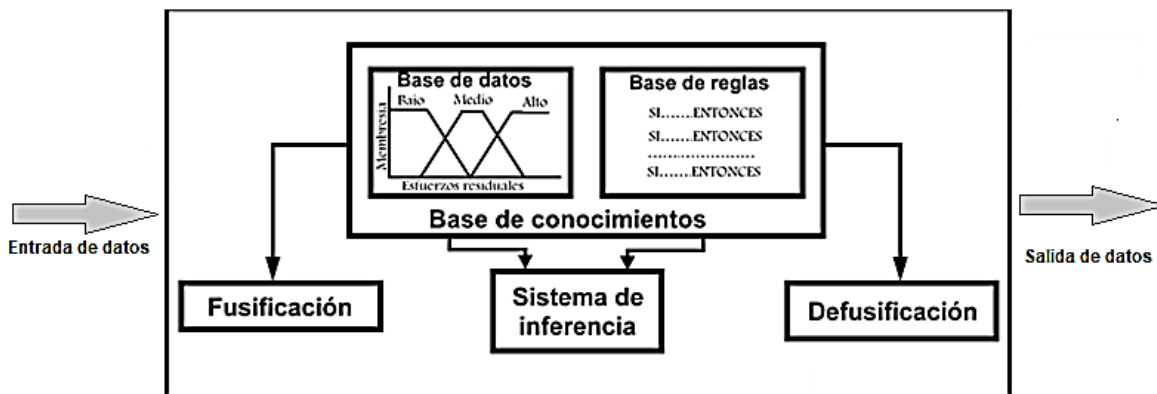
Esta fase contempla una metodología básica que permite a las variables poseer un grado de incertidumbre metalingüístico y el rango de valores de cada variable se puede describir a través de conjuntos difusos, creando el concepto de universo del discurso. Así mismo, los valores transitan por un proceso de fusificación son clasificados dentro de un nivel de pertenencia entre los valores de 0 y 1, otorgándoles la membresía en un conjunto difuso; este tipo de conjuntos son representados mediante de funciones de pertenencia que están en concordancia con las reglas de inferencia a utilizar para asegurar el correcto funcionamiento del sistema

## Fase 2 Inferencia

Es este fase se expresan reglas lingüísticas también conocidas como reglas de inferencia. Donde el grado de pertenencia de cada una de las variables se someten a un subconjunto de dichas reglas.

## Fase 3 Defusificación

En este apartado se decretan los valores óptimos de salida, a través de un subsistema distinguido como defusificación. La defusificación consiste en transformar el grado de pertenencia, derivado del efecto de la regla de inferencia activada, a un valor nítido o real, con el propósito de conseguir un valor numérico que tenga un sentido lógico para el análisis cuantitativo [67].



**Figura 2.13** Esquema general de funcionamiento de un sistema de inferencia difusa

### 2.8.3 Reglas difusas

Las reglas difusas son oraciones que rigen las acciones a realizar para un conjunto difuso determinado; las cuales se han de establecer por un experto, para que las reglas contengan una arreglo funcional y acorde con las relaciones del conjunto estudiado. La esencia de la lógica difusa radica en las relaciones señaladas en la reglas, simplemente porque dichas reglas son definidas mediante el tratamiento de la información de reglas "IF-THEN"; lo cual permiten ajustar datos cualitativos de la comprensión humana, también a procesos de raciocinio, pero sin realizar un análisis numérico de precisión [68]. Un conjunto difuso está integrado por las reglas, valores y variables. Los conjuntos difusos son originados de las

derivaciones lingüísticas asociadas a un campo de grupos semánticos; tomando en cuenta que la semántica se encarga de interpretar los símbolos lingüísticos, tales como palabras, expresiones, etc. Enfatizando, las reglas expresadas en un lenguaje natural integran el conocimiento de un experto en la tarea. La aplicación de estas reglas es de manera inmediata en escenarios reales, y por medio de instrucciones que es posible programar en una computadora, con la intervención de un experto en un determinado contexto. El número de reglas a establecer depende del conocimiento sólido que se tiene como base; para cualquier posible combinación de valores de referencia, y tenga como resultado una conclusión, depende del número de variables lingüísticas que representa a el sistema, además del número de conjuntos difusos asociados a cada una de estas.

#### **2.8.4 Método Mamdani**

Es metodología de inferencia es la más frecuente usada en la lógica difusa y es uno de los primeros sistemas de control en utilizar la teoría de los conjuntos difusos. Inicialmente se propuso con el objetivo de supervisar el funcionamiento de la combinación de una máquina de vapor y boiler abreviando un conjunto de reglas lingüísticas de control obtenidas de expertos operadores humanos [69]. En 1970 Ebrahim H. Mamdani aplico la lógica difusa en el Queen Mary Collage en Londres; en el diseñó un controlador difuso para un motor a vapor y a partir de ese momento el término lógica difusa es sinónimo de cualquier sistema matemático o computacional que razona con lógica difusa. La generalidad de los sistemas difusos radica en que los valores verdaderos de pertenencia se presentan en valores numéricos dentro el intervalo de  $[0,1]$ , donde 0 personifica falsedad total y 1 simboliza verdad absoluta.[68].

#### **2.8.5 Método Takagi & Sugeno**

Este procedimiento, también reconocido como inferencia difusa de Takagi Sugeno-Kang, usa funciones de pertenencia de salida singleton que son una función lineal de los valores de ingreso. El proceso de defuzzificación, el sistema Sugeno es más eficaz, que el de un sistema Mamdani, visto desde la perspectiva computacional. El sistema Sugeno usa promedios ponderados de algunos puntos de los datos, sin necesidad se determinar un centroide de un área en dos dimensiones [70]. Como consecuencia de la dependencia lineal de cada regla de las variables de entrada, la metodología Sugeno es idónea para portarse como un supervisor de interpolación de múltiples lineales por aplicar a diferentes contextos de acción de un sistema dinámico no lineal. Para su mejor comprensión se presenta la siguiente situación; el rendimiento de una aeronave cambia de manera drástica, dependiendo de la altura y el número Mach, los controladores lineales son fáciles de deducir y apropiados para cualquier situación de vuelo presente, pero deben actualizarse con frecuencia y sin inconvenientes para permanecer al tanto del estado variable de la aeronave. Un sistema Sugeno, resulta conveniente para la modelación de sistemas no lineales, mediante la interpolación entre múltiples modelos lineales. Las reglas clásicas de un modelo difuso Sugeno muestra la siguiente forma: si la entrada 1 es  $x$ ; y la entrada 2 es  $y$ , entonces la salida es:  $z = ax+by+c$ . En un modelo de orden cero tendrá un nivel de salida constante representado por  $z_i$  ( $a=b=0$ ). Cada regla pesa su propio nivel de salida mostrando que la fuerza de la regla  $w_i$  es la fuerza de disparo de la regla derivada de la referencia de esta. Entonces la salida de cada regla es el nivel de salida ponderado, que es el producto de  $w_i$  y  $z_i$ . posteriormente la salida final de sistema es ponderada logrando el promedio de todas las salidas de las reglas [64].

## 2.9 RED NEURONAL ARTIFICIAL

El conjunto de técnicas de la red neuronal artificial (RNA), resaltan al intenta reproducir el procesamiento de solución de problemas del cerebro humano; al igual que las personas emplean el conocimiento adquirido a través de experiencias para aplicarlo ante nuevas situaciones. La red neuronal contempla los problemas solucionados como ejemplo para desarrollar un sistema que permita la toma de decisiones, ejecutando categorizaciones. Los problemas que no cuentan con soluciones exactas desde el punto de vista computacional, o aquellos que para su solución necesitan algoritmos muy desarrollados, son apropiados para ser analizados por una red neuronal

Algunas ventajas de las RNA frente a otros sistemas de procesamiento de información son:

- Las RNA logran resumir algoritmos mediante un proceso de aprendizaje.
- Para aplicar la tecnología neural únicamente se necesita estar familiarizado con los datos del trabajo.
- La RNA tiene la gran fortaleza de resolver problemas no lineales.
- Las RNA de forma contraria a la programación habitual, podría presentar problemas en algunos de sus componentes de procesamiento, pero la robustez de la red permite que esta siga trabajando continuamente

Las desventajas de las redes neurales son:

- Las RNA deben adiestrarse para cada problema. Al mismo tiempo, se requiere efectuar múltiples ensayos para establecer la arquitectura correcta; dicho entrenamiento puede ser extenso y tomarse mucho tiempo de la computadora.
- A consecuencia de que las RNA deben ser entrenadas y no programadas, se requiere de una gran cantidad de información para efectuar dicho adiestramiento.
- Las RNA representan problemas para personas externas y que desconocen el funcionamiento de estas, específicamente en el caso de que requieran hacer modificaciones. De tal forma que se necesita alterar las interacciones entre numerosos mecanismos, para que el resultado agrupado abrevie este conocimiento. La RNA ante problemas de gran dimensión resulta absurdo obtener una solución de forma manual, entonces una red con representación distribuida debe usar algún proyecto de aprendizaje que facilite su labor [68].

### 2.9.1 Modelo general de Neurona Artificial

Una red neuronal (RN), es un modelo matemático o modelo computacional, capaz de adquirir, representar y calcular un mapeo de un espacio de información multivariante a otro, dado un conjunto de datos que representan ese mapeo. La inspiración y preeminencia para las redes neuronales tiene su origen en emular la estructura y organización del cerebro humano. El cerebro contiene numerosas células llamadas neuronas, las cuales se comunican a través de impulsos a través de las dendritas de otras neuronas y depende de los impulsos recibidos para que una neurona envíe señales a otra neurona, por medio de su único nervio (conocido como axón), el cual se conecta a las dendritas de

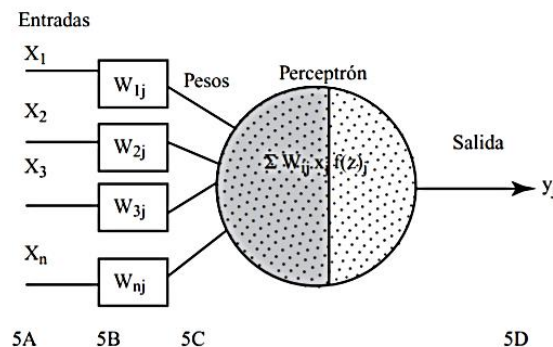
otras neuronas. Así mismo, el cerebro y las RNA están constituidos por elementos y cada uno de estos recibe varias entradas, generando una sola salida, la cual representa una función relativamente sencilla respecto a las entradas [71].

Las RN generalizan información obtenida de datos experimentales, secciones bibliográficas existentes o bases de datos, determinadas por personas expertas. Estas RN consideran las entradas y a las salidas como señales del sistema.

El adiestramiento de la RNA tiene su fundamento en el algoritmo de “retro propagación del error” mediante el método del gradiente descendiente, donde las ponderaciones se renuevan por medio del uso de un grupo ordenado de entradas y salidas esperadas y el cotejo entre dicha salida y la salida verdadera derivada de la RN

### Perceptrón

Es un dispositivo del tipo de RNA que clasifica en forma binaria excluyendo sistemas lineales. El perceptrón utiliza como base, la suma de las señales de ingreso y las pondera de forma selectiva, y a su vez aleatoriamente. Durante la fase de aprendizaje del perceptrón, la entrada es comparada con un modelo previamente establecido y así establecer la salida de red. Entonces, al comparar la suma de entradas ponderadas, si esta sumatoria resulta mayor o igual al modelo preestablecido, la solución para la salida es 1; pero si es menor al modelo preestablecido, la salida es igual a cero. El perceptrón en su ordenación inicial no tiene la aptitud de diferenciar patrones de entrada complicados, pero mediante el entrenamiento y un proceso de aprendizaje podrá adquirir esta capacidad optimizando su trabajo. En esencia, el adiestramiento involucra un proceso de asistencia mediante el cual las ponderaciones que codifican la comunicación entre red neuronal se incrementan o disminuyen. En la Fig. 2.14 se observa una neurona “artificial”, que pretende representar el comportamiento de la neurona biológica; el cuerpo de la neurona se simboliza como un sumador lineal de los estímulos externos  $z_j$ , acompañada de una función no lineal  $y_i = f(z_j)$ . La función  $f(z_j)$ . Es denominada la función de activación y es la función que usa la suma de estímulos para establecer la actividad de salida de la neurona.



**Figura 2.14** Estructura del perceptrón, la más simple en las RNA. Es un discriminador binario lineal y puede ser entrenado para mejorar su desempeño. Las entradas de la neurona (5A), los pesos aleatorios (5B), la sumatoria de la multiplicación de los pesos por sus respectivas entradas (5C) y la salida que es el cálculo de todos los pesos y sus entradas (5D) [29].

Este modelo representa el concepto fundamental de mayoría de las estructuras de las RNA interrelacionadas entre sí. Las neuronas utilizan diferentes funciones para activarse, de acuerdo con su aplicación. Las funciones pueden ser lineales y, otras son funciones más complejas como las sigmoideas, la cual tiene una gráfica que tiene la típica forma de una S, y otras son funciones de señal de disparo. La eficacia sináptica es simbolizada por factores de ponderación de interconexión  $w_{ij}$ , desde la neurona  $i$  hasta la neurona  $j$ .

#### Redes de retro propagación (backpropagation)

Este algoritmo de retro propagación es una generalización de la notación de mínimos cuadrados, los dos algoritmos hacen su trabajo al actualizar las ponderaciones y logros, basándose en la cantidad conocida como error cuadrado medio. Esta red de retro propagación actúa mediante el aprendizaje controlado, para lo que requiere adiestramiento para representar cada salida y su valor esperado para la salida. Para el entrenamiento de una red neuronal se requiere instruir un grupo de datos, dicho entrenamiento contempla las señales de entrada  $X_1$  y  $X_2$  asignadas con objetivos proporcionados, es decir, acorde a las salidas esperadas, que son representadas por  $z$ . el adiestramiento es un procedimiento reiterativo. En cada ensayo de la interacción las ponderaciones de los nodos cambian utilizando nueva información de los datos del grupo para su instrucción; dichas modificaciones de las ponderaciones se deducen manejando el algoritmo de retro propagación del error para el entrenamiento supervisado. En conclusión, para el controlador difuso y para la red neural artificial, las operaciones de control son simplemente pasar los datos de salida a los puntos de conexión o, en un momento dado a plantas implícitas cargadas de manera previa en el Sistema Didáctico de Control Inteligente Multipropósito [68].

**CAPÍTULO**

**3**

**MÉTODO**

**EXPERIMENTAL**

---



### 3.1 MATERIALES Y DEPOSICIÓN.

#### 3.1.1 Caracterización del recubrimiento

El recubrimiento bajo estudio se depositó sobre un acero AISI 4140 con dimensiones 7x7x3 mm<sup>3</sup>. Este material ferroso es un acero martensítico al cromo de baja aleación con un contenido químico que se presenta en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Composición química del acero AISI 4140 (% en peso) [72]

C	Si	Mn	P	S	Cr
0,95-1,10	0,35 max	0,20-0,50	0,025 max	0,025 max	1,30-1,60

Las aplicaciones ingenieriles que tienen este tipo de aceros son: rodamientos de bolas de precisión, componentes automovilísticos (frenos, dirección, transmisión, pistones, levas), bicicletas, electrodomésticos, guías para cajones, casquillos, máquinas herramientas, mecanismos para cerraduras, cintas transportadoras, patines, bolígrafos, bombas, ruedas giratorias, instrumentos de medición, válvulas, husillos roscados de bolas. Aplicaciones en la industria alimentaria y química. Máquinas para acabado, pulido y molienda.

El recubrimiento se depositó mediante deposición química de vapores con plasma mejorado y excitación por microondas (MW PECVD). El proceso por deposición continua incluyó una primer capa de adherencia de Cr (por pulverizado magnético de corriente continua) con un espesor dentro del rango 0.45-0.56 µm, seguido por una capa intermedia de WC también en un rango de 0.375-0.4 µm y la capa superficial de C de 1.25-1.5 µm. El espesor total del recubrimiento osciló entre 2.5 a 3 µm. La topografía superficial del H-DLC se presenta en la Fig. 3.1. El sistema de escala industrial incorpora dos fuentes de plasma por microondas de 1000 W y 2.54 GHz. Se aplicó un voltaje *bias* de -400 V. Por su parte, el substrato se mantuvo en menos de 200 °C. Esta es una característica muy importante particularmente en materiales sensibles al calor, como el caso del acero. El substrato se limpió con plasma y gas Ar+

utilizando bias pulsado con corriente directa antes de la deposición de la capa de adherencia. Cabe indicar que los parámetros para la deposición se proporcionaron al proveedor que se encargó de realizar el tratamiento por deposición (Oerlikon Balzers Coating Mexico, S.A de C.V.). El espesor total se determinó en una primera instancia la técnica del cráter, con el equipo Calotester (*Tribotechnic, France*). El espesor total para el recubrimiento WC-DLC fue  $2.8 \pm 0.2 \mu\text{m}$ . Los esfuerzos compresivos residuales fueron  $0.9 \pm 0.05 \text{ GPa}$ , y se determinaron por la medición de la deflexión de una oblea de Si puro con espesor de 0.4 mm antes y después de recubrimiento. Con este valor, y empleando la ecuación de Stoney [73] se calcularon los esfuerzos residuales producidos por el proceso de deposición de la película WC-DLC y con los parámetros seleccionados. Estos valores de esfuerzo residual están en el rango de valores reportados en la literatura [74, 75].

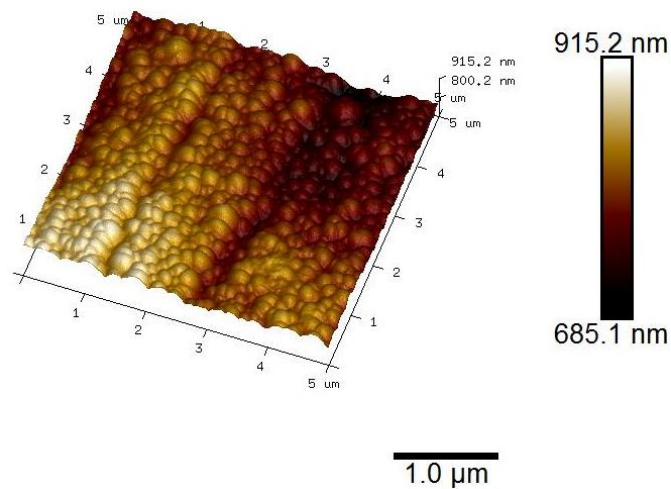


Figura 3.1. Imagen de microscopía de fuerza atómica de la superficie del H-DLC tal y como salió de la deposición.

La rugosidad superficial de  $18 \pm 5 \text{ nm}$  para la película se determinó utilizando perfilometría por contacto bidimensional. La medición se realizó en una línea de 8mm, con filtro Gaussiano y límite superior de 0.25 mm y ancho de banda de  $100 \div 1$ . La dureza y el módulo de elasticidad reducido se evaluaron por nano-indentación. El indentador es del tipo diamante con punta Berkovich. La carga fue incremental

con profundidad desde 1 hasta 50 mN. El valor promedio de nanodureza en la superficie fue de 20 GPa y este incrementó ligeramente hasta 23 GPa a una profundidad de 180 nm con un eventual descenso de dureza a partir de los 210 nm, presumiblemente causado por la influencia del sustrato [76]. El módulo de elasticidad reducido se mantuvo en promedio 180 GPa. De esta manera, la relación H/E (nótese que E es el módulo de elasticidad) que hipotéticamente es un indicador del desgaste de la película y que se describe como la deformación del recubrimiento relativo a la cedencia, se determinó igual a 0.1. Se establece que entre más alto el valor de esta relación H/E, más alta es la resistencia del recubrimiento a que se deforme plásticamente. En la literatura se encuentran valores que oscilan entre 0.1 y 0.15 para recubrimientos DLC. Las propiedades del tribopar se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Características del recubrimiento y sustrato.

Parámetro	Acero (placa y perno)	Recubrimiento/capa intermedia
Especificación	AISI 4140 para placa y AISI 52100 para perno.	Cr/WC/H-DLC
Dureza	9-15 GPa	$20^{+3}_{-1}$ GPa
Módulo elástico reducido	$187 \pm 13$ GPa	$180 \pm 10$ GPa
Rugosidad de la placa (Ra)	$18 \pm 5$ nm	$18 \pm 5$ nm
Rugosidad del perno (Ra)	$28 \pm 2$ nm	
Composición (% peso)/Espesor de recubrimiento	C 0.98–1.10, Cr 1.30–1.60, Mn 0.25–0.45, Si 0.15–0.30, S 0.025, and P 0.025.	< 0.5 Cr < 0.5 WC 2.3-2.5 $\mu$ m
% atómico de hidrógeno		~20

La adhesión de la(s) capa(s) al sustrato generalmente se lleva a cabo por medio de la prueba de rayado (*Scratch test*), la cual proporciona información respecto al nivel de adherencia en términos de la ocurrencia de fracturas interfaciales (Fig. 3.2). La resistencia adhesiva del recubrimiento se midió utilizando un aparato comercial tipo *Scratch tester* que tiene un indentador esférico de diamante Rockwell con punta de 500  $\mu$ m de radio. Las pruebas se realizaron empleando cargas progresivas desde

0.1 hasta 80 N con una velocidad de carga de 100 N/min y una longitud de rayado de 8mm en condición seca. El aparato está equipado con sensor de emisión acústica.

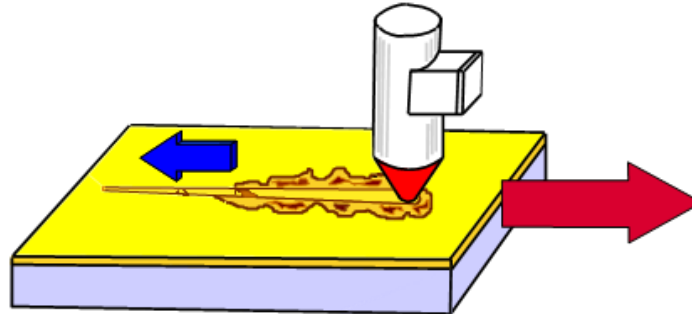


Figura 3.2. Prueba de rayado (*scratch*).

La espectroscopía Raman es una técnica *Ad Hoc* para adquirir información de la estructura de películas hidrogenadas de carbón. En el espectro del recubrimiento bajo estudio tal y como se depositó sobre la placa de acero (teniendo un 40% de humedad relativa en el momento de las mediciones) mostró las típicas distribuciones de bandas utilizando deconvolución de funciones Gaussianas y Lorentzianas. Los picos se mostraron en el rango de 900 a 1800  $\text{cm}^{-1}$ . Estas dos bandas están bien definidas como la desordenada (D) y la de grafito (G) que inician con los sitios  $\text{sp}^2$ , debido al hecho de que a la excitación de 488 nm resuena con las transiciones  $\pi - \pi^*$  en los sitios  $\text{sp}^2$ , y en este caso la banda D domina sobre la distribución de sitios  $\text{sp}^3$ . La banda G estuvo centrada en el pico 1557.22  $\text{cm}^{-1}$  por excitación visible. Mientras que la banda D se localizó en el pico marcado en 1383.78  $\text{cm}^{-1}$  (Fig. 3.3). La banda D se atribuye al enlace desordenado en el microdominio de como-grafito afectado por el enlace  $\text{sp}^3$ . La anchura de las curvas confirmó la estructura amorfa del recubrimiento. La relación de intensidad de del análisis Gaussiano para el espectro fue de  $I_D/I_G = 0.49$  y el FWHM ( $\text{cm}^{-1}$ ) para los picos D y G fueron 347 y 168 respectivamente.

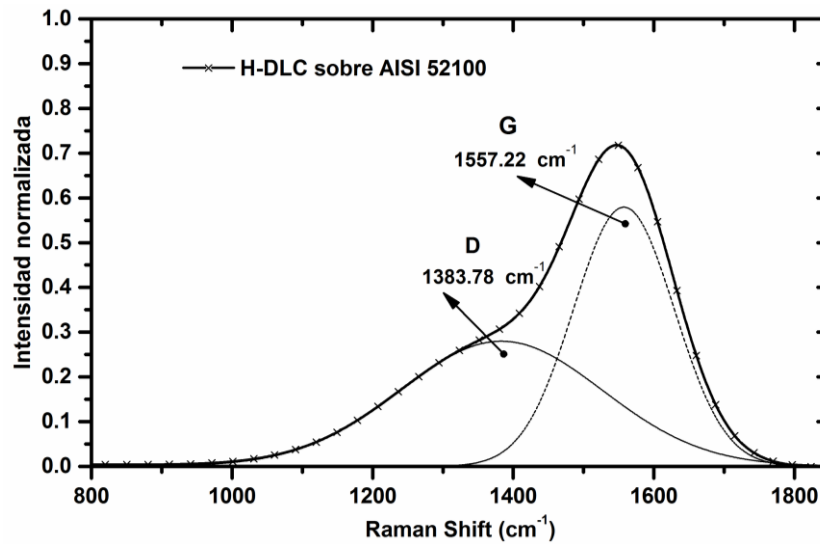


Figura 3.3. Espectro del análisis Raman para el H-DLC antes de la prueba de fricción.

### 3.2 PARÁMETROS TRIBOLÓGICOS.

Las pruebas para conocer el comportamiento tribológico del recubrimiento H-DLC en términos de fuerzas friccionantes se realizaron mediante la técnica perno sobre placa, el equipo fue un tribómetro recíprocante con movimiento lineal/bidireccional (Fig. 3.4). Esta plataforma tiene capacidad de trabajo para diferentes cargas y condiciones de temperatura. Los experimentos para este estudio no estuvieron bajo condiciones húmedas, sino en seco. La carga se aplicó al perno de acero AISI 52100 sin recubrir y con movimiento recíprocante se llevó a cabo el deslizamiento con el par tribológico perno sobre placa de acero con recubrimiento H-DLC a temperatura ambiente sin controlar. Antes de iniciar con las pruebas, todos los sujetadores, el perno y la placa recubierta se limpiaron con acetona usando un baño sónico por 20 min. Los pernos de acero AISI 52100 fueron de 20 mm de largo y 6 mm de diámetro con un extremo semiesférico de 110-120 mm de radio. La longitud de la carrera se instaló a 5 mm. Las propiedades de los materiales para el par tribológico se compilan en la tabla 3.2. Los datos de fuerza friccionante se colectaron por espacio de 6 hrs. Para evaluar la fricción, las pruebas se repitieron al

menos 3 veces para cada carga. Para predecir el comportamiento tribológico del H-DLC que será aplicado en componentes de máquinas, las correlaciones entre las características tribológicas del H-DLC y las condiciones de trabajo son muy importantes. De esta forma, la configuración perno sobre placa, el radio del extremo semiesférico del perno y el rango de cargas normales que se aplicaron, son parámetros que intentan emular las condiciones de deslizamiento de un contacto de los anillos de un pistón en una máquina de combustión interna [77]. Las presiones iniciales de contacto Hertziano que se utilizaron en el presente estudio y las condiciones del experimento se compilan en la tabla 3.3.

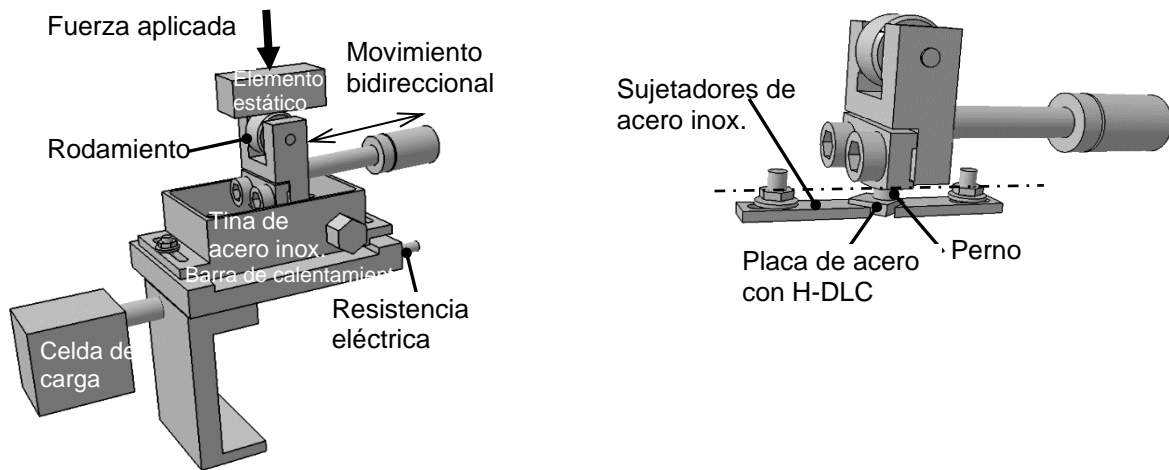


Figura 3.4. Representación esquemática del arreglo experimental tribológico.

Tabla 3.3 Condiciones experimentales para las pruebas tribológicas	
Condiciones experimentales	Magnitud
Carga (N)	10, 20, 30, 40 y 50
Presión máxima Hertziana (MPa)	110, 140, 160, 170 y 190
Frecuencia (Hz)	10
Velocidad promedio ( $m s^{-1}$ )	0.07, 0.08, 0.09, 0.1
Temperatura ( $^{\circ}C$ )	$20 \pm 2$ (condición seca)
Humedad relativa (%)	35-50
Duración (h)	6

### 3.3 MICROSCOPIA DE BARRIDO, DE FUERZA ATÓMICA Y RAMAN.

Se utilizó un microscopio óptico para analizar las regiones desgastadas para los tribo-sistemas acero/acero y H-DLC/acero. La microestructura, morfología y espesores de las películas y las superficies desgastadas se estudiaron utilizando un microscopio de barrido de presión variable y emisión de campo en modo directo. Este equipo viene con un componente de rayos X de energía dispersa (EDX) con el que se evaluó cuantitativa y cualitativamente la presencia de C y Cr/W tanto dentro como fuera de la pista de desgaste y para determinar la ocurrencia de la transferencia de material. Los perfiles de composición química en sección transversal se lograron obtener por medio de espectroscopía de emisión óptica (GDOES). La topografía superficial del recubrimiento se observó con un microscopio de fuerza atómica. Las imágenes del AFM se obtuvieron utilizando una punta de silicio (rigidez en cantiliver de  $\sim 0.4$  N/m y radio de la punta de  $\sim 10$  nm) en modo de contacto y un área de barrido de  $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ . La estructura del recubrimiento de carbón con respecto a la relación  $sp^2/sp^3$  se estudió utilizando un espectroscopio Raman. Se empleó una fuente laser con una excitación de 488 nm de longitud de onda y 2mW de potencia. Se usaron los modos estático y extendido para detectar la formación del componente químico y los picos de carbón (los picos D desordenado y G gráfico amorfo). Se aplicó un rango de barrido de 800 a  $1800 \text{ cm}^{-1}$  para identificar los picos de carbón. Los datos se ajustaron a una línea para mostrar las posiciones de los picos G y D, así como la relación de intensidades. La relación  $I_D/I_G$  se consideró como un indicador de la estructura de carbón  $sp^2/sp^3$  y también las estructuras de la capa transferida.

# **CAPÍTULO 4**

**RESULTADOS**

**Y**

**DISCUSIÓN**

---



#### 4.1 CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL.

La composición química de la sección transversal del recubrimiento donde se muestra información relativa a las intercapas y su espesor, se muestra en la Fig. 4.1. La sección transversal de la muestra en la Fig. 4.1, exhibe el compuesto dúplex de las capas. La capa superficial está compuesta por carbón e hidrógeno (que no se muestra) debido al hidrocarbón acetileno que actúa como gas precursor para depositar el recubrimiento a-C:H. La intercapa de WC con el H forma un carburo de tungsteno hidrogenado no-estequiométrico (WC/H-DLC).



Figura 4.1 Micrografía con SEM en sección transversal del H-DLC depositado sobre el acero AISI 4140.

El espesor total del H-DLC se validó mediante la prueba rápida de Calotest. El procedimiento tecnológico es la realización de un pequeño cráter en el revestimiento utilizando una bola de geometría conocida produciendo una sección cónica en la película al visualizarla en un microscopio óptico, como se muestra esquemáticamente en la Fig. 4.2 (c). En la Fig. 4.2 (a) se muestra esquemáticamente la colocación de una bola de acero inoxidable de 0.02 m de diámetro que gira deslizándose sobre el H-DLC. En la Fig. 4.2 (b) se pueden observar las dimensiones necesarias para determinar el espesor de dicho revestimiento. La relación matemática está dada por:  $\text{espesor} = \frac{xy}{2R}$ ,

$$\text{por lo que, utilizando los valores de la Fig. 4.2 (c), se tiene que} = \frac{(150.123 \mu\text{m})(447.289 \mu\text{m})}{0.02 \times 10^6 \mu\text{m}} = 3.3 \mu\text{m}$$

, lo que concuerda con la suma del espesor que se observa por la vía de SEM, ilustrados en la Fig. 4.1.

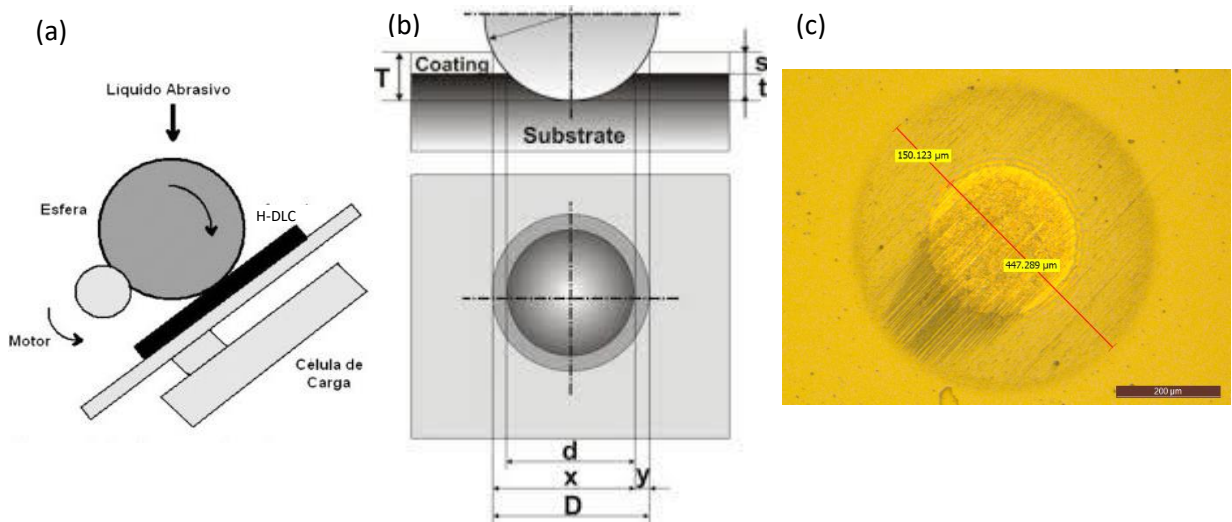


Figura 4.2 (a) Representación esquemática de la prueba Calotest para la medición rápida y precisa del espesor del recubrimiento, (b) Geometría del cráter que se forma y las dimensiones requeridas para la determinación del espesor, y (c) cráter formado en el H-DLC bajo estudio.

La superficie del H-DLC es prácticamente una copia de la superficie inicial del sustrato, por ello es que en ocasiones se encuentra en la literatura que la película de cualquier DLC es una mímica de la superficie del sustrato. Con la finalidad de elucidar el contenido químico del recubrimiento bajo estudio, se utilizó el complemento del SEM, es decir, el EDX, representado en la Fig. 4.3. En la gráfica se aprecia el contenido de cada elemento, evidenciando los elementos que son los ingredientes principales del H-DLC, es decir, el C, W, y Cr. En la fotomicrografía se observan las burbujitas características de los DLC's.

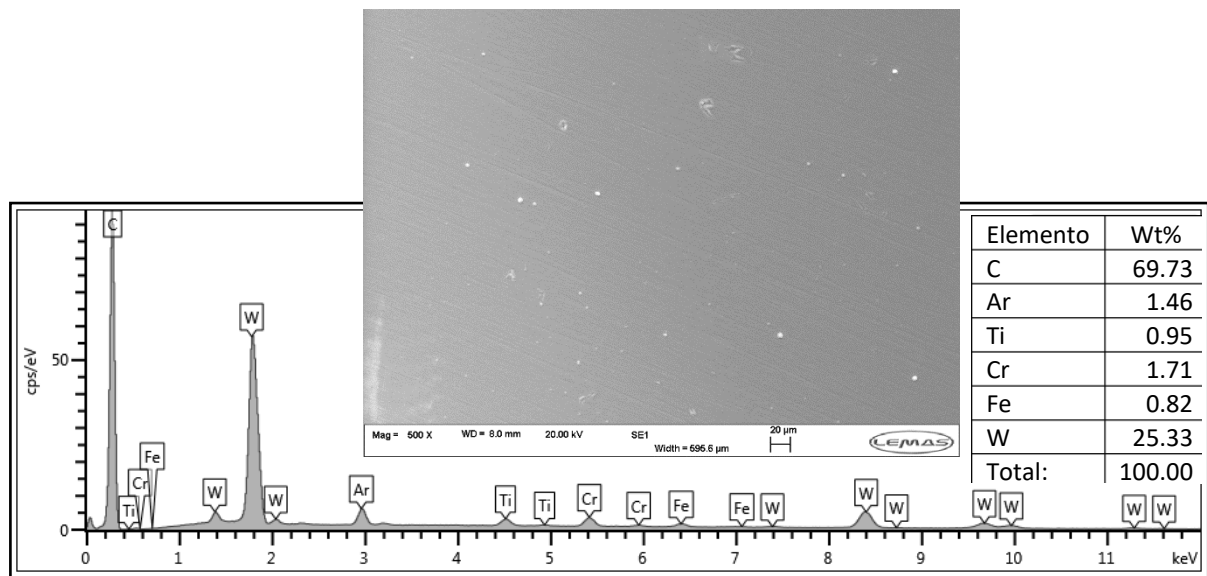


Figura 4.3 Contenido químico del H-DLC obtenido mediante EDX.

Una mirada a la sección transversal del H-DLC se ilustra en la Fig. 4.4 (a). La distribución de los elementos que contiene el revestimiento se muestra en la Fig. 4.4 (b).

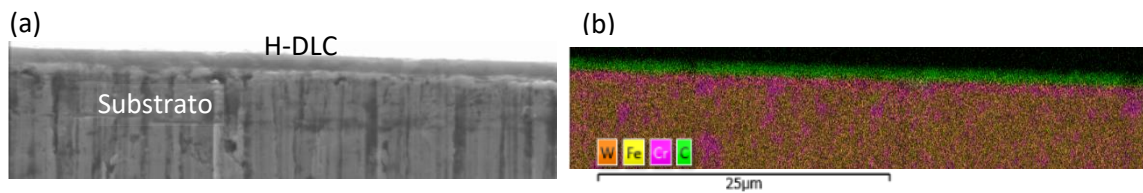


Figura 4.4 (a) Imagen de SEM del revestimiento sobre el acero AISI 5210. (b) Mapeo de la zona recubierta mostrando los elementos, obtenido por EDS



#### 4.2.2 Comportamiento tribológico en términos de fricción.

Antes de iniciar con el análisis de resultados principalmente en lo que se refiere a la respuesta del contacto entre el par tribológico acero/H-DLC en términos de las fuerzas friccionantes y su correspondiente discusión, es muy conveniente alojar una breve introducción que involucre precisamente el fundamento matemático para la determinación de los esfuerzos que se producen por el contacto de las superficies bajo estudio.

En una amplia variedad de problemas, las cargas varían con un modo “Hertziano” y el esfuerzo que se desarrolla sobre la superficie se le denomina esfuerzo de Hertz o Hertziano. Es mucho muy importante saber dónde ocurre el máximo esfuerzo Hertziano porque esta presión puede conducir al agrietamiento sub-superficial debido a la generación de esfuerzos sub-superficiales (por debajo de la superficie). En el caso del punto de contacto, una forma semi-elíptica de la distribución de presión se puede expresar por las relaciones siguientes y gráficamente se muestra en la Fig. 4.6:

$$p(r) = p_0 \sqrt{\frac{(1-r^2)}{a^2}} \text{-----}(0.1)$$

donde  $r^2 = x^2 + y^2$ ,  $a$  es el radio del círculo de contacto y  $p_0$  la presión máxima de contacto.

Si  $W$  es la carga total en el lugar de contacto, entonces

$$p_0 = \frac{3W}{2\pi a^2} \text{-----}(0.2)$$

Entonces la presión media es,  $p_m = \frac{W}{\pi a^2}$  y por lo tanto, en este caso,

$$p_m = \frac{2}{3} p_0 \text{-----}(0.3)$$

El radio de contacto está dado por:

$$a = \left( \frac{3WR}{4E^*} \right)^{\frac{1}{3}} \text{-----(0.4)}$$

donde  $\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}$  y R es el radio de curvatura en el extremo del perno. E\* es el módulo elástico

reducido y  $\nu$  es el módulo de Poisson.

Cuando se combina  $a$  en la expresión para la presión máxima  $p_o$ , se tiene:

$$p_o = \frac{1}{\pi} \left( \frac{6WE^{*2}}{R^2} \right)^{\frac{1}{3}} \text{(0.5)}$$

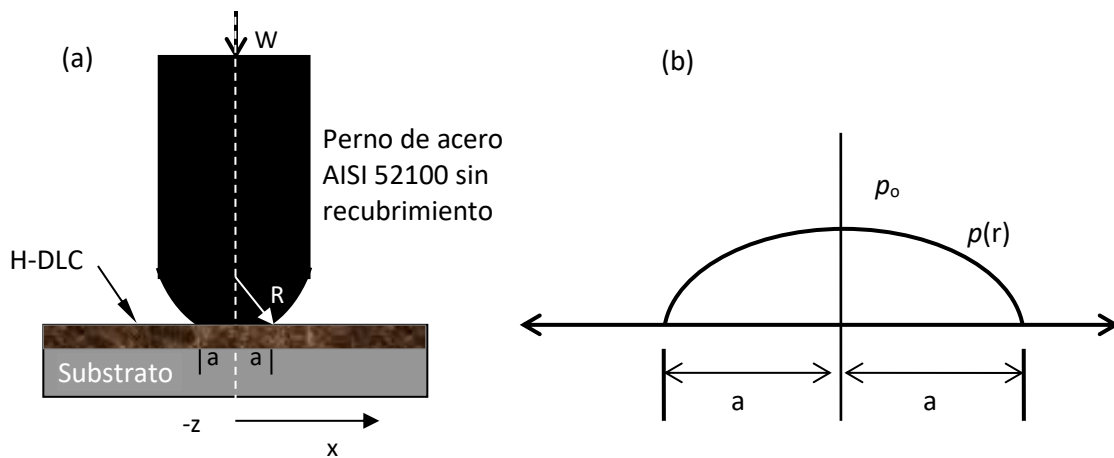


Figura 4.6 (a) Punto de contacto entre el perno y la superficie H-DLC y (b) distribución semi-elíptica de la presión.

En el presente trabajo, las cargas aplicadas ( $W$ 's) que se utilizan para determinar las presiones máximas que ejerce el perno ( $pin$ ) sobre la superficie del H-DLC bajo estudio se determinaron utilizando la relación (0.5). Los datos que se emplearon son:

$W = 10, 20, 30, 40$  y  $50$  N       $R = 110$  mm       $E_1 = 160000$  MPa       $E_2 = 180000$  MPa

$E_1$  y  $E_2$  son los módulos de Young del acero AISI 52100 y del H-DLC respectivamente [81]. Igualmente, tanto  $\nu_1$  como  $\nu_2$  son los módulos de Poisson para estos materiales.

Utilizando la expresión  $\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}$  se tiene que  $E^* = 9.253 \times 10^4$  MPa. Luego entonces, la presión

máxima se determina substituyendo los datos anteriores:

$$\text{La presión máxima para la carga de 10 N es } p_o = \frac{1}{\pi} \left( \frac{6WE^{*2}}{R^2} \right)^{\frac{1}{3}} = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{(6)(10)(9.253 \times 10^4)^2}{110} \right]^{\frac{1}{3}} = 111 \text{ MPa}$$

De lo anterior, las presiones máximas para las cargas de 20 a 50 N son:

$$P_o = 140, 160, 175, 190 \text{ MPa.}$$

Los esfuerzos superficiales dentro del círculo de contacto ( $r < a$ ) se pueden escribir como:

$$\frac{\sigma_r}{p_o} = \frac{1-2\gamma a^2}{r^2} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right) \right]^{3/2} - \left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{1/2}$$

$$\frac{\sigma_\theta}{p_o} = -\frac{1-2\gamma a^2}{r^2} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right) \right]^{3/2} - 2\gamma \left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{1/2} \text{-----(0.6)}$$

$$\frac{\sigma_z}{p_o} = -\left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{1/2}$$

Fuera del área de contacto ( $r > a$ ),

$$\frac{\sigma_r}{p_o} = -\frac{\sigma_\theta}{p_o} = \frac{(1-2\gamma)a^2}{3r^2} \text{-----(0.7)}$$

El esfuerzo circunferencial ( $\sigma_\theta$ ) es compresivo en todos lados, mientras que el esfuerzo radial ( $\sigma_r$ ) es compresivo en casi toda el área de contacto pero ténsil en todas parte por fuera de esta área. El valor máximo del esfuerzo ténsil es cuando  $r = a$ ,  $z = 0$ , lo que ocurre al borde del área de contacto.

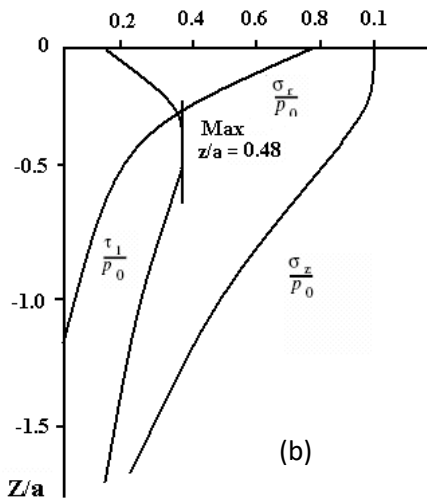
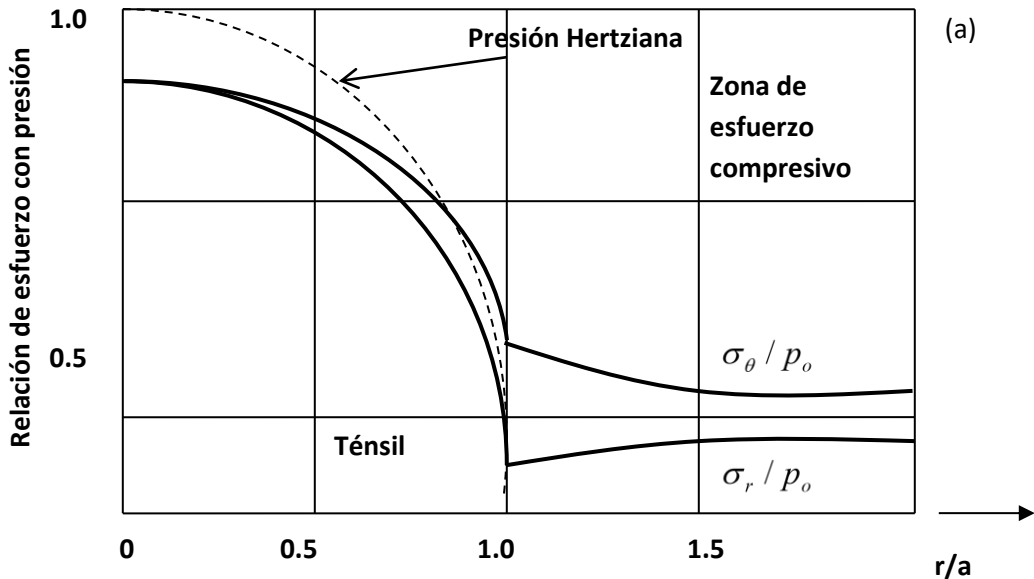
$$\sigma_{rmax} = \frac{(1-2\nu)}{3} p_0 \text{-----(0.8)}$$

Los esfuerzos por debajo de la superficie a lo largo del eje z son:

$$\sigma_r = \sigma_\theta = -(1+\nu)p_0 \left( 1 - \frac{z}{a} \arctan \frac{z}{a} \right) + \frac{1}{2} p_0 \left( 1 + \frac{z^2}{a^2} \right)^{-1}$$

$$\sigma_z = -p_0 \left( 1 + \frac{z^2}{a^2} \right)^{-1} \text{-----(0.9)}$$

$$\tau_1 = \frac{1}{2} |\sigma_z - \sigma_\theta|$$



Si se considera un  $\nu$  0.3, la distribución de esfuerzos sobre la superficie y sub-superficie están gráficamente representados en la Fig. 4.7.

Figura 4.7 Esfuerzos en el contacto elástico, (a) en la superficie, (b) sub-superficie a lo largo del eje de simetría con la profundidad [78].



En este estudio se realiza el análisis de la variación en el coeficiente de fricción (CoF) como una función de la distancia de deslizamiento bajo condiciones secas y con diferentes cargas. Al comienzo de la prueba (*running-in*), el CoF para cargas de 10 y 20 N se incrementó progresivamente con el incremento de la distancia de deslizamiento hasta que alcanzó un valor promedio superior de  $\mu_{10N} = 0.22$  y  $\mu_{20N} = 0.225$ , para luego descender ligeramente hasta que se alcanza aproximadamente una estabilidad con valores promedio de  $\mu_{10N} = 0.21$  y  $\mu_{20N} = 0.20$ , como se puede ver en la Fig. 4.8. El incremento inicial que se observa para el CoF se atribuye a la rugosidad que presenta la superficie revestida (Fig. 4.9 a ) y por tanto, al área de contacto reducida entre las interfaces (perno-H-DLC).

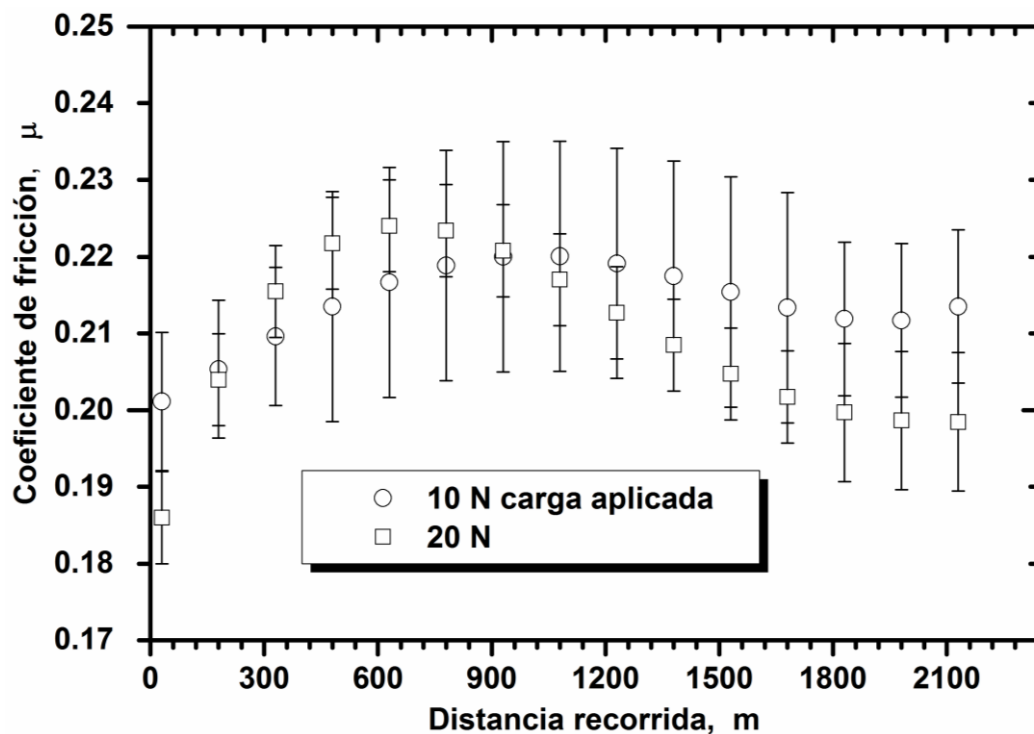
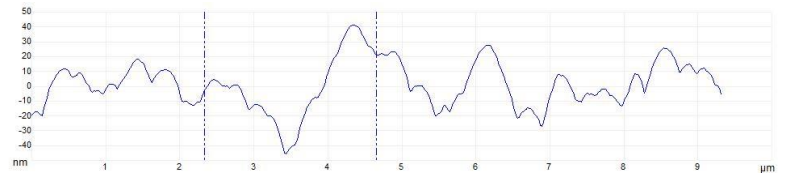
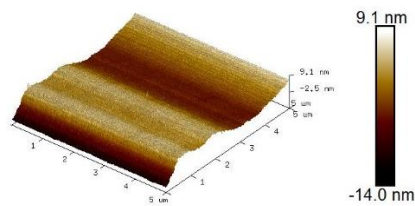
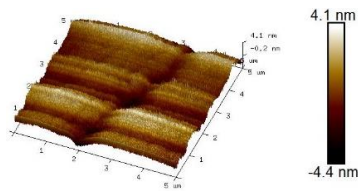
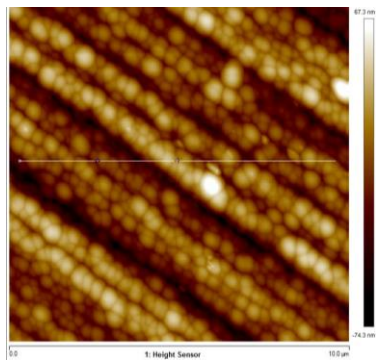
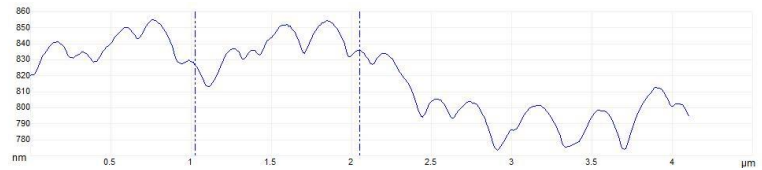


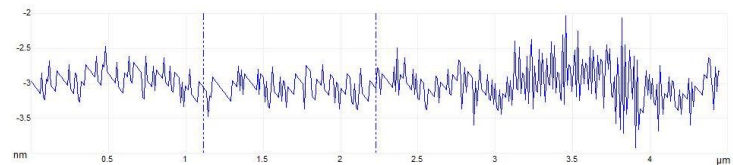
Figura 4.8 Evolución del CoF del perno (*pin*) de acero AISI 52100 sobre el acero recubierto con el revestimiento H-DLC sujeto a las cargas de 10 y 20 N en movimiento bidireccional con velocidad lineal de  $0.1 \text{ ms}^{-1}$ . Las barras de error son la desviación de tres repeticiones.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.9 Imágenes del H-DLC obtenidas por microscopía de fuerza atómica para (a) como se depositó, (b) área de 5 μm x 5 μm desgastada por el deslizamiento del perno con carga aplicada de 20N, y (c) área desgastada con carga de 50 N.

Debido al deslizamiento, las rugosidades superficiales se suavizan como resultado de los efectos plástico y elástico de las fuerzas friccionadas que actúan sobre el recubrimiento, el cual, a su vez, incrementa el área de contacto, que está fuertemente asociada con el CoF, específicamente por su apariencia y dureza superficial que corresponde a la resistencia por deformación del área de contacto

(matemáticamente expresado por la bien conocida relación  $\tau = \frac{F\mu}{A} \rightarrow H = \frac{F}{A}$ , donde A sería el área de

contacto real,  $\tau$  la resistencia al cortante de la unión en el contacto, F la carga normal aplicada y H la presión media sobre una aspereza o simplemente la dureza local del material). En cuanto continúa el

deslizamiento, la ligera tendencia hacia abajo del CoF se vincula, por un lado, a la baja magnitud de la carga normal aplicada, la cual produce una cierta cantidad de fricción inducida por calentamiento localizado y que funde las asperezas en el contacto, lo que puede generar lenta pero progresivamente una capa de transferencia amorfa capaz de contribuir en la reducción del CoF [82]. La rugosidad superficial al final del deslizamiento de una muestra seleccionada con carga de 20N se ilustra en la Fig. 4.6 (b). Por otro lado, la eliminación de los enlaces libres  $\sigma$  sobre la superficies deslizándose también determina los niveles de reducción en los valores de fricción. Aquí, el hidrógeno atómico y/o molecular dentro del recubrimiento (acomodado intersticialmente dentro de la estructura el H-DLC), se rellena continuamente y termina los enlaces  $\sigma$  que estuvieron expuestos por el contacto dinámico [83]. En contraste, las características friccionales correspondientes a cargas mayores, es decir, 30-50 N exhibieron una tendencia descendente en el CoF desde el inicio del deslizamiento, como se puede observar en la gráfica de la Fig. 4.10.

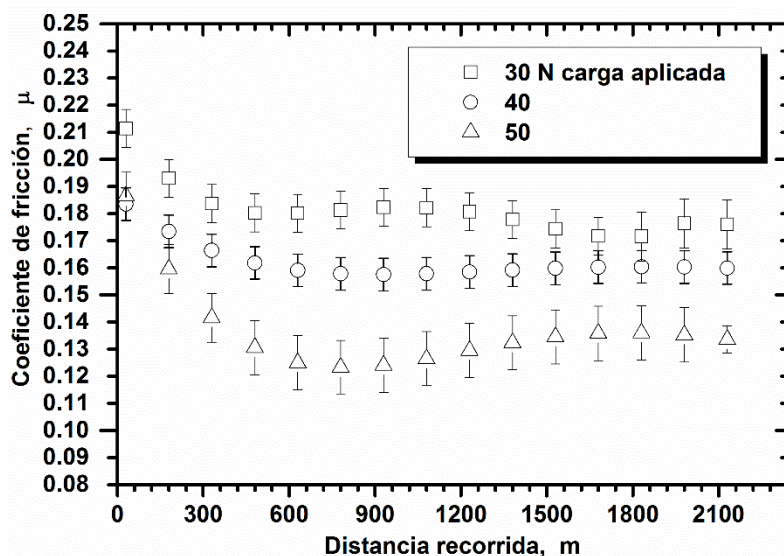


Figura 4.10 Dependencia de la fuerza aplicada con el CoF en el estado estable y su comparación con la etapa inicial (*running-in*), que no muestra correlación alguna.

Para las cargas de 30 a 50 N (160 a 190 MPa), la presión de contacto es más alta y la temperatura entre el perno y el recubrimiento se eleva debido a las fuerzas de empuje que son más grandes, y así, las asperezas rugosas se deforman plásticamente con doblez y estampados dando como resultado el desarrollo de una tribocapa lubrificada como si fuera grafito. Adicionalmente, cuando se aplican cargas más altas sobre la superficie del recubrimiento, se reporta en la literatura que el auto alineamiento de la tribocapa grafitizada/amorfizada y la pasivación efectiva de los enlaces sueltos por los átomos de hidrógeno y/o moléculas en el medio ambiente contribuye a la reducción del CoF [83-85]. En la Fig. 4.11 (c), se muestra la superficie desgastada al final del deslizamiento (después de 6h). Sin importar las diferencias en el inicio de la prueba tribológica, claramente se distingue que los niveles de fricción para un estado estable comienzan en el rango de los 1740-1800 m de tallado para todas las cargas.

El valor promedio máximo del CoF en el estado estable fue 0.21, cuando se aplicó una carga normal de 10 N (110 MPa) y un valor promedio mínimo de 0.13 se alcanzó para una carga normal de 50 N (190 MPa). Estos niveles de CoF están en concordancia con aquellos que se encuentran en la literatura [86] bajo condiciones de preparación y prueba similares. En comparación, otros estudios bajo condiciones similares [87, 88] mostraron valores en el estado estable en un rango de 0.25 a 0.6, los cuales son mucho más altos que los que se lograron en el presente estudio. Además, en [89] un recubrimiento H-DLC con una capa de adhesión de Cr se depositó sobre un elastómero vía pulverizado reactivo con magnetrones desbalanceados desde un blanco de WC en un plasma con  $C_2H_2/Ar$  y bajo condición de deslizamiento en seco contra un pin de acero AISI 52100. Su comportamiento tribológico en términos de CoF se extendió entre 0.2-0.25, lo que es comparable a los valores de CoF para las menores cargas en el presente trabajo. En general, el recubrimiento bajo análisis logró soportar la falla de película o delaminación y muy importante, el CoF presentó una dependencia con la fuerza (presión Hertziana aplicada) en la etapa estable.

Las zonas desgastadas de los contactos H-DLC/acero bajo condición seca fueron poco profundas para cada una de las presiones aplicadas, como se confirmó por el barrido de perfil de desgaste como puede verse en las huellas representativas que se presentan en la Fig. 4.11.

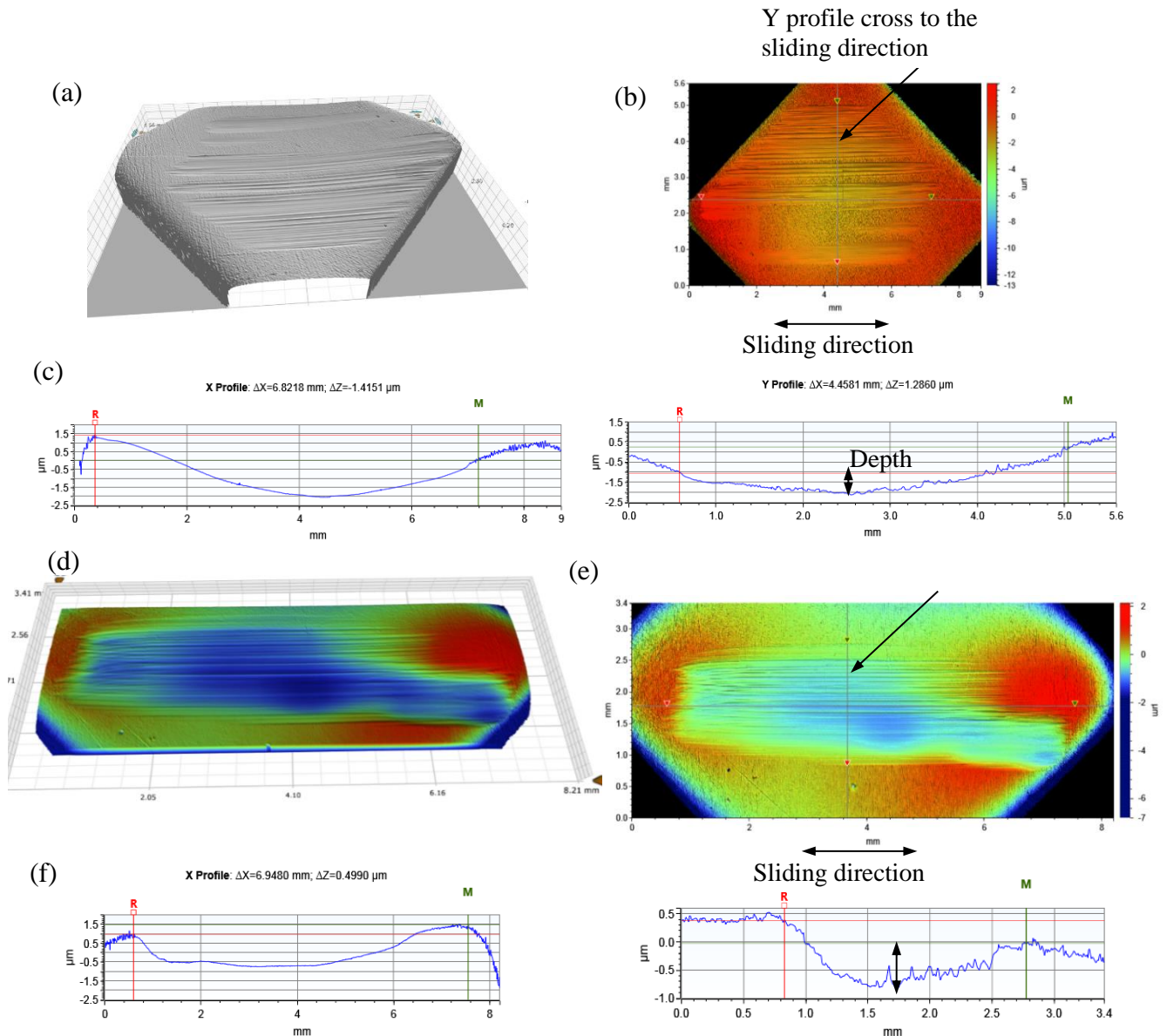


Figura 4.11 Huellas de deslizamiento representativas sobre las plaquitas recubiertas con H-DLC después de 2160 m de tallado. Se presentan las profundidades de las pistas desgastadas para para (a-c) 10 N y (d-f) 50 N. El equipo usado fue interferometría de luz blanca.

En este contexto, los máximos niveles de la profundidad de desgaste en la sección transversal de la dirección de deslizamiento de las huellas de deslizamiento, es decir, los perfiles Y que se pueden observar en la Fig. 4.11 (c, f) no excedieron los 1.5  $\mu\text{m}$ . Esta última observación mostró que la profundidad de penetración es más baja que el espesor del recubrimiento ( $\sim 3 \mu\text{m}$ ). También es notable de las gráficas tridimensionales de las huellas por desgaste en las placas que se muestran en la Fig. 4.11 (a y d), que a pesar de la aparente remoción de material como resultado de las fuerzas tangenciales que actúan directamente sobre la superficie del revestimiento, no hay ningún signo de generación de una fractura frágil aguda interfacial. Se puede establecer entonces, que el recubrimiento se deforma plásticamente y los residuos se doblan como corrugado en la pista de desgaste, y parte de estos residuos que se deformaron se transfieren a la contraparte (perno), como puede apreciarse en la gráfica de la Fig. 4.12. Para identificar la formación de tribocapa originada en la contraparte por dicha transferencia, se utilizó la espectroscopía Raman.

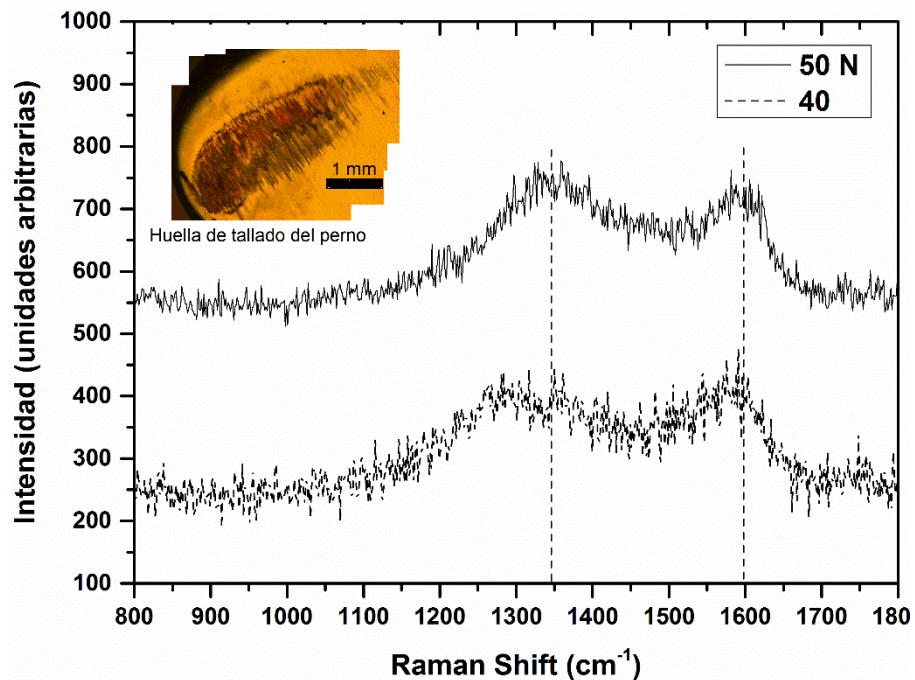


Figura 4.12 Espectroscopía de Raman sobre la huella sobre un pin de acero seleccionado después que deslizó por encima del H-DLC durante 6 h (2300 m) en aire ( $45 \pm 5$  % humedad relativa) y con velocidad lineal de  $0.1 \text{ m s}^{-1}$ . La fotografía embebida muestra la huella sobre el extremo contactante del perno para una carga aplicada de 40 N (175 MPa).

Los resultados anteriores concuerdan con los resultados de rayado, es decir, existe una deformación plástica que se forma en la huella como si fuera una ranura por el incremento continuo de la carga hasta una carga crítica un poco mayor que 80 N sin agrietamiento frágil o astillado interfacial. Aparentemente la ductilidad de la capa dúplex concedió una relajación efectiva de los esfuerzos residuales ( $< 1$  GPa como se mencionó en el capítulo 3) provocada por la capa de cromo, la cual de hecho, minimizó el agrietamiento superficial inducido y la fractura interfacial.

Como se esperaba, bajo condiciones secas, la estructura como grafito  $sp^2$  contribuyó a la transferencia de carbón de la película H-DLC hacia el perno de acero con la consecuente reducción en la adhesión y fricción debido al hecho de que el contacto fue carbón sobre carbón en vez de carbón sobre acero. Lo anterior se verificó, por la medición de la profundidad de la huella del H-DLC al concluir el período de deslizamiento. El revestimiento presentó carbón después del tallado y no existió transferencia de material desde el perno de acero al recubrimiento como se puede observar en la Fig. 4.13.

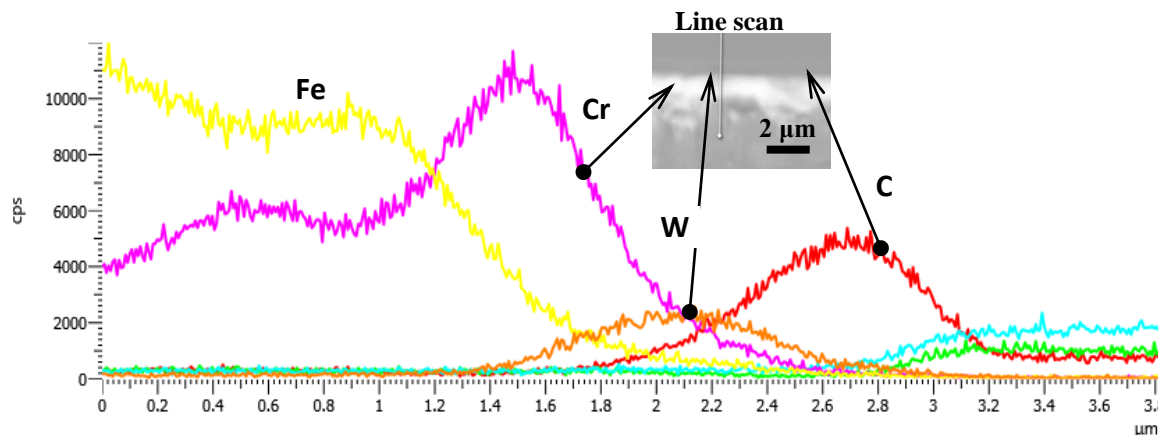


Figura 4.13 Perfil representativo de la composición química tomado en la región desgastada del revestimiento H-DLC después de la prueba de deslizamiento para una carga de 40 N.

La parte superior del H-DLC se desgastó parcialmente por aproximadamente  $0.6 \mu\text{m}$  de espesor con C y W en menor cantidad. La intercapa permaneció intacta para todas las cargas aplicadas.

# **CAPÍTULO 5**

## **CONCLUSIONES**

---



## 5.1 CONCLUSIONES.

Los resultados experimentales muestran particularidades de los recubrimientos en su comportamiento funcional, es decir, microestructural y mecánico. Se puede concluir al respecto lo siguiente:

- El procedimiento tecnológico para la deposición de los elementos que constituyeron la multicapa fue el *Plasma Enhance Chemical Vapor Deposition*, lo que permitió la generación de una capa consistente.
- El revestimiento depositado se caracterizó con el método Calotest, mediante el cual se confirmó un espesor de 2.5 a 3 micras de espesor, incluyendo los elementos Cr, WC y la capa carbonosa hidrogenada. Los esfuerzos residuales que se midieron a través de una oblea de Si arrojaron un máximo de 0.9 GPa.
- En la industria se reconoce que, para introducir un recubrimiento por deposición, este debe tolerar una carga de 50N sin que ocurra falla. El revestimiento que se investigó en esta tesis alcanzó una resistencia a la adhesión mayor a 80N sin falla crítica.
- Debido a que se presenta el fenómeno de transferencia de material gráfitico entre el perno con carga y la superficie recubierta, se forma una tribocapa en la interficie del perno, de acuerdo con los datos que arrojó el análisis Raman. Por la generación de la tribocapa, existe mayor deslizamiento en el contacto del tribopar y el coeficiente de fricción se reduce en la medida que se incrementa la carga normal.
- De acuerdo con el punto anterior, el coeficiente de fricción para la presión máxima de 100 MPa fue de 0.21, entre tanto, el coeficiente de fricción de 0.13 se presentó para una presión máxima de 190 MPa. Todo lo anterior, cuando se alcanzó una distancia de deslizamiento de más de 2 Km. Desde

luego, los valores de fricción son la funcionalidad del recubrimiento, ya que el acero 4140 sin recubrir arrojó un rango de coeficiente de fricción de 0.6 a 0.9.

- Como resultado de los experimentos de este trabajo de investigación, se puede concluir que el recubrimiento puede adaptarse para un gran número de aplicaciones ingenieriles, incluyendo la industria automotriz, la metalmecánica, la naval y aeronáutica.

## **5.2 RECOMENDACIONES.**

- El presente estudio se desarrolló para la condición seca en condiciones ambientales sin control. Está claro que los componentes ingenieriles trabajan bajo condiciones de lubricación, temperaturas por encima del ambiente. Por lo que, es muy recomendable continuar con la fase experimental que involucre pruebas de tribocorrosión y con lubricación a ciertas temperaturas.
- El estudio, aunque si se desarrolló para diferentes cargas o presiones normales, no se realizó con un rango apropiado de velocidades, por lo que, es recomendable realizar más pruebas donde se incluyan variaciones de velocidades unidireccionales y contrastar con velocidades reciprocantes, ya sea en seco, como lubricadas.

# REFERENCIAS

- [1] K. Holmberg and A. Matthews, *Coatings Tribology: Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering, 2nd. Ed.* Amsterdam, Boston: Elsevier Science, 2009.
- [2] D. K. Dwivedi, "Surface Engineering," in *Surface Engineering: Enhancing Life of Tribological Components*, D. K. Dwivedi, Ed. New Delhi: Springer India, 2018, pp. 1-16.
- [3] J. Robertson, "Diamond-like amorphous carbon," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 37, no. 4–6, pp. 129-281, 2002.
- [4] J. Robertson, "Comparison of diamond-like carbon to diamond for applications," *Phys. Status Solidi A*, vol. 205, no. 9, pp. 2233-2244, 2008.
- [5] A. Grill, "Diamond-like carbon: state of the art," *Diamond and Related Materials*, vol. 8, no. 2–5, pp. 428-434, 1999.
- [6] W. Q., Sharma, A. K., S. J., and N. J., "Mechanical properties of diamond-like carbon composite thin films prepared by pulsed laser deposition," *Composites. Part B, Engineering*, vol. 30, no. 7, pp. 675-684, 1999.
- [7] A. Erdemir, "The role of hydrogen in tribological properties of diamond-like carbon films," *Surface and Coatings Technology*, vol. 146–147, pp. 292-297, 2001.
- [8] Y. Lifshitz, "Hydrogen-free amorphous carbon films: correlation between growth conditions and properties," *Diamond and Related Materials*, vol. 5, no. 3–5, pp. 388-400, 1996.
- [9] J. Robertson, "Classification of Diamond-like Carbons," in *Tribology of Diamond-Like Carbon Films: Fundamentals and Applications*, C. Donnet and A. Erdemir, Eds. Boston, MA: Springer US, 2008, pp. 13-24.
- [10] R. Gåhlin, M. Larsson, and P. Hedenqvist, "ME-C:H coatings in motor vehicles," *Wear*, vol. 249, no. 3–4, pp. 302-309, 2001.
- [11] M. Kalin, E. Roman, L. Ožbolt, and J. Vižintin, "Metal-doped (Ti, WC) diamond-like-carbon coatings: Reactions with extreme-pressure oil additives under tribological and static conditions," *Thin Solid Films*, vol. 518, no. 15, pp. 4336-4344, 2010.
- [12] C. Donnet and A. Erdemir, *Tribology of Diamond-like Carbon Films: Fundamentals and Applications*. Springer, 2008.
- [13] J. Solis, H. Zhao, C. Wang, J. A. Verduzco, A. S. Bueno, and A. Neville, "Tribological performance of an H-DLC coating prepared by PECVD," *Applied Surface Science*, vol. 383, pp. 222-232, 2016/10/15/ 2016.
- [14] C. Donnet and A. Grill, "Friction control of diamond-like carbon coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. 94–95, pp. 456-462, 1997.
- [15] Y. Liu, A. Erdemir, and E. I. Meletis, "A study of the wear mechanism of diamond-like carbon films," *Surface and Coatings Technology*, vol. 82, no. 1–2, pp. 48-56, 1996.
- [16] J. L. Mo and M. H. Zhu, "Tribological investigation of WC/C coating under dry sliding conditions," *Wear*, vol. 271, no. 9–10, pp. 1998-2005, 2011.
- [17] M.-D. Jean, B.-T. Lin, and J.-H. Chou, "Design of a fuzzy logic approach for optimization reinforced zirconia depositions using plasma sprayings," *Surface and Coatings Technology*, vol. 201, no. 6, pp. 3129-3138, 2006/12/04/ 2006.
- [18] C. T. Lin and C. S. Lee, *Neural fuzzy system: a neural-fuzzy synergism to intelligent systems*. Prentice Hall, Simon & Schuster, 1996.
- [19] Y.-S. Yang and W. Huang, "A grey-fuzzy Taguchi approach for optimizing multi-objective properties of zirconium-containing diamond-like carbon coatings," *Expert Systems with Applications*, vol. 39, no. 1, pp. 743-750, 2012/01/01/ 2012.
- [20] J.-g. Zhai, Y.-q. Wang, T.-g. Kim, and J.-i. Song, "Finite element and experimental analysis of Vickers indentation testing on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with diamond-like carbon coating," *Journal of Central South University*, vol. 19, no. 5, pp. 1175-1181, 2012.
- [21] P. Villiger, C. Sprecher, and J. A. Peters, "Parameter optimisation of Ti-DLC coatings using statistically based methods," *Surface and Coatings Technology*, vol. 116–119, pp. 585-590, 1999.
- [22] O. A. Gómez-Vargas, J. Solis-Romero, U. Figueroa-López, M. Ortiz-Domínguez, J. Oseguera-Peña, and A. Neville, "Boro-nitriding coating on pure iron by powder-pack boriding and nitriding processes," *Materials Letters*, vol. 176, pp. 261-264, 2016.

- [23] M. Ortiz-Domínguez *et al.*, "Modeling of the Growth Kinetics of Boride Layers in Powder-Pack Borided ASTM A36 Steel Based on Two Different Approaches," (in English), *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2019, p. 12, 2019 2019.
- [24] I. Campos, M. Islas, E. González, P. Ponce, and G. Ramírez, "Use of fuzzy logic for modeling the growth of Fe<sub>2</sub>B boride layers during boronizing," *Surface and Coatings Technology*, vol. 201, no. 6, pp. 2717-2723, 2006.
- [25] T. P. Singh and V. S. Jatti, "Optimization of the Deposition Parameters of DLC Coatings with the IC-PECVD Method," *Particulate Science and Technology*, vol. 33, no. 2, pp. 119-123, 2015/03/04 2015.
- [26] A. Czyniewski, "Optimising deposition parameters of W-DLC coatings for tool materials of high speed steel and cemented carbide," *Vacuum*, vol. 86, no. 12, pp. 2140-2147, 2012/07/20/ 2012.
- [27] H.-C. Liao, "A data envelopment analysis method for optimizing multi-response problem with censored data in the Taguchi method," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 46, no. 4, pp. 817-835, 2004/07/01/ 2004.
- [28] W. Y. Fowlkes and C. M. Creveling, "Engineering Methods for Robust Product Design: Using Taguchi Methods in Technology and Product Development," 1995.
- [29] B. Y. Lee and Y. S. Tarng, "Cutting-parameter selection for maximizing production rate or minimizing production cost in multistage turning operations," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 105, no. 1, pp. 61-66, 2000/09/07/ 2000.
- [30] J. Zhou, J. Ren, and C. Yao, "Multi-objective optimization of multi-axis ball-end milling Inconel 718 via grey relational analysis coupled with RBF neural network and PSO algorithm," *Measurement*, vol. 102, pp. 271-285, 2017/05/01/ 2017.
- [31] S. N. Sahu, S. K. Murmu, and N. C. Nayak, "Multi-objective Optimization of EDM Process with Performance Appraisal of GA based Algorithms in Neural Network Environment," *Materials Today: Proceedings*, vol. 18, pp. 3982-3997, 2019/01/01/ 2019.
- [32] G. Khalaj and M.-J. Khalaj, "Application of ANFIS for modeling of layer thickness of chromium carbonitride coating," *Neural Computing and Applications*, vol. 24, no. 3, pp. 685-694, 2014/03/01 2014.
- [33] METALS HANDBOOK 9th, "Friction, Lubrication and Wear Technology," ed: Ed. American Society for Metals International, vol. 18, 1992.
- [34] ASM International Handbook Committee, "ASM Handbook, Volume 05-Surface Engineering." ASM International, 1994, p.^pp. Pages.
- [35] A. A. Voevodin, S. D. WalckandJ. S. Zabinski, "Architecture of multilayer nanocomposite coatings with super-hard diamond-like carbon layers for wear protection at high contact loads", *Wear*, vol. 203–204, pp. 516-527, 1997. [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648\(96\)07425-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648(96)07425-X).
- [36] Feng Shi, "Introductory Chapter: Basic Theory of Magnetron Sputtering," ed: IntechOpen, 2018.
- [37] A. Barranco, J. Cotrino, F. YuberoandA. R. González-Elipe, "Polymeric Sacrificial Layers for the Control of Microstructure and Porosity of Oxide Thin Films Deposited by Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition", *Chemistry of Materials*, vol. 15, no. 16, pp. 3041-3043, 2003. 10.1021/cm034023z.
- [38] L. Zambov, A. Zambova, M. CabassiandT.S. Mayer, "Template-Directed CVD of Dielectric Nanotubes", *Chemical Vapor Deposition*, vol. 9, no. 1, pp. 26-33, 2003. <https://doi.org/10.1002/cvde.200290003>.
- [39] Ana Borrás, Juan R. Sanchez-Valencia, Roland Widmer, Victor J. Rico, Angel JustoandAgustin R. Gonzalez-Elipe, "Growth of Crystalline TiO<sub>2</sub> by Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition", *Crystal Growth & Design*, vol. 9, no. 6, pp. 2868-2876, 2009. 10.1021/cg9001779.
- [40] E. Hyman, K. Tsang, I. Lottati, A. Drobot, B. Lane, R. Post *et al.*, "Plasma enhanced chemical vapor deposition modeling", *Surface and Coatings Technology*, vol. 49, no. 1, pp. 387-393, 1991. [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(91\)90088-E](https://doi.org/10.1016/0257-8972(91)90088-E).
- [41] Amélie Perraudeau, Christelle Dublanche-Tixier, Pascal TristantandChristophe Chazelas, "Dynamic mode optimization for the deposition of homogeneous TiO<sub>2</sub> thin film by atmospheric pressure

- PECVD using a microwave plasma torch", *Applied Surface Science*, vol. 493, pp. 703-709, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.07.057>.
- [42] Kasap S. Gould R.D., Ray A.K., "Thin Films. Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials," Springer Handbooks, 2017. [Online]. Available.
- [43] A. C. Adams, "Dielectric and polysilicon film deposition.," in *VLSI Technology*, S. M. Sze, Ed. New York: McGraw–Hill, 1988.
- [44] Ali Erdemir and Christophe Donnet, "Tribology of diamond-like carbon films: recent progress and future prospects", *Journal of physics. D, Applied physics*, vol. 39, no. 18, pp. R311-R327, 2006. 10.1088/0022-3727/39/18/R01.
- [45] Ali Erdemir, "Genesis of superlow friction and wear in diamondlike carbon films", *Tribology International*, vol. 37, no. 11–12, pp. 1005-1012, 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2004.07.018>.
- [46] J. Robertson, "Diamond-like amorphous carbon", *Materials science & engineering. R, Reports : a review journal*, vol. 37, no. 4-6, pp. 127-281, 2002.
- [47] Rickard Gåhlin, Mats Larsson and Per Hedenqvist, "ME-C:H coatings in motor vehicles", *Wear*, vol. 249, pp. 302-309, 2001. 10.1016/S0043-1648(01)00565-8.
- [48] Rickard Gåhlin, Mats Larsson and Per Hedenqvist, "ME-C:H coatings in motor vehicles", *Wear*, vol. 249, no. 3–4, pp. 302-309, 2001. [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00565-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00565-8).
- [49] C. Donnet and A. Grill, "Friction control of diamond-like carbon coatings", *Surface and Coatings Technology*, vol. 94-95, pp. 456-462, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(97\)00275-2](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(97)00275-2).
- [50] S. Chowdhury, M. T. Laugier and I. Z. Rahman, "Effects of substrate temperature on bonding structure and mechanical properties of amorphous carbon films", *Thin Solid Films*, vol. 447-448, pp. 174-180, 2004. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(03\)01076-9](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(03)01076-9).
- [51] F. Gao, A. Erdemir and W. T. Tysoe, "The Tribological Properties of Low-friction Hydrogenated Diamond-like Carbon Measured in Ultrahigh Vacuum", *Tribology Letters*, vol. 20, no. 3, pp. 221-227, 2005. 10.1007/s11249-005-8549-7.
- [52] J. R. Davis, Davis Jr and Inc Books 24x, "Surface hardening of steels: understanding the basics," 1st ed. Materials Park: ASM International, 2002. isbn 9780871707642; 0871707640; U6 - ctx\_ver=Z39.88-2004&ctx\_enc=info%3Aofi%2Fenc%3AUTF-8&rft\_id=info%3Aid%2Fsummon.serialssolutions.com&rft\_val\_fmt=info%3Aofi%2Ffmt%3Akev%3Amtx%3Abook&rft.genre=book&rft.title=Surface+Hardening+of+Steels&rft.au=Davis%2C+J.+R.&rft.au=Davis+JR&rft.date=2002-01-01&rft.pub=A+S+M+International&rft.isbn=9780871707642&rft.externalDocID=EBC3002329&paramdict=en-US U7 - eBook.
- [53] M. Ortiz-Domínguez, O. A. Gómez-Vargas, G. Ares de Parga, G. Torres-Santiago, R. Velázquez-Mancilla, V. A. Castellanos-Escamilla *et al.*, "Modeling of the Growth Kinetics of Boride Layers in Powder-Pack Borided ASTM A36 Steel Based on Two Different Approaches", *Advances in materials science and engineering*, vol. 2019, pp. 1-12, 2019. 10.1155/2019/5985617.
- [54] M. Ortiz-Domínguez, O. Gómez-Vargas, Gonzalo Ares de Parga, G. Torres-Santiago, R. Velázquez-Mancilla, V. Castellanos-Escamilla *et al.*, "Modeling of the Growth Kinetics of Boride Layers in Powder-Pack Borided ASTM A36 Steel Based on Two Different Approaches", *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2019, pp. 1-12, 2019. 10.1155/2019/5985617.
- [55] ASMI, "Phase of Diagram," in *ASM Handbook* vol. 3, A. S. f. M. International, Ed., First ed. OHIO, USA, 1992.
- [56] C. M. Brakman, A. W. J. Gommers and E. J. Mittemeijer, "Boriding of Fe and Fe–C, Fe–Cr, and Fe–Ni alloys; Boride-layer growth kinetics", *Journal of Materials Research*, vol. 4, no. 6, pp. 1354-1370, 1989. 10.1557/JMR.1989.1354.

- [57] Adolf Fick, "Ueber Diffusion", *Annalen der Physik*, vol. 170, no. 1, pp. 59-86, 1855. <https://doi.org/10.1002/andp.18551700105>.
- [58] Kenneth Holmberg, Allan Matthews and Helena Ronkainen, "Coatings tribology—contact mechanisms and surface design", *Tribology international*, vol. 31, no. 1, pp. 107-120, 1998. 10.1016/S0301-679X(98)00013-9.
- [59] Gutiérrez Pulido Humberto and De La Vara Salazar Román, "Análisis y Diseño de Experimentos," McGraw-Hill Interamericana de España, 2012. isbn
- [60] Gen'ichi Taguchi, Elsayed A Elsayed and Thomas C Hsiang, "Quality engineering in production systems," McGraw-Hill College, 1989. isbn 0070628300.
- [61] J.L. Deng, "Introduction to grey system theory", *The Journal of Grey System*, vol. 1, no. 1, pp. 1-24, 1989.
- [62] Arkadeb Mukhopadhyay, Santanu Duari, Tapan Kr Barman and Prasanta Sahoo, "APPLICATION OF GREY FUZZY LOGIC FOR THE OPTIMIZATION OF TRIBOLOGICAL PERFORMANCE OF ELECTROLESS NI-B COATING", *Journal of manufacturing technology research*, vol. 7, no. 1/2, p. 1, 2015.
- [63] L Zadeth, "Fuzzy sets", *Information and Control*, vol. 8, no. 4, pp. 338-353, 1965. 10.2307/2272014.
- [64] Mathworks, "Fuzzy-inference-system," in <https://la.mathworks.com/help/fuzzy/fuzzy-inference-process.html>, Mathworks, Ed., ed, 2018.
- [65] B. Kosko, "Fuzzy systems as universal approximators", *IEEE transactions on computers*, vol. 43, no. 11, pp. 1329-1333, 1994. 10.1109/12.324566.
- [66] Mamdani, "Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis", *IEEE transactions on computers*, vol. C-26, no. 12, pp. 1182-1191, 1977. 10.1109/TC.1977.1674779.
- [67] Alicia Guadalupe Lazcano Herrera, Sandra Aguilar, José Romero, Héctor Rafael Orozco Aguirre and Víctor Escamilla, "Aplicación de lógica difusa en el proceso de shot peening del aluminio 2024-T351", *Research in Computing Science*, vol. 147, pp. 285-298, 2018. 10.13053/rcs-147-6-21.
- [68] P. Ponce Cruz, "Inteligencia artificial con aplicaciones a la ingeniería," Alfaomega Grupo Editor S.A de C.V., 2010. isbn
- [69] G. Pajares Martisan and M. Santos Peñas, "Inteligencia Artificial e Ingeniería del conocimiento," Alfaomega española, 2006. isbn
- [70] Michio Sugeno, "Industrial applications of fuzzy control," Amsterdam; New York; New York, N.Y., U.S.A.: North-Holland ; Sole distributors for the U.S.A. and Canada, Elsevier Science Pub. Co., 1985. isbn 0444878297 9780444878298.
- [71] Rajesh Singh, V. Vishal, T. N. Singh and P. G. Ranjith, "A comparative study of generalized regression neural network approach and adaptive neuro-fuzzy inference systems for prediction of unconfined compressive strength of rocks", *Neural computing & applications*, vol. 23, no. 2, pp. 499-506, 2013. 10.1007/s00521-012-0944-z.
- [72]. 9th, M.H., *Friction, Lubrication and Wear Technology*. 1992, Ed. American Society for Metals International, vol. 18.
- [73]. Gerald, S.G., *The Tension of Metallic Films Deposited by Electrolysis*. Proceedings of the Royal Society London A., 1909. **82**(553): p. 172-5.
- [74]. Strondl, C., et al., *Influence of energetic ion bombardment on W-C:H coatings deposited with W and WC targets*. Surface and Coatings Technology, 2005. **200**(1-4): p. 1142-1146.
- [75]. Wänstrand, O., M. Larsson, and P. Hedenqvist, *Mechanical and tribological evaluation of PVD WC/C coatings*. Surface and Coatings Technology, 1999. **111**(2-3): p. 247-254.
- [76]. Zhang, T.H. and Y. Huan, *Nanoindentation and nanoscratch behaviors of DLC coatings on different steel substrates*. Composites Science and Technology, 2005. **65**(9): p. 1409-1413.

- [77]. Johansson, S., et al., *Experimental friction evaluation of cylinder liner/piston ring contact*. *Wear*, 2011. **271**(3–4): p. 625-633.
- [78]. Williams, J.A., *Engineering tribology*. Oxford University Press. 1994, Oxford, U.K.
- [79]. ASTM, *ASTM G171-03(2009)e2, Standard Test Method for Scratch Hardness of Materials Using a Diamond Stylus*. 2009, ASTM International: West Conshohocken, PA,.
- [80]. Buijnsters, J.G., et al., *Adhesion analysis of polycrystalline diamond films on molybdenum by means of scratch, indentation and sand abrasion testing*. *Thin Solid Films*, 2005. **474**(1–2): p. 186-196.
- [81]. Wei, Q., et al., *Mechanical properties of diamond-like carbon composite thin films prepared by pulsed laser deposition*. *Composites Part B: Engineering*, 1999. **30**(7): p. 675-684.
- [82]. Liu, Y., A. Erdemir, and E.I. Meletis, *An investigation of the relationship between graphitization and frictional behavior of DLC coatings*. *Surface and Coatings Technology*, 1996. **86–87, Part 2**: p. 564-568.
- [83]. Erdemir, A., *The role of hydrogen in tribological properties of diamond-like carbon films*. *Surface and Coatings Technology*, 2001. **146–147**: p. 292-297.
- [84]. Lin, J.F., et al., *Effect of nitrogen content at coating film and film thickness on nanohardness and Young's modulus of hydrogenated carbon films*. *Diamond and Related Materials*, 2004. **13**(1): p. 42-53.
- [85]. Liu, Y., A. Erdemir, and E.I. Meletis, *A study of the wear mechanism of diamond-like carbon films*. *Surface and Coatings Technology*, 1996. **82**(1–2): p. 48-56.
- [86]. Kim, D.-W. and K.-W. Kim, *Effects of sliding velocity and normal load on friction and wear characteristics of multi-layered diamond-like carbon (DLC) coating prepared by reactive sputtering*. *Wear*, 2013. **297**(1–2): p. 722-730.
- [87]. Vengudusamy, B., A. Grafl, and K. Preinfalk, *Tribological properties of hydrogenated amorphous carbon under dry and lubricated conditions*. *Diamond and Related Materials*, 2014. **41**(0): p. 53-64.
- [88]. Wänstrand, O., M. Larsson, and P. Hedenqvist, *Mechanical and tribological evaluation of PVD WC/C coatings*. *Surface and Coatings Technology*, 1999. **111**(2–3): p. 247-254.
- [89]. Pei, Y.T., et al., *Tribological behavior of W-DLC coated rubber seals*. *Surface and Coatings Technology*, 2008. **202**(9): p. 1869-1875