



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO  
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA  
**DOCTORADO EN CIENCIAS DE LOS MATERIALES**

**TESIS**

**CARACTERIZACIÓN TRIBOLÓGICA Y ESTRUCTURAL DE UNA  
FUNDICIÓN GRIS UTILIZADA EN CAMISAS DE CILINDRO**

Para obtener el grado de  
Doctor en Ciencias de los Materiales

**PRESENTA**

M. en C. Francisco Germán Mejía Hernández

**Director**

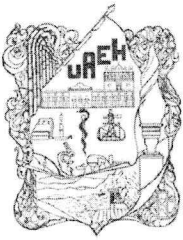
Dr. Màrius Ramírez Cardona

**Codirector**

Dr. Gilgamesh Luis Raya

**Comité tutorial**

Mineral de la Reforma, Hgo., México, junio 2023



Mineral de la Reforma, Hgo., a 15 de junio de 2023

**Número de control:** ICBI-D/741/2023  
**Asunto:** Autorización de impresión.

**MTRA. OJUKY DEL ROCIO ISLAS MALDONADO**  
**DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH**

El Comité Tutorial de la tesis titulada “**Caracterización tribológica y estructural de una fundición gris utilizada en camisas de cilindro**” realizado por el sustentante **Francisco Germán Mejía Hernández** con **número de cuenta 349488** perteneciente al programa de **Doctorado en Ciencias de los Materiales (tradicional)**, una vez que ha revisado, analizado y evaluado el documento recepcional de acuerdo a lo estipulado en el Artículo 110 del Reglamento de Estudios de Posgrado, tiene a bien extender la presente:

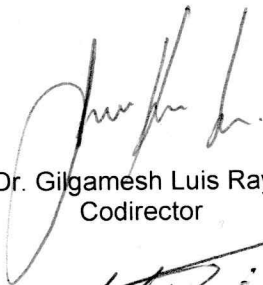
### AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Por lo que el sustentante deberá cumplir los requisitos del Reglamento de Estudios de Posgrado y con lo establecido en el proceso de grado vigente.

Atentamente  
“Amor, Orden y Progreso”

El Comité Tutorial

  
Dr. Marius Ramírez Cardona  
Directora de tesis

  
Dr. Gilgamesh Luis Raya  
Codirector

  
Dr. Edgar Cardoso Legorreta  
Titular

  
Dr. Martín Reyes Pérez  
Suplente

  
Dr. Otilio Arturo Acevedo Sandoval  
Director del ICBI

OAAS/IBO

Ciudad del Conocimiento  
Carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5 Colonia  
Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo,  
México. C.P. 42184  
Teléfono: 771 71 720 00 ext. 2231 Fax 2109  
direccion\_icbi@uaeh.edu.mx

Este trabajo fue realizado en las instalaciones de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, en el Laboratorio de Análisis de Materiales del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales bajo la asesoría del Dr. Màrius Ramàrez Cardona, Dr. Edgar Cardoso Legorreta, Dr. Martìn Reyes Pèrez y en las instalaciones del Àrea de Ingenierìa Mecànica Automotriz de la Universidad Politècnica de Pachuca bajo la asesorìa del Dr. Gilgamesh Luis Raya y el Dr. Armando Irvin Martìnez Pèrez.

## DEDICATORIA

A mis padres por acompañarme en todo momento, a mis hermanos y familiares por creer en mí.

A mi esposa y mis hijos por ser la motivación más grande de crecer día a día.

## AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi máximo agradecimiento a todas las personas que han hecho posible la realización de este trabajo.

Quiero agradecer al doctor Màrius por darme la oportunidad de llevar a cabo este proyecto, por el tiempo empleado y por la ayuda recibida desde el inicio hasta el final.

Agradezco al doctor Gilgamesh y al doctor Armando Irvin por su tiempo y dedicación. Al doctor Edgar Cardoso, al doctor Edgar Vera y al doctor Martín por sus explicaciones y conocimientos y por seguirme y aconsejarme. Gracias a todos mis compañeros de generación y de laboratorio por su apoyo y contribuciones. Y gracias a todos mis profesores por su excelente compromiso para formar mi desarrollo académico.

También agradezco a los laboratorios en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo en Ciudad del conocimiento y campus Apan, en la Universidad Politécnica de Pachuca, en el Centro de Investigación CICATA Querétaro y campus Legaria, en Gerdau Corsa México y en el Instituto Tecnológico de Pachuca por su valioso apoyo.

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACyT por la beca otorgada para manutención.

Para poder finalizar este proyecto fue necesaria también la ayuda incondicional de familiares y amigos, por lo que les agradezco mucho su comprensión y apoyo.

Gracias.

## RESUMEN

El estudio de piezas sujetas a desgaste es parte fundamental para el desarrollo de máquinas y para la búsqueda continua para mantener los sistemas en condiciones adecuadas para su funcionamiento, aumentando la vida útil de las piezas sin que disminuya la productividad. El desarrollo de materiales para aplicación en los motores de combustión interna precisa del estudio y la caracterización de la superficie sometida a desgaste. La utilización de los motores de combustión interna es muy amplia, como ejemplo: automóviles, motocicletas, motosierras, ferrocarriles, embarcaciones, también muy usado en aviación y en la minería y en la generación de energía eléctrica, lo que hace interesante el estudio tribológico de las camisas de los cilindros. En el presente trabajo se llevó a cabo la caracterización tribológica y estructural de una fundición gris; material usado comercialmente en los revestimientos de cilindros. Se usaron las técnicas XRD, espectroscopía de chispa, EDS, microscopía óptica, SEM, y perfilometría, analizando el fenómeno que se presenta al someter a desgaste el material, usando para tal propósito, una máquina reciprocante de desplazamiento lineal diseñada en la Universidad Politécnica de Pachuca. Se propuso realizar un tratamiento térmico para mejorar las propiedades del material obteniendo resultados interesantes para el desempeño del material en condiciones de desgaste.

## LISTA DE ACRÓNIMOS Y SIMBOLOGÍA

CFP	Fundición Ferrítica-Perlítica; por sus siglas en inglés: <i>Cast-Ferrite-Pearlite</i>
CFP-TT	Fundición Ferrítica-Perlítica con Tratamiento Térmico
CFP-L	Fundición Ferrítica-Perlítica con Lubricante
CFP-TT-L	Fundición Ferrítica-Perlítica con Tratamiento Térmico y Lubricante
ADI	Fundición Nodular Austemperada – Austempered Ductile Iron
FB	Fundición Blanca
FH	Fundición de Hierro
$\alpha$	Ferrita
$\gamma$	Austenita
Fe <sub>3</sub> C, M <sub>3</sub> C	Cementita
GL	Grafito Libre
Ms	Temperatura de inicio de transformación Martensítica FG
FN	Fundición Nodular
CE	Carbono Equivalente
CN	Conteo Nodular
FV	Fundición Vermicular
FNA	Fundición Nodular Atruchada
C <sub>0</sub>	Contenido de soluto de la aleación
C <sub>S</sub>	Contenido de soluto en el sólido
C <sub>L</sub>	Contenido de soluto en el Líquido
k	Coefficiente de partición de soluto
LTF	Ultimas porciones en solidificar – last to freeze
TEE	Temperatura del Eutéctico Estable
TEM	Temperatura del Eutéctico Metaestable Ty
t <sub>y</sub>	Tiempo de austenizado
T <sub>a</sub>	Temperatura de austemperado
t <sub>a</sub>	Tiempo de austemperado
fab	Factor fab o Grado de Desgaste CR
p <sub>0</sub>	Presión máxima de contacto ideal de Hertz P
a	Semi amplitud de contacto ideal de Hertz EHD
$\lambda$	Coefficiente de espesor de Película Lubricante
h <sub>0</sub>	Espesor mínimo de película lubricante
RC	Rugosidad compuesta
$\mu$	Coefficiente de fricción
K	Coefficiente de desgaste adimensional

H	Dureza de la superficie más blanda
k	Coeficiente de desgaste dimensional TN
IC	Intervalo de Confiabilidad
TD	Tasa de Desgaste
TDC	Tasa de Desgaste de la Contramuestra EI, EII, EIII, EIV
TDP	Tasa de desgaste promedio
TDi	Tasa de desgaste asociada a la etapa i



## CONTENIDO

CONTENIDO .....	6
ÍNDICE DE FIGURAS .....	8
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>10</b>
<b>JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS.....</b>	<b>11</b>
Justificación .....	11
Objetivos .....	12
<b>CAPITULO 1: MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>13</b>
1.1 Fundición gris .....	13
1.2 Tribología.....	23
1.2.1 Mecanismos de desgaste .....	25
1.3 Disposición de componentes en el bloque del motor de combustión interna .....	29
1.3.1 Sistema pistón-anillos-camisas.....	34
1.4 Tratamiento térmico .....	35
<b>CAPITULO 2: ANTECEDENTES .....</b>	<b>36</b>
2.1 Antecedentes.....	36
<b>CAPITULO 3: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>40</b>
3.1 Preparación de muestras para pruebas tribológicas y caracterización estructural .....	40
3.2 Rugosidad y dureza .....	46
3.3 Estructura (DRX) .....	49
3.4 Microestructura (MEB, MO) .....	49
3.5 Pruebas tribológicas.....	50
3.6 Perfilometría, MEB y MO .....	51
3.7 Tratamiento térmico .....	53
3.8 Caracterización de muestras .....	55
3.9 INSTRUMENTOS Y MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN.....	56
3.9.1. Caracterización química.....	56
3.9.2. Caracterización estructural .....	56
3.9.3. Caracterización tribológica.....	56
3.9.4. Caracterización de la superficie con desgaste .....	58
3.5.3. Tratamiento térmico .....	59

<b>CAPITULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>60</b>
4.1 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA .....	60
4.1.1. ESPECTROSCOPIA DE EMISIÓN ATÓMICA POR DESCARGA ELECTROSTÁTICA .....	60
4.1.2 EDS CON MAPEO ELEMENTAL .....	61
4.2 RUGOSIDAD Y DUREZA .....	63
4.2.1. Rugosidad (perfilometría).....	63
4.2.2. Dureza Vickers .....	64
4.2.3. Dureza Rockwell.....	64
4.3 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL .....	66
4.4 TRATAMIENTO TÉRMICO .....	73
4.5 CARACTERIZACIÓN TRIBOLÓGICA .....	75
<b>CAPITULO 5: CONCLUSIONES.....</b>	<b>81</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>82</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>90</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de grafito laminar y distribución.....	14
Figura 2. Micrografía de una probeta de fundición gris a 500 aumentos.....	15
Figura 3. Diagrama de Maurer.....	18
Figura 4. Área real de contacto entre dos superficies.....	24
Figura 5. Cuerpo estacionario.....	25
Figura 6. Adhesión durante el deslizamiento de dos superficies en contacto.....	26
Figura 7. Deformación durante el deslizamiento de dos superficies en contacto.....	26
Figura 8. Ejemplificación de movimiento de partículas abrasivas.....	27
Figura 9. Ejemplificación de desgaste por fatiga.....	27
Figura 10. Desgaste por impacto.....	28
Figura 11. Bloque integral.....	30
Figura 12. Tipos de camisas del bloque.....	31
Figura 13. Camisas secas.....	32
Figura 14. Vista de una camisa húmeda.....	32
Figura 15. Ensamble de bloque con camisas húmedas.....	33
Figura 16: Camisa C-166-X070, SKU: CA-C166X070, Marca:SPQ..	40
Figura 17: Camisa C-182-X070, SKU: CA-C182X070, Marca: SPQ	41
Figura 18. Corte de camisas.....	42
Figura 19. Cortadora metalográfica.....	42
Figura 20. Montadora.....	43
Figura 21. Muestra montada en baquelita.....	44
Figura 22. Lijadora METKON.....	44
Figura 23. Pulidora Buehler.....	45
Figura 24. Perfilómetro Mitutoyo.....	46
Figura 25. Ensayo de dureza con microdurómetro de fuerza Vickers.....	47
Figura 26. Durómetro Rockwell.....	48
Figura 27. Difractómetro D8 Advance Bruker.....	49
Figura 28. Disposición de las muestras para observación mediante el microscopio electrónico de barrido.....	50
Figura 29. Máquina reciprocante Universidad Politécnica de Pachuca.....	51
Figura 30. Punta palpadora del rugosímetro sobre una muestra.....	51
Figura 31. Microscopio Electrónico de Barrido.....	52
Figura 32. Muestra con huella de desgaste observada bajo el microscopio electrónico de barrido...53	53
Figura 33. Mufla.....	54
Figura 34. a) Diagrama esquemático simplificado de la máquina reciprocante, 1: transductor de la fuerza de fricción; 2: pin; 3: muestra; 4: portamuestras; 5: carga normal; 6: controlador del oscilador, b) contenedor de aluminio con lubricante.....	58
Figura 35. Análisis microelemental EDS C-166 sin tratamiento térmico.....	62
Figura 36. Mapeo. a) Imagen MEB, Distribución de b) Carbono c) Hierro d) Silicio. Fuente propia...62	62
Figura 37. Probeta con huella después del ensayo Rockwell.....	65
Figura 38. a) Patrón de DRX de la muestra sin tratamiento y con tratamiento térmico (CFP y CFP-TT), Micrografías a 100X de b) CFP y c) CFP-T.....	68
Figura 39. Micrografías 100X a) C-166 b) C-182.....	69
Figura 40. Micrografías 100X a) C-166 b) C-182.....	69
Figura 41. Micrografías 200X a) C-166 b) C-182.....	70

Figura 42. Micrografías 500X a) C-166 b) C-182 .....	70
Figura 43. C-166 Muestra sin tratamiento, pulido con alúmina a 100X .....	71
Figura 44. C-166 Muestra con tratamiento térmico, superficie atacada con Nital 4% a 100X .....	71
Figura 45. C-182 Muestra sin tratamiento, pulido con alúmina a 100X .....	72
Figura 46. C-182 Muestra con tratamiento térmico, superficie atacada con Nital 4% a 100X .....	72
Figura 47. Difractograma C-166.....	73
Figura 48. Difractograma C-182.....	73
Figura 49. C-182 Pulido con alúmina a 100X. Se observa la difusión del carbono y la tendencia a formar rosetas.....	74
Figura 50. Ataque con Nital. 1000X .....	74
Figura 51. Curvas de fricción de a) CFP, CFP-TT, b) CFP-L y CFP-TT-L .....	76
Figura 52. Perfilometría de a) CFP, CFP-TT, b) CFP-L, CFP-TT-L, y c) Tasa de desgaste específica de las muestras .....	78
Figura 53. Mecanismos de desgaste identificados mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) dentro de la huella de desgaste de a) CFP, b) CFP-TT, c) CFP-L y d) CFP-TT-L .....	80

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad el motor de combustión interna es el responsable de la mayor parte del transporte por tierra, mar y aire en el mundo; en este proyecto se llevó a cabo la caracterización tribológica y estructural de una fundición gris utilizada en las camisas de los cilindros de los motores de combustión interna, proponiendo un tratamiento térmico en el material para mejorar las propiedades ante el desgaste, manteniendo las bondades del material en la aplicación como camisa de cilindro. Los resultados obtenidos demuestran que es posible mejorar la dureza y la resistencia al desgaste del material, manteniendo una superficie con buena lubricación en seco debido a la cantidad de grafito remanente una vez realizado el tratamiento térmico. Igualmente, se realizó el estudio de las propiedades tribológicas y estructurales del material, para evaluar su desempeño ante el desgaste para la aplicación como revestimiento de cilindro.

La necesidad de desarrollar procesos que mejoren el desempeño de las piezas de desgaste en el motor de combustión interna estimula la investigación científica por la resistencia a la fricción y al desgaste de los materiales. La introducción del motor eléctrico en el transporte está tomando cada vez más relevancia por las ventajas que ofrece sobre el motor de combustión interna, sin embargo, debido a su alto costo y la potencia limitada que pueden desarrollar, se encuentra restringido el mercado, principalmente en los países subdesarrollados y en aplicaciones de grandes potencias como el transporte marítimo, de minería y aviación, así como en la generación de energía eléctrica de respaldo o de emergencia. El tratamiento térmico realizado sobre las probetas estudiadas es el templado; se trata de un tratamiento térmico relativamente sencillo que no precisa de ambientes controlados, abriendo la posibilidad de obtener materiales eficientes y de bajo costo para su aplicación en los sistemas mecánicos de émbolo-pistón.

## JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

### Justificación

La prolongación de la vida útil de los componentes mecánicos y estructurales por medio del control de desgaste se ha convertido en una importante herramienta de reducción de costos de mantenimiento en las industrias pesadas y medianas. La ciencia que estudia los principales fenómenos que envuelve el desgaste de materiales se denomina tribología. Esta se ocupa del estudio de la interacción entre dos superficies en contacto y en movimiento relativo, con una interacción que principalmente se manifiesta como fricción, y está relacionada de forma implícita con el desgaste mecánico. En un sistema tribológico, se define desgaste a todo material removido o indeseablemente desplazado por efecto de las superficies interactuantes, dentro del medio en que trabaja. En este trabajo se realiza el análisis tribológico y estructural de la superficie del revestimiento del cilindro de motor de combustión interna. El material utilizado en las camisas de los cilindros es una fundición gris tipo "A". Es necesaria la preparación de probetas sin desgaste, estudiar su microestructura a través de las técnicas de XRD, SEM, perfilometría, microscopía óptica, someter a desgaste las probetas, estudiar su microestructura nuevamente utilizando las mismas técnicas, comparar resultados y características (deformaciones en la microestructura, orientación de granos, etc.), posteriormente con base en los resultados obtenidos y analizando el fenómeno que se presenta, sugerir un tratamiento o la modificación del material para ajustar sus propiedades para mejorar el desempeño y la eficiencia de los motores de combustión interna aumentando la eficiencia, aprovechar más el consumo de los hidrocarburos, reducir en la industria los recursos utilizados por mantenimiento, contribuir en la parte científica sobre los materiales utilizados, tribología y el diseño de motores de combustión interna.

## Objetivos

### Objetivo general

- Analizar tribológica y estructuralmente una fundición gris tipo “A” mediante una máquina recíproca de deslizamiento lineal, DRX, MEB, Microscopía Óptica, mediciones de microdureza y perfilometría, para mejorar su comportamiento mecánico como camisa de pistón de un motor de combustión interna.

### Objetivos particulares

- Establecer el tipo de fundición objeto de estudio a partir de la microestructura y de su composición química elemental.
- Registrar las características tribológicas del material mediante el uso de la máquina recíproca de desplazamiento lineal para determinar el comportamiento ante el desgaste.
- Determinar la morfología del grafito presente en la fundición para describir las propiedades de lubricación útiles para su uso como camisa de pistón.
- Verificar microdeformaciones producidas durante el tratamiento térmico o las pruebas de desgaste.
- Caracterizar estructural, microestructural y morfológicamente los componentes que conforman la fundición mediante Difracción de rayos X, Microscopía Electrónica de Barrido, Microscopía Óptica y Perfilometría.

## CAPITULO 1: MARCO TEÓRICO

### 1.1 Fundición gris

Las fundiciones grises son tradicionalmente escogidas para diversas aplicaciones industriales debido a su flexibilidad de uso, buena capacidad de colado, bajo costo (20 – 40% menos que el acero) y una amplia gama de propiedades mecánicas. La estructura de las fundiciones grises depende de la composición química antes del proceso de fundición, inoculantes y condiciones de enfriamiento [1-3].

Su composición química debe ser seleccionada según tres requerimientos básicos estructurales: forma y distribución del grafito, la estructura libre de carburos y la matriz requerida. Por lo general, la fundición gris perlítica se usa cuando se requiere un alto módulo de elasticidad, buena resistencia al desgaste y una buena superficie de acabado. Por otra parte, si se requiere una buena maquinabilidad, resistencia al choque térmico, alta capacidad de amortiguamiento interno y capacidad para ser fundido en secciones delgadas, se prefiere una matriz ferrítica en fundición gris [4].

La microestructura de las fundiciones grises se caracteriza por láminas de grafito dispersas en la matriz ferrosa. La práctica de la fundición puede influir en la nucleación y el crecimiento de las escamas de grafito, de modo que el tamaño y el tipo mejoren las propiedades deseadas. La cantidad de grafito, el tamaño, la morfología y la distribución de las láminas de grafito en la fundición son fundamentales para determinar el comportamiento mecánico [5–7]. El grafito en forma laminar es uno de los siete tipos (formas) de grafito establecidos en normas específicas [8].

El grafito laminar se subdivide en cinco tipos (patrones), que se designan con las letras de la A a la E. El grafito laminar tipo A presenta una orientación aleatoria y es el preferido para la mayoría de las aplicaciones.



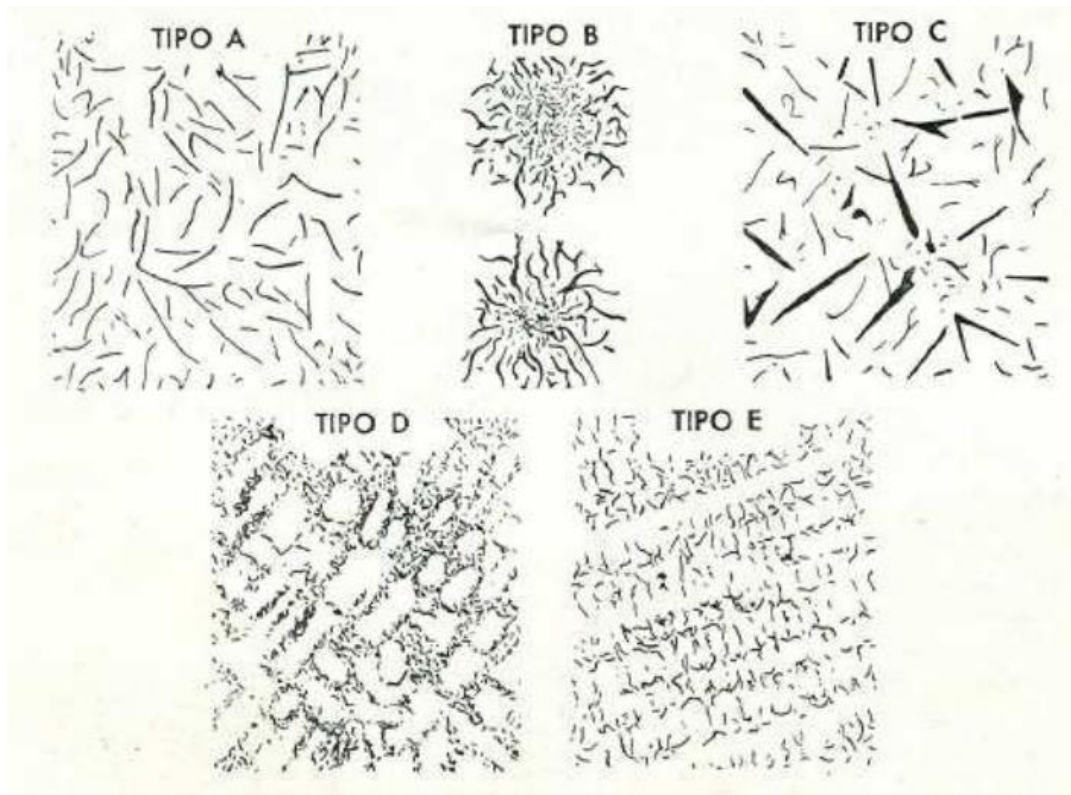


Figura 1. Tipos de grafito laminar y distribución. José Apraiz Barreiro, *Fundiciones*, 6ta Edición, 1998, p.68.

La fundición gris es una aleación ternaria Fe-C-Si con más del 2% de C y contenidos de Si entre 1 y 4%. Adquieren su forma definitiva directamente de colada y no pueden someterse a trabajos metal mecánicos de deformación ni en frío ni en caliente. La fundición gris es la fundición comercial ordinaria llamada así, por el color grisáceo de su fractura.

Es de este color, debido a que el carbono se encuentra principalmente en forma de grafito escamoso, además de que forma la perlita, ( $C_t = C_{\text{grafito}} + C_{\text{Fe}_3\text{C}}$ ). El hierro gris es fácil de maquinar y tiene una alta resistencia a la compresión.

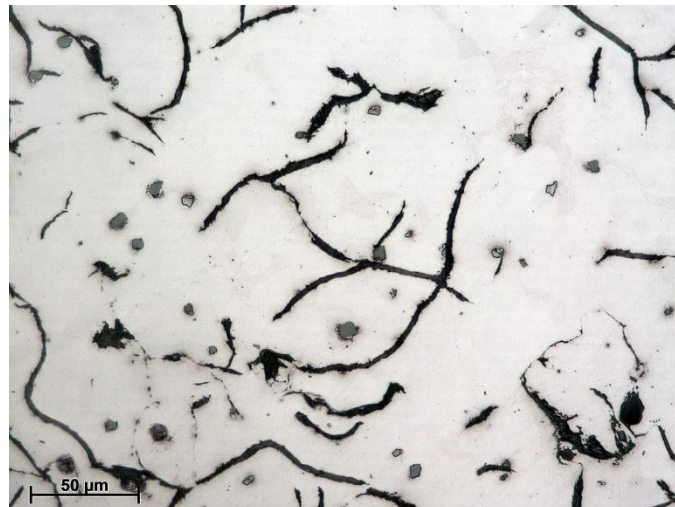
La resistencia a la tensión varía de 1400 a 4200 Kg/cm<sup>2</sup>, pero la ductilidad es baja, es por tal motivo que solo se producen piezas fundidas o coladas y no por deformación plástica.

Los porcentajes de los diferentes elementos pueden variar considerablemente, pero en general se encuentran dentro de los siguientes límites:

*Tabla 1. Porcentajes de los diferentes elementos*

Carbono	3.00-3.50%
Silicio	1.00-2.75%
Manganeso	0.40-1.00%
Fósforo	0.15-1.00%
Azufre	0.02-0.15%
Hierro	El resto

Observando una probeta pulida a través de un microscopio aparecerán líneas oscuras, son pequeñas escamas de grafito, las cuales proporcionan en gran parte la resistencia del hierro a los esfuerzos antes mencionados. La resistencia de la fundición gris es mayor si estas escamas son pequeñas y distribuidas uniformemente a través del metal.



*Figura 2. Micrografía de una probeta de fundición gris a 500 aumentos. Imagen recuperada de: <https://www.ucm.es/data/cont/docs/1292-2022-07-08-verde%20sin%20atacara%20web.jpg>*

La forma de controlar la formación de dichas escamas es, cuidando los siguientes factores:

**VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO:** la velocidad de enfriamiento debe ser baja, de lo contrario, estaremos formando una matriz martensítica (templado) lo cual le da dureza a las piezas y fragilidad.

**COMPOSICIÓN QUÍMICA: (C.E.):** a bajos contenidos de carbono, estaremos produciendo piezas duras, es decir, solo estará formado el carburo de hierro, sin la presencia de grafito laminar, lo cual nos aproxima a la producción del hierro blanco, lo cual deteriora la maquinabilidad del producto y eleva su punto de fusión.

**TRATAMIENTO DEL BAÑO METÁLICO:** (inoculación) este método tiene gran influencia en la formación del grafito laminar, ya que el silicio es un grafitizante y al agregarlo adecuadamente, el grafito laminar se estará formando homogéneamente. De lo contrario solo habrá secciones con grafito laminar y piezas con deficiencia de grafito laminar.

**INOCULACIÓN:** refina el tamaño del grano, en la práctica el objetivo de agregar inoculantes es el de llevar a cabo un tamaño de grano fino, y entonces otras variables como la concentración de partículas de nucleación también llega a ser importante.

**CONTENIDO DEL FÓSFORO:** esteadita ( $Fe_3P$ ) con punto de fusión  $960^{\circ}C$ , se encuentra presente en los hierros, cuando no se controla el contenido del fósforo, se segrega en las últimas áreas en solidificar (límite de granos). Así como los carburos son duros y frágiles, deteriorando las propiedades mecánicas y de maquinado.

El fósforo en cantidades de 0.35% incrementa el esfuerzo a la tensión, reduce la maquinabilidad y puede causar dispersión interna y porosidad.

Entre los elementos de aleación existen unos que favorecen la formación de grafito y otros que promueven los carburos, llamados estabilizadores de carburo.

*Tabla 2. Elementos de aleación grafitizantes y estabilizadores*

GRAFITIZANTES	ESTABILIZADORES DE CARBUROS
(Disminuyen la dureza)	(Aumentan la dureza)
Carbono	Cromo
Níquel	Molibdeno
Fósforo	Manganeso
Cobre	Vanadio
Silicio	

Los contenidos de carbono y silicio establecen la ubicación del eutéctico y dicha localización corresponde a la ecuación:

$$\text{Eutéctico (C.E.)} = \%C + 1/3\% \text{ Si.}$$

---

Dado que el fósforo es grafitizante, se agrega su efecto en la determinación del eutéctico:

$$\text{Eutéctico (C.E.)} = \%C + 1/3 \text{ Si} + 1/3 \% P$$

La ecuación anterior define la posición del eutéctico en una aleación multicomponente y se le conoce como "Carbono Equivalente". Término utilizado para describir la relación de un hierro con el punto eutéctico o la eutecticidad del hierro.

Si el carbono equivalente es menor a 4.3, hablamos de hierros hipoeutécticos. Si el carbono equivalente es mayor a 4.3, hablamos de hierros hipereutécticos.

#### **Efecto de los principales elementos de aleación**

**MANGANESO:** promotor de carburos; moderado hasta 0.70%, es promotor de perlita.

**MAGNESIO:** promotor de carburos; agregado en bajas cantidades al baño metálico 0.05% de magnesio residual, modifica la estructura del grafito de laminar a nodular.

**CROMO:** promotor de carburos y perlita. Elemento indeseable en la elaboración de hierro gris y nodular.

**VANADIO:** mejora las propiedades de dureza y resistencia a la tensión, pero genera carburos. Se usa en concentraciones menores a 0.3%.

**PLOMO:** deteriora las estructuras del grafito laminar, generando un grafito wittmastaten (grafito con ramificaciones), aun a bajas concentraciones, es elemento indeseable.

**COBRE:** fuerte promotor de perlita y dureza.

**SILICIO:** incrementa el potencial de grafitización y mejora la distribución del grafito. Disminuye además la resistencia a la tensión, el silicio, tanto en el hierro gris como en el hierro nodular debe estar presente en concentraciones de 1.80-2.80%. Este elemento es resistente a la oxidación, producto de las reacciones del hierro con el medio ambiente.

El contenido del silicio interactúa con el carbono en el hierro, controlando el carbono equivalente, tanto en el hierro gris como en el nodular. Incrementa el número de esferoides y decrementa el tamaño de celdas en el hierro nodular, para facilitar la nucleación del grafito.

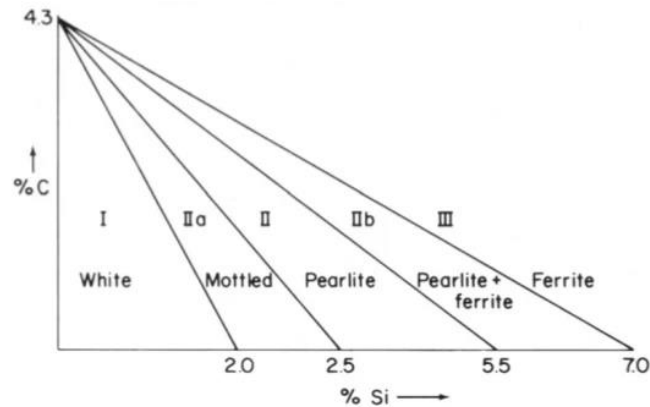


Figura 3. Diagrama de Maurer. Imagen recuperada de: <https://images.app.goo.gl/LSCGdmHPbRgA6U1Y9>

En el diagrama de Maurer, construido para una probeta del mismo espesor, se observa como a medida que se incrementa el contenido de silicio se modifica la estructura de la fundición; de blanca a gris ferrítica.

### Propiedades del hierro gris





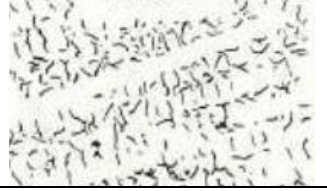
La metalurgia del hierro es muy compleja; porque son aleaciones básicamente ternarias de hierro, carbono y silicio, las cuales no pueden ser representadas en el diagrama binario hierro-carbono, por lo que es descrito en términos de carbono equivalente (C.E.), en el cual el silicio y el fósforo son representados. El C.E. indica el modo de solidificación del hierro y de esta manera es básica para la microestructura.

### Efecto de la microestructura

La microestructura es la consideración más importante en la determinación de propiedades, la cual depende de la velocidad de enfriamiento y análisis químico. Propiedades como la maquinabilidad y la resistencia al desgaste, dependen de la microestructura, la cual consiste de dos partes principales: el grafito laminar y la matriz metálica. Para identificar o estudiar la estructura del hierro es necesario pulirla la muestra con un abrasivo fino y verla bajo microscopio para determinar el tipo y distribución del grafito que esté presente.

El tipo de grafito y clasificación de tamaños establecidos en la ASTM A 247-47 es la siguiente:

Tabla 3. Clasificación de los tipos de grafito en la función gris

Tipo	Descripción	Ilustración
A	Distribución uniforme, orientación aleatoria.	
B	Agrupados como roseta, orientación aleatoria.	
C	Grafito sobrepuesto, orientación aleatoria.	
D	Segregación interdentríca, orientación aleatoria.	
E	Segregación interdentríca, orientación preferida.	

El tipo A es generalmente el preferido, es asociado con las mejores propiedades mecánicas.

El tipo B tiende a ser ferrita como en el centro de la roseta.

El tipo C ocurre con hierros de alto contenido de carbono (hipereutéticos), los cuales son buenos en aplicaciones de impacto a altas temperaturas, pero tienen una baja resistencia y superficie granular cuando es maquinada.

El tipo D ocurre en hierros con alto contenido de silicio que son rápidamente enfriados y conducen a la formación de una matriz ferrítica, este tipo de hierro es excelente para maquinarse, pero tienen poca resistencia al desgaste.

El tipo E ocurre frecuentemente en hierros con un bajo contenido de carbono. Es indeseable, no se puede maquinarse por ser tan duro.

La microestructura es factor primario en determinar la dureza del hierro gris. Un gran rango de dureza brinell es obtenido con varias estructuras de hierro.

*Tabla 4. Dureza según el tipo de hierro*

<b>Tipo</b>	<b>Dureza brinell</b>
Hierro gris ferrítico	110-140
Hierro austenítico	140-160
Hierro gris blando	140-180
Hierro perlítico	160-220
Hierro perlítico con baja aleación	200-250
Hierro martensítico	350-450
Hierro blanco	280-500
Hierro aleado	450-500
Hierro blanco martensítico	550-700
Hierro nitrurado (superficialmente)	900-1000

La cantidad, tamaño, distribución y tipo de grafito influyen en la dureza del mismo. Incrementando el carbono equivalente (carbono y silicio), disminuye la dureza. Los elementos de aleación que influyen en la dureza son aquellos denominados como estabilizadores de carburos.

Las propiedades de fatiga del hierro gris exhiben excelente comportamiento de fatiga bajo una variedad de condiciones. La fatiga es el límite del esfuerzo de un metal sin fracturarse después de un largo número de ciclos, los valores para el hierro gris son del orden de 12000 a 32000 psi.

El efecto de las altas temperaturas en las propiedades del hierro gris hasta 425°C (800°F) son insignificantes. El resultado disponible a temperaturas menores a -45°C indica aproximadamente un 25% de incremento en el límite de endurecimiento cuando la temperatura decrece de 25°C a -45°C.

La resistencia al desgaste es definida como la desintegración física y mecánica de una superficie por el contacto con otro material. Los tipos de desgaste pueden ser diferenciados:

1. Desgaste friccional que ocurre por una unión entre dos metales en contacto.
2. Abrasión producida por la presencia de partículas exteriores duras, como pueden ser piezas de metal o materiales abrasivos.
3. Desgaste por rodado, en el cual dos superficies están en contacto rodando con un mínimo de fricción, como los dientes de un engrane.
4. Desgaste por corrosión que ocurre en presencia de un medio corrosivo.

La microestructura ejerce considerablemente influencia en la resistencia al desgaste, pero la cantidad y forma del grafito influye en esta resistencia; si es muy fino y de distribución no uniforme del grafito, no da buena resistencia al desgaste.

Para ello, los tipos B y E son indeseables, porque tienen una matriz considerablemente suave de ferrita; para la resistencia al desgaste es recomendable tener hierro tipo A y D.

El cobre y el níquel tienen poca influencia en el desgaste, pero cuando son usados con cromo y molibdeno, ayudan a mejorar la resistencia al desgaste considerablemente. El fósforo decremente la resistencia al desgaste.

La corrosión es una reacción electroquímica entre un metal y sus alrededores. La presencia de sales, ácidos, sustancias orgánicas o álcalis frecuentemente incrementa la velocidad de corrosión.

Bajo algunas condiciones el hierro formará una película que se adhiere para reducir la velocidad del ataque.



La corrosión puede ser uniforme o selectiva y que produce picaduras. Cuando la corrosión es uniforme, la velocidad de ataque es usualmente expresada en mil por año (1 mil = 0.001 pulg.). Cuando el metal es sujeto a picadura o corrosión localizada la máxima picadura es el factor significativo.

La presencia de grafito y alto contenido de silicio causa la principal diferencia entre la corrosión del hierro gris y acero.

El hierro gris tiene poca resistencia en un medio ácido; la velocidad de corrosión es muy alta en ácido clorhídrico en todas las concentraciones y temperaturas. En ácidos muy diluidos la presencia de aire y otros agentes oxidantes incrementa la corrosión.

En algunos casos con ácidos concentrados como el sulfúrico, nítrico, crómico y fosfórico, el hierro puede formar una capa protectora que da satisfactoriamente resistencia a la corrosión. En agua blanda, la corrosión del hierro es casi nula.

La corrosión del agua industrial, sin embargo, depende de lo que trae disuelta el agua; la corrosión se agudiza cuando hay altos contenidos de ácidos y alcalinos. El agua de las minas con sales ferríticas disueltas puede ser muy corrosiva. Al hierro gris la corrosión en agua de mar es relativamente baja de 5 a 10 mil por año.

### Aplicaciones típicas de fundición gris automotriz

Fundición en moldes de arena para la industria automotriz, de camiones, e industrias afines.

*Tabla 5. Aplicaciones típicas de fundición gris automotriz*

<b>Aplicaciones típicas</b>	<b>Grado o clase</b>	<b>Dureza brinell</b>	<b>Carbono total %</b>	<b>Microestructura</b>
Para maquinabilidad donde no es necesaria una mayor resistencia	G1800	187 Max		Ferrítica- Perlítica
Bloques y cabezas de cilindros pequeños, pistones, placas de embrague, cuerpos de bomba, cajas de transmisión, carcasas, tambores de freno de servicio ligero	G2500	170- 229	3.4 Min.	Perlítica- Ferrítica
Tambores de freno, placas de embrague para minimizar el control de calor	G2500a	170- 229		"A" tamaño de grafito 2-4 15% max. Ferrita
Bloques de cilindros, cabezas, camisas, volantes, pistones,	G3000	187- 241		Perlítica

tambores de freno de servicio mediano y placas de embrague para automóviles				
Bloques y cabezas de cilindros de camiones, volantes pesados y cajas de transmisión, porta diferenciales	G3500	207-255		Perlítica
Tambores de freno y placas de embrague para servicio pesado que requiere resistencia al calor y mayor resistencia mecánica	G3500b	207-225	3.4 Min.	“A” tamaño de grafito 3-5 5% max. Ferrita o carburo
Tambores de freno de servicio extra pesado	G3500c	207-255	3.4 Min.	“A” tamaño de grafito 3-5 5% max. Ferrita o carburo
Piezas fundidas, camisas, cilindros y pistones de motores Diesel y piezas pesadas en general	G4000	217-269		Perlítica

## 1.2 Tribología

Una primera definición estudiando la etimología de la palabra Tribología, viene del griego y su raíz *Tribo* significa frotamiento, por lo tanto, es la ciencia encargada del estudio del frotamiento. La definición exacta, es la de ciencia que estudia cómo interactúan dos o más superficies en contacto y en movimiento relativo. Las interacciones en lo que podríamos denominar interfase tribológica son muchas y complejas. Su estudio requiere un amplio conocimiento en disciplinas como física, química, mecánica del estado sólido, ingeniería de materiales, diseño de maquinaria, etc.

Antes de detallar los principales mecanismos que interactúan en una interfase tribológica en movimiento relativo se debe tener en cuenta que cuando dos superficies se ponen en contacto se puede definir un área aparente de contacto y un área real de contacto [9].

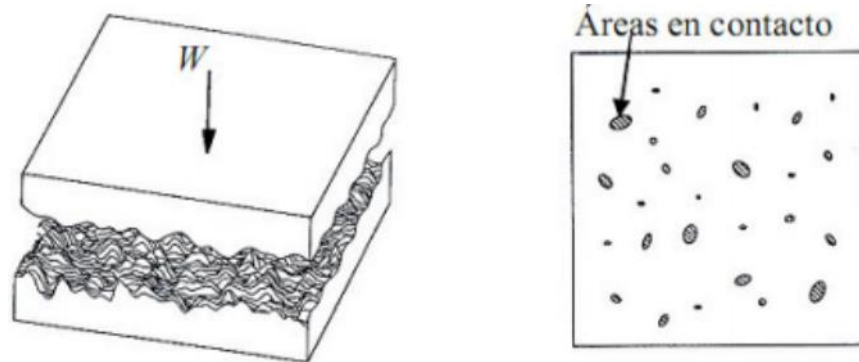


Figura 4. Área real de contacto entre dos superficies. Imagen recuperada de <https://bit.ly/3q7y7vB>

Tal y como muestra la Figura 4, el área real de contacto está formada por la suma de todos aquellos puntos discretos donde las dos superficies están en contacto a distancias atómicas. Y la aparente es aquella que sólo tiene en cuenta la superficie total de los cuerpos en contacto.

Es por esta razón que el área real de contacto es función de la rugosidad, propiedades interfaciales del material (elasticidad y plasticidad) y las condiciones de carga aplicadas.

La fricción es la resistencia u oposición al movimiento de dos cuerpos que se encuentran en contacto [9]. Es decir, la fuerza tangencial resistiva que se crea cuando se produce el movimiento. La fricción no depende del material, es una respuesta del sistema a una determinada acción.

Existen tres leyes de la fricción, la primera ley establece que la fuerza de fricción es proporcional a la fuerza normal.

Matemáticamente, se define fuerza de fricción como:

$$F = \mu W \quad \text{ec. 1.1}$$

Donde F es la Fuerza de fricción, W es la carga normal sobre el contacto y  $\mu$  es una constante conocida como el coeficiente de fricción. Existen dos tipos de coeficiente de fricción: el estático ( $\mu_s$ ) y el cinético ( $\mu_k$ , independiente de la carga normal). En el caso de fricción estática es posible expresar esta ley en términos del ángulo de reposo límite  $\theta$  definido por:

$$\mu_s = \tan\theta \quad \text{ec. 1.2}$$

En esta ecuación,  $\theta$  es el ángulo tal que un cuerpo de algún peso, colocado sobre un plano inclinado a un ángulo menor que  $\theta$  desde la horizontal permanecerá estacionario mientras que si se aumenta la inclinación del ángulo a  $\theta$ , el cuerpo empezará a deslizar hacia abajo, como lo muestra la figura 5.

Estas consideraciones se cumplen igualmente para los casos de fricción sin y con lubricación. El coeficiente de fricción sin lubricación puede variar en un amplio

rango, desde valores muy pequeños de 0.02 a valores tan grandes como 10 o incluso mayores en el caso de metales blandos y limpios deslizando contra ellos mismos en vacío.

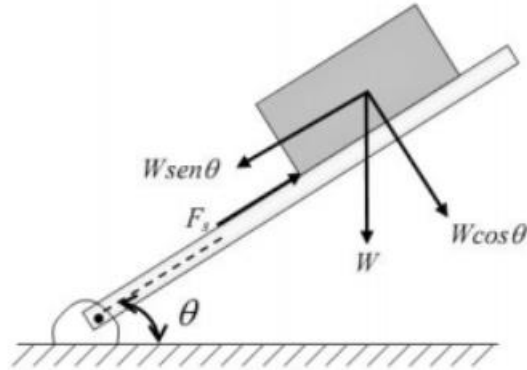


Figura 5. Cuerpo estacionario. Imagen recuperada de <https://bit.ly/45FQkAI>

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

La tercera ley, conocida como ley de Coulomb estipula que el coeficiente de fricción cinético es independiente de la velocidad de deslizamiento una vez que el cuerpo se encuentra en movimiento.

Es importante enfatizar que  $\mu$  en general es independiente de la velocidad de deslizamiento, pero su valor depende de las condiciones de operación (temperatura, humedad, presión ambiental). Algunos pares de materiales pueden mostrar una cierta dependencia de los coeficientes de fricción estático y cinético con la carga normal, la velocidad de deslizamiento y el área aparente.

Los mecanismos de fricción en deslizamiento; se conoce la fricción como un proceso que incluye mecanismos de disipación de energía.

### 1.2.1 Mecanismos de desgaste

Bowden y Tabor (1950) propusieron que en los puntos de contacto de dos superficies se producen altas presiones que causan soldaduras locales que se van fracturando debido al movimiento relativo de ambas superficies. Este mecanismo se conoce con el nombre de Adhesión (Figura 6). Dicha rotura ocurre en las regiones más débiles de la interfase de unión. Esta adhesión es de la misma naturaleza e intensidad que las fuerzas que existen entre moléculas del material en volumen.

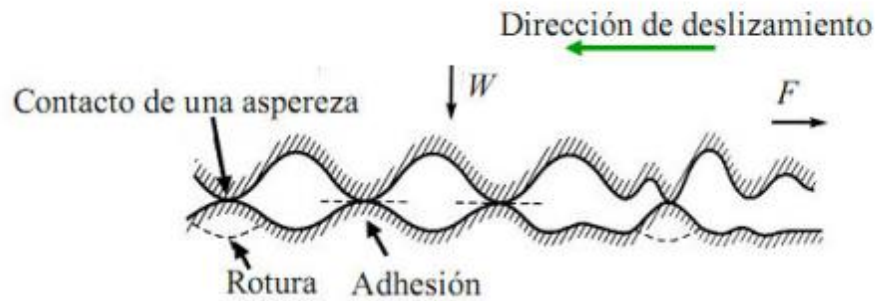


Figura 6. Adhesión durante el deslizamiento de dos superficies en contacto. Imagen recuperada de [https://www.researchgate.net/publication/264040856\\_Comportamiento\\_Al\\_Desgaste\\_En\\_Pasadores\\_Fabrica\\_dos\\_de\\_Acero\\_Aisi\\_1045](https://www.researchgate.net/publication/264040856_Comportamiento_Al_Desgaste_En_Pasadores_Fabrica_dos_de_Acero_Aisi_1045)

Debido a este mecanismo, se generan fragmentos desprendidos de los materiales en contacto llamados *debris*. Esto contribuye a aumentar la fricción entre las superficies y en los materiales, cuando este proceso es dominante, se conoce como fricción por impurezas abrasivas. Bajo este mecanismo, la fuerza de fricción depende de la resistencia al corte de los materiales.

Otro mecanismo que ocurre durante este proceso es el de fricción en deslizamiento por deformación. Este proceso ocurre en aquellos materiales dúctiles los cuales tienden a ser deformados plásticamente por los duros. Esta deformación puede acabar causando rotura o fragmentación. Aumentando de esta manera la fricción entre materiales y su desgaste debido a la posible fragmentación y creación de *debris*. Podemos observar este proceso en la fig. 7.

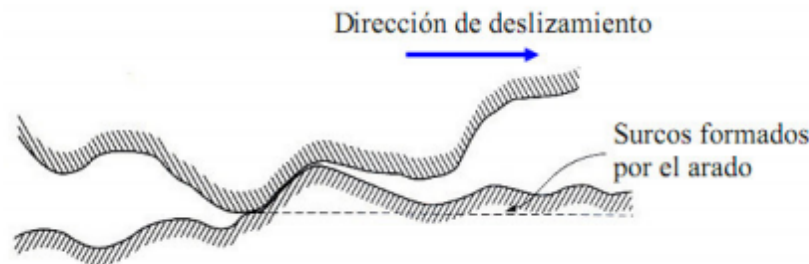


Figura 7. Deformación durante el deslizamiento de dos superficies en contacto. Imagen recuperada de <https://bit.ly/3oEfQFW>

El desgaste [9]: se define desgaste como el proceso de remoción de material debido al movimiento relativo de esta superficie respecto otra en contacto. En dicho proceso el material puede ser removido de la superficie y expulsado fuera de la región de contacto. También puede ser transferido a la otra superficie y quedarse adherido a ella o romperse y generar *debris* que puede quedar, en parte, atrapado en el contacto. En el caso de que se produzca una transferencia de material, la pérdida de masa neta de la interface es cero, siendo una o ambas superficies desgastadas. La evolución de la fricción está vinculada al desgaste, aunque su relación no es bien entendida.

Existen varios tipos de desgaste, de los cuales, los principales son:

## Desgaste Adhesivo

En el área de contacto real entre dos superficies, puede ocurrir la adhesión entre las asperezas y con el movimiento relativo entre las superficies, fracturar las partes adheridas formando fragmentos adheridos y/o transferidos a la otra superficie, así como desprenderse y formar partículas de *debris*.

## Desgaste Abrasivo

El desgaste abrasivo ocurre cuando las asperezas de una superficie dura o *debris* duro desliza sobre una superficie más blanda produciendo desgaste por deformación plástica y fractura. Tal y como muestra la Figura 8.

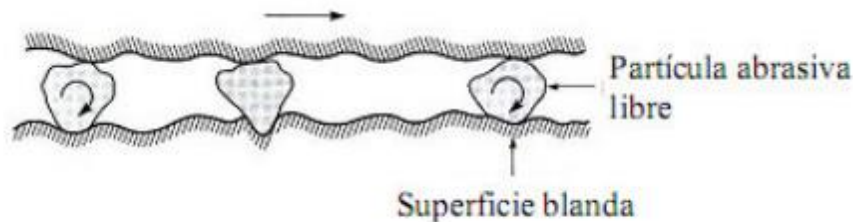


Figura 8. Ejemplificación de movimiento de partículas abrasivas. Imagen recuperada de <https://encrypted-tbn3.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcStNiixOk29VJjiiAaaRR3JUVyFDrm8olZ0ynUdOlwo8Pn7PFJc>

## Desgaste por fatiga

La fatiga en la superficie y sub-superficie se observa durante el deslizamiento y apisonamiento repetido. Los repetidos ciclos de carga y descarga a los cuales los materiales son expuestos pueden inducir la formación de grietas superficiales y sub-superficiales, que eventualmente, después de un número crítico de ciclos resultarán en la rotura de la superficie con la formación de grandes fragmentos, dejando grandes hoyos en la superficie, Figura 9. Antes de este punto crítico el desgaste del material es despreciable, lo que no sucede con el desgaste causado por un mecanismo adhesivo o abrasivo, donde el desgaste causa un deterioro gradual del material desde el inicio del proceso. Por tanto, la cantidad de material removido debido a la fatiga no es un parámetro útil. Mucho más relevante es la vida útil en términos del número de revoluciones o ciclos de trabajo antes de que ocurra la falla por fatiga.

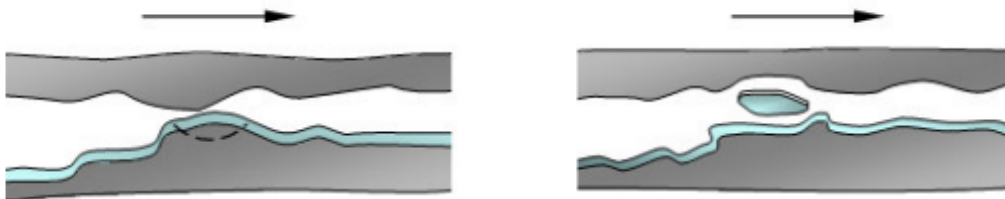


Figura 9. Ejemplificación de desgaste por fatiga. Imagen recuperada de GOMÉZ Ronald M. Estudio del comportamiento a desgaste erosivo de recubrimientos *wc-co* micro y nano estructurados. Valencia, 2009, 124 p. Tesis (fin de máster). Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de ingeniería mecánica y de materiales.

## Desgaste por impacto

El desgaste por impacto comprende dos amplios tipos de fenómenos de desgaste: el erosivo (partículas al azar) y el percusivo (impactos repetidos en un punto). La erosión puede ocurrir por chorros y flujos de partículas sólidas pequeñas transportadas por un fluido, en general aire o agua, o también por gotas líquidas. La percusión ocurre por impactos repetidos de cuerpos sólidos de tamaño mayor.

La Figura 10 muestra el mecanismo de erosión causado por el choque de partículas sólidas.

Esto es una forma de abrasión, que generalmente se trata diferente porque la presión del contacto crece con la energía cinética del flujo de partículas en un chorro de aire o líquido cuando encuentra la superficie. La velocidad de las partículas, el ángulo de impacto y el tamaño medio de las partículas de abrasivo dan una medida de la energía cinética de las partículas que chocan. Como en el caso del desgaste abrasivo, el desgaste erosivo ocurre por deformación plástica y fractura frágil, dependiendo del material que está siendo erosionado y de los parámetros de operación.

Chorro de partículas abrasivas

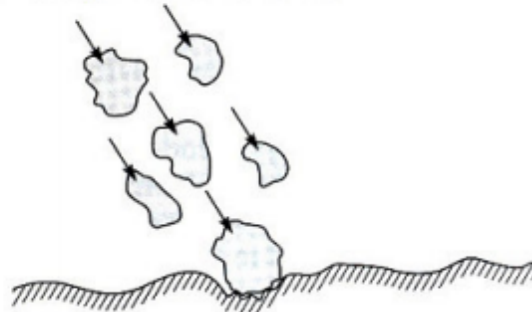


Figura 10. Desgaste por impacto. Imagen tomada de *Introduction to tribology, second edition, Bharat Bhushan.*

Los materiales dúctiles experimentan desgaste por deformación plástica. En los materiales frágiles, en cambio, el material es removido por la formación e intersección de grietas que se difunden desde el punto de impacto de la partícula erosionada. El desgaste por percusión se da por el impacto repetitivo de un cuerpo sólido, (martilleo). En la mayoría de las aplicaciones prácticas de maquinaria, el impacto está asociado con deslizamiento, ejerciendo fuerzas con componentes normal y tangencial conocidas como impacto compuesto. El desgaste percusivo ocurre por mecanismos de desgaste híbridos los cuales combinan varios de los siguientes mecanismos: adhesivo, abrasivo, fatiga superficial, fractura y desgaste triboquímico.

Los mecanismos de desgaste se identificaron después de las pruebas de desgaste practicadas sobre el material comercial de fabricación de camisas de cilindros de motor.

### **1.3 Disposición de componentes en el bloque del motor de combustión interna**

La fabricación del bloque de motor: los bloques se fabrican de una sola pieza y completamente huecos para eliminar peso muerto en el motor. Todos los cilindros van dispuestos en uno o dos bloques, según el tipo de motor, unidos por su bancada, formando así un cuerpo único.

Esta disposición de un solo bloque tiene la ventaja de dar mayor rigidez al conjunto, simplifica la refrigeración del motor y facilita el proceso de fabricación.

El material empleado en la fabricación de los bloques es, generalmente, fundición de hierro con estructura perlítica, aleado con pequeñas proporciones de cromo y níquel, que proporcionan una gran resistencia al desgaste y protección a la corrosión. Este material además resiste muy bien las altas temperaturas que tiene que soportar.

En la fabricación de bloques se emplean también las aleaciones ligeras a base de aluminio-silicio, que tienen las ventajas de su menor peso y gran conductibilidad térmica, con lo que se mejora la refrigeración. Estas características permiten aumentar el grado de compresión en los motores de gasolina, con lo que se obtiene una mayor potencia útil y un menor peso específico para una misma cilindrada.

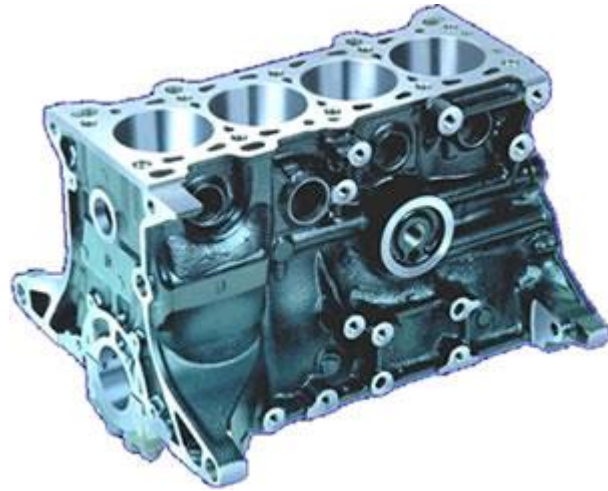
Formación de los cilindros: el orificio circular que sirve de cilindro puede practicarse sobre el propio material del bloque, o bien puede obtenerse ajustando en este unas piezas postizas en forma de tubo llamadas "camisas". Estas piezas se fabrican independientemente y se montan sobre el bloque con un buen ajuste.

Según el procedimiento empleado para obtener los cilindros hay que distinguir tres clases de bloques:

#### **Bloque integral**

Los cilindros se mecanizan sobre el propio material del bloque. Para ello, el orificio destinado a formar el cilindro se obtiene en bruto, de fundición, con la sobremedida necesaria para el rectificado. Este tipo de bloque es muy utilizado en la actualidad, ver Figura 11.





*Figura 11. Bloque integral. Imagen recuperada de <https://mecanicaautomotrizdg.wordpress.com/2017/06/09/arquitectura-del-motor/>*

### Bloque con camisas

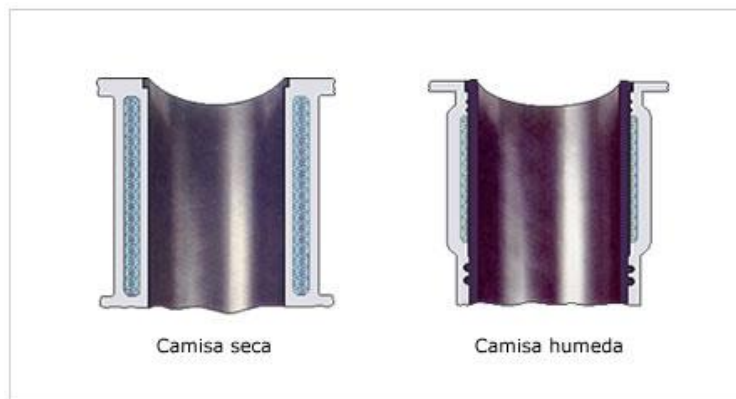
Las camisas son unos cilindros desmontables que se acoplan al bloque motor. Tienen la ventaja de que se pueden fabricar de materiales distintos al del bloque del motor, por lo que pueden ser más resistentes al desgaste y más eficientes a la hora de evacuar el calor. En caso de avería o desgaste de los cilindros pueden ser sustituidas las camisas sin que el bloque del motor se vea afectado.

Las superficies interiores de las camisas se obtienen por mecanizado de precisión, rectificado y pulido. A continuación, reciben un tratamiento superficial, que en muchos casos es un cromado con el fin de reducir el desgaste de segmentos y cilindros, estando controlado el proceso de forma que resulte una superficie finamente porosa capaz de retener el lubricante.

Tipos de camisas en los bloques, (ver Figura 12):

Camisas secas: se llaman camisas "secas" porque no están en contacto directo con el líquido de refrigeración.

Camisas húmedas: se llaman camisas "húmedas" porque están en contacto directo con el líquido refrigerante.



*Figura 12. Tipos de camisas del bloque. Imagen recuperada de <http://educacion.sanjuan.edu.ar/mesj/LinkClick.aspx?fileticket=58X4oUuERtw%3D&tabid=678&mid=1743>*

Las camisas secas van montadas a presión, en perfecto contacto con la pared del bloque, para que el calor interno pueda transmitirse al circuito de refrigeración. Estas camisas se fabrican de materiales más resistentes que los del bloque por lo que pueden utilizarse en motores que soporten mayores presiones internas como son los motores Diésel. Las camisas se montan en el bloque a presión por medio de una prensa, de esta forma se consigue que queden fijas sobre el bloque sin que puedan moverse. Las camisas secas pueden ser con pestaña de asiento y sin pestaña. En la Figura 13 se muestran los tipos de camisas secas.

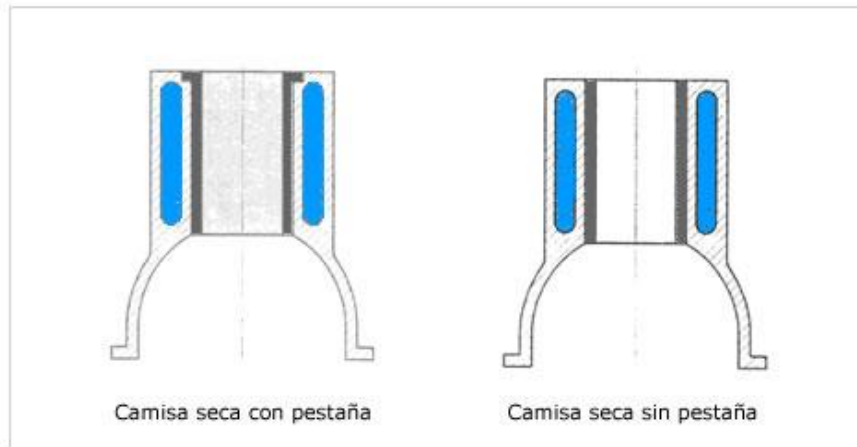


Figura 13. Camisas secas. Imagen recuperada de [https://nanopdf.com/download/tapa-de-valvulas-del-motor\\_pdf](https://nanopdf.com/download/tapa-de-valvulas-del-motor_pdf)

Las camisas húmedas son unos cilindros independientes que se acoplan al bloque que es completamente hueco. Se ajustan al bloque por medio de unas juntas de estanqueidad, para evitar que el agua pase al cárter de aceite. Estas camisas sobresalen ligeramente del plano superior del bloque de forma que quedan fijadas una vez que se aprieta la culata. En la Figura 14 se muestra una camisa húmeda.

Esta disposición del motor ofrece una mejor refrigeración del mismo, y se emplea generalmente en motores de gran potencia, donde se necesita una mayor evacuación de calor. Tiene el inconveniente de su mayor costo de fabricación y una cierta dificultad de montaje, ya que, al estar la camisa en contacto directo con el líquido de refrigeración, existe el riesgo de que se produzcan fugas a través de las juntas de estanqueidad, ver Figura 15.



Figura 14. Vista de una camisa húmeda. Imagen recuperada de <https://ingenieromarino.com/las-camisas-y-su-disposicion-en-el-bloque-motor/>

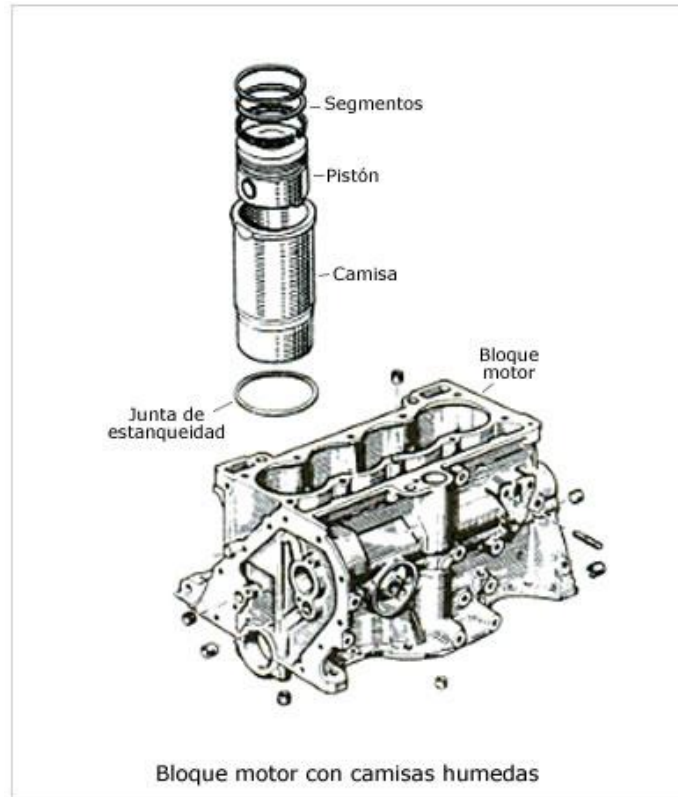


Figura 15. Ensamble de bloque con camisas húmedas. Imagen recuperada de <https://m.exa-10.com/medicina/2535/index.html>

Los materiales o procesos mejorados para los componentes dentro del cilindro de los motores de combustión interna se han buscado durante mucho tiempo para una menor fricción y rendimiento de desgaste. El uso de pruebas de laboratorio para simular el entorno del motor se ha llevado a cabo durante muchos años para ahorrar el tiempo, los gastos y la complejidad de confiar únicamente en pruebas de motor a gran escala durante el proceso de desarrollo [10]. La reducción de la fricción y el desgaste en los componentes del motor y del tren motriz podría ahorrarle a la economía estadounidense hasta US \$ 120 mil millones por año [11]. Hay muchos cientos de componentes tribológicos, desde cojinetes, pistones, transmisiones, embragues, engranajes y componentes del tren de transmisión. La aplicación de principios tribológicos es esencial para la fiabilidad del vehículo de motor y en el área de la tecnología del tren de fuerza [12].

La fricción en los motores de combustión interna continúa recibiendo un interés sustancial porque a pesar de las mejoras significativas en el diseño del motor y la formulación del aceite, la fricción mecánica continúa causando una considerable economía de combustible, rendimiento y degradación de las emisiones. Una reducción de la fricción del motor del 10%, si se aplica a todos los vehículos de

pasajeros de EE. UU., daría como resultado un ahorro de combustible de 3.400 millones de galones en 2007 [13].

### 1.3.1 Sistema pistón-anillos-camisas

El comportamiento tribológico de los anillos de pistón ha sido reconocido durante mucho tiempo como una influencia importante en el rendimiento de los motores de combustión interna en términos de pérdida de potencia, consumo de combustible, consumo de aceite, fuga y emisiones de escape nocivas. La función principal del paquete de anillos de pistón es mantener un sello de gas efectivo entre la cámara de combustión y el cárter. El conjunto de anillos de pistón, que juntos forman efectivamente un sellado entre el pistón y las paredes del cilindro; logran esto al ajustarse estrechamente a sus ranuras en el pistón y a la pared del cilindro. La pequeña cantidad de gas que se introduce en el cárter, que pasa por el aire, normalmente se envía por tubería a la válvula de entrada y se retroalimenta al cilindro. La función secundaria del paquete de anillos de pistón es transferir calor desde el pistón a la pared del cilindro y desde allí al refrigerante [14]. La función final del paquete de anillos de pistón es limitar la cantidad de aceite que se transporta desde el cárter hasta la cámara de combustión. Este camino de flujo es probablemente el mayor contribuyente al consumo de aceite de un motor y conduce a un aumento en las emisiones de escape perjudiciales a medida que el aceite se mezcla y reacciona con los otros contenidos de la cámara de combustión [15].

El conjunto de anillos de pistón debe cumplir estos tres roles con un mínimo de pérdida de potencia por fricción, especialmente en la interfaz deslizante con la pared del cilindro, y un desgaste mínimo para maximizar la vida útil de los componentes. Desafortunadamente, el conjunto de anillos de pistón es una de las mayores fuentes de fricción en el motor de combustión interna sobre el rango normal de velocidades del motor y cargas encontradas en el servicio [16-18]. El anillo de pistón es el componente tribológico más complicado en el motor de combustión interna para analizar debido a las grandes variaciones de carga, velocidad, temperatura y disponibilidad de lubricante. En una sola carrera del pistón, la interfaz del anillo de pistón con la pared del cilindro puede experimentar una lubricación límite, mixta y de película llena de fluido [19].

De los diferentes estudios que se han llevado a cabo en las pruebas de desgaste recíprocas se pueden mencionar los siguientes:

Odabas y Su investigaron el comportamiento del desgaste abrasivo de la aleación de Al 2014 tratada en solución y endurecida por envejecimiento bajo condiciones muy similares durante el movimiento deslizante alternativo y continuo. Informaron que el patrón de desgaste es similar para el desgaste continuo y recíproco [20].

Cassar et al. Realizaron pruebas lineales de desgaste recíproco de bola sobre placa sobre el rendimiento de desgaste de las muestras de aleación de titanio Ti-6Al-4V [21].

## 1.4 Tratamiento térmico

Los aceros con bajo contenido de carbono se han utilizado en una amplia gama de aplicaciones, desde el sector automotriz, en el sector naval, en la industria de la construcción debido a su bajo costo, que se puede trabajar bien con estos materiales y que posee buenas características para soldadura [22].

Sin embargo, tienen dureza y resistencia relativamente bajas en comparación con los aceros con alto contenido de carbono, lo que restringe sus aplicaciones industriales. Por otro lado, es bien sabido que los materiales más duros proporcionan una menor tasa de desgaste y menor coeficiente de fricción [23].

Hay varias formas de mejorar la dureza y la resistencia de los aceros [24-25].

El tratamiento térmico puede ser una forma efectiva de mejorar su dureza. De este modo el material con bajo contenido de carbono es posible hacer una modificación de su microestructura para aumentar la dureza y reducir el desgaste.

Se propuso realizar el tratamiento térmico a las muestras para mejorar su dureza mediante la modificación de la morfología del grafito y el cambio en la microestructura [26-28].

## CAPITULO 2: ANTECEDENTES

### 2.1 Antecedentes

El acero utilizado en la fabricación de las camisas de cilindros es comúnmente el acero 38XM10A, este es un acero aleado con contenido de carbono alrededor de 0.38%, contenido de cromo de aproximadamente 1%, molibdeno y otros elementos como fósforo (0.4%) y azufre (0.05%).

En este proyecto se estudia la composición del material comercial con la técnica de espectroscopía de chispa (Espectroscopía de Emisión Atómica de Descarga Electroestática) como una primera aproximación y posteriormente se analizó con la técnica EDS (Espectroscopía de Energía Dispersiva) para confirmar la presencia de los elementos de composición del material.

En la literatura no se encuentra reportada la caracterización de este acero aleado, y se pretende contribuir con este trabajo en el análisis estructural del material, así como su composición y los efectos de desgaste con los estudios tribológicos.

Actualmente los fabricantes de camisas de cilindros de los motores de combustión interna no publican las características del material utilizado en su fabricación, lo que resulta interesante poder determinar con estudios pertinentes y establecer como punto de partida para comenzar la caracterización.

El tema de tribología tiene gran importancia en la actualidad, si se observan los problemas por fricción en cuanto a gasto energético se refiere en la industria automotriz, estudios de la Agencia Internacional de Energía dependiente de la OCDE [29], en 2005 a nivel global se consumían 285 EJ de energía, de los cuales el transporte representaba el 26%, los hogares el 29 % y la manufactura el 33%.

La energía del combustible en automóviles se distribuye de la siguiente manera:

38% potencia mecánica, 33% expulsada por escape y 29% en el enfriamiento del motor; por otro lado, la potencia mecánica se redistribuye con 5% transmisión, 21.5% energía para mover el automóvil y 11.5% fricción en el motor.

De tal manera que 33% de la energía del combustible en un automóvil se usa para vencer a la fricción.

Según un estudio de K. Holmberg [30], a nivel global el consumo de energía para superar la fricción en el transporte de pasajeros por automóviles representaba en 2009, 208,000 millones de litros de gasolina o diésel.

Por lo que resulta necesario enfocarse en problemas donde se requiera disminuir la

fricción del motor, resistencia al rodado, engranajes, frenos, entre otros sistemas de fricción.

De manera general el aprovechamiento de la energía generada en los cilindros por la combustión del combustible en los motores de combustión interna se encuentra alrededor de 35%, el resto se disipa en pérdidas termodinámicas y mecánicas entre las que se encuentra la fricción.

De tal forma que en el conjunto anillo-émbolo se tiene aproximadamente la mitad de esas pérdidas; el uso de mejores materiales en los anillos, cilindros y camisas permite reducir ese porcentaje de pérdidas y aumentar la eficiencia del motor y el uso de combustible.

Los anillos de pistón son sellos dinámicos que mantienen la presión en la cámara de combustión y proveen control de aceite en el cilindro. El paquete de anillos del pistón en un motor de combustión interna consiste en tres anillos situados en surcos en el pistón.

El propósito primario del paquete de anillos es evitar que los gases de alta presión se escapen fuera de la cámara de combustión, que daría lugar a apagones.

Los anillos deben también prevenir la salida excesiva del aceite del cárter a la cámara de combustión, mientras que ellos mismos sigan lubricados suficientemente.

Una tercera función de los anillos del pistón, particularmente para el anillo superior, es la disipación del calor del pistón a la camisa del cilindro. Los anillos deben realizar todas estas funciones sin la introducción de pérdidas friccionales excesivas en el sistema, y reducir el desgaste de los anillos y de la camisa del cilindro a un mínimo [31].

Los anillos del pistón para el motor de combustión interna actuales tienen que cumplir todos los requisitos de un sello dinámico para el movimiento lineal que funciona bajo condiciones térmicas y químicas.

Los requisitos siguientes para los anillos del pistón pueden ser: [32]

- Baja Fricción, para aportar un soporte de la eficacia de la potencia del motor.
- Bajo desgaste del anillo, para asegurar una vida operacional larga.
- Bajo desgaste de la camisa del cilindro, para conservar la textura superficial deseada.
- Supresión de la emisión, limitando el flujo de aceite de motor a la cámara de combustión.
- Buena resistencia a la fatiga, ataques químicos y la erosión.



-Operación y rentabilidad confiable por un tiempo largo.

Una de las formas de reducir los efectos de fricción y desgaste, es a través del tratamiento de superficies, y en especial del uso de recubrimientos.

Para poder proponer una vía para lograr la reducción de los efectos de fricción es necesario realizar un estudio tribológico y de la microestructura del material.

Para Bayer R. [33], el desgaste es el daño a una superficie como resultado de un movimiento relativo con respecto a una sustancia. Y, un punto clave, es que el desgaste es un daño y no limita la pérdida de material de una superficie.

Por ello, la manera en que afecta el desgaste a la superficie de una pieza se representa en 3 formas:

1. La pérdida de material, que es definitivamente una manera en la cual experimenta el desgaste.
2. El movimiento de material sin pérdida de masa. Un ejemplo de esto sería el cambio en la geometría o dimensión de una parte como resultado de una deformación plástica.
3. Un tercer modo de daño a la superficie que no involucra pérdida de masa o cambios dimensionales. Un ejemplo podría ser el desarrollo de una red de grietas en una superficie.

La creciente demanda de un menor consumo de combustible está impulsando a los fabricantes de vehículos hacia una mayor optimización de sus componentes y sistemas.

Las pérdidas por fricción en un motor diesel de servicio pesado (HDDE) contribuyen significativamente al consumo de combustible de un camión. De acuerdo con Holmberg et al. [34]

Existe un gran potencial para la reducción del consumo de combustible por mejora en el anillo del pistón a la interfaz del revestimiento del cilindro (camisa). Para reducir estas pérdidas, la interacción entre el anillo del pistón y el revestimiento del cilindro debe ser bien comprendida.

Las herramientas para evaluar los diferentes conceptos de reducción de la fricción deben desarrollarse y utilizarse adecuadamente para lograr la comprensión del sistema.[35]

Rejowski [36] demostró que al sustituir el forro de hierro fundido convencional por un forro de cilindro revestido DLC, se puede reducir la fricción en un 2,5% a bajas revoluciones. Esto es debido a la cantidad reducida de fricción mecánica, metal - metal.

Sato [37] también mostró una reducción de la fricción mediante revestimientos de cilindros revestidos con DLC. Se dijo que era debido a menos arañazos axiales creados en el DLC más duro en comparación con un forro de hierro fundido

proporcionando así un mejor estado de lubricación.

Sato también demostró que las superficies rugosas pueden ser beneficiosas para la fricción en la región de carrera media en algunas condiciones específicas.

Spencer et al. [38] investigaron un anillo de compresión superior en contacto con diferentes variantes del revestimiento en un tribómetro alternativo Plint.

Descubrieron que una superficie del revestimiento del cilindro más suave podría proporcionar una menor fricción. Las condiciones de prueba se simularon numéricamente y se encontró una buena correlación en algunas condiciones operativas.

La reducción de la fricción del motor es clave y un enfoque relativamente rentable que ha estado recibiendo una atención significativa por parte de los tribólogos y los ingenieros de lubricación.

Esto implica revisar los fundamentos de la fricción específicos para entornos de tribología de componentes de motores, junto con discusiones sobre el impacto del desarrollo de tecnologías de trenes de potencia, tecnologías de superficies y materiales, y tecnologías de lubricantes y aditivos con la promesa de la tendencia a la reducción continua de fricción y desgaste.

Los acuerdos internacionales sobre cambio climático requieren mayores ganancias en la eficiencia del combustible y la sostenibilidad energética de todos los sectores industriales, incluidos los de la industria automotriz y motores de combustión interna más amplios, y los últimos abarcan también las industrias fuera de carretera, generación de energía, marina y ferroviaria [39].

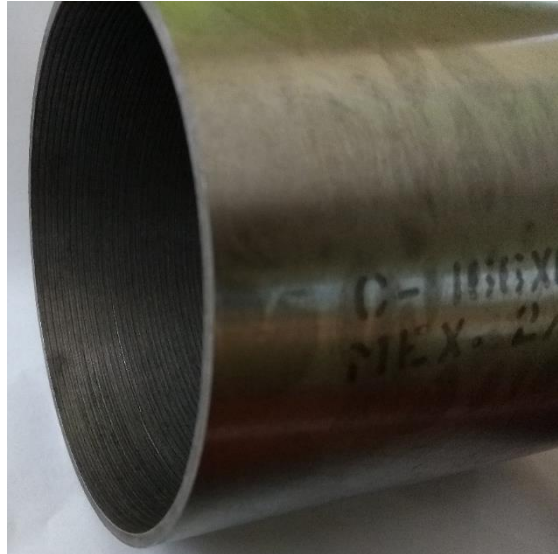
Sin embargo, este trabajo se enfoca en la reducción de la fricción en motores principalmente automotrices.

## CAPITULO 3: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### 3.1 Preparación de muestras para pruebas tribológicas y caracterización estructural

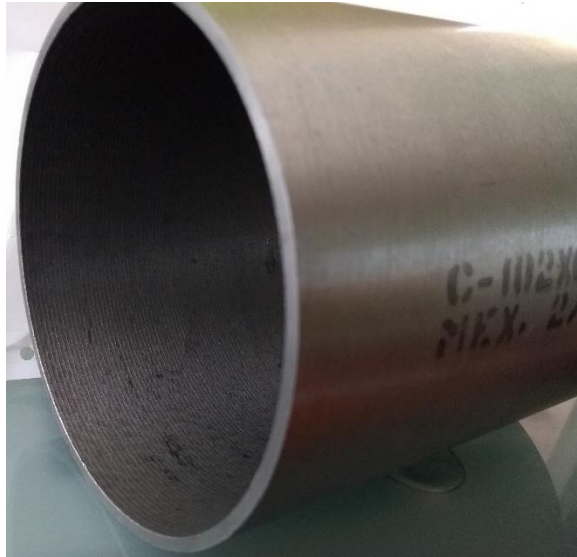
#### MATERIALES UTILIZADOS

#### Camisas de cilindros comerciales



*Figura 16: Camisa C-166-X070, SKU: CA-C166X070, Marca: SPQ.*

Diámetro interior: 101.60mm. 4 pulgadas; largo: 127.0mm. 5 pulgadas; diámetro exterior: 105.23mm. 4.143 pulgadas.



*Figura 17: Camisa C-182-X070, SKU: CA-C182X070, Marca: SPQ.*

Diámetro interior: 101.60mm. 4 pulgadas; largo: 139.7mm. 5 1/2 pulgadas; diámetro exterior: 105.23mm. 4.143 pulgadas.

Se adquirieron muestras de camisas comerciales de un motor con diámetro amplio de cilindro para minimizar el efecto de radio de curvatura para preparar la superficie plana.

Posteriormente se seccionaron para obtener las probetas, esto se realizó en una cortadora metalográfica, empleando un disco de corte fino de carburo de silicio (ver Figura 18).



*Figura 18. Corte de camisas.*

Se realizó el maquinado de las probetas para obtener dimensiones aproximadamente de 10 mm x 10 mm y de 2-4 mm de espesor. Los cortes del material se hicieron con una cortadora metalográfica como se muestra en la figura 19.



*Figura 19. Cortadora metalográfica.*

Para una fácil manipulación de las muestras se llevó a cabo el montaje de las muestras en una base de baquelita con un diámetro aproximado de 25mm por 20mm

de alto, utilizando una montadora con calefactor y prensado hidráulico manual en el laboratorio de Análisis de Materiales. En la figura 20 se muestra la montadora utilizada.

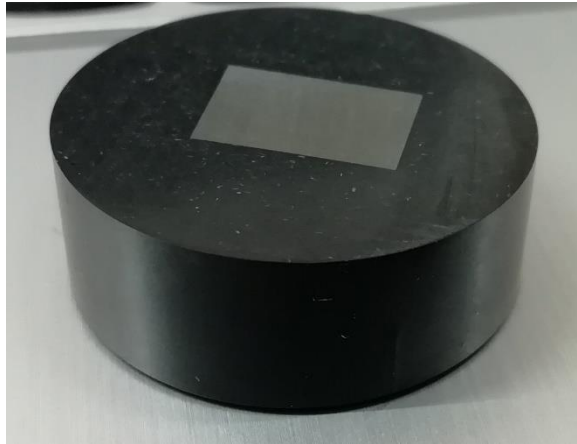


*Figura 20. Montadora Buehler.*

Para el montaje de la muestra es necesario contar con los elementos necesarios como son: la montadora, los dados o troqueles, el calefactor, el desmoldante, pellets de baquelita, guantes.

De manera general el proceso de montaje consiste en centrar la muestra en la contraparte del dado, los dados dan la geometría y transmiten la presión del gato hidráulico de la montadora a los pellets de baquelita, los cuales son fundidos mediante la energía térmica del calefactor, antes de agregar la suficiente cantidad de pellets se aplica desmoldante para retirar fácilmente la muestra montada.

Con las muestras montadas se realiza el desbaste de una manera más rápida y precisa. En la figura 21 se observa una muestra montada en baquelita.



*Figura 21. Muestra montada en baquelita.*

Se realizó el desbaste en una lijadora metalográfica con control de velocidad y lubricación con agua, con lijas de carburo de silicio con grano 100 hasta 2000 para obtener una superficie plana y posteriormente realizar un pulido con alúmina para un acabado espejo. En la figura 22 se muestra la lijadora utilizada para el desbaste de las muestras.



*Figura 22. Lijadora METKON.*

Para el desbaste grueso inicial se ajustó la velocidad alrededor de las 400rpm, con una presión moderada sobre las muestras y a regulares intervalos rotando 90° la muestra con la finalidad de evitar formar diferentes caras en la muestra.

Para el desbaste fino es aceptable el aumento de la velocidad de la lijadora, de acuerdo con el acabado que se vaya obteniendo, si bien este proceso depende mucho de la habilidad de la persona que lo realiza.

Es muy importante la lubricación constante entre la muestra y el material abrasivo de

la lija en virtud de que el lubricante, en este caso el agua, ayuda a que el material desprendido sea arrastrado fuera de la superficie de interacción de los materiales sin generar desbastes irregulares y de esta manera obtener una superficie desbastada lo más homogénea posible.

En el proceso de desbaste, el fluido de agua también ayuda a refrigerar tanto a la muestra como a la lija, ya que, de no usar el fluido, la muestra podría tener calentamientos importantes que podrían modificar la superficie y se podría ver afectado el contraste de las áreas al observarse la microestructura mediante microscopía. En la figura 23 se muestra la pulidora utilizada para dar el acabado espejo a las muestras.



*Figura 23. Pulidora Buehler.*

El acabado final de las muestras se da con la pulidora; esta permite realizar un desbaste muy fino para dar el acabado espejo. Se utiliza alúmina en solución para el pulido. Las muestras se posicionan sobre el disco giratorio con fieltro de la pulidora aplicando suficiente alúmina en solución para el lubricado y el pulido de la muestra.

La fuerza aplicada a la muestra debe ser la adecuada para permitir la interacción entre el disco, el fluido con alúmina y la muestra.

En el proceso de pulido la velocidad puede oscilar entre 350 rpm y 600 rpm aproximadamente. Es necesario mantener la muestra en constante cambio de ángulo para evitar la formación de rayas en la superficie, de manera tal, que se pueda



alcanzar un pulido aceptable y el acabado espejo.

Se prepararon suficientes muestras para las diferentes etapas del proceso de caracterización estructural y tribológica, para materiales de las dos camisas: muestras tratadas térmicamente y no tratadas, muestras para pruebas tribológicas en seco y con lubricante, etc. entre las que se pueden mencionar las siguientes:

- Muestras para observar la microestructura de los materiales, por microscopía óptica y de barrido electrónico, así como para determinación de elementos presentes por EDS
- Muestras para medición de dureza Vickers
- Muestras para medición de dureza Rockwell
- Muestras para determinación de rugosidad mediante perfilometría
- Muestras para determinación de la composición de los materiales por espectroscopía de chispa
- Muestras para análisis estructural por DRX
- Muestras para las pruebas tribológicas en seco y con lubricante

### 3.2. Rugosidad y dureza

Se caracterizaron las probetas por medio de la medición de rugosidad y dureza en superficies pulidas. Para la rugosidad se empleó el perfilómetro de superficies, Marca Mitutoyo modelo SJ-400 (ver Figura 24).



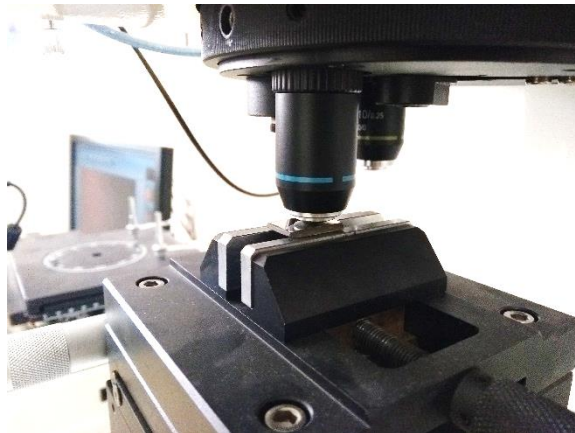
*Figura 24. Perfilómetro Mitutoyo.*

El inicio de las mediciones se da con la calibración del equipo, la cual consiste principalmente en verificar el desplazamiento uniforme sobre la muestra. Para la calibración del equipo se precisa de patrones con las características determinadas de dimensiones, perfiles y rugosidad.

Se asegura que el equipo realiza un desplazamiento uniforme cuando el ángulo de desplazamiento no varía con respecto a la superficie, es decir, se verifica que la superficie esté nivelada y que el valor de la rugosidad coincida con la rugosidad del patrón.

Se tomaron mediciones en forma horizontal (eje X) y vertical (eje Y) de la superficie plana, con el fin de obtener un promedio del valor de la rugosidad representativo. En cuanto a la dureza, se utilizó el microdurómetro de fuerza Vickers y el durómetro Rockwell, tomando entre 5 y 10 mediciones en diferentes puntos de la muestra para obtener un promedio.

En el caso del microdurómetro de fuerza Vickers se utilizó un penetrador con geometría de diamante piramidal. En la figura 25 se observa el microdurómetro de fuerza Vickers con la muestra montada en sus mordazas.



*Figura 25. Ensayo de dureza con microdurómetro de fuerza Vickers.*



*Figura 26. Durómetro Rockwell.*

Para el caso de los ensayos de dureza Rockwell se utilizó un indentador con geometría de bola de 1/16". La figura 26 muestra el durómetro Rockwell utilizado para los ensayos de dureza.

Debido a que las dimensiones del indentador utilizado para las mediciones de dureza Vickers, son comparables con los granos de ferrita y perlita en las muestras (20  $\mu\text{m}$  aprox.), las mediciones resultaron con mayor rango de diferencia entre cada medición. Sin embargo, con el ensayo de dureza Vickers, se pudo observar la variación de la dureza en zonas con mayor cantidad de ferrita y en zonas con mayor cantidad de perlita.

La medición de rugosidad se realiza con el fin de conocer la calidad en el acabado de la superficie de las probetas, indicada por el valor de Ra (Rugosidad media aritmética). En el caso de las pruebas de dureza, es importante realizarlas para conocer algunas de las propiedades mecánicas. De esta manera se asegura que todas las probetas están en las mismas condiciones de acabado superficial y dureza.

### 3.3. Estructura (DRX)

Se caracterizaron las probetas por medio del difractómetro de Rayos X (ver Figura 27) para tener la referencia de las fases presentes en el material y poder comparar posteriormente las muestras y verificar los cambios en la estructura del material.

Las probetas para Rayos X fueron redimensionadas para ocupar el espacio disponible en el porta muestras del difractómetro; de manera que las muestras se ajustaron a unas dimensiones de 1cm x 1cm x 0.5cm aproximadamente.

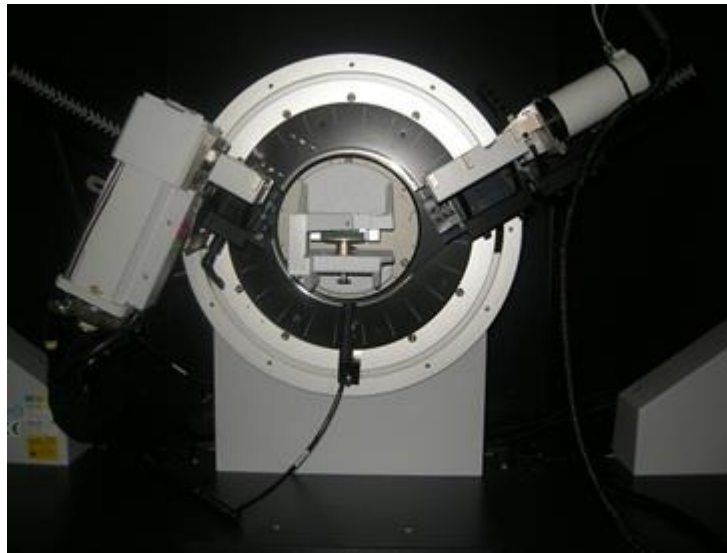


Figura 27. Difractómetro D8 Advance Bruker. Imagen recuperada de <https://www.cicata.ipn.mx/oferta-educativa/maestria-pta/recursos-e-infraestructura/difraccion-de-rayos-x.html>

### 3.4. Microestructura (MEB, MO)

Se realizó la caracterización microestructural de las probetas utilizando el microscopio electrónico de barrido (ver Figura 28) y el microscopio óptico evidenciando la presencia de la matriz ferrítica-perlítica en la microestructura del material.

Las probetas que se observaron mediante el microscopio electrónico de barrido, no fueron montadas en baquelita. No así las muestras observadas en el microscopio óptico, las cuales sí fueron montadas en baquelita.



*Figura 28. Disposición de las muestras para observación mediante el microscopio electrónico de barrido.*

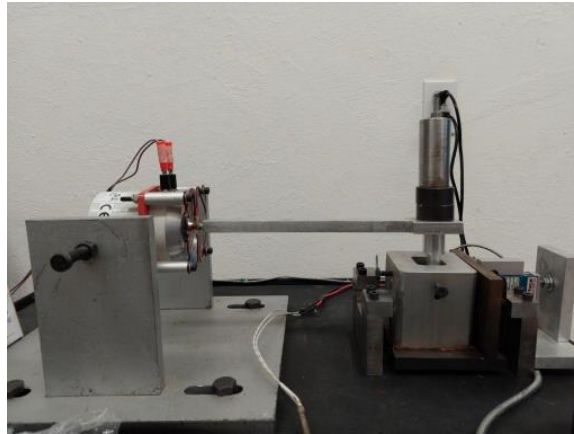
### 3.5. Pruebas tribológicas

Las pruebas tribológicas se realizaron mediante una máquina reciprocante de desplazamiento lineal desarrollada en la Universidad Politécnica de Pachuca (ver Figura 29), el desarrollo mecatrónico de la máquina reciprocante le permite efectuar pruebas de desgaste por deslizamiento en materiales y recubrimientos con una configuración bola sobre plano (contacto puntual).

Se utiliza un excitador (*shaker* o motor reciprocante) de frecuencia variable, el cual mueve un eje que sostiene la bola y hace contacto por deslizamiento con el plano (probeta). La máquina tiene la capacidad de realizar pruebas en condiciones secas y lubricadas.

La máquina proporciona las características y condiciones que permiten realizar una huella de desgaste en la superficie del material donde se pueden observar los mecanismos de desgaste y las características físicas de la huella.

Cuenta con un programa donde se controlan los parámetros de prueba, así como un paro automático que actúa una vez alcanzado el número de ciclos programado. La información que se obtiene mediante la tarjeta de adquisición de datos permite realizar el cálculo de los coeficientes de fricción y la tasa de desgaste.



*Figura 29. Máquina recíproca Universidad Politécnica de Pachuca.*

En conjunto estas características arrojan los resultados del comportamiento del material ante condiciones de desgaste, en este trabajo se realizaron las pruebas tribológicas a las muestras sin tratamiento térmico y con tratamiento térmico en condiciones secas y con lubricante.

### **3.6. Perfilometría, MEB y MO**

Mediante la perfilometría y la microscopía electrónica de barrido y óptica se obtienen los datos para caracterizar la huella de desgaste en cuanto a su longitud, ancho y perfil de huella, es decir la topografía de la superficie de la huella, así como los mecanismos de desgaste presentes en la superficie de las muestras.

El perfilómetro utilizado es de la marca Mitutoyo. Cuenta con un sensor de inducción de corriente excitado mediante una punta palpadora que se desplaza sobre la superficie de manera uniforme. La información registrada proporciona los datos de rugosidad y el perfil de huella. En la figura 30 se observa la punta del perfilómetro sobre la superficie de la muestra mientras se registran los datos.



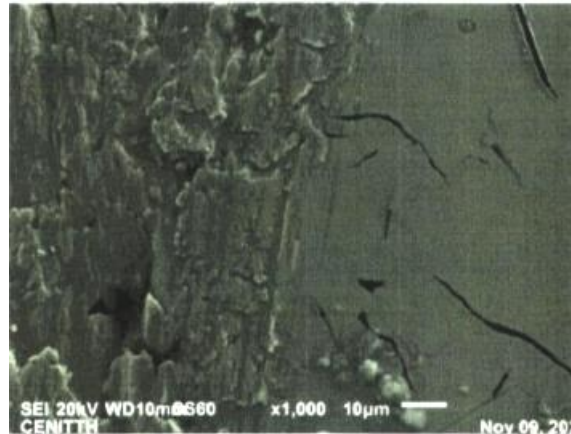
*Figura 30. Punta palpadora del rugosímetro sobre una muestra.*

El microscopio electrónico de barrido es de suma importancia para la caracterización de la huella de desgaste. Es posible visualizar los mecanismos de desgaste, así como medir las dimensiones de la huella. En la figura 31 se muestra el microscopio electrónico de barrido utilizado.



*Figura 31. Microscopio Electrónico de Barrido.*

A diferencia del microscopio óptico, el microscopio electrónico de barrido es capaz de proporcionar imágenes claras y definidas aun con aumentos superiores a 1000X, esto debido a que es utilizado un haz de electrones en lugar de la luz visible. En la siguiente figura (Figura 32) se observa una imagen de la superficie de una muestra que fue sometida a desgaste. La imagen se tomó con un microscopio electrónico de barrido.



*Figura 32. Muestra con huella de desgaste observada bajo el microscopio electrónico de barrido.*

El microscopio óptico es el equipo que se prefiere usar para las primeras observaciones ya que es el equipo que se tiene con mayor disponibilidad y las muestras se pueden intercambiar de forma sencilla ya que no se requiere de ambientes controlados o de un proceso minucioso para encender y operar el equipo.

### **3.7. Tratamiento térmico**

Se propuso realizar el tratamiento térmico a las muestras con base en las características del material y por ser un método sencillo y económico para lograr mejorar las características del material ante el desgaste.

En una fundición gris se produce una transformación cuando se eleva la temperatura entre 800°C y 900°; parte del material se transforma en austenita.

El temple consiste en calentar a una temperatura tal que comience la transformación. En la fundición gris comenzará la difusión del carbono con la tendencia a formar rosetas o nódulos de carbono. En las fundiciones grises como en los aceros, al enfriar rápidamente, se logra aumentar la dureza y la resistencia al desgaste.

En general, las fundiciones que contienen importantes porcentajes de ferrita y grafito, no son las más recomendables para practicar el temple; en este caso se manejó una fundición de matriz ferrítica-perlítica (mayormente perlítica) con lo cual es más probable alcanzar notables mejoras en dureza y resistencia al desgaste.

El tratamiento térmico se realizó en el laboratorio de análisis de materiales en la UAEH usando una mufla (ver Figura 33) a 800°C por 15 minutos y después enfriando rápidamente en agua.





Figura 33. Mufla. Imagen recuperada de [https://http2.mlstatic.com/D\\_NQ\\_NP\\_970797-MLM50215321342\\_062022-O.jpg](https://http2.mlstatic.com/D_NQ_NP_970797-MLM50215321342_062022-O.jpg)

Las muestras se colocan en el interior de la mufla y se establece el ajuste de la temperatura deseada (*set point*); para el caso se ajustó a 800°C, el tiempo que toma para alcanzar la temperatura depende de la potencia de sus resistencias internas y de las condiciones en que se encuentren.

Una vez alcanzada la temperatura de 800°C, es innegable la difusión del carbono. En el momento que se alcanzan los 15 minutos a 800°C, se extraen las muestras del interior de la mufla y se enfrían rápidamente en agua.

El procedimiento no es complejo, sin embargo, es necesario tener en cuenta todas las condiciones de seguridad al trabajar con las piezas a temperaturas altas; es necesario contar con unas pinzas largas, por ejemplo, unas pinzas para crisol, guantes resistentes a altas temperaturas, careta o gafas de seguridad, así como la ropa adecuada, etc. previendo algún descuido durante la manipulación de las muestras calientes.

Cuando se extrae la muestra caliente del interior de la mufla, se requiere mantener firme la pieza y llevarla rápidamente al recipiente con agua, la muestra cambiará de color y su temperatura se reducirá drásticamente; debido a esto se produce vapor de agua y burbujas en la superficie de la muestra, por lo que es importante, una vez sumergida la pieza en el agua se le dé un movimiento brusco y constante para evitar

la acumulación de burbujas en la superficie de la muestra y lograr un temple homogéneo.

Con la generación de las burbujas que se forman sobre la superficie de la muestra se puede crear un aislante térmico, debido a que las burbujas se interponen entre la muestra y el agua, pudiendo afectar el templado.

### 3.8. Caracterización de muestras

La caracterización de las muestras se realizó durante las diferentes etapas del desarrollo de este trabajo. Las muestras sin tratamiento térmico y con tratamiento térmico en condiciones secas y con lubricante fueron sometidas a las diferentes técnicas experimentales mencionadas anteriormente para obtener los resultados que permitieran la caracterización completa del material a lo largo del proceso.

Para la caracterización microestructural mediante el microscopio, se debe realizar una serie de pasos previos en el material para poder ver la microestructura que posee. El primer paso es el corte del material para extraer una pieza, posteriormente la pieza se debe montar en baquelita para su mejor manejo y seguido de dicho paso se realiza la preparación metalográfica.

La preparación metalográfica consiste en tres etapas: desbaste superficial, pulido y ataque metalográfico. Desbaste superficial con lijas de carburo de silicio de distintas granulometrías; desde lijas de mayor granulometría hasta las lijas de menor granulometría con el fin de obtener una rugosidad superficial determinada a la superficie de la muestra que se desea observar.

El pulido de la muestra se requiere para dar un acabado especular a la superficie de la muestra, es decir la rugosidad de la superficie de la muestra es mínima y se ve como un espejo. El pulido se realiza con alúmina en suspensión acuosa.

Finalmente, para observar la microestructura de la muestra de la fundición bajo el microscopio se realiza el ataque metalográfico. Para el revelado de la microestructura del material se utilizó el reactivo Nital, que es una solución alcohólica de ácido nítrico en un alcohol que puede ser etanol o metanol. En este caso se utilizó Nital al 4% es decir, la solución contiene 4 partes de ácido nítrico y 96 partes de alcohol.

El medio de ataque disuelve preferentemente la cementita, que es la fase rica en carbono del material:  $\text{Fe}_3\text{C}$  (6.67% C).

## 3.9. INSTRUMENTOS Y MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN

### 3.9.1. Caracterización química.

Para la caracterización química de las muestras obtenidas se utilizó la técnica de espectroscopía de emisión atómica por descarga electrostática, también llamada espectroscopía de chispa o de arco eléctrico, el equipo utilizado se encuentra en el laboratorio de calidad de la planta de fundición Gerdau Corsa.

Durante la caracterización microestructural se utilizó un microscopio electrónico de barrido con EDS el cual permitió realizar también el mapeo elemental de la muestra siendo otra técnica empleada para la caracterización química.

### 3.9.2. Caracterización estructural

Los patrones de difracción de rayos X se obtuvieron mediante un difractómetro con la geometría  $\theta$ - $\theta$  de Bragg-Brentano parafofocalizante en modo reflexión. Se utilizó un detector lineal recto con un ancho angular de  $3.5^\circ$ . El experimento se realizó de  $20.000$  a  $110.000^\circ 2\theta$  con un paso estimado aproximado de  $0.030^\circ 2\theta$ , utilizando  $\text{CuK}\alpha_{1,2}$  ( $\lambda_1 = 1.5406 \text{ \AA}$ ,  $\lambda_2 = 1.5443 \text{ \AA}$ ) sobre las muestras de  $1 \text{ cm}^2$  de la camisa de cilindro.

### 3.9.3. Caracterización tribológica

Las pruebas tribológicas en condiciones secas y lubricadas se realizaron en una máquina de deslizamiento lineal alternativo basada en la norma ASTM G133 [40]. El pin esférico de acero inoxidable 440C se usó para deslizarse contra la superficie del material bajo prueba. Se realizaron tres pruebas para cada muestra. Para las pruebas lubricadas, las muestras se sumergieron en aceite sintético comercial SAE 5W-40 contenido en un recipiente de aluminio, que se fija al portamuestras. Las condiciones de las pruebas tribológicas que se muestran en la siguiente tabla y el pin utilizado se establecieron con base en varias pruebas preliminares para asegurar el desgaste en la superficie.

*Tabla 6. Condiciones de la prueba tribológica*

<b>Condiciones</b>	<b>Presión</b>	<b>Carga</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Amplitud</b>	<b>Ciclos</b>
<b>atmosféricas</b>	<b>Hertziana (GPa)</b>	<b>(N)</b>	<b>(Hz)</b>	<b>(mm)</b>	
290-296 K					
40-45%	1.12	6.47	15	6	27000
humedad relativa					

Las probetas utilizadas en las pruebas secas y el pin de acero se colocaron como se muestra en el diagrama esquemático de la Figura 34 (a). Las pruebas en condiciones lubricadas se presentan en la Figura 34 (b). La carga normal se aplica directamente al pin.

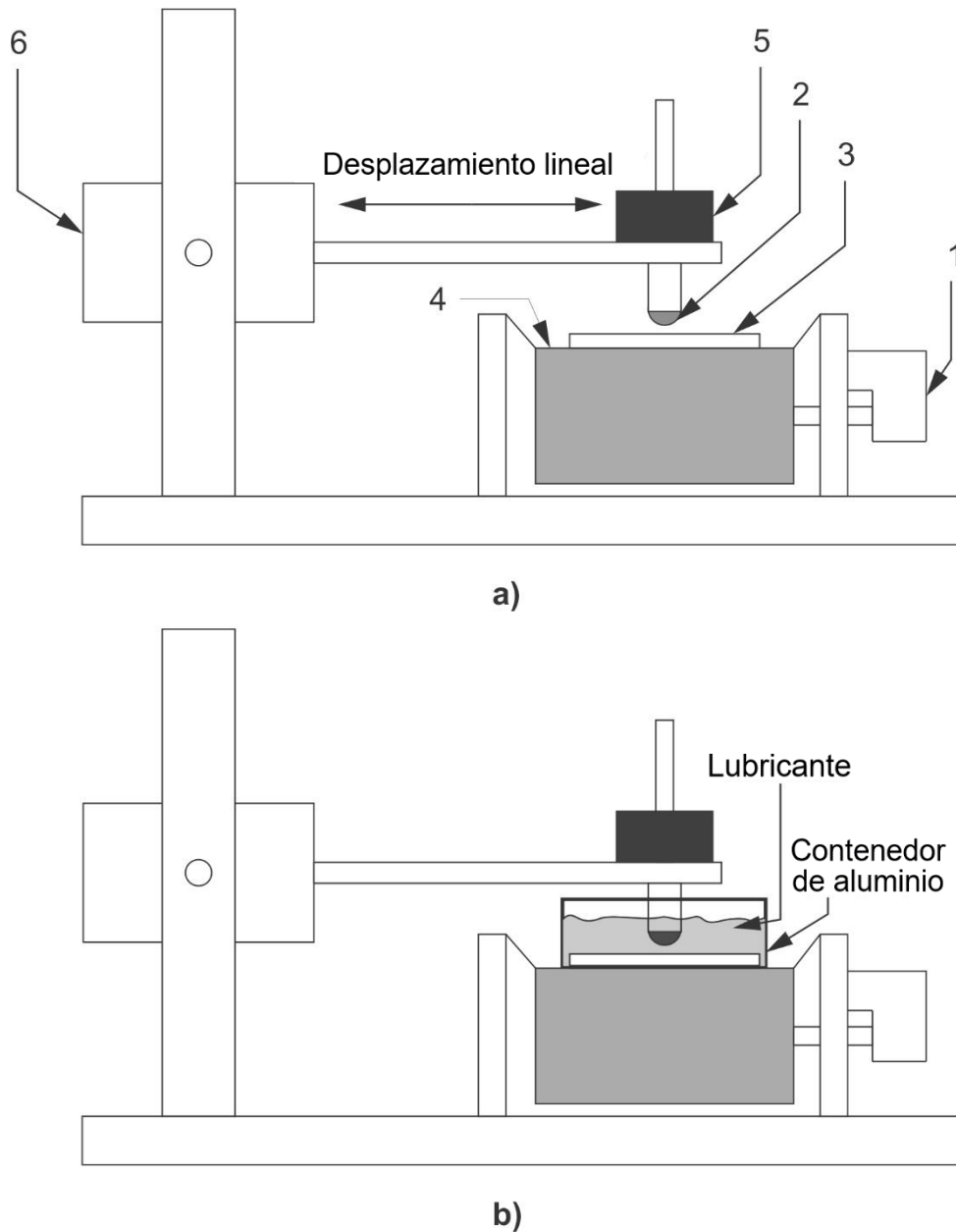


Figura 34. a) Diagrama esquemático simplificado de la máquina recíproca, 1: transductor de la fuerza de fricción; 2: pin; 3: muestra; 4: portamuestras; 5: carga normal; 6: controlador del oscilador, b) contenedor de aluminio con lubricante.

### 3.9.4. Caracterización de la superficie con desgaste

El perfil de la huella de desgaste y el valor promedio de rugosidad de 10 mediciones en diferentes áreas se determinaron utilizando un instrumento de medición de rugosidad.

La superficie del material evaluado se observó mediante un microscopio óptico y un microscopio electrónico de barrido con modo de bajo vacío.

La tasa de desgaste y el coeficiente de fricción del material fueron calculados con base en los datos obtenidos de la máquina reciprocante de deslizamiento lineal.

La experimentación tribológica se realizó a las muestras sin tratamiento térmico, con tratamiento térmico, sin lubricante y con lubricante para obtener la información completa sobre el comportamiento ante el desgaste en las diferentes condiciones.

### **3.5.3. Tratamiento térmico**

El tratamiento térmico (temple) se realizó a las muestras de la siguiente manera:

1. Obtención de muestras, realizando el corte del material mediante una cortadora metalográfica con dimensiones de 1 cm x 1 cm aproximadamente.
2. Colocar en la mufla y programar la elevación de la temperatura hasta 800°C.
3. Dejar 15 minutos a esa temperatura.
4. Realizar el enfriamiento rápido en agua.
5. Preparación de la muestra mediante desbaste y pulido.
6. Verificar la microestructura. Revelado con Nital al 4%.
7. Medir dureza Rockwell.

## CAPITULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La caracterización química, estructural y tribológica de las muestras utilizadas, fue realizada mediante las técnicas de Espectroscopía de Emisión Atómica de Descarga Electroestática, EDS con mapeo elemental, Difracción de Rayos X (DRX), Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), Microscopía Óptica (MO), perfilometría, y para evaluar la dureza del material y el efecto del desgaste se realizó mediante el microdureómetro de fuerza Vickers, Rockwell C y la máquina reciprocante de deslizamiento lineal. En este capítulo se discuten los resultados de las técnicas de caracterización.

### 4.1 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

#### 4.1.1. ESPECTROSCOPIA DE EMISIÓN ATÓMICA POR DESCARGA ELECTROSTÁTICA

Los elementos presentes en las muestras evaluadas fueron obtenidos por espectroscopia de chispa.

A continuación, se muestra la tabla donde se muestran las referencias de los elementos presentes en los materiales utilizados en las camisas de los cilindros cuando se fabricaron los motores y las muestras C-182 y C-166 que corresponden a las muestras bajo estudio.

Se puede observar que en las muestras bajo estudio cuentan con un bajo contenido de carbono. Los resultados coinciden con trabajos reportados sobre la fundición gris analizada [41].

*Tabla 7. Composición química en porcentaje en peso (no se incluye el hierro)*

	Composición (%)							
	C	Si	Mn	P	Cr	S	Mo	Ni
Standard								
45	2.8-3.2	1.7-2.4	0.5-0.8	0.4-0.45	0.25-0.4	<0.03	-	-
Standard P	2.8-3.2	1.7-2.4	0.5-0.8	0.6-0.8	0.25-0.4	<0.3	-	-
HE G40	2.6-2.8	1.1-1.6	<0.8	<0.8	-	<0.08	1.0-1.5	1.0-1.5

ASTM 247	3.1-3.4	1.85-2.3	-	<0.12	<0.35	<0.18	0.25	0.5
C-182	1.8	3.35	0.378	0.092	0.1550	0.0392	0.0253	0.0731
C-166	1.8	3.43	0.331	0.14	0.1647	0.0492	0.0567	0.0831

Las características de las muestras mostraron una apariencia a la fractura de una fundición gris, esta característica corresponde a los materiales usados en la fabricación de las camisas de los motores, sin embargo, al verificar la composición química, se observa que el contenido de carbono es notablemente menor que el rango de valores típicos.

Por otra parte, el valor de contenido de silicio es también notablemente mayor que el rango de valores típicos.

Esto nos permitió establecer que el material de partida utilizado es una fundición gris de bajo contenido de carbono, además de que la cantidad de silicio se encargaría de precipitar el carbono en forma de hojuelas de grafito lo que le da la apariencia gris a la fractura de la pieza.

#### 4.1.2 EDS CON MAPEO ELEMENTAL

Se realizó un análisis EDS con mapeo elemental como una técnica complementaria para verificar la composición de las muestras.

La presencia de los elementos obtenidos por espectroscopia de chispa fue confirmada por EDS y por mapeo elemental de las muestras bajo estudio. En este trabajo, como se mencionó anteriormente, se aplicó un tratamiento térmico a las muestras C-182 y C-166.

La técnica semicuantitativa de EDS permite, en primera instancia, identificar los elementos químicos presentes en una muestra. Así mismo, su implementación en un MEB permite también hacer mapeos elementales en sectores seleccionados de la muestra.

El tipo de distribución encontrado, a su vez, es una metodología para delimitar diferentes componentes microestructurales de la muestra (ver Figuras 35 y 36). De manera cualitativa también, mediante el mapeo elemental se pudo observar la distribución de los elementos en la superficie de la muestra.



Con estos resultados se pudo determinar con mayor precisión la microestructura de la muestra y la caracterización del material de partida.

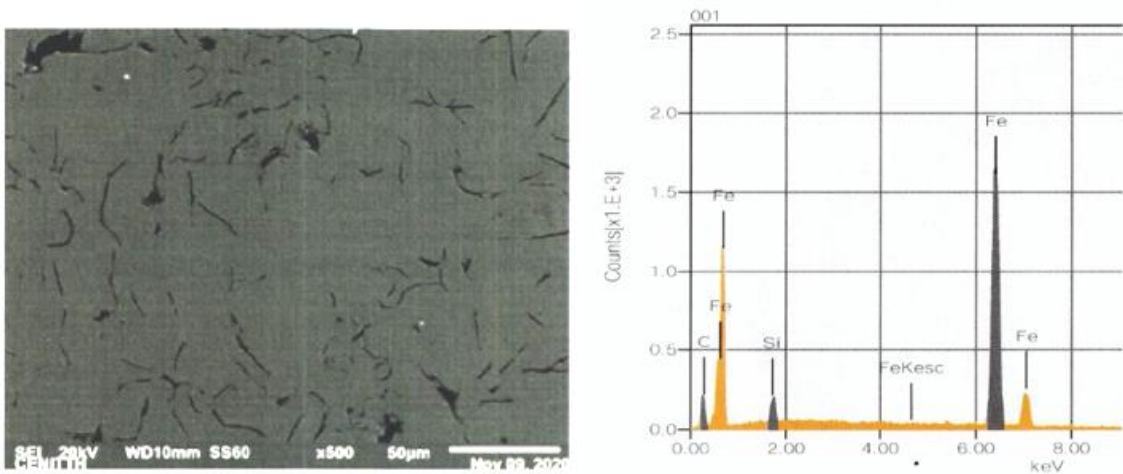


Figura 35. Análisis microelemental EDS C-166 sin tratamiento térmico.

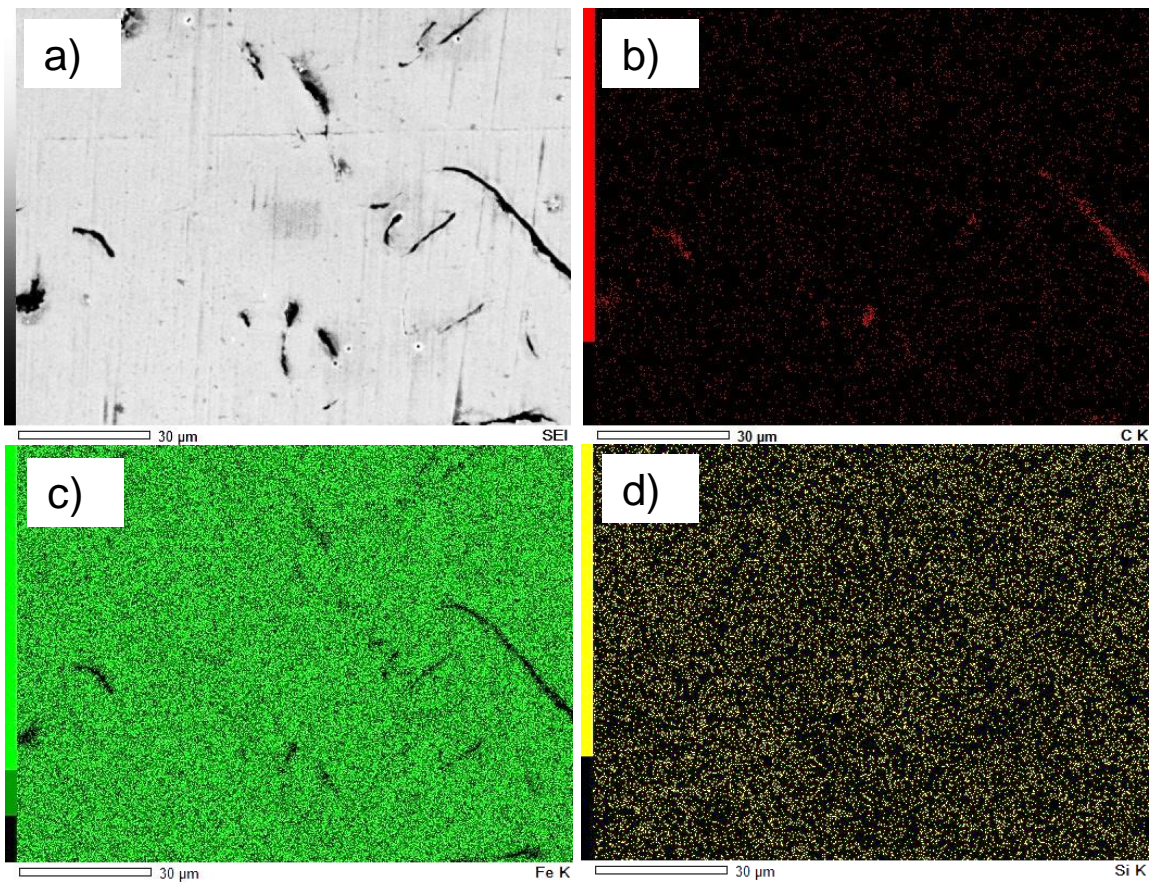


Figura 36. Mapeo. a) Imagen MEB, Distribución de b) Carbono c) Hierro d) Silicio.

## 4.2 RUGOSIDAD Y DUREZA

### 4.2.1. Rugosidad (perfilometría)

Se llevaron a cabo mediciones de rugosidad con rugosímetro Mitutoyo realizadas con la superficie en acabado espejo con desbaste con grano 2000 y pulido con alúmina en solución acuosa.

Las mediciones se realizaron a lo largo de los ejes X e Y de las muestras de manera distribuida, aproximadamente a cada milímetro de distancia en ambos ejes. El valor establecido de rugosidad se determinó con base en el valor promedio obtenido de las mediciones.

Con este procedimiento se asegura que todas las muestras se encuentran con un acabado en condiciones similares de rugosidad para poder hacer las comparativas pertinentes de acuerdo con los diferentes ensayos de la experimentación.

La siguiente tabla contiene los datos obtenidos de las mediciones de rugosidad de un par de probetas de la camisa C-182 y un par de probetas de la camisa C-166. El valor de Ra, representa la rugosidad media de la superficie medida en micras.

*Tabla 8. Mediciones de rugosidad (micras)*

P1-182	P2-182	P1-166	P2-166
Ra	Ra	Ra	Ra
0.04	0.04	0.04	0.06
0.04	0.04	0.04	0.07
0.05	0.04	0.04	0.07
0.06	0.04	0.04	0.07
0.06	0.04	0.04	0.07
0.05	0.07	0.06	0.12
0.07	0.06	0.06	0.08
0.07	0.06	0.06	0.08
0.06	0.06	0.06	0.08
0.07	0.06	0.07	0.08
<b>0.057</b>	<b>0.051</b>	<b>0.051</b>	<b>0.078</b>

### 4.2.2. Dureza Vickers

Se realizaron 10 mediciones para cada carga aplicada (1kg y 0.5kg). De acuerdo con los datos obtenidos se toman los valores de 232.87 HV1.0 y 237.68 HV0.5 con 1kg y 0.5 kg de fuerza, respectivamente. Se observa que variando la fuerza aplicada en cada prueba se mantiene la tendencia en la dureza del material.

Mediante el análisis de datos y el modelo de cuartiles, se descartan los valores atípicos registrados durante el ensayo de dureza Vickers.

Los resultados obtenidos fueron congruentes en las áreas seleccionadas en cada prueba, sin embargo, las mediciones no serían tan representativas de la dureza del material si se realizaran completamente al azar debido a que el indentador posee dimensiones comparables (20µm aprox.) con las áreas de ferrita o perlita. Considerando lo anterior, resulta más representativo el ensayo de dureza Rockwell.

*Tabla 9. Mediciones de dureza Vickers*

	HV1.0		HV0.5	
1	224	224	237.3	237.3
2	205.4	205.4	257.5	257.5
3	180.5		248.2	248.2
4	225.7	225.7	244.3	244.3
5	262.7	262.7	249.9	249.9
6	236.1	236.1	216.5	216.5
7	242.6	242.6	240.5	240.5
8	232.5	232.5	222.7	222.7
9	222.3	222.3	290.9	
10	244.5	244.5	222.2	222.2
	<b>227.63</b>	<b>232.87</b>	<b>243</b>	<b>237.68</b>

### 4.2.3. Dureza Rockwell

Se realizaron 4 mediciones para una carga aplicada de 150 kg durante 15 segundos con un indentador tipo bola de 1/16" sobre la superficie de las muestras sin tratar (C-166 y C-182) y de las muestras tratadas (C-166 TT y C-182 TT).

La designación correspondiente a la carga aplicada y el tipo de indentador es en la escala G de Rockwell. De acuerdo con los datos (HRG) obtenidos se toman los valores de 36.25, 31.8, 41.87 y 45.75 para las muestras C-166, C-182, C-166 TT y C-182 TT, respectivamente.

En la imagen de la figura 37, se observa la huella que deja el ensayo Rockwell. El indentador utilizado para el ensayo Rockwell, fue tipo bola y posee dimensiones de 1/16" (1.6 mm aprox.) de diámetro; debido a esto, el indentador puede penetrar y dejar una huella cuya área comprende las áreas de ferrita y de perlita. De esta manera los valores de dureza obtenidos durante el ensayo Rockwell resultan más representativos de la dureza del material.



*Figura 37. Probeta con huella después del ensayo Rockwell.*

*Tabla 10. Mediciones de dureza Rockwell (HRG)*

	C-166	C-182	C-166 TT	C-182 TT
1	34.4	32.9	36.4	42.8
2	36.2	31.9	44.7	45.5
3	36.7	31	43.9	47.1
4	37.7	31.4	42.5	47.6
Promedio	<b>36.25</b>	<b>31.8</b>	<b>41.88</b>	<b>45.75</b>

El valor promedio de rugosidad (Ra) se obtuvo dentro del rango para considerar un acabado espejo [42]; esto permite realizar los ensayos sobre la superficie de la aleación evaluada en un proceso unificado y controlado. La magnitud de la dureza de

CFP (por sus siglas en inglés: *Cast-Ferrite-Pearlite*) es cercana a las reportadas para la fundición de hierro gris ferrítico-perlítico [43, 44]. Los valores promedio de rugosidad y dureza se muestran en la Tabla 11. En CFP-TT se observó un aumento en la rugosidad y dureza, lo que se atribuyó a la formación de nódulos irregulares de grafito. [45-49].

Tabla 11. Rugosidad, dureza y tasa de desgaste específica

Muestra	Rugosidad, Ra ( $\mu\text{m}$ )	Dureza (HRC)	Tasa de desgaste específica ( $\text{mm}^3/\text{Nm}$ )	Error estándar ( $\text{mm}^3/\text{Nm}$ )
CFP	0.037	31.80	$6.6 \times 10^{-5}$	$1.01 \times 10^{-5}$
CFP-TT	0.097	45.75	$2.1 \times 10^{-5}$	$1.10 \times 10^{-5}$
CFP-L	-	-	$5.3 \times 10^{-7}$	$1.23 \times 10^{-7}$
CFP-TT-L	-	-	$3.3 \times 10^{-7}$	$1.35 \times 10^{-7}$

### 4.3 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL

A continuación se exponen los resultados obtenidos en cuanto a la caracterización estructural de las muestras de camisas sin tratamiento térmico y con tratamiento térmico.

En la Figura 38 (a) se observa que los picos (110), (200), (211) y (220) de la fase cristalina BCC del hierro  $\alpha$  aparecen en los patrones de difracción del hierro fundido de las muestras sin tratamiento térmico y con tratamiento térmico.

Este último también presenta el pico de mayor intensidad de grafito (002), validado a partir de la entrada del PDF número 41-1487, publicado por el ICDD, pero con una

intensidad extremadamente baja, lo que indica una ligera concentración de alótropo de carbono hexagonal con respecto a la ferrita  $\alpha$ .

Por lo tanto, no se esperan diferencias estructurales entre las muestras de prueba antes y después de la prueba tribológica.

La micrografía a 100X (Figura 38 (b)) muestra claramente que la muestra sin tratamiento térmico es una fundición gris de tipo A. Además, se puede observar que las escamas de grafito presentan una distribución uniforme con orientación aleatoria.

Alternativamente, en la Figura 38 (c) se observa la microestructura obtenida de la muestra con tratamiento térmico, donde se puede apreciar la difusión del carbono en grafito, formando nódulos irregulares. En este caso, la transformación de la perlita gruesa en fina por el tratamiento térmico aplicado favorece la formación de nódulos de grafito [50-54].

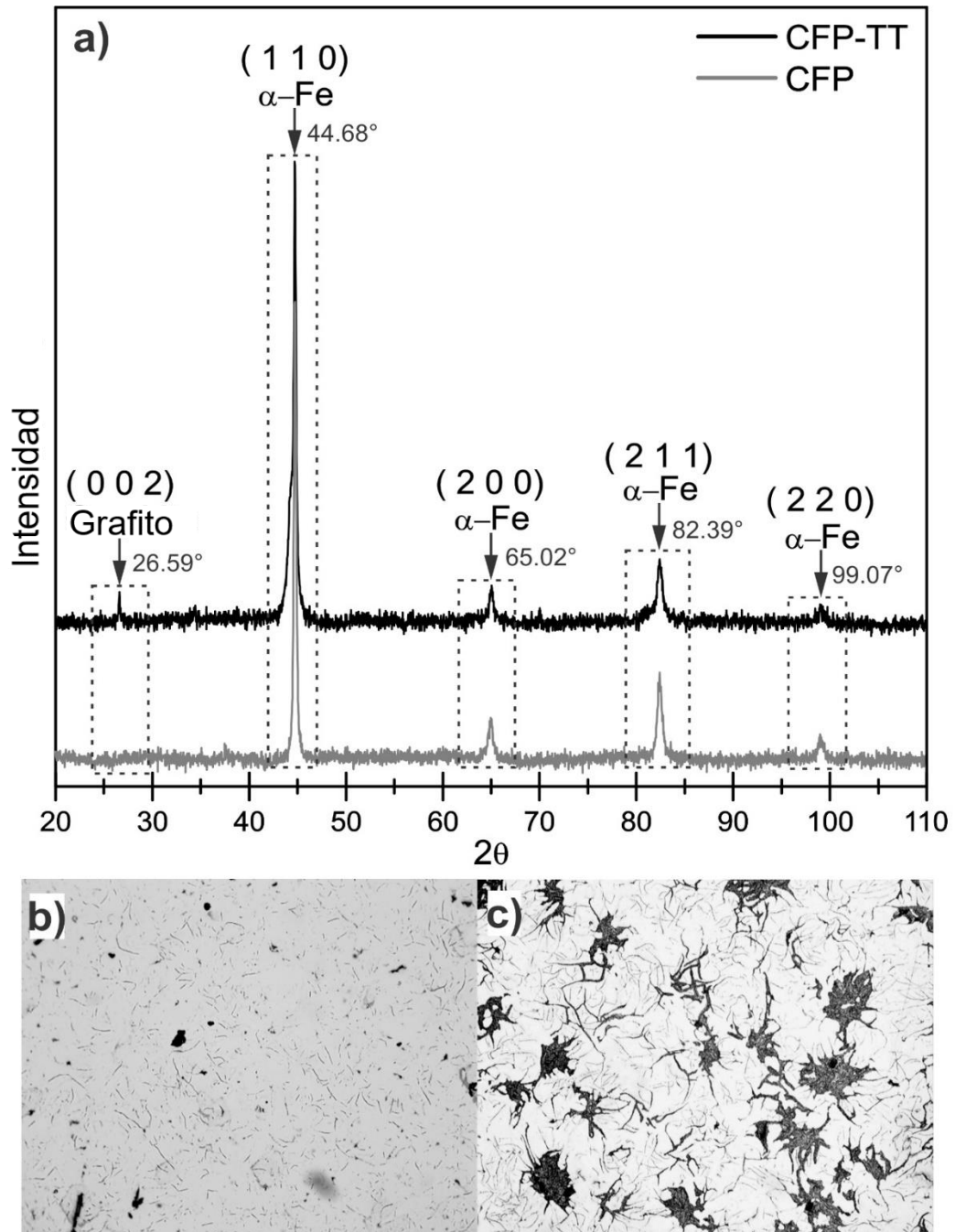


Figura 38. a) Patrón de DRX de la muestra sin tratamiento y con tratamiento térmico (CFP y CFP-TT), Micrografías a 100X de b) CFP y c) CFP-T

En las siguientes imágenes se observa el rayado de la lija 2000 antes del pulido. También se observan las hojuelas de grafito, característico de la fundición gris (ver Figura 39).

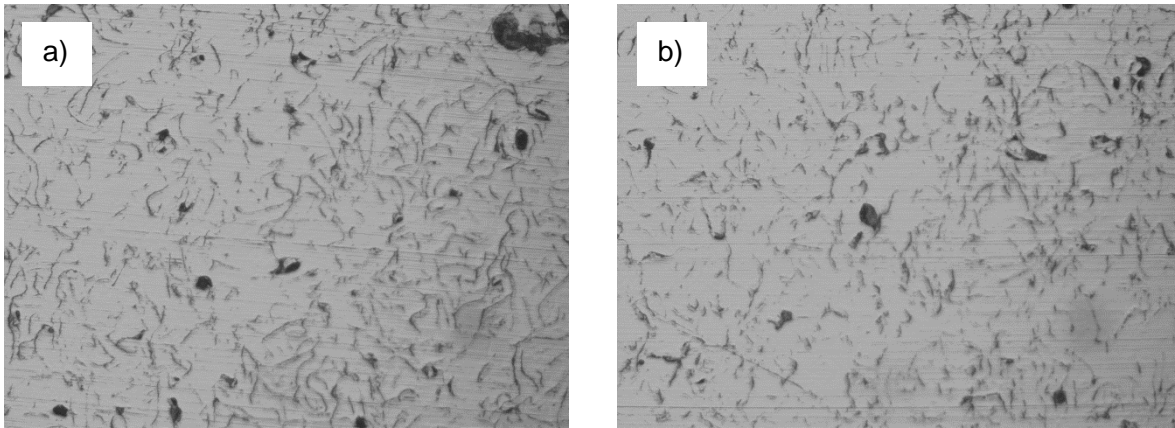


Figura 39. Micrografías 100X a) C-166 b) C-182.

Se atacó la superficie del material con Nital (ácido nítrico con alcohol) al 4%. Las siguientes fotos fueron tomadas a 100X (ver Figura 40).

Se observa la fase ferrita (partes claras) y la fase perlita (partes oscuras).

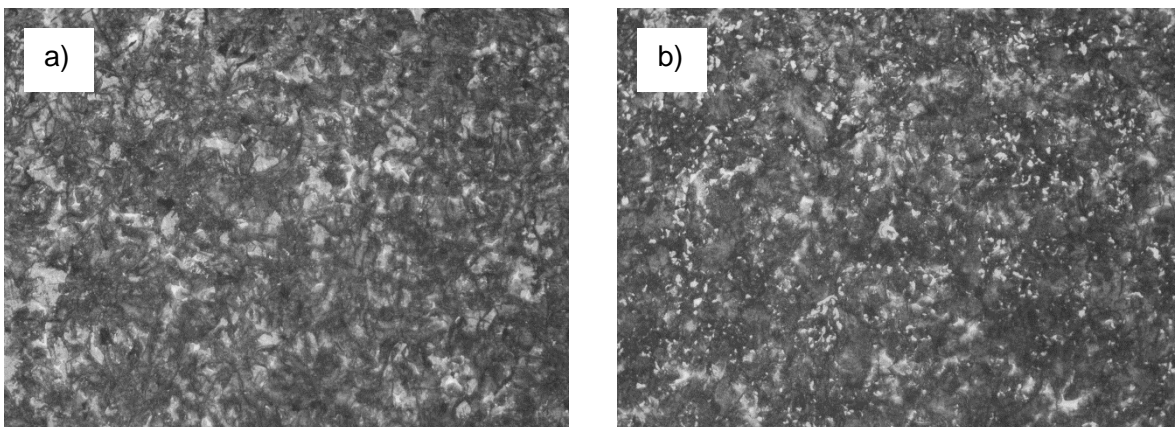
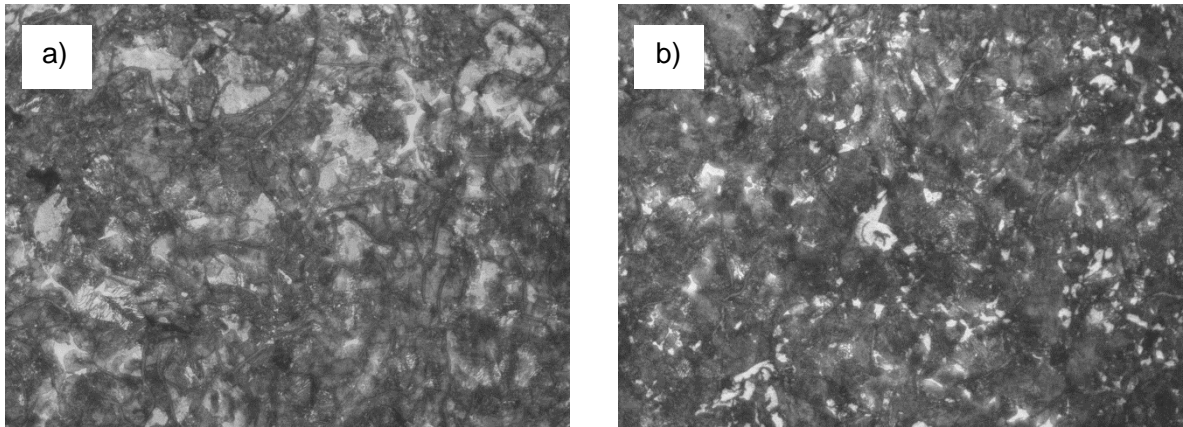


Figura 40. Micrografías 100X a) C-166 b) C-182

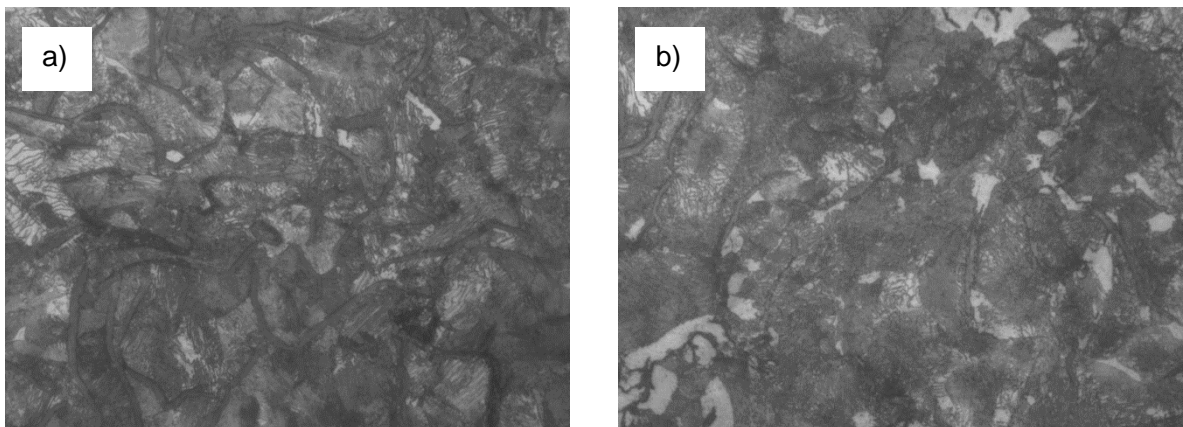


Las siguientes fotos fueron tomadas a 200X (ver Figura 41). Se puede observar ciertamente que la fase mayoritaria es perlita (ferrita+cementita).



*Figura 41. Micrografías 200X a) C-166 b) C-182.*

En las siguientes fotos (ver Figura 42) que se tomaron a 500X se observan las líneas claras y oscuras alternadas características de la fase perlita; es decir capas o láminas alternas de las dos fases (ferrita y cementita).

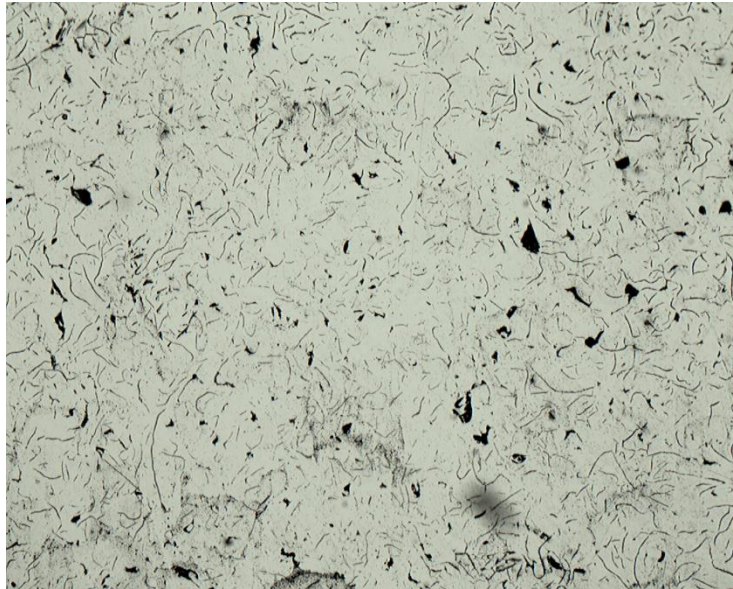


*Figura 42. Micrografías 500X a) C-166 b) C-182.*

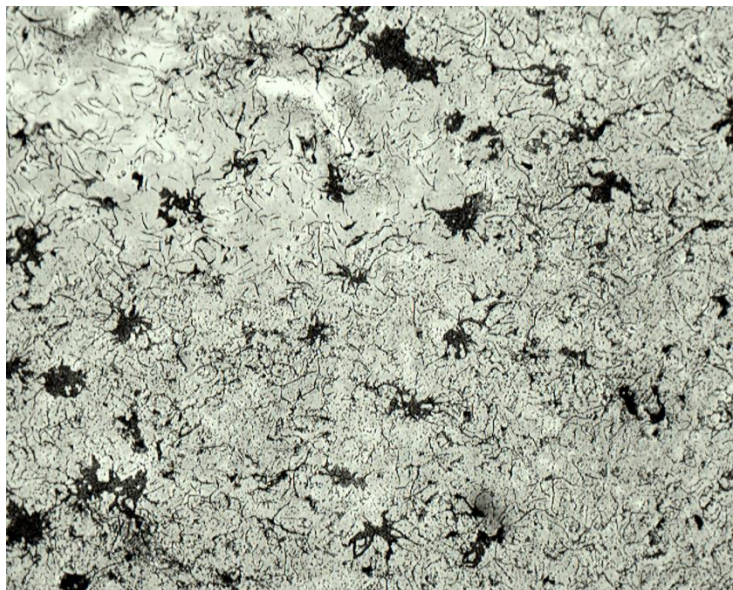
En las figuras 43 a 46 se presentan imágenes comparativas de la microestructura para las muestras tratadas y no tratadas.

En las imágenes se puede apreciar la difusión de carbono y la transformación de fases incrementando en las muestras tratadas los valores de dureza, manteniendo, sin embargo, la presencia de grafito en la superficie dotando a esta de un buen lubricante en seco.

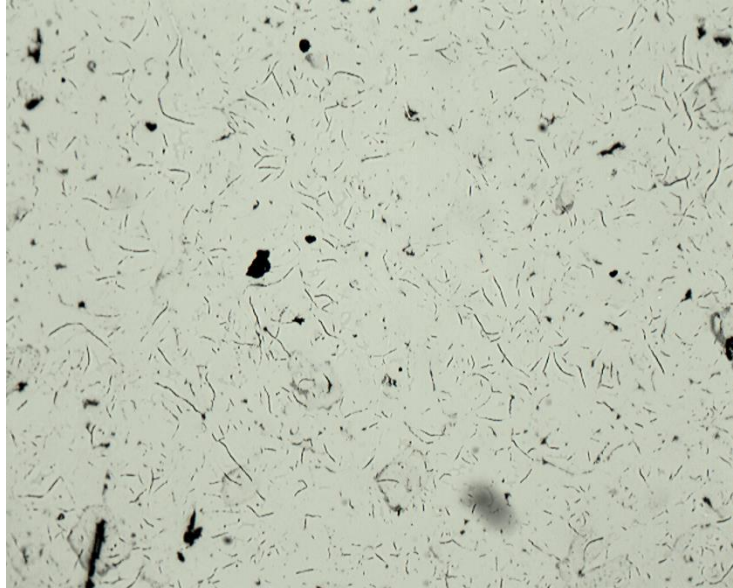
En el desempeño del revestimiento de cilindro se espera una buena lubricación en seco al inicio del ciclo de trabajo de las partes evitando un desgaste acelerado de las superficies. Una vez concluido el primer ciclo del motor, las piezas se lubricarán y el desgaste será sustancialmente menor.



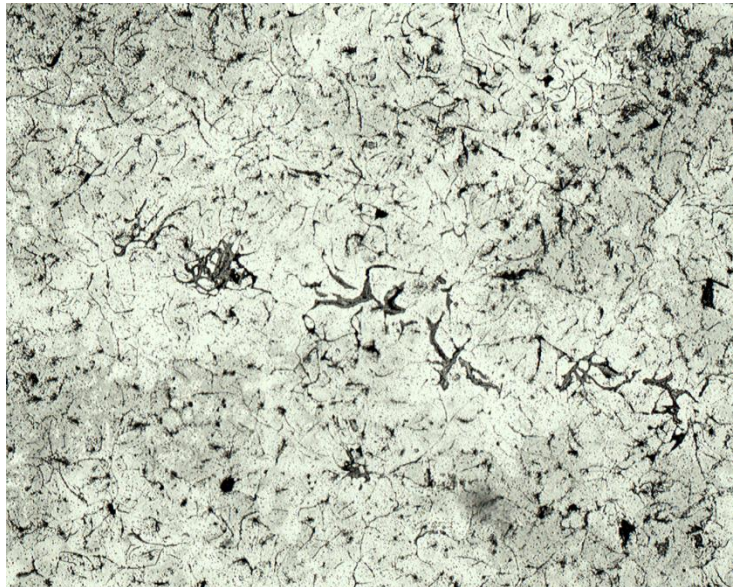
*Figura 43. C-166 Muestra sin tratamiento, pulido con alúmina a 100X.*



*Figura 44. C-166 Muestra con tratamiento térmico, superficie atacada con Nital 4% a 100X.*



*Figura 45. C-182 Muestra sin tratamiento, pulido con alúmina a 100X.*



*Figura 46. C-182 Muestra con tratamiento térmico, superficie atacada con Nital 4% a 100X.*

Se realizaron los experimentos correspondientes a las probetas de C-166 y C-182. Se verifica la presencia de Fe  $\alpha$  (ver Figura 47 y 48).

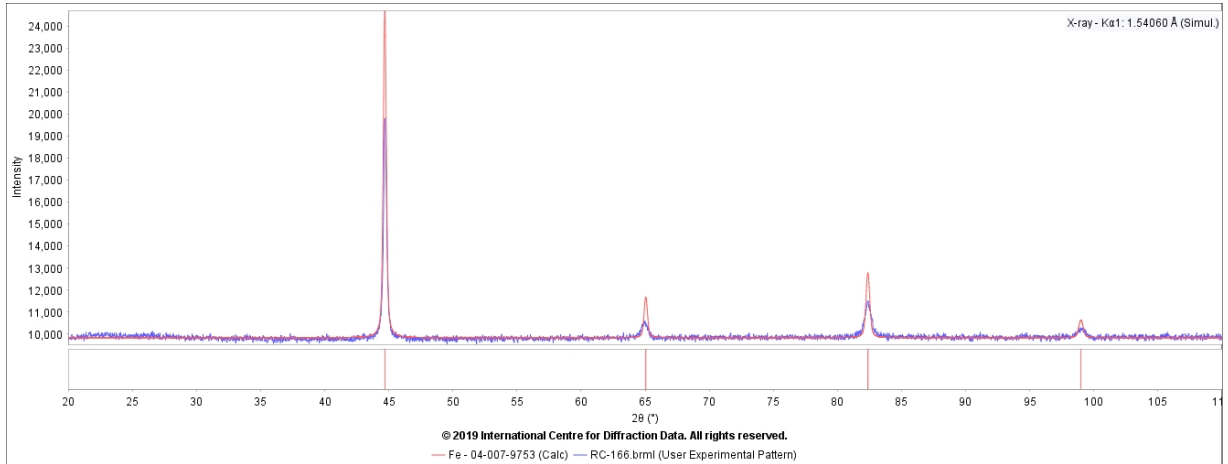


Figura 47. Difractograma C-166.

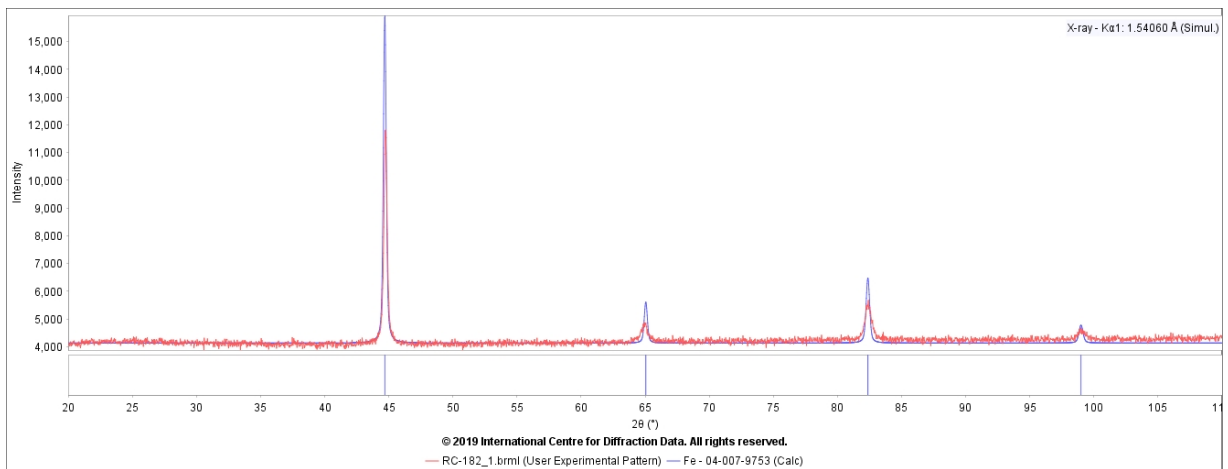
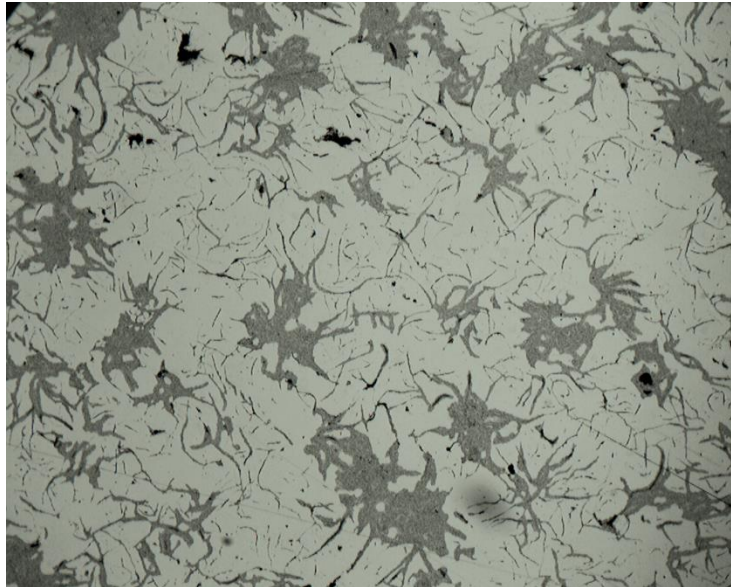


Figura 48. Difractograma C-182.

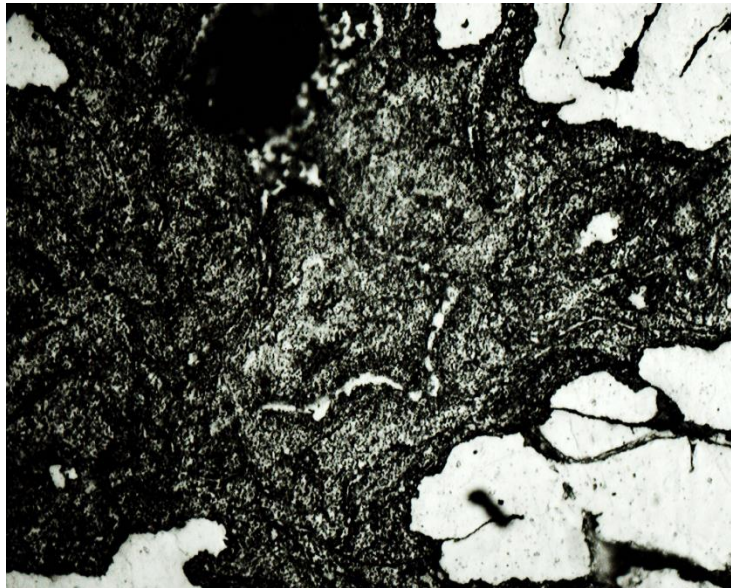
## 4.4 TRATAMIENTO TÉRMICO

Se llevó a cabo el tratamiento térmico en la mufla a 800°C y enfriando rápidamente en agua. El proceso para realizar el tratamiento térmico finaliza con la verificación de la microestructura y las pruebas de dureza antes del ensayo tribológico.

En las figuras 49 y 50 a 100X y 1000X respectivamente, se observa la difusión de carbono y la transformación de fases en la muestra C-182. Estos resultados revelan el cambio en la microestructura y el correspondiente aumento de la dureza del material.



*Figura 49. C-182 Pulido con alúmina a 100X. Se observa que el carbono se ha difundido y muestra una tendencia a formar rosetas.*



*Figura 50. Ataque con Nital. 1000X.*

Las muestras sin tratamiento térmico y con tratamiento térmico fueron sometidas a pruebas de desgaste en condiciones secas y lubricadas.

Las pruebas tribológicas se realizan para verificar la resistencia al desgaste en condiciones secas y con lubricante.

De acuerdo con los resultados obtenidos se confirma que el material de fundición gris de bajo contenido de carbono utilizado durante el desarrollo de este trabajo es adecuado para someterlo a tratamiento térmico.

Se logró la difusión de carbono esperada y se verificó el aumento correspondiente en la dureza y la resistencia al desgaste en condiciones lubricadas y sin lubricación.

Después de realizar el tratamiento térmico a las muestras, se mantuvo el grafito en la superficie del material proporcionando una buena lubricación en seco.

## 4.5 CARACTERIZACIÓN TRIBOLÓGICA

En esta sección solo se reportan los datos de los materiales de estudio; el pin no fue considerado para análisis por no presentar daño al final de las pruebas.

Durante la prueba, se registró el coeficiente de fricción. La Figura 51 muestra el comportamiento de la fricción de CFP y CFP-TT en condiciones de deslizamiento seco (Figura 51 (a)) y lubricado (Figura 51 (b)) contra un pin de acero inoxidable 440C.

Se observaron fluctuaciones en el coeficiente de fricción en las pruebas en seco debido a la evolución de los mecanismos de desgaste de la superficie provocados por el contacto directo entre el pin y la muestra [55].

Los resultados de las pruebas con lubricante mostraron un comportamiento periódico característico y consistente a lo largo de la distancia de deslizamiento, esto se atribuye a la formación de una capa de lubricante entre el pin y la superficie de la muestra, lo que redujo su desgaste y los cambios bruscos en el coeficiente de fricción. [56-59]. Luego se determinó el coeficiente de fricción ( $\mu$ ) a partir de las curvas.

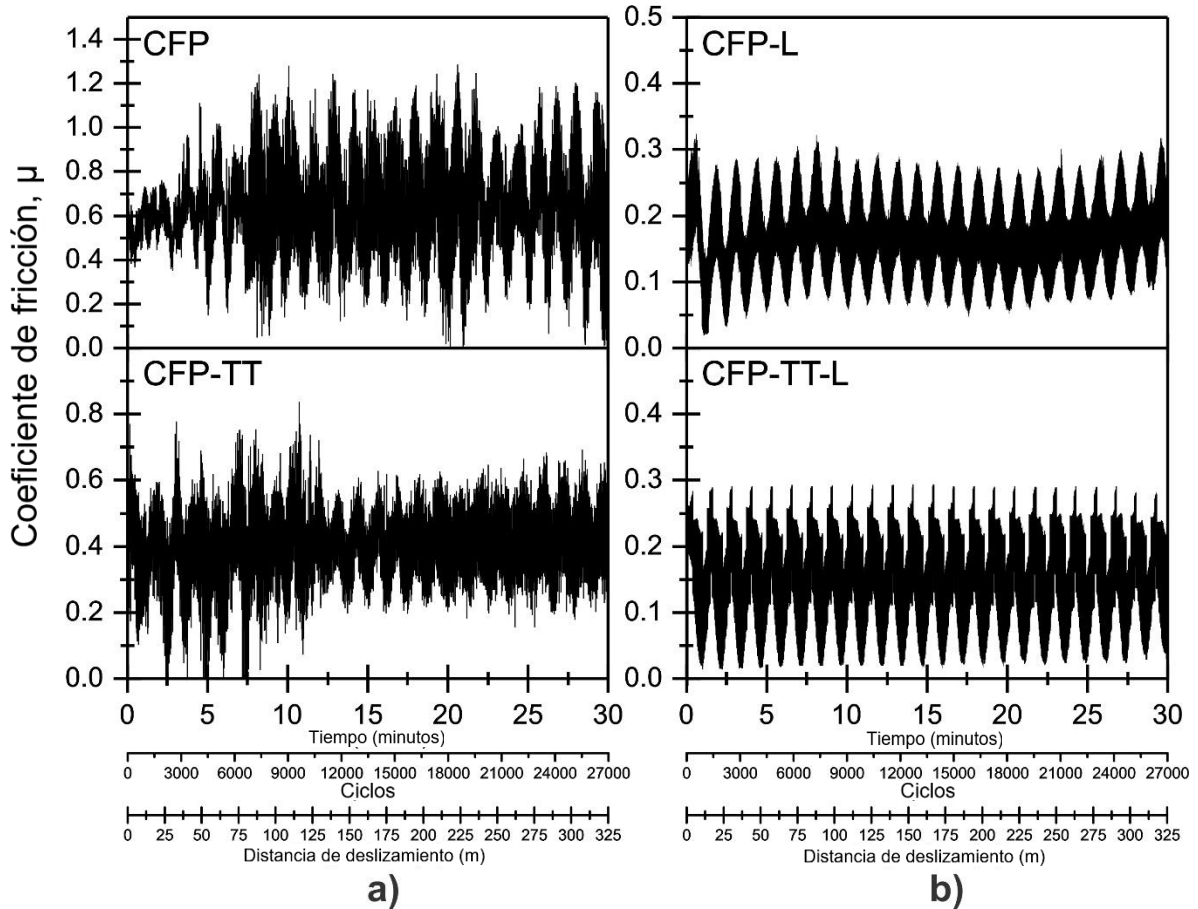


Figura 51. Curvas de fricción de a) CFP, CFP-TT, b) CFP-L y CFP-TT-L

El coeficiente de fricción promedio para las muestras de CFP y CFP-TT fue de 0.63 y 0.40, respectivamente. La disminución de  $\mu$  en la muestra de CFP-TT se debió a la gran presencia de nódulos de grafito irregulares que funcionaban como un lubricante sólido [60-66].

Se observó que bajo condiciones de deslizamiento lubricado para las muestras CFP-L y CFP-TT-L, los promedios de  $\mu$  fueron 0.18 y 0.15, respectivamente. El menor valor de  $\mu$  obtenido en CFP-TT-L se atribuye al efecto del lubricante y al contacto con el grafito.

Con base en las condiciones de ensayo (carga aplicada, distancia recorrida y frecuencia) y rugosidad, se consideró la formación de una capa parcial o imperfecta de lubricante entre el pin y la muestra, permitiendo la actividad lubricante de los nódulos de grafito irregulares que sobresalen [67-70].

La siguiente tabla muestra el valor promedio de  $\mu$  y el error estándar.

*Tabla 12. Valor promedio de  $\mu$  de CFP y CFP-TT en condiciones secas y con lubricante*

Muestra	$\mu$	Error estándar
CFP	0.63	0.054
CFP-TT	0.40	0.046
CFP-L	0.18	0.022
CFP-TT-L	0.15	0.016

Las pruebas de deslizamiento tribológico provocan una huella de desgaste en la superficie plana.

En la Figura 52 (a), se observó que la profundidad a la mitad de la amplitud de la huella de desgaste en CFP-TT es menor que la causada en CFP, esto se debe a la autolubricación seca y al aumento de la dureza de los nódulos de grafito irregulares presentes en la superficie de la muestra con tratamiento térmico [71, 72].

En el caso de las pruebas en condiciones lubricadas, como se muestra en la Figura 52 (b), nuevamente la muestra con tratamiento térmico presentó una profundidad menor a la mitad de la amplitud en su huella de desgaste; también se confirmó que la interacción del lubricante junto con la fase de grafito reduce el desgaste en la superficie [73, 74]. La diferencia en la profundidad de las marcas de desgaste fue evidente en condiciones de pruebas secas y lubricadas.



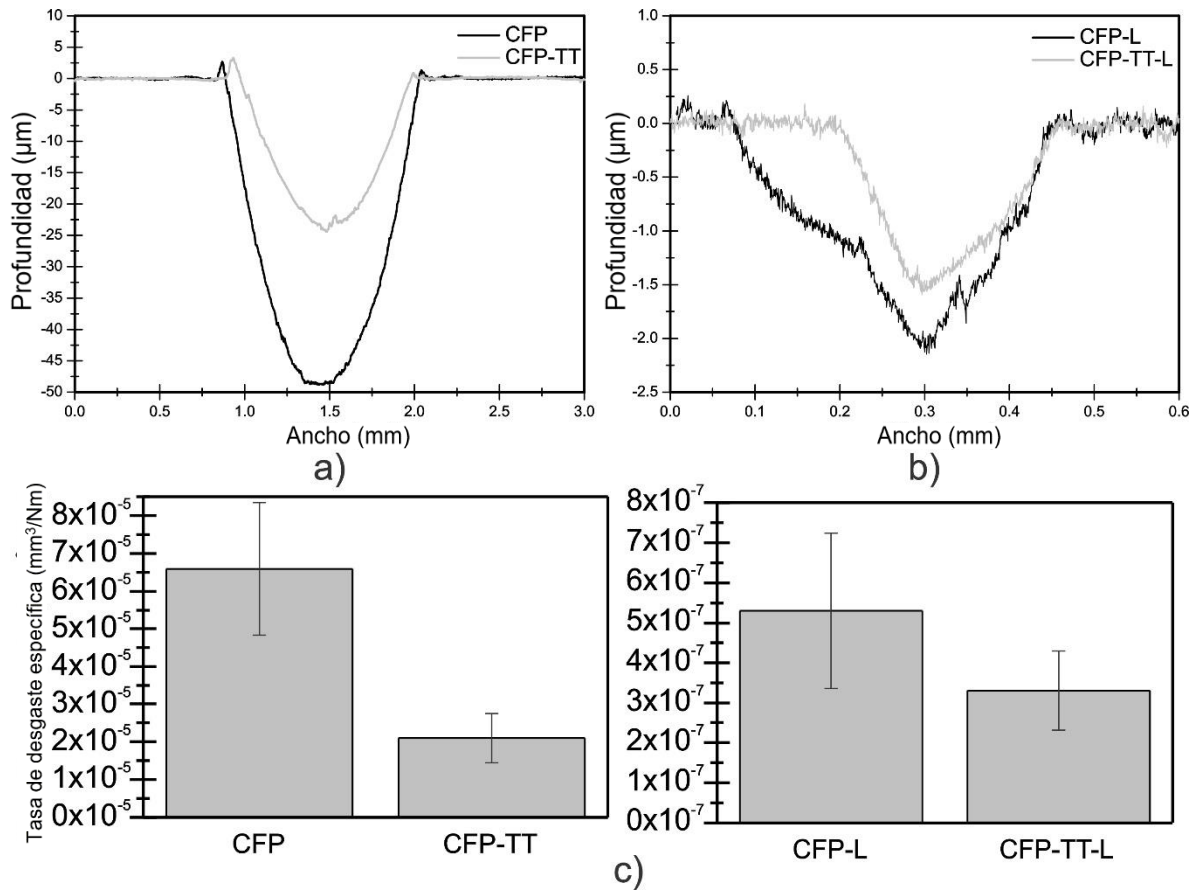


Figura 52. Profilometría de a) CFP, CFP-TT, b) CFP-L, CFP-TT-L, y c) Tasa de desgaste específica de las muestras.

Las pruebas produjeron huellas de desgaste en las muestras planas. Se midió el largo, ancho y profundidad de estas huellas mediante un perfilómetro y con esta información se obtuvo el volumen de desgaste.

Se utilizó la siguiente ecuación para calcular la tasa de desgaste específica; donde (V) es el volumen perdido, (Fn) es la carga normal y (S) es la distancia de deslizamiento [75].

$$Tasa\ de\ desgaste\ específica = \frac{V}{Fn * S}$$

La figura 52 (c) muestra la tasa de desgaste específica promedio. Se observó que en condiciones secas, CFP-TT presentó una tasa de desgaste específico

aproximadamente tres veces menor que CFP; esto confirma la reducción del desgaste por el aumento de la dureza y el efecto de autolubricación por la presencia de grafito nodular procedente del tratamiento térmico aplicado [76, 77].

En condiciones de lubricación, la tasa de desgaste específica de CFP-TT-L fue menor, en este caso, la diferencia con CFP-L fue pequeña debido a la presencia de la capa lubricante, pero la tendencia fue nuevamente la reducción del desgaste por la transformación de la morfología del grafito [78].

La Tabla 11 muestra el valor promedio de la tasa de desgaste específica y el error estándar. En CFP-TT y CFP-TT-L se observó un error estándar que representa una mayor dispersión de valores que en CFP y CFP-L en los resultados de la tasa de desgaste específica, esto se debe a la diferencia en el número y tamaño de los nódulos irregulares de grafito en cada región evaluada como se observa en la micrografía CFP-TT, a pesar de ello se mantiene una tendencia a la reducción del desgaste [79-80].

La Figura 53 muestra imágenes SEM de la huella de desgaste en CFP, CFP-L, CFP-TT y CFP-TT-L producida por el contacto deslizante contra el pin en condiciones secas y lubricadas. En la Figura 53 (a), correspondiente a la muestra de CFP, se observaron regiones bien marcadas que presentan algunas fisuras, deformación plástica, descamación, *debris* y desgaste adhesivo, que son mecanismos comunes de desgaste en las fundiciones [81-84].

En CFP-TT (Figura 53 (b)), nuevamente se produjeron residuos del material extraído, picaduras, algunas grietas y desgaste adhesivo. Además, se observó desgaste por delaminación debido a la extrusión del grafito por su morfología compactada y nodular [85, 86].

La muestra de CFP-L (Figura 53 (c)) presentó daños menores debido a la lubricación; solo se observaron picaduras y descamación causadas por pequeñas grietas, se puede observar el pulido de la superficie en el área de desgaste.

Los mismos mecanismos se presentaron en CFP-TT-L (Figura 53 (d)), mostrando la presencia de extrusión de grafito, pero debido al aumento de dureza, se observa claramente la fractura y grietas. En las muestras CFP-TT y CFP-TT-L, la extrusión de grafito confirma la presencia de grafito compactado y nódulos irregulares debido al tratamiento térmico aplicado [87].

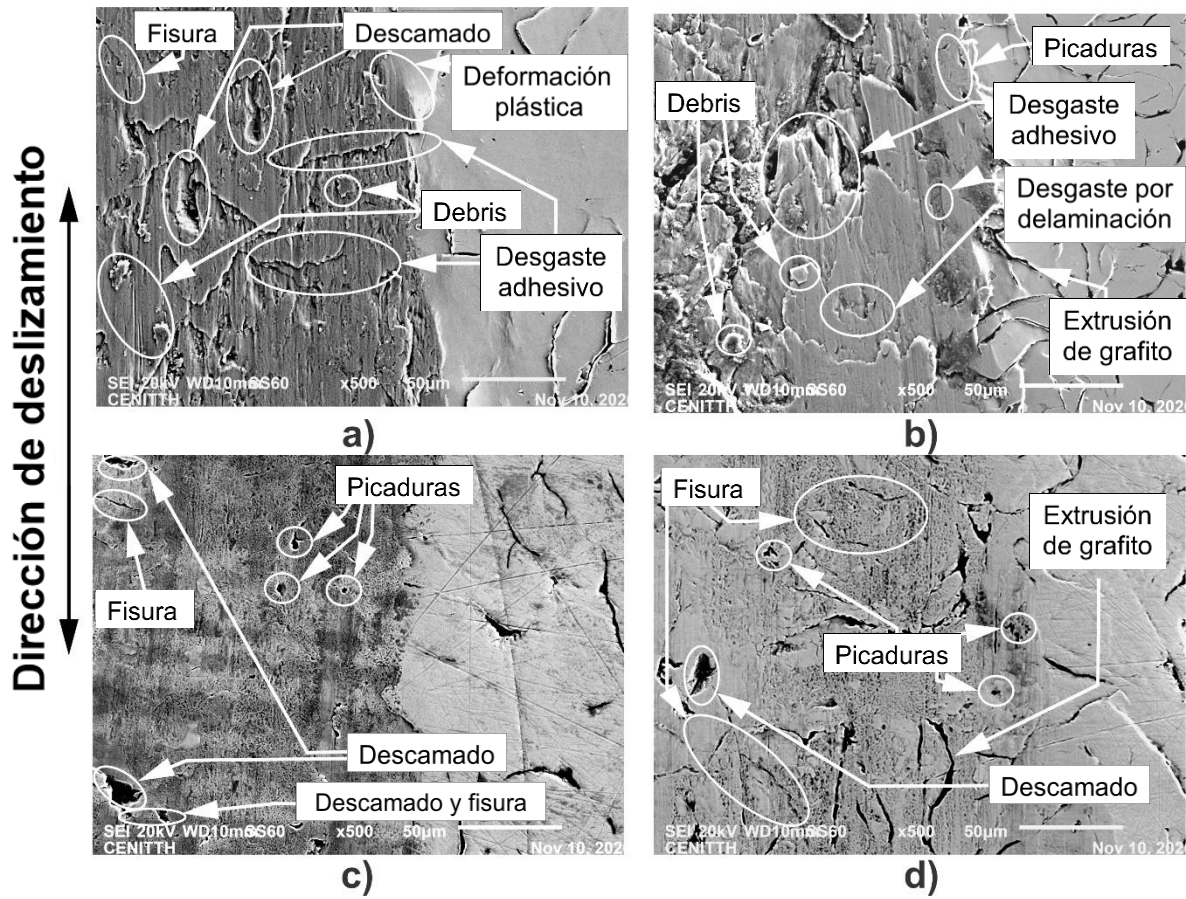


Figura 53. Mecanismos de desgaste identificados mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) dentro de la huella de desgaste de a) CFP, b) CFP-TT, c) CFP-L y d) CFP-TT-L.

## CAPITULO 5: CONCLUSIONES

El estudio tribológico confirma que la transformación de la morfología del grafito de escamas a nódulos irregulares, en condiciones secas y lubricadas, reduce el coeficiente de fricción y el desgaste por contacto deslizante debido al aumento de su dureza y su propiedad autolubrificante.

El tratamiento térmico aplicado a la fundición gris podría alargar la vida de los motores de combustión interna, debido al aumento de dureza y por tanto generando pocos gases de efecto invernadero.

El estudio tribológico muestra que los principales mecanismos de desgaste que se encuentran en condiciones de deslizamiento en seco son el desgaste adhesivo, las picaduras y descamación. También se observó desgaste por delaminación debido a la extrusión del grafito por efecto de su morfología compactada y nodular.

Derivado de los ensayos tribológicos se demostró que el tratamiento térmico aplicado a una fundición gris con bajo contenido de carbono aumentó la dureza al cambiar la morfología del grafito, mejorando la resistencia al desgaste al reducir el coeficiente de fricción.

## REFERENCIAS

- [1] D. Bartocha, K. Janerka, J. Suchon, J. Mater. Process. Technol. 162–163 (2005) 465–470.
- [2] W. Xu, M. Ferry, Y. Wang, Mater. Sci. Eng. A 390 (1–2) (2005) 326–333.
- [3] J. Hemanth, K.V.S. Rao, J. Mater. Eng. Perform. 8 (4) (1999) 417–423.
- [4] J.R. Davis, ASM Specialty Handbook, ASM International, 1996.
- [5] K. Mills, et al., Metals Handbook, vol. 9, ASM, 1985.
- [6] P.Skořcovský, M. Matejka, In proc. of Fompex, Trenčín, Slovakia (in Slovak), 1994.
- [7] V. Majerová, R. Konečná, G. Nicoletto, In proc. of SEMDOK, Sulov, Slovakia (in Slovak), 2005.
- [8] Slovak Tech Norm STN 42 0461. Hodnotenie metalografickej štruktúry liatin. (in Slovak).
- [9] Bharat Bhushan. Principles and applications of tribology. New York, 1999 Ediciones. Wiley-Interscience. p 198-199-254. p 285. p344-347. P479-540.
- [10] Truhan JJ, Kodali P. A comparison of rig and engine testing to measure incylinder wear in heavy duty diesel engines. In: Proceedings of the fourth international filtration conference. San Antonio, TX: Southwest Research Institute; 2001. p. 76.
- [11] Fessler R. US department of energy workshop on industrial research needs for reducing friction and wear. Argonne National Laboratory; 1999.
- [12] Tung SC, McMillan ML. Automotive tribology overview of current advances and challenges for the future. Tribol Int 2004;37:517–36.
- [13] Skjoedt M, Butts R, Assanis DN, Bohac SV. Effects of oil properties on sparkignition gasoline engine friction. Tribol Int 2008;41:556–63.
- [14] Priest M, Dowson D, Taylor CM. Predictive wear modelling of lubricated piston rings in a diesel engine. Wear 1999;231:89–101.

- 
- [15] Gazzard ST, Eastham DR, Jakobs RJ, Lunsford RL. Piston system design for low emissions. In: Leading through innovation T&N symposium; 1995. Paper 20.
- [16] Monaghan ML. Engine friction a change in emphasis. 2nd BP tribology lecture: inst mech eng; 1987.
- [17] Monaghan ML. Combustion engines reduction of friction and wear. Inst mech eng conf pub; 1989-9. Paper 1-5.
- [18] Parker DA, Adams DR. Friction losses in the reciprocating internal combustion engine, tribology key to the efficient engine. Inst mech eng conf pub; 1982-1. Paper C5r82, 1982. p. 31–9.
- [19] Ruddy BL, Dowson D, Economou PN. A review of studies of piston ring lubrication. In: Proceedings of 9th Leeds–Lyon symposium on tribology: tribology of reciprocating engines. Paper V(i); 1982. p. 109–21.
- [20] Odabas D, Su S. A comparison of the reciprocating and continuous two-body abrasive wear behavior of solution-treated and age-hardened 2014 Al alloy. *Wear* 1997;208:25–35.
- [21] Cassar G, Avelar-Batista Wilson JC, Banfield S, Housden J, Matthews A, Leyland A. A study of the reciprocating-sliding wear performance of plasma Surface treated titanium alloy. *Wear* 2010;269:60–70.
- [22] Lampman H F, Crankovic, G M, Lampman S R, Zorc T B 1990 ASM Handbook, vol. 1: Properties and Selection: Irons, Steels and High-Performance Alloy (Ohio: AS International).
- [23] Chichinadze A V, Berliner E M, Brown E D, Bushe N A and Buyanovskii I A 2003 Friction, Wear and Lubrication - Tribology and Triboengineering (Moscow: Mashinostroenie).
- [24] Shabashov V A, Korshunov L G, Mukoseev A G, Sagaredze V V, Makarov A V, Pilyugin V P, Novikov S I and Vildanova N P 2003 *Mat. Sci. Eng. A-Struct.* 346 196–197.
- [25] Garnham J E and Beynon J H 1992 *Wear* 157 (1) 81–109.
- [26] Megaheda, H., El-Kashifa, E., Shashb, A. Y., Essamca, M. A. (2018), "Effect of holding time, thickness and heat treatment on microstructure and mechanical properties of compacted graphite cast iron," *Journal of Materials Research and Technology*, 8 (1), pp. 1188-1196.
- [27] Riposan, L., Chisamera, M., Stan, S., White, D. (2009), "Complex (Mn, X)S compounds – major sites for graphite nucleation in grey cast iron," *China*

Foundry, 6 (4), pp. 352-357.

[28] Fragassa, C., Minak, G, Pavlovic, A. (2016), “Tribological aspects of cast iron investigated via fracture toughness,” *Tribology in Industry*, 38 (1), pp. 1-10.

[29] Worldwide Trends in Energy Use and Efficiency, Key Insights from IEA Indicator Analysis, In support of the G8 Plan of Action, OECD/IEA, (2008).

[30] Holmberg K., P. Andersson, A. Erdemir, Global energy consumption due to friction in passenger cars, *Tribology International*, 47 (2012) 221-234.

[31] Andersson, Peter, Tamminen, Jaana & Sandström, Carl-Erik. Piston ring tribology. A literature survey. Espoo 2002. VTT Tiedotteita – Research Notes.

[32] Hill, S.B. and Newman, B.A., “Piston Ring Designs for Reduced Friction”, SAE Paper 841222, 1984.

[33] Bayer R. “Mechanical Wear Prediction and Prevention”, (ed.; Marcel Dekker, Inc.; New York: © 1994).

[34] Holmberg Kenneth, Andersson Peter, Nylund Nils-Olof, Kari Mäkelä Kari, Erdemir Ali. Global energy consumption due to friction in trucks and buses. *Tribology International* 2014;78: 94–114.

[35] Markus Söderfjäll, Hubert M. Herbst b, Roland Larsson a, Andreas Almqvist Influence on friction from piston ring design, cylinder liner roughness and lubricant properties.

[36] Rejowski Edney Deschauer, Mordente Sr Paulo, Pillis Marina Fuser, Casserly Tom. Application of dlc coating in cylinder liners for friction reduction. Technical report. SAE Technical Paper; 2012.

[37] Sato Oki, Takiguchi Masaaki, Takayuki Aihara, Seki Yulchi, Fujimura Kazuhiro, Tateishi Yukio. Improvement of piston lubrication in a diesel engine by means of cylinder surface roughness. Technical report. SAE Technical Paper; 2004.

[38] Spencer Andrew, Yusuf Avan Emin, Almqvist Andreas, Dwyer-Joyce Rob S, Larsson Roland. An experimental and numerical investigation of frictional losses and film thickness for four cylinder liner variants for a heavy duty diesel engine. *Proc Institution Mech Eng Part J J Eng Tribol* 2013;227(12):1319–33.

[39] Victor W. Wong, Simon C. Tung. Overview of automotive engine friction and reduction trends—Effects of surface, material, and lubricant-additive technologies.

[40] ASTM G133-05 (2016), “Standard Test Method for Linearly Reciprocating

Ball-on-Flat Sliding Wear,” ASTM International: West Conshohocken, PA.

[41] Rukadikar, M. C., Reddy, G. P. (1986), “Influence of chemical composition and microstructure on thermal conductivity of alloyed pearlitic flake graphite cast irons,” *Journal of Materials Science*, 21, p. p. 4403–4410.

[42] Yashchuk, V. V., Gullikson, E. M., Howells, M. R., Irick S. C., MacDowell, A. A., McKinney, W. R., Salmassi, F., Warwick, T., Metz, J.P., Tonnessen, T. W. (2006), “Surface roughness of stainless-steel mirrors for focusing soft x rays,” *Applied Optics*, 45 (20), p. p. 4833-4842.

[43] Sjogren, T., Vomacka, P., Svensson, I. L. (2004), “Comparison of mechanical properties in flake graphite and compacted graphite cast irons for piston rings,” *International Journal of Cast Metals Research*, 17 (2), p. p. 65–71.

[44] Duka, E., Oettel, H., Dilo, T. (2012), “Connection between micro and macro hardness pearlitic-ferritic steel,” *AIP Conference Proceedings*, 1476 (1), p. p. 47–51.

[45] Mohammed, A. D., Kachit, M. (2017), “Effects of Features of Graphite Nodules on Stress Concentration in Nodular Graphite Cast Iron Material under Multi-Axial Loading,” *International Journal of Applied Engineering Research*, 12 (5), p. p. 656-663.

[46] Desai Gowda, H. S., Mukunda, P. G., Herbert, M. A. (2014), “Correlation of Tribological Properties with Microstructure and Mechanical Properties of Graphite Cast Irons Centrifugally Cast for Engine Liner,” *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 67, p. p. 731-740.

[47] Cárcel-Carrasco, F. J., Pascual-Guillamón, M., Salas-Vicente, F., Donderis-Quiles, V. (2019), “Influence of Heat Treatment in the Microstructure of a Joint of Nodular Graphite Cast Iron when Using the Tungsten Inert GasWelding Process with Pearlitic Grey Cast Iron Rods as Filler Material,” *Metals*, 9 (1), p. p. 48-58

[48] Hlaváčová, I. M., Sadílek, M., Váňová, P., Szumilo, S., Tyč, M. (2020), “Influence of Steel Structure on Machinability by Abrasive Water Jet,” *Materials*, 13 (19), p. p. 1-17.

[49] Mian, A. J., Driver, N., Mativenga, P. T. (2010), “A comparative study of material phase effects on micro-machinability of multiphase materials,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 50 , p. p. 163–174.

[50] Figueroa, M., Pérez, M. J., Fraga, K. L., Valdés, C. V., Almanza, E. (2008), “Impact strength of thin wall ductile iron with dual matrix structure,” *Revista Mexicana de Física*, 55 (1), p. p. 105-109.

[51] Baer, W. (2020), “Chunky Graphite In Ferritic Spheroidal Graphite Cast Iron:



Formation, Prevention, Characterization, Impact On Properties: An Overview,” *International Journal of Metalcasting*, 14, p. p. 454-488.

[52] Gonzaga, R. A. (2013), “Influence of ferrite and pearlite content on mechanical properties of ductile cast irons,” *Materials Science and Engineering: A.*, 567, p. p. 1-8.

[53] Yeşiltepe, S., Şeşen, M. K. (2017), “Heat Treatment Effect On Spheroidal Graphite, Microstructure And Mechanical Properties Of Ni-Resist Ductile Cast Iron,” *Journal of Engineering Sciences and Desing*, 5 (3), p. p. 479-482.

[54] Anca, D. E., Stan, I., Riposan, I., Stan, S. (2022), “Graphite Compactness Degree and Nodularity of High-Si Ductile Iron Produced via Permanent Mold versus Sand Mold Casting,” *Materials*, 15 (8), p. p. 1-19.

[55] Maurel, P., Weiss, L., Bocher, P., Fleury, E., Grosdidier, T. (2019), “Oxide dependent wear mechanisms of titanium against a steel counterface: Influence of SMAT nanostructured surface,” *Wear*, 430-431, p. p. 245-255.

[56] Alves, S. M., Barros, B. S., Trajano, M. F., Ribeiro, K. S. B., Moura, E. (2013), “Tribological behavior of vegetable oil-based lubricants with nanoparticles of oxides in boundary lubrication conditions,” *Tribology International*, 65, p. p. 28-36.

[57] Kovalchenko, A., Ajayi, O., Erdemir, A., Fenske, G., Etsion, I. (2005), “The effect of laser surface texturing on transitions in lubrication regimes during unidirectional sliding contact,” *Tribology International*, 38 (3), p. p. 219-225.

[58] Erdemir, A. (2005), “Review of engineered tribological interfaces for improved boundary lubrication,” *Tribology International*, 38 (3), p. p. 249-256.

[59] Wang, Y. M., Jiang, B. L., Guo, L. X., Lei, T. Q. (2005), “Tribological behavior of microarc oxidation coatings formed on titanium alloys against steel in dry and solid lubrication sliding,” *Applied Surface Science*, 252 (8), p. p. 2989-2998.

[60] Binder, C., Bendo, T., Pereira, R. V., Hammes, G., de Mello, G. D. B., Klein, A. N. (2016), “Influence of the SiC content and sintering temperature on the microstructure, mechanical properties and friction behaviour of sintered self-lubricating composites,” *Powder Metallurgy*, 59 (5), p.p. 384-393.

[61] Binder, C., Bendo, T., Hammes, G., Neves, G. O., Binder, R., de Mello, J. D. B., Klein, A. N. (2017), “Structure and properties of in situ-generated two-dimensional turbostratic graphite nodules,” *Carbon*, 124, p. p. 685-692.

[62] Spreaadorough, J. (1962), “The frictional behaviour of graphite,” *Wear*, 5 (1), p. p. 18-30.

- [63] Stanković, M., Venci, A., Marinković, A. (2013), "A review of the tribological properties of PTFE composites filled with glass, graphite, carbon or bronze reinforcement," 13th International Conference on Tribology, p. p. 135-140.
- [64] Berman, D., Erdemir, A., Sumant, V. (2014), "Graphene: a new emerging lubricant," *Materials Today*, 17 (1), p. p. 31-42.
- [65] Tahir, N. A. M., Abdollah, M. F. B., Tamaldin, N., Amiruddin, H., Mohamad Zin, M. R. B. (2018), "A brief review on the wear mechanisms and interfaces of carbon based materials," *Composite Interfaces*, 25 (5-7), p. p. 491-513.
- [66] Morstein, C. E., Dienwiebel, M. (2021), "Graphite Lubrication Mechanisms Under High Mechanical Load," *Wear*, 477, p. p. 1-28.
- [67] Dubois, A., M. Karim, A. N. (2019), "Metal Forming and Lubrication," Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, Elsevier.
- [68] Akhlaghi, F., Zare-Bidaki, A. (2019), "Influence of graphite content on the dry sliding and oil impregnated sliding wear behavior of Al 2024-graphite composites produced by in situ powder metallurgy method," *Wear*, 266 (1-2), p. p. 37-45.
- [69] Huang, H. D., Tu, J. P., Gan, L. P., Li, C. Z. (2006), "An investigation on tribological properties of graphite nanosheets as oil additive," *Wear*, 261 (2), p. p. 140-144.
- [70] Kang, S., Chung, D. (2003), "Improvement of frictional properties and abrasive wear resistance of nylon/graphite composite by oil impregnation," *Wear*, 254 (1-2), p. p. 103-110.
- [71] Ren, F., Wang, S., Yu, M., Duan, H., Su, M., Ren, M., Sun, J. (2020), "Influence of Graphite/Graphene on the Tribological Behaviors of Self-Lubricating Fabric Composite," *Materials*, 13 (1), p. p. 1-15.
- [72] Shin, W. S., Baek, S., Kim, Y. J. (2022), "Effect of Sn addition on the Microstructure and Friction-wear Properties of a Nodular Graphite Cast Iron," *Korean Journal of Metals and Materials*, 60 (6), p. p. 471-477.
- [73] Da Silva, L. R. R., Ruzzi, R. S., Teles, V. C., Sales, W. F., Guesser, W. L., Machado, A. R. (2019), "Analysis of the coefficient of friction at the workpiece-tool interface in milling of high strength compacted graphite cast irons," *Wear*, 426-427 (B), p. p. 1646-1657.
- [74] Wang, Y., Gao, Y., Ki, Y., Li, M., Sun, L., Zhai, W., Li, K. (2020), "Research on synergistic lubrication effect of silver modified Cu-Ni-graphite composite," *Wear*, 444-445, p. p. 1-11.
- [75] Green, D. A., Lewis R., Dwyer-Joyce R. S. (2006), "The Wear Effects and

Mechanisms Of Soot Contaminated Automotive Lubricants,” *Journal of Engineering Tribology*, 220 (3), p. p. 159-169.

[76] Wang, B., Pan, Y., Liu, Y., Barber, G. C., Qiu, F., Hu, M. (2020), “Wear behavior of composite strengthened gray cast iron by austempering and laser hardening treatment,” *Journal of Materials Research and Technology*, 9 (2), p. p. 2037-2043.

[77] Ananth, S., Sivaprakasam, P., Prakash, J. U., Ravi, B., Kalusuraman, G., Sundarakannan, R. (2022), “Tribological Characteristics of GCI-EN31 Steel Surface Contact with Dry Sliding Condition,” *Journal of Nanomaterials*, 2022, p. p. 1-11.

[78] Ru-Tie, L., Xiang, X., Fu-Sheng, C., Jin-zhong, L. (2011), “Tribological performance of graphite containing tin lead bronze–steel bimetal under reciprocal sliding test,” *Tribology International*, 44 (2), p. p. 101-105.

[79] Binder, C., Bendo, T., Hammes, G., Neves, G. O., Binder, R., de Mello, J. D. B., Klein, A. N. (2017), “ Structure and properties of in situ-generated two-dimensional turbostratic graphite nodules,” *Carbon*, 124, p. p. 685-692.

[80] Herrera-Navarro, A. M., Jiménez-Hernández, H., Peregrina-Barreto, H., Manríquez-Guerrero, F., Terol-Villalobos, I. R. (2017), “ Characterization of the roundness degree of graphite nodules in ductile iron: A new discrete measure independent to resolution,” *Superficies y Vacío*, 26 (2), p. p. 58-63.

[81] Yan, D., Neville, F. R. (2003), “Spalling formation mechanism for gears,” *Wear*, 254 (12), p. p. 1307-1317.

[82] Plume, G., Rousseau, C. E. (2014), “Spall behavior of cast iron with varying microstructures,” *Journal of Applied Physics*, 116 (034903), p. p. 1-9.

[83] Alemani, M., Gialanella, S., Straffelini, G., Ciudin, R., Olofsson, U., Perricone, G., Metinoz, I. (2017), “Dry sliding of a low steel friction material against cast iron at different loads: Characterization of the friction layer and wear debris,” *Wear*, 376-377 (B), p. p. 1450–1459.

[84] Pusterhofer, M., Summer, F., Wuketich, D., Grün, F. (2019), “Development of a Model Test System for a Piston Ring/Cylinder Liner-Contact with Focus on Near-to-Application Seizure Behaviour,” *Lubricants*, 7 (12), p. p. 1-12.

[85] Ghasemi, R., Elmquist, L. (2014), “A study on graphite extrusion phenomenon under the sliding wear response of cast iron using microindentation and microscratch techniques,” *Wear*, 320 (1-2), p. p. 120-126.

[86] Aguirre-Brefe, Y. (2019), “Microstructure of gray cast iron FG 24 subjected to heat treatment,” *Minería y Geología*, 35 (1), p. p. 140-159.

[87] Archard, J., Hirst, W. (1956), "The Wear of Metals Under Unlubricated Conditions," Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 236 (1206), p. p. 397-410.

## **ANEXOS**



## Synergy Study Between a Lubricant Oil Layer and a Microstructural Graphite to Reduce Friction and Wear of a Thermally Modified Low-Carbon Gray Cast-Iron Cylinder Liner

Francisco G. Mejía Hernández, Màrius Ramírez Cardona, Gilgamesh Luis Raya, Armando I. Martínez Pérez, Edgar E. Vera Cárdenas, René Cabrera, Edgar Cardoso Legorreta & Martín Reyes Pérez

To cite this article: Francisco G. Mejía Hernández, Màrius Ramírez Cardona, Gilgamesh Luis Raya, Armando I. Martínez Pérez, Edgar E. Vera Cárdenas, René Cabrera, Edgar Cardoso Legorreta & Martín Reyes Pérez (2023) Synergy Study Between a Lubricant Oil Layer and a Microstructural Graphite to Reduce Friction and Wear of a Thermally Modified Low-Carbon Gray Cast-Iron Cylinder Liner, Tribology Transactions, 66:3, 413-421, DOI: 10.1080/10402004.2023.2184739

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/10402004.2023.2184739>



Published online: 24 Mar 2023.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 30



View related articles [↗](#)



View Crossmark data [↗](#)



# VI REUNIÓN NACIONAL DE DIFRACTOMETRÍA



Francisco Germán Mejía Hernández<sup>a</sup>, Màrius Ramírez Cardona<sup>a</sup>, Gilgamesh Luis Raya<sup>b</sup>, Edgar Ernesto Vera Cárdenas<sup>c</sup>, Armando Irvin Martínez Pérez<sup>b</sup>, Edgar Cardoso Legorreta<sup>a</sup>, Martín Reyes Pérez<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, UAEH, Mineral de la Reforma, Hidalgo, <sup>b</sup>Área de Ingeniería Mecánica Automotriz, UPP, Zempoala, Hidalgo, <sup>c</sup>Tecnológico Nacional de México/I.T. Pachuca, Pachuca de Soto, Hidalgo. Correo: fco.german.mejia@gmail.com

## Estudio Tribológico y Tratamiento Térmico de una Fundición Gris con Aplicación Automotriz

### Resumen

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos de la caracterización tribológica y un tratamiento térmico de una fundición gris, la cual es comúnmente aplicada en el revestimiento de los cilindros de un motor de combustión interna. La composición química y la micrografía nos confirman que se trata de una fundición gris, con precipitados de grafito en forma de hojuelas. La dureza del material presenta una magnitud de 225.7 HV y la tasa de desgaste en las condiciones de prueba es de  $2.2 \times 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/Nm. Posteriormente al tratamiento térmico se muestra un cambio en la microestructura del material verificado por microscopía óptica y difracción de rayos-X y un aumento en la dureza de 247 HV.

### Introducción

En este trabajo se reporta la caracterización tribológica y la composición química de una fundición con matriz ferrítica-perlítica. Las pruebas tribológicas se realizaron con una máquina reciprocante, a partir de la cual se obtuvo el coeficiente de fricción y la tasa de desgaste por el análisis de la huella de desgaste por perfilometría. Los mecanismos de desgaste se determinaron por el análisis de las imágenes obtenidas por microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido. La composición química de la muestra se obtuvo por la técnica de espectroscopía de emisión atómica de descarga electrostática. Determinando el tipo de material y los mecanismos de desgaste.

### Objetivo

El objetivo de este estudio tribológico es precisar las propiedades de la aleación evaluada a través de la caracterización del material para proponer modificaciones en la estructura del material a partir de un de tratamiento térmico, reducir el desgaste generado por la fricción entre los elementos, lo que tendría como consecuencia aumentar la eficiencia de la máquina de combustión interna y ampliar la vida útil de las piezas.

### Resultados

El coeficiente de fricción obtenido fue  $\mu=0.56$  aproximadamente, el cual es comparable con resultados de trabajos previos obtenidos por la máquina de prueba con configuración de pin-on-disk [1]. La magnitud de la dureza está cercana a las reportadas para una fundición ferrítica-perlítica [2,3]. Con la difracción de rayos-X aplicada directamente a la superficie pulida se identificó la fase  $\alpha$ -Fe (ferrita) Figura 1. La tasa de desgaste generado durante la prueba de deslizamiento [4], fue de  $2.2 \cdot 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/Nm. La Figura 2 muestra a) la presencia de grafito en forma de hojuelas, b) el revelado de la matriz ferrítica-perlítica, c) la forma de huella digital característica de la fase perlita. En la figura 3 se observa la difusión del carbono y el cambio en la microestructura.

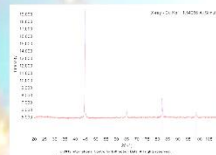


Figura 1. Difractograma (XRD) con identificación de la fase Fe.

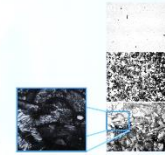


Figura 2. Micrografías a) sólo revelado a 200X, y son revelado b) a 100X, c) a 500X

Sin Tratamiento Térmico	Con Tratamiento Térmico
Dureza HV	Dureza HV
225.7	247

Tabla 1. Dureza Vickers

	C	Si	Mn	P	Cr	S	Mo	Ni
C-166-3070	1.8	3.43	0.331	0.14	0.1647	0.0482	0.0567	0.0831

Tabla 2. Composición química en % en peso (no se incluye el Fe).

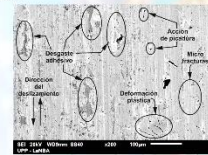


Figura 4. Huella y mecanismos de desgaste sobre la superficie

### Conclusiones

El tratamiento térmico revela el aumento de la dureza del material conservando parte del grafito como lubricante en seco, Tabla 1. Los valores obtenidos de dureza se asocian a la microestructura ferrítica-perlita. Mediante el análisis por espectroscopía de emisión atómica de descarga electrostática se confirma que el material en estudio es una fundición gris de aplicación automotriz. Los elementos presentes se reportan en la tabla 2. La figura 4 muestra las imágenes por SEM de la huella de desgaste en la superficie del C-166-X070 producida por el contacto de deslizamiento contra el pin de acero 1045 y los principales mecanismos de desgaste encontrados: desgaste adhesivo, deformación plástica, picaduras y microfracturas.

### Referencias

1. C. Camba, A. Varela, V. Blázquez, A. Gama, J.L. Mier, F. Barbañán. "Comportamiento al desgaste de fundiciones tipo 60Si". Metals 46 (2013) 40-46.
2. E. Duka, H. Ostel, T. Olo. "Connection between micro and macro hardness pearlitic ferritic steel" AIP Conference Proceedings 1476 (2012) 47-51.
3. S.O. Omole, A. Oyetunji, K.K. Alaneme, P.A. Olusambi. "Structural characterization and mechanical properties of pearlite - Enhanced micro-plloyed ductile iron". J King Saud Univ - Eng. Sci. (2018).
4. M.A. Gómez Soltero M. "Caracterización de las propiedades tribológicas de los recubrimientos duros". Departament De Física Aplicada I Optica, Barcelona (2005).