

**ANÁLISIS DE DESGASTE EN LA CAMISA DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN
INTERNA CON RECUBRIMIENTO SUPERFICIAL**

**SERGIO CASTELLANOS CARRILLO
MIGUEL ANGEL RINCON SALAMANCA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2020

**ANÁLISIS DE DESGASTE EN LA CAMISA DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN
INTERNA CON RECUBRIMIENTO SUPERFICIAL**

**SERGIO CASTELLANOS CARRILLO
MIGUEL ANGEL RINCON SALAMANCA**

Tesis de grado para obtener el título de Ingeniero Mecánico

Director

**JORGE LUIS CHACÓN VELASCO
Doctor en Ingeniería**

Codirector

**ALBERTO DAVID PERTUZ COMAS
Doctor en Ingeniería**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2020

DEDICATORIA

El presente trabajo investigativo lo dedico principalmente a Dios, por ser el inspirador y darme fuerza para continuar en este proceso y lograr concluir mi carrera.

A mis padres, Ruth y Ricardo por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, además de enseñarme a no desfallecer ni rendirme ante nada, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo quien soy.

A mis hermanos, Danna y Camilo por estar siempre presentes, acompañándome y por el apoyo moral que me brindaron a lo largo de esta etapa de mi vida.

A mis abuelos Argemiro y Odilia, y demás familiares por su apoyo incondicional.

A todas las personas que me han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial aquellos que me abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

SERGIO CASTELLANOS CARRILLO

DEDICATORIA

Dedico esta tesis principalmente a Dios, por permitirme cumplir un nuevo logro en
mi vida.

A mi mamá Ana Isabel por su apoyo incondicional económica y emocionalmente,
durante todo el proceso vivido en la universidad para poder cumplir esta meta de
ser ingeniero.

A mi hermana Laura Jazmin y mis abuelos Carmen Ines y Melquisedec, por
siempre ser un apoyo durante mi carrera y siempre deseándome lo mejor para
cumplir mis sueños.

A mi familia que siempre aportaron un granito de arena en este proceso de estudio
durante la universidad, a sus buenos consejos para poder seguir adelante.

A mis amigos, con quienes tuve el privilegio de compartir muchas experiencias y
estuvieron hay como un apoyo en los momentos difíciles durante la carrera.

A mis profesores, quienes me ayudaron a formar no solo académicamente sino
como persona para poder enfrentar la vida con diferentes visiones y siempre
buscar salir adelante.

A mi compañero de proyecto Sergio Castellanos por su dedicación y esfuerzo
durante la realización de nuestro proyecto.

Finalmente agradezco a la Universidad Industrial de Santander con la cual
siempre estaré agradecido, por permitirme ser parte de ella y sentir el orgullo de
decir soy ingeniero UIS.

MIGUEL ANGEL RINCON SALAMANCA

AGRADECIMIENTOS

Brindamos nuestros agradecimientos a:

La Universidad Industrial de Santander, en especial a la Escuela de Ingeniería Mecánica y sus respectivos docentes por su labor diaria en la formación de nuevos profesionales.

Dr. Jorge Luis Chacón Velasco, docente de planta y director de nuestro proyecto quien nos brindó guía, seguimiento y conocimientos para el desarrollo del proyecto.

Dr. David Alberto Pertuz Comas, docente de planta y codirector de nuestro proyecto quien nos brindó sus conocimientos y experiencias para el desarrollo del proyecto.

Al Laboratorio de Plasma y Física de Superficies de la Universidad Industrial de Santander, en especial al profesor Piotr A. Tsygankov por los servicios y colaboración prestada en pro de la investigación del proyecto.

Al Laboratorio de Microscopia del Parque Tecnológico de Guatigará de la Universidad Industrial de Santander por el servicio prestado al momento de la realización del proyecto.

A todas las demás personas que contribuyeron en la realización del proyecto pues sin ninguna de ellas esto no sería posible.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. OBJETIVOS.....	21
1.1 OBJETIVO GENERAL	21
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
2. MARCO REFERENCIAL.....	22
2.1 MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA (MCI)	22
2.2 COMPONENTES PRINCIPALES DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN	23
2.2.1 Camisa o cilindro.	23
2.2.2 Émbolo o pistón.	24
2.2.3 Anillos.	25
2.3 CINEMÁTICA DEL MECANISMO BIELA-MANIVELA (MBM).....	26
2.3.1 Desplazamiento del pistón.	28
2.3.2 Velocidad del pistón.....	28
2.3.3 Aceleración del pistón.....	29
2.4 DINÁMICA DEL MECANISMO BIELA-MANIVELA	31
2.4.1 Fuerzas que actúan en el mecanismo biela-manivela.	31
2.5 DESGASTE	33
2.5.1 Principales tipos de desgastes en las camisas de motores de combustión interna (MCI).....	34
2.5.1.1 Desgaste adhesivo.	34
2.5.1.2 Desgaste abrasivo.	35
2.5.1.3 Desgaste corrosivo.	36
2.5.1.4 Desgaste por conicidad.....	36
2.5.1.5 Desgaste por ovalización.....	37
2.6 MODELO DE ARCHARD.....	38

2.6.1 La tasa de desgaste es proporcional a la carga normal.....	39
2.7 TRATAMIENTO SUPERFICIAL.....	39
2.7.1 Tratamientos superficiales y acabados industriales.....	39
2.7.1.1 Procesos de modificación superficial.....	41
2.7.1.2 Propiedades del Zirconio.....	42
2.7.1.4 Propiedades del nitrógeno.....	43
2.7.1.5 Propiedades del nitruro de zirconio.....	43
2.7.2 Reactor MOSMET.....	44
2.7.3 Partes del reactor MOSMET.....	45
2.7.4 Tipos de tratamientos que se pueden realizar en el reactor MOSMET.....	45
3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS.....	48
3.1 DESPLIEGUE DE LA FUNCION CALIDAD (QFD).....	48
3.1.1 Requerimientos del consumidor.....	48
3.1.2 Requerimientos del ingeniero.....	49
3.2 MATRIZ DE CALIDAD.....	49
3.3 PONDERACIÓN DE RESULTADOS.....	50
3.4 ALTERNATIVAS DE DISEÑO.....	51
3.4.1 Alternativa uno.....	51
3.4.2 Alternativa dos.....	52
3.4.3 Alternativa tres.....	54
3.5 EVALUACION DE ALTERNATIVAS.....	55
3.5.1 Alternativa seleccionada.....	56
3.6 BANCO DE PRUEBAS SELECCIONADO.....	56
3.6.1 Descripción de los componentes del banco.....	57
3.6.2 Ensamble del banco de pruebas.....	60
4. DESARROLLO EXPERIMENTAL PARA LA MEDICIÓN DE DESGASTE EN LA CAMISA DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.....	63
4.1 SELECCIÓN DEL MATERIAL.....	64
4.1.1 Geometría de la camisa.....	65
4.1.2 Rectificado de la camisa.....	66

4.2 PROCESO DE TRATAMIENTO SUPERFICIAL	67
4.2.1 Bombardeo Iónico (Sputtering)	67
4.2.2 Implantación iónica tridimensional (3DII)	68
4.3 CARACTERIZACIÓN SUPERFICIAL DE LA CAMISA	69
4.3.1 Inspección visual de las probetas	70
4.3.2 Micro dureza del material empleado en las camisas.	70
4.3.3 Microscopía electrónica de barrido.	71
4.4 CÁLCULO DE DESGASTE DE MODELO DE ARCHARD Y EL VOLUMEN MEDIDO DE DESGASTE	73
4.5 DETERMINACIÓN DEL MODELO DE DESGASTE DE ARCHARD	77
4.5.1 Fuerza normal.....	78
4.5.2 Distancia de desgaste en la camisa.....	78
4.5.3 Micro dureza Vickers.	79
4.5.4 Cálculo de modelo de desgaste de Archard.	79
4.5.5 Cálculo de volumen medido de desgaste.	80
5. ANÁLISIS Y RESULTADOS	83
5.1 ANÁLISIS DE MICRO DUREZA	83
5.2 ANÁLISIS DE LA MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO	84
5.3 DISTANCIA DE DESGASTE EN LA CAMISA DEL MCI.....	97
5.3.1 Camisa sin recubrimiento.....	98
5.3.2 Camisa con recubrimiento.	99
5.3.3 Porcentajes de error entre el volumen medido y el volumen del modelo de Archard.	101
6. CONCLUSIONES	103
7. RECOMENDACIONES.....	105
BIBLIOGRAFÍA.....	106

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ciclo Otto	23
Figura 2. Pistón, anillos y disposición	26
Figura 3. Esquema de mecanismo biela-manivela	27
Figura 4. Gráficas de desplazamiento, velocidad y aceleración del pistón.	30
Figura 5. Descomposición de las fuerzas.	33
Figura 6. Desgaste adhesivo	35
Figura 7. Desgaste abrasivo	36
Figura 8. Desgastes en la camisa por conicidad y ovalización.	37
Figura 9. Esquema de un reactor PVD	41
Figura 10. Reactor MOSMET	44
Figura 11. Tipos de tratamiento	46
Figura 12. Componente camisa-pistón horizontal.....	52
Figura 13. Componente camisa-pistón hacia arriba.....	53
Figura 14. Componente camisa-pistón hacia abajo	55
Figura 15. Configuración del banco	57
Figura 16. Estructura del banco	60
Figura 17. Elementos del banco	61
Figura 18. Camisa de fundición gris.....	65
Figura 19. Rectificadora SBM100	66
Figura 20. Cámara de descargas del reactor MOSMET	67
Figura 21. Diagrama de corriente y voltaje de la implantación iónica	68
Figura 22. Tonalidad de la superficie	70
Figura 23. UMT TriboLab	71
Figura 24. Microscópio electrónico de barrido marca QUANTA FEG 650	72
Figura 25. Soporte metálico de muestras	73

Figura 26. Gráfica de la variación de la fuerza alternativa con respecto al ángulo de giro durante el ciclo.....	75
Figura 27. Gráfica de la variación de la fuerza normal con respecto al ángulo de giro durante el ciclo.....	76
Figura 28. Gráfica de la variación de la fuerza alternativa y la fuerza normal con respecto al ángulo de giro del cigüeñal durante el ciclo.....	77
Figura 29. Micrografías de la superficie de la camisa con recubrimiento de ZrN sin desgaste.	85
Figura 30. Espectro de composición de elementos presentes en la superficie de la camisa con recubrimiento de ZrN y sin desgaste	87
Figura 31. Micrografías de la superficie de la camisa con recubrimiento de ZrN con desgaste.	88
Figura 32. Espectro de composición de elementos presentes en la superficie de la camisa con recubrimiento de ZrN y con desgaste	90
Figura 33. Micrografías de la superficie de la camisa sin recubrimiento y sin desgaste.	92
Figura 34. Espectro de composición de elementos presentes en la superficie de la camisa sin recubrimiento y sin desgaste	93
Figura 35. Micrografías de la superficie de la camisa sin recubrimiento y con desgaste	94
Figura 36. Espectro de composición de elementos presentes en la superficie de la camisa sin recubrimiento y sin desgaste.	96
Figura 37. Gráfica de volumen medido vs modelo de Archard sin recubrimiento ..	99
Figura 38. Gráfica de volumen medido vs modelo de Archard con recubrimiento	100

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Propiedades del zirconio.....	42
Tabla 2. Propiedades del nitrógeno.	43
Tabla 3. Propiedades del nitruro de zirconio.....	44
Tabla 4. Matriz QFD.....	50
Tabla 5. Ponderación de los requerimientos importantes.	51
Tabla 6. Matriz de ponderación.....	56
Tabla 7. Especificaciones del motor AKT 125 CGR.....	58
Tabla 8. Características del motor eléctrico.....	59
Tabla 9. Elementos del banco.....	61
Tabla 10. Parámetros bombardeo iónico	68
Tabla 11. Parámetros implantación iónica tridimensional	69
Tabla 12. Tabla de micro dureza tomada para el análisis.....	79
Tabla 13. Masas de la camisa después de realizado el desgaste	81
Tabla 14. Micro durezas Vickers obtenidas	83
Tabla 15. Porcentaje de composición de elementos presentes en la superficie de la camisa con recubrimiento de ZrN y sin desgaste.....	87
Tabla 16. Porcentaje de composición de elementos presentes en la superficie de la camisa con recubrimiento de ZrN y con desgaste	91
Tabla 17. Porcentaje de composición de elementos presentes en la superficie de la camisa sin recubrimiento y sin desgaste.....	93
Tabla 18. Porcentaje de composición de elementos presentes en la superficie de la camisa sin recubrimiento y con desgaste.	96
Tabla 19. Distancia de desgaste de camisas con y sin recubrimiento	97
Tabla 20. Tabla de desgaste medido vs desgaste de Archard sin recubrimiento ..	98

Tabla 21. Tabla de desgaste medido vs desgaste de Archard con recubrimiento100

Tabla 22. Camisa sin recubrimiento.....101

Tabla 23. Camisa con recubrimiento101

LISTA DE ANEXOS

Ver anexos adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la base de datos de la Biblioteca UIS

ANEXO A. NORMA ESTANDAR INTERNACIONAL ISO 6507-1. METALLIC MATERIALS – VICKERS HARDNESS TEST

ANEXO B. MODELO DE DESGASTE PROPUESTO POR ARCHARD

ANEXO C. PLANOS DE LOS DIFERENTES COMPONENTES DEL BANCO DE PRUEBAS

ANEXO D. BALANZA UTILIZADA PARA LA MEDICIÓN DEL DESGASTE

ANEXO E. PRESUPUESTO DEL PROYECTO

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS DE DESGASTE EN LA CAMISA DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA CON RECUBRIMIENTO SUPERFICIAL*

AUTOR: Sergio Castellanos Carrillo
Miguel Angel Rincon Salamanca**

PALABRAS CLAVE: tribología, motores de combustión, tratamiento superficial, desgaste, nitruro de zirconio.

DESCRIPCIÓN:

Se analiza el desgaste en la camisa de un motor de combustión interna por el contacto que existe con los anillos del pistón, debido a que es una de las principales causas de pérdida de potencia de un motor causado por la fricción que ocurre al estar en permanente contacto entre estas piezas mecánicas. Debido a esto ha sido una de las principales causas de investigación para poder prolongar la vida de servicio del motor. En este trabajo se diseñó y se construyó un banco de pruebas para estudiar el desgaste en el cual su funcionamiento es muy similar al de un motor de combustión interna, produciendo el desgaste directamente entre la camisa y los anillos del pistón. La investigación que se realizó se basó en disminuir el desgaste producido entre estas superficies por medio de un recubrimiento superficial de Nitruro de zirconio (ZrN) que se realizó en el reactor MOSMET. Se caracterizó el material y su recubrimiento analizando su micro dureza bajo la norma ISO 6507-1. Se analizó su morfología y composición porcentual de los elementos presentes en la superficie de las camisas con y sin recubrimiento superficial mediante la técnica de Microscopia Electrónica de Barrido (MEB).

También se utilizó el modelo de Archard y se compararon con el volumen real desprendido durante las pruebas y como conclusión se pudo determinar que el modelo propuesto por Archard no es conveniente para este tipo de desgaste en las camisas de un motor de combustión interna. En cuanto al desgaste que se produjo en las dos camisas, se observó que este es menor en la camisa con recubrimiento obteniendo un porcentaje de desgaste de 49,26% respecto a la camisa sin recubrimiento, lo cual determina que el recubrimiento mejora las propiedades superficiales en la camisa utilizada para las pruebas de desgaste.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Jorge Luis Chacón Velasco. Codirector: Alberto David Pertuz Comas.

ABSTRACT

TITLE: WEAR ANALYSIS ON THE CYLINDER LINER OF A SURFACE-COATED INTERNAL COMBUSTION ENGINE*

AUTHOR: Sergio Castellanos Carrillo
Miguel Angel Rincon Salamanca**

KEYWORDS: Tribology, combustion engines, surface treatment, wear, zirconium nitride

DESCRIPTION:

The wear on the cylinder liner of an internal combustion engine due to the contact with the piston rings is analyzed, because it is one of the main causes of power loss in an engine caused by the friction that occurs when these mechanical parts are in permanent contact. Due to this has been one of the main causes of research to be able to prolong the service life of the engine. In this work a test bench was designed and built to study the wear in which its operation is very similar to that of an internal combustion engine, producing the wear directly between the cylinder liner and the piston rings. The investigation was based on reducing the wear produced between these surfaces by means of a surface coating of Zirconium Nitride (ZrN) which was carried out in the MOSMET reactor. The material and its coating were characterized by analyzing their micro hardness under the ISO 6507-1 standard. Their morphology and percentage composition of the elements present on the surface of the cylinder liner with and without surface coating was analyzed by means of the Scanning Electronic Microscopy (SEM).

The Archard model was also used and this was compared with the real volume detached during the tests and as a conclusion it could be determined that the model proposed by Archard is not suitable for this type of wear in the liners of an internal combustion engine. As for the wear that occurred in the cylinders liners, it was observed that this is less in the cylinder liner with coating, obtaining a percentage of wear of 49.26% with respect to the cylinder liner without coating, which determines that the coating improves the surface properties in the liner used for the wear tests.

* Degree Project

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. Mechanical Engineering School. Director: Jorge Luis Chacón Velasco. Codirector: Alberto David Pertuz Comas.

INTRODUCCIÓN

El Motor de Combustión Interna (MCI) ha tenido una gran evolución hasta el día de hoy, desde los comienzos de la tecnología donde nadie apostaba por él, debido a que la máquina de vapor era más competente, aunque en la actualidad este es el motor más utilizado del mundo debido a que transforma la energía química, producto de la combustión en energía mecánica y su finalidad es realizar un trabajo eficiente.

En la actualidad el avance de la tecnología en los materiales de la industria automotriz crece a gran velocidad mejorando sus propiedades físicas y superficiales por medio de recubrimientos y técnicas especiales de acabado superficial. Todo esto con el fin de reducir el desgaste debido a la fricción, al efecto térmico, esfuerzos alternantes, entre otros, en los diferentes componentes que posee el motor de combustión interna.¹

El desgaste en las camisas del motor provocado por el contacto con los anillos de compresión es la principal causa de fallas, lo que genera altos costos de mantenimiento. Además, este desgaste genera pérdidas de potencia mecánica debido a la fricción generada por el movimiento alternativo del pistón provocando más consumo de combustible y a su vez un incremento de gases contaminantes que afectan el medio ambiente lo que conlleva a un aumento en la crisis ambiental que se vive actualmente. El estudio para reducir el desgaste en la camisa debido a la fricción ha llevado a mejorar estos aspectos.²

¹ PORTILLA, Miguel. Influencia de la modificación superficial con iones de titanio y nitrógeno en materiales utilizados en la fabricación de pistones de motocicleta. Trabajo de grado ingeniero mecánico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2017

² ORTEGA, Karen y SALAZAR, Víctor. Evaluación del desgaste del material utilizado en la fabricación de las camisas de combustión interna modificado superficialmente con nitruro de titanio (TiN) mediante el análisis de varianza ANOVA. Trabajo de grado ingeniero mecánico. Bucaramanga.

Con el fin de mejorar las propiedades superficiales de los materiales para reducir la fricción y el desgaste se ha empleado la técnica de recubrimientos superficiales como nitruro de zirconio (ZrN) por medio de deposición física de vapor (PVD), debido a su alta resistencia al desgaste y alta dureza. En los últimos años, estos tipos de recubrimientos se han convertido en una solución a los efectos que conlleva el desgaste aumentando la vida útil de los diferentes materiales en la industria metalmeccánica y automotriz.³

Por lo anteriormente expuesto, se desarrolló este proyecto de investigación en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, en el cual se analiza el desgaste de una camisa de un motor de combustión interna con y sin recubrimiento superficial de nitruro de zirconio (ZrN) por medio de deposición física de vapor (PVD), el cual permite evaluar la dureza del recubrimiento y estudiar la comparación de los diferentes desgastes presentados en el material con y sin recubrimiento utilizando el modelo de desgaste Archard. Las superficies de la camisa fueron caracterizadas antes y después de los ensayos tribológicos por medio de microscopia electrónica de barrido (SEM) y se realizaron en el Parque Tecnológico de Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander.

Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2017

³ GÓMES, Oscar y PATIÑO, Miguel. Evaluación del desgaste de una broca en acero rápido (HSS) modificada superficialmente con iones de nitrógeno y titanio usando la metodología ANOVA. Trabajo de grado ingeniero mecánico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2013

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Implementar el desarrollo y transferencia de tecnologías consignadas en la misión de la escuela de Ingeniería Mecánica, mediante el diseño de un dispositivo capaz de evaluar el recubrimiento superficial en materiales utilizados en la fabricación de camisas de motores de combustión interna.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar un dispositivo donde se puedan simular y realizar las pruebas de desgaste en la camisa de un motor de combustión interna.
- Probar un recubrimiento superficial capaz de reducir el desgaste por fricción en la camisa de un motor de combustión interna.
- Realizar un análisis microscópico óptico y de tribología en la camisa de un motor de combustión interna para revelar su aplicabilidad.
- Evaluar la resistencia al desgaste en la camisa de un motor de combustión interna utilizando el modelo propuesto por Archard.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1 MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA (MCI)

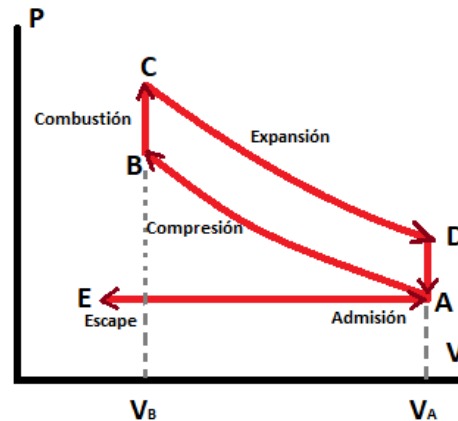
El MCI es un tipo de máquina que transforma la energía química, producto de la combustión en energía mecánica y su finalidad es realizar un trabajo eficiente. “Su nombre se debe a que dicha combustión se produce dentro de la máquina en sí misma”.⁴ En la actualidad existen muchos tipos de MCI, de los cuales los más importantes son los alternativos, algunos de estos son conocidos como:

- Motor de ignición por chispa - MICH
- Motor de ignición por compresión - MIC

Los MCI alternativos se clasifican por su ciclo de trabajo, en motores de dos tiempos (2T) donde se efectúa una carrera útil de trabajo en cada giro del cigüeñal o de cuatro tiempos (4T) donde se efectúa una carrera de trabajo útil por cada dos giros del cigüeñal. Los más utilizados son los de 4T debido a que son menos contaminantes y su rendimiento es más alto. El proceso de combustión para un motor de 4T es denominado ciclo OTTO y se puede observar su comportamiento representado en el diagrama P-V en la figura 1, el cual está determinado por cuatro estados termodinámicos que son admisión, compresión, explosión y escape.

⁴ ECURED contributors. Motor de combustión interna. [en línea]. EcuRed. Cuba. 2015. (Recuperado en 29 octubre 2019). Disponible en https://www.ecured.cu/index.php?title=Motor_de_combusti%C3%B3n_interna&oldid=2560777.

Figura 1. Ciclo Otto



2.2 COMPONENTES PRINCIPALES DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

A continuación, se especifican los elementos que conforman la cámara de combustión en un MCI.

2.2.1 Camisa o cilindro. La camisa es un cilindro hueco y cuya superficie interior que es lisa está expuesta a elevadas temperaturas y presiones que son producto de la combustión de la mezcla aire-combustible. Además, deben poseer altas propiedades antifricción, la suficiente solidez para soportar los gases y buena resistencia al desgaste. Existen las camisas secas y las húmedas.

- **Camisas húmedas:** Estas camisas son las que están en contacto con el refrigerante en la superficie exterior, extraen mejor el calor y se pueden sustituir con mayor facilidad. Necesitan unos sellos especiales para que el refrigerante no ingrese a la cámara de combustión ni al cárter.
- **Camisas secas:** Estas camisas se montan en el bloque del motor y no están en contacto con ningún tipo de refrigerante líquido porque son utilizadas en motores

refrigerados por aire. La superficie externa va pegada al bloque del motor y son más difíciles de sustituir a comparación de las húmedas.⁵

En un motor de combustión interna las camisas deben cumplir con ciertas especificaciones como:

- Bajo coeficiente de fricción.
- Larga vida y bajo desgaste operacional.
- Buena resistencia a la erosión.

2.2.2 Émbolo o pistón. El émbolo o pistón es uno de los componentes más importantes del motor, debido a que éste se mueve dentro de la camisa teniendo un papel fundamental en el proceso de combustión para transmitir la potencia generada y evitando que los gases escapen de la cámara de combustión hacia el cárter. Por eso “debido a los esfuerzos tanto de fricción como de calor a los que está sometido el pistón, se fabrican de materiales muy resistentes al calor y al esfuerzo físico, pero siempre empleando materiales lo más ligeros posibles, para así aumentar su velocidad” y disminuir las pérdidas.⁶

Estos cumplen tres funciones principales:

- Cerrar y obturar la cámara de combustión con respecto al cárter.
- Recibir las fuerzas generadas en la combustión y transmitirlas al cigüeñal con ayuda de la biela como fuerza de torsión.

⁵ ORTEGA, Karen y SALAZAR, Víctor. Evaluación del desgaste del material utilizado en la fabricación de las camisas de combustión interna modificado superficialmente con nitruro de titanio (TiN) mediante el análisis de varianza ANOVA. Trabajo de grado ingeniero mecánico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2017. p40

⁶ MARTÍNEZ, Albert. Motores de combustión interna. [en línea]. Sant Celoni. Trabajo de investigación. 2007. p29 (Recuperado en 15 Octubre de 2019). Disponible en <https://www.coursehero.com/file/22874088/Motores-de-combusti%C3%B3n-interna/>

- Transmitir el calor producido por los gases de combustión hacia las paredes de la camisa para que sean enfriadas por el refrigerante.⁷

2.2.3 Anillos. Los anillos son los encargados de generar un sello entre la camisa y el émbolo manteniendo una buena estanqueidad de compresión, evitando que los gases producidos por la combustión se escapen y ocasionen una contrapresión debido a que esta generaría grandes pérdidas de energía.

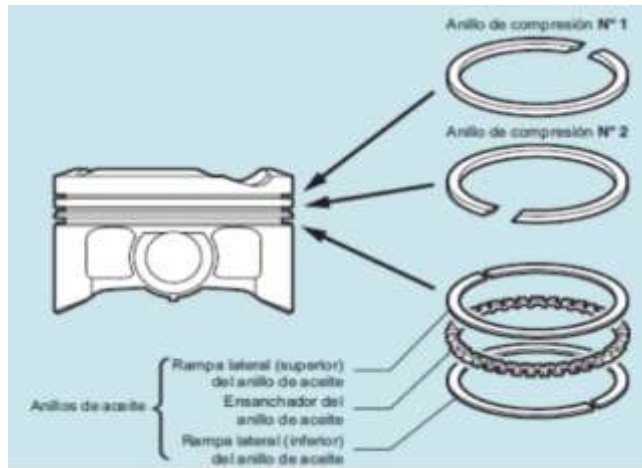
Estos anillos tienen otras funciones como transferir parte el calor liberado por el pistón a la pared de la camisa y otorgarle un cierto grado de amortiguación. Por lo general son tres anillos que se ubican en las ranuras del pistón los cuales son dos de compresión y uno de aceite el cual es el encargado de lubricar la camisa correctamente para reducir la fricción y el desgaste.⁸

En la figura 2 se muestra la disposición de los anillos en el embolo.

⁷ CLETO, Jorge y GÓMEZ, Leonardo. Simulación y análisis de la dinámica de un motor de combustión interna de cinco cilindros manufacturado por Volkswagen, mediante el software Virtual Lab. Licenciatura en Ingeniería Mecánica. Puebla: Universidad de las Américas Puebla. Departamento de Ingeniería Industrial y Mecánica. Escuela de Ingeniería y Ciencias. 2008

⁸ ORTEGA, Karen y SALAZAR, Víctor. Evaluación del desgaste del material utilizado en la fabricación de las camisas de los motores de combustión interna modificado superficialmente con nitruro de titanio (TiN) mediante el análisis de varianza ANOVA. Trabajo de grado ingeniero mecánico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2017. p42

Figura 2. Pistón, anillos y disposición



Fuente: FERNANDEZ, Carlos y VARGAS, Edgar. Sistemas y tecnología de motores Diesel. [En línea]. SlideShare. 2015. (Recuperado en 30 de Julio de 2019.) Disponible en <https://www.slideshare.net/EdgarVargasMedina/exposicion-motores-diesel>.

2.3 CINEMÁTICA DEL MECANISMO BIELA-MANIVELA (MBM)⁹

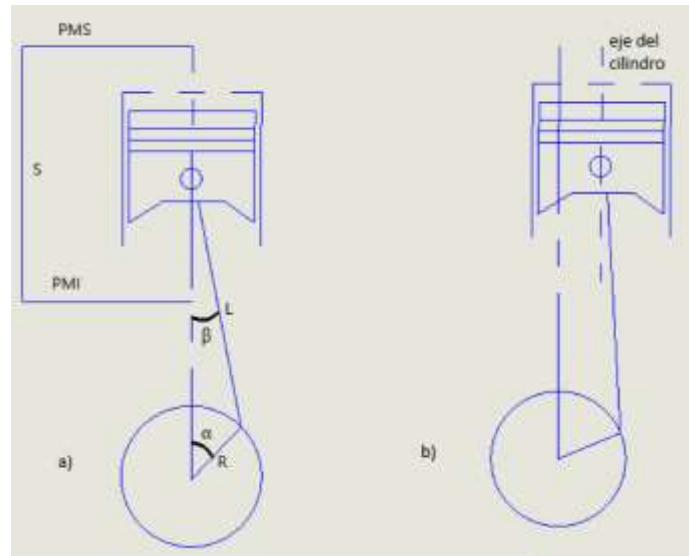
Por medio del movimiento alternativo del pistón se genera el movimiento de rotación del eje del cigüeñal mediante el mecanismo biela-manivela de un MCI, además, de las fuerzas y vibraciones producidas en los componentes.

El MBM se muestra en la figura 3 y se clasifica en dos tipos:

- Centrado: el eje del pistón está en el mismo plano del eje vertical del cigüeñal, ver figura 3 (a).
- Descentrado: el eje del pistón no está en el mismo plano del eje vertical del cigüeñal, ver figura 3 (b).

⁹ HEYWOOD, John B. Internal combustion engine fundamentals, McGraw-Hill primera edición, 1988. p42-57

Figura 3. Esquema de mecanismo biela-manivela



En la figura 3 se observan las siguientes variables:

α - Es el ángulo de giro de la manivela en grados.

β - Es el ángulo que forma la biela con el eje del cilindro.

S - Es la carrera total del pistón.

L - Es la longitud de la biela.

R - Es la longitud de la manivela.

La disposición cuando el eje está descentrado es mejor que cuando está centrado porque disminuye el esfuerzo que ejerce el pistón sobre las paredes de la camisa durante la carrera de trabajo y el aumento en la compresión, lo que produce menos fricción y un desgaste más uniforme. Además, reduce la velocidad del pistón en las proximidades del punto muerto superior (PMS) mejorando la combustión a volumen constante.¹⁰

¹⁰ MUÑOS, M y PAYRI, F. Motores de combustión interna alternativos. Madrid: Rustica Editorial. Sección de publicaciones de la E.T.S. de ingenieros industriales. Fundación general U.P.M. 1989. p551-553

El descentramiento es relativamente pequeño por eso en el análisis cinemático no se tiene en cuenta.

2.3.1 Desplazamiento del pistón. El desplazamiento instantáneo del pistón (s) está en función del ángulo de giro del cigüeñal y por medio de relaciones geométricas se representa por la ecuación 1.

$$s = R * (1 - \cos\alpha) + L * (1 - \sqrt{1 - \lambda^2 * \text{sen}^2\alpha}) \quad (1)$$

Donde (λ) es la relación entre el radio de la manivela (R) sobre la longitud de la biela (L):

$$\lambda = \frac{R}{L} \quad (2)$$

Este desplazamiento no es constante y ocasiona que el movimiento en la primera parte de la carrera sea más rápido que en comparación con la segunda mitad.

2.3.2 Velocidad del pistón. La velocidad del pistón no es constante y se define una velocidad instantánea como la derivada del desplazamiento respecto al tiempo:

$$V = \frac{ds}{dt} = \frac{ds}{d\alpha} * \frac{d\alpha}{dt} \quad (3)$$

Considerando que la velocidad angular del cigüeñal me mantiene constante:

$$\omega = \frac{d\alpha}{dt} = cte \quad (4)$$

Se tiene que la velocidad del pistón se expresa por la siguiente ecuación:

$$V = R * \left(\text{sen}\alpha + \frac{1}{\lambda} * \frac{\lambda^2 * 2 * \text{sen}\alpha * \text{cos}\alpha}{2\sqrt{1 - \lambda^2 * \text{sen}^2\alpha}} \right) * \omega \quad (5)$$

La expresión $\sqrt{1 - \lambda^2 * \text{sen}^2\alpha}$ se considera que tiende a 1 porque la expresión $\lambda^2 * \text{sen}^2\alpha$ tiende a cero y con ayuda de identidades trigonométricas se puede simplificar para determinar la velocidad del pistón mediante la siguiente ecuación:

$$V = R * \omega * \left(\text{sen}\alpha + \frac{\lambda}{2} * \text{sen}2\alpha \right) \quad (6)$$

Por medio de la ecuación 6 se puede determinar que la velocidad del pistón teniendo en cuenta que en el punto muerto superior (PMS) ó en el punto muerto inferior (PMI) es cero, además, que cuando la velocidad del pistón es la máxima se debe a que la biela y la manivela están perpendiculares.

2.3.3 Aceleración del pistón. Los cambios de velocidad que se generan en el pistón son un indicativo de que se genera una aceleración cuyo valor está determinado por la derivada de la velocidad respecto al tiempo.

$$a = \frac{dV}{dt} \quad (7)$$

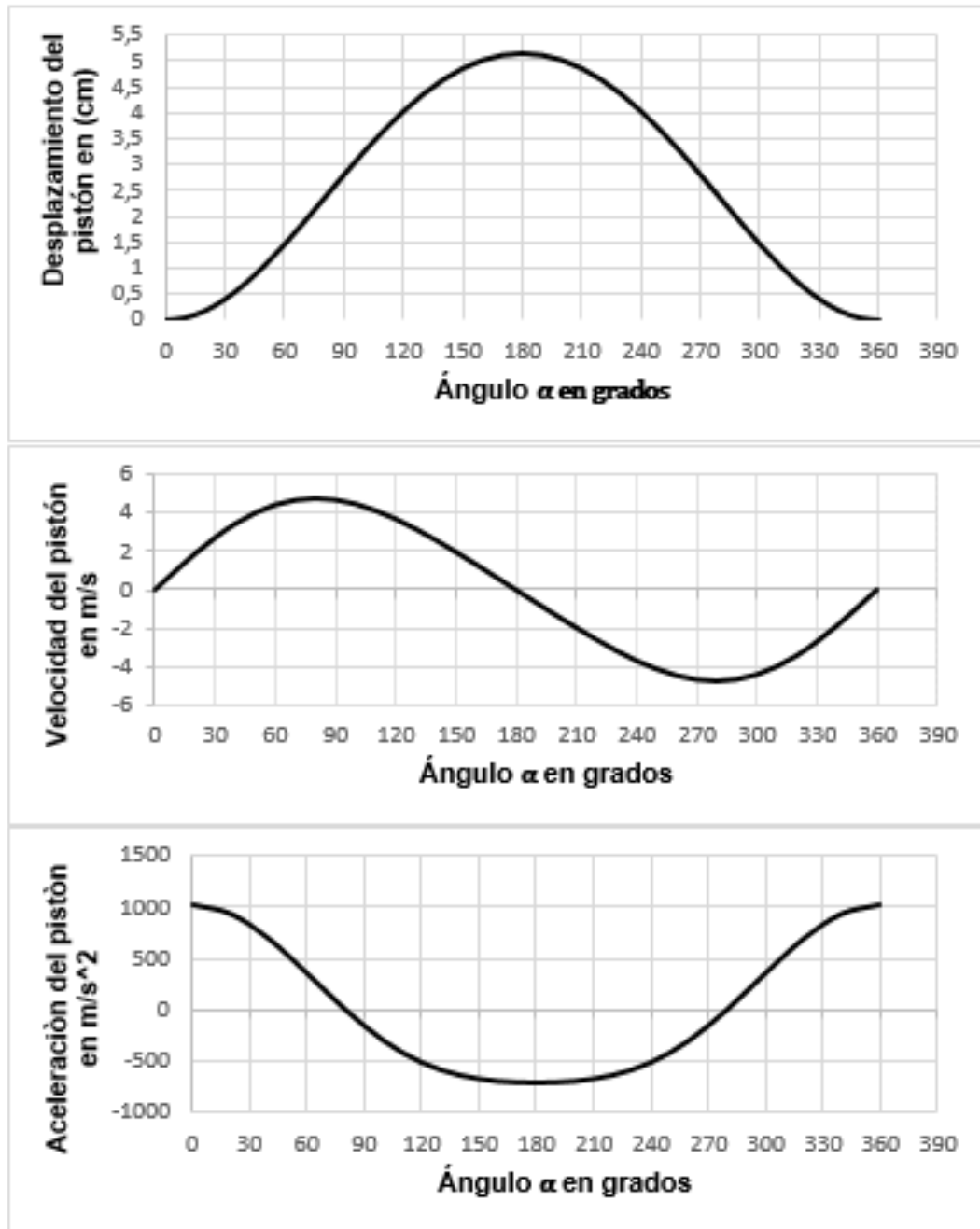
Donde la ecuación de la aceleración del pistón es la siguiente:

$$a = \omega^2 * R * (\text{cos}\alpha + \lambda \text{cos}2\alpha) \quad (8)$$

De la anterior ecuación se obtiene que la máxima aceleraciones y desaceleración se obtienen para 0° y 180°.

En la figura 4 se muestra el desplazamiento, la velocidad y la aceleración del pistón respecto del ángulo de giro del cigüeñal.

Figura 4. Gráficas de desplazamiento, velocidad y aceleración del pistón.



2.4 DINÁMICA DEL MECANISMO BIELA-MANIVELA¹¹

Durante el movimiento alternativo del pistón y respecto al movimiento de los componentes se generan diferentes fuerzas y momentos las cuales producen desgaste, fricción y vibraciones. Se pueden considerar dos tipos de fuerzas como: las fuerzas debidas a la presión de los gases de la combustión y las fuerzas debidas a la inercia de los componentes.

Para la determinación de los esfuerzos y las cargas sobre los cojinetes que están actuando sobre el motor alternativo es necesario conocer estas fuerzas, es decir, la dinámica del mecanismo biela-manivela. Los componentes como la biela, la manivela y el pistón se pueden reducir a una serie de masas puntuales unidas entre sí por barras rígidas sin masa para facilitar el estudio dinámico, pero tiene que cumplir las siguientes condiciones de equilibrio estático y dinámico.

2.4.1 Fuerzas que actúan en el mecanismo biela-manivela. La variación de la aceleración del embolo o pistón genera una variación en las fuerzas lo que ocasiona las vibraciones del motor y por medio de la segunda ley de Newton se pueden determinar.

$$F = m * a \quad (9)$$

Se deben tener ciertas suposiciones para tener una aproximación de cómo se comportan estos componentes debido a que el análisis de las fuerzas que actúan es indispensable para determinar la resistencia de las piezas del motor:

- El pistón, el bulón y los anillos se toman como si fueran un solo componente.
- Todos los elementos no poseen deformación.

¹¹ MUÑOS, M y PAYRI, F. Motores de combustión interna alternativos. Madrid: Rustica Editorial. Sección de publicaciones de la E.T.S. de ingenieros industriales. Fundación general U.P.M. 1989. p551-553

- El movimiento está limitado a un recorrido con un plano bidimensional.
- Las fuerzas ocasionadas por el aceite lubricante presente en la camisa, anillos y pistón no se tendrán en cuenta debido a que son mínimas.
- Se desprecia el movimiento de los anillos en las ranuras del pistón.
- El análisis se efectúa para determinado régimen de funcionamiento.
- Las cargas son provenientes de las fuerzas de presión de los gases y de las fuerzas de inercia de las masas en movimiento.
- El cigüeñal gira con velocidad angular constante.

La fuerza de inercia y la fuerza centrífuga presentes en el sistema biela-manivela debe tener en cuenta las masas presentes en el movimiento alterno (m_a) y las masas presentes en el movimiento circular (m_c). Estas fuerzas alternas actúan según el eje del cilindro.

$$F_a = -m_a * a \quad (10)$$

$$a = \omega^2 * R * (\cos\alpha + \lambda * \cos 2\alpha) \quad (11)$$

$$F_a = -m_a * \omega^2 * R * (\cos\alpha + \lambda * \cos 2\alpha) \quad (12)$$

Donde:

a - Es la aceleración del pistón en (m/s^2).

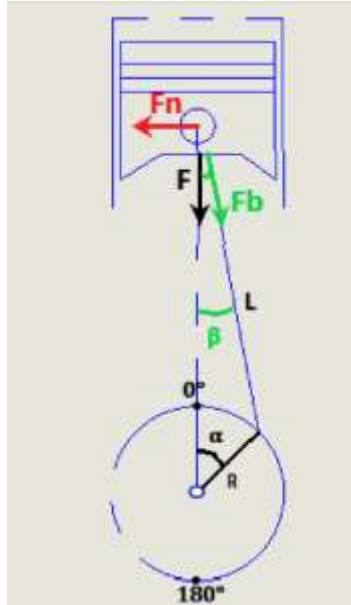
ω - Es la velocidad angular en el cigüeñal (rad/s).

Las fuerzas centrífugas actúan al pasar por el centro de giro del cigüeñal.

$$F_c = m_c * \omega^2 * R \quad (13)$$

La fuerza alternativa se descompone provocando que actúen dos fuerzas que son: fuerza normal (F_n) que actúa sobre la pared del cilindro y la fuerza que actúa en la biela (F_b), véase la figura 5.

Figura 5. Descomposición de las fuerzas.



$$F_n = F * \tan\beta \quad (14)$$

$$F_b = F / \cos\beta \quad (15)$$

La F_n es la que causa la pérdida de potencia por rozamiento y genera el desgaste en la pared del cilindro y la fuerza F_b al ser transmitida por la biela, actúa sobre la manivela y el eje del cigüeñal originando un momento (M).

$$M = F_b * d \quad (16)$$

$$d = R * \text{sen}(\alpha + \beta) \quad (17)$$

2.5 DESGASTE

Se denomina desgaste a la pérdida de material y a las perturbaciones en la superficie de la pieza imprevistas debido a la influencia de las acciones de fuerzas exteriores de cualquier clase. El inicio del desgaste se presenta de diferentes

modos, pero a pesar de los numerosos esfuerzos que se han hecho para establecer relaciones bien fundamentadas entre la resistencia al desgaste y la calidad de la pieza no se ha logrado establecer una escala absoluta que fije la calidad de resistencia al desgaste.¹²

El desgaste desarrollado en seco o sin ningún tipo de lubricante se puede decir que aumenta considerablemente a comparación de cuando tiene algún tipo de lubricante. El trabajo de rozamiento realizado al deslizar una pieza sobre otra se transforma en calor, pero debido a este incremento de temperatura se pueden presentar cambios en la estructura y en la resistencia del material.

2.5.1 Principales tipos de desgastes en las camisas de motores de combustión interna (MCI). Debido al movimiento alternativo del émbolo en el interior de la camisa, las altas temperaturas y presiones a las que están sometidas las camisas se produce un desgaste que no es regular ni uniforme y que ataca siempre únicamente la superficie que está en contacto con los anillos y el émbolo. El desgaste está fuertemente influido por la presión ejercida en el interior del cilindro que actúa sobre los anillos del pistón, especialmente en el primer anillo.

Los desgastes más frecuentes que se generan en la superficie de las camisas de los motores de combustión interna pueden ser por: conicidad, ovalización, adhesión, abrasión y corrosión.¹³

2.5.1.1 Desgaste adhesivo. El desgaste se produce por el deslizamiento de una superficie contra la otra bajo presión, la aspereza de la unión en donde ocurre el

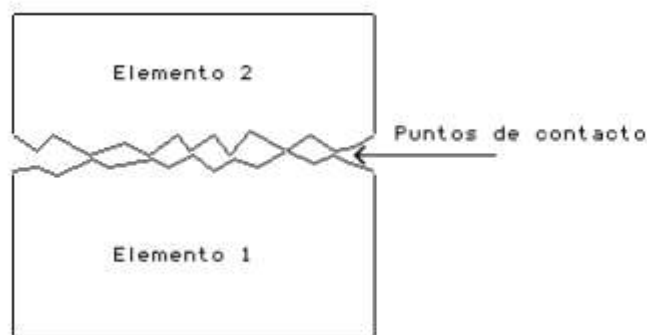
¹² ENGLISCH, Carl. Motores de combustión interna. Desgaste, coste de explotación y rentabilidad. Alemania. Editorial Labor, S. A. 1950

¹³ ORTEGA, Karen y SALAZAR, Víctor. Evaluación del desgaste del material utilizado en la fabricación de las camisas de los motores de combustión interna modificado superficialmente con nitruro de titanio (TiN) mediante el análisis de varianza ANOVA. Trabajo de grado ingeniero mecánico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2017. p34

deslizamiento debido a los altos esfuerzos localizados lleva a que las fuerzas de deslizamiento fracturen la unión, desgarrando al material de una superficie y transfiriéndolo a otra, lo que puede ocasionar posteriormente mayor daño.¹⁴ El desgaste adhesivo es asociado a la transferencia macroscópica del material entre el segmento y el cilindro que se conoce como engripamiento.

En la figura 6, se puede observar cómo se produce el desgaste adhesivo al estar en permanente contacto entre 2 superficies.

Figura 6. Desgaste adhesivo

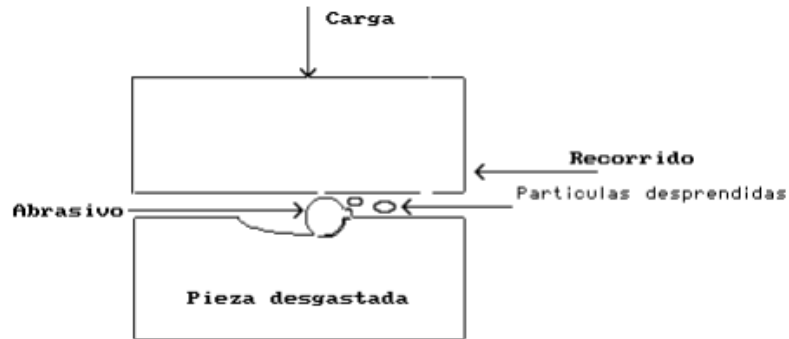


Fuente: CASTILLO, Felipe. Tribología: fricción, desgaste y lubricación. Laboratorio tecnológico de materiales. Cuatitlán. Facultad de estudios superiores Cuatitlán. Departamento de ingeniería. 2007. p 11-12.

2.5.1.2 Desgaste abrasivo. Es la remoción de material entre las superficies de contacto, se debe principalmente a la acción de partículas aisladas procedentes del exterior o generadas internamente. Es conveniente aclarar que este tipo de desgaste se puede presentar en estado seco o bajo la presencia de un fluido. En la figura 7, se puede observar cómo es el comportamiento de desgaste abrasivo entre 2 superficies.

¹⁴ CASTILLO, Felipe. Tribología: fricción, desgaste y lubricación. Laboratorio tecnológico de materiales. Cuatitlán. Facultad de estudios superiores Cuatitlán. Departamento de ingeniería. 2007. p 11-12.

Figura 7. Desgaste abrasivo



Fuente: CASTILLO, Felipe. Tribología: fricción, desgaste y lubricación. Laboratorio tecnológico de materiales. Cuatitlán. Facultad de estudios superiores Cuatitlán. Departamento de ingeniería. 2007. p 11-12.

2.5.1.3 Desgaste corrosivo. Este tipo de desgaste es generado por el alto contenido de azufre en los combustibles que está comprendido entre el 0.2% y el 0.25% en volumen, y la condensación del vapor de agua, el cual dependerá de la temperatura especialmente en los puntos más fríos.¹⁵

2.5.1.4 Desgaste por conicidad. La conicidad es la diferencia de diámetros inferior y superior en la camisa debido al desgaste. Este es mayor en la parte superior debido a que son mayores las presiones y la película de lubricante es más delgada lo que provoca que haya mayor rozamiento, a medida que el pistón va descendiendo las presiones van a disminuir generando un desgaste no uniforme. La diferencia del desgaste en la parte superior respecto al de la parte inferior de la camisa es muy mínima, pero si se aproxima a 1 décima de milímetro debe rectificarse o cambiarse la camisa.¹⁶

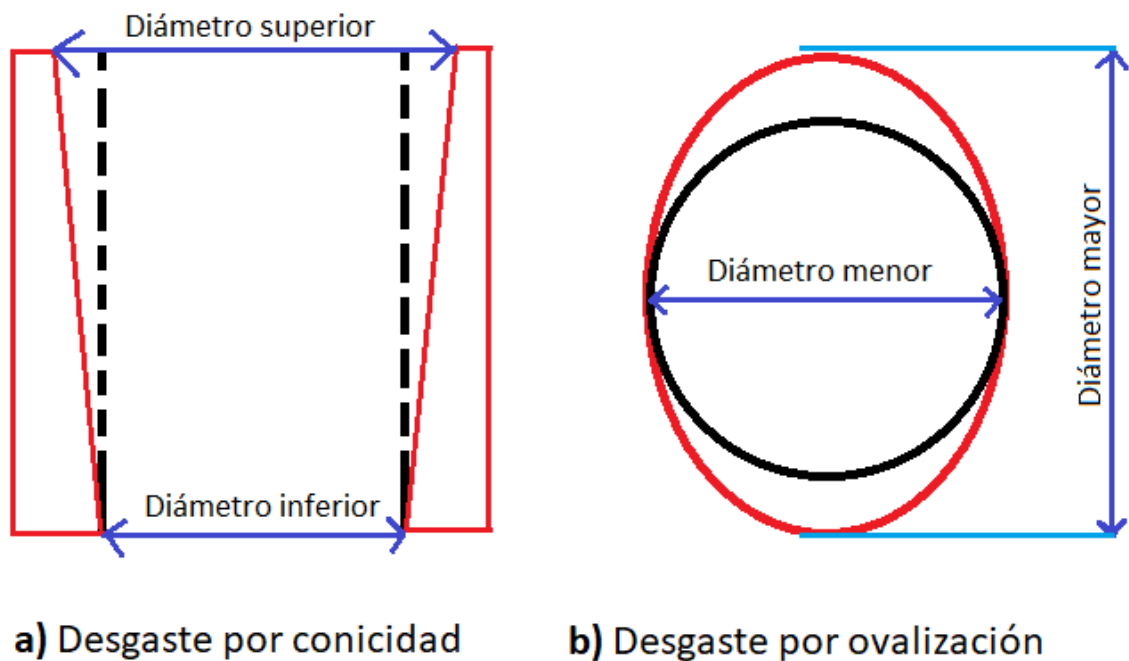
¹⁵ AYLAN, Maxi. El desgaste de los motores de encendido por compresión. Comodoro Rivadavia: Universidad Nacional de La Patagonia San Juan Bosco. Mantenimiento ME003.2018. p6-9

¹⁶ QUIGUANGO, Richard; ROJAS, Jhon y NACIMBA, Wilmer. Ovalamiento y conicidad de los cilindros de un motor. Quito: Instituto Tecnológico Superior Central Técnico. Escuela de mecánica automotriz.2015. p6

2.5.1.5 Desgaste por ovalización. La camisa tiende a ovalarse debido a que el pistón ejerce una fuerza lateral la cual es producida por el movimiento oscilante de la biela, por eso el desgaste será mayor en dirección transversal al motor. El máximo ovalamiento se presenta en la parte superior de la camisa y trae como consecuencia la falta de hermeticidad con los anillos, más consumo de aceite y pérdida de compresión en el motor.¹⁷

En la figura 8, se puede observar el desgaste producido entre los anillos del pistón y la camisa o cilindro del motor.

Figura 8. Desgastes en la camisa por conicidad y ovalización.



¹⁷ ORTEGA, Karen y SALAZAR, Víctor. Evaluación del desgaste del material utilizado en la fabricación de las camisas de los motores de combustión interna modificado superficialmente con nitruro de titanio (TiN) mediante el análisis de varianza ANOVA. Trabajo de grado ingeniero mecánico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2017. p34

2.6 MODELO DE ARCHARD

La tribología se ha encargado de la formulación de modelos que permitan expresar matemáticamente la variación del desgaste durante el contacto de superficies en movimiento.

Las principales dificultades se originan en la presencia de factores microscópicos, entre los cuales puede mencionarse la calidad superficial, las heterogeneidades del material y la temperatura localmente desarrollada. Para la camisa de un (MCI), se analiza el recubrimiento superficial sometido a desgaste por fricción con los anillos del pistón, se implementó este método para evaluar su desgaste.

Holm y Archard¹⁸ desarrollaron un modelo en el cual la rapidez de desgaste (W) es proporcional a la carga normal aplicada (F_n) e inversamente proporcional a la dureza del material (H) relacionados a través de una constante k y distancia de desgaste (L). Estos autores obtuvieron una ecuación de forma simple, conocida como ecuación de Archard:

$$W = K * \frac{F_n * L}{H} \quad (18)$$

En el modelo de Holm y Archard las variables de entrada definidas son:

F_n - Es la Carga Normal o fuerza normal en Newton (N).

H - Es la dureza del material en Pascales (Pa).

L - Es la distancia de desgaste en metros (m).

Y las variables de salida son:

W - Es la tasa de desgaste en (m³).

k - Es el coeficiente de desgaste abrasivo.

¹⁸ ARCHARD, J.F. Contact and Rubbing of Flat Surfaces. [Base de datos en línea]. Junio 07 de 2004. Revista Journal of Applied Phisys. Vol 24, number 8. p 981-988. (Recuperado en 21 Noviembre 2019) Disponible en <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1721448>

El coeficiente de desgaste abrasivo (k) depende de la geometría de la aspereza de abrasión y típicamente varía entre 10^{-6} a 10^{-1} , donde este valor es adimensional.

2.6.1 La tasa de desgaste es proporcional a la carga normal. Ha sido corroborado en experimentos de desgaste continuado y de transferencia efectuados con diversos tipos de materiales (metales y no metales). En algunos casos aplica también a sistemas tribológicos lubricados, en los cuales el lubricante es un elemento inerte. También puede observarse este comportamiento en intervalos limitados de condiciones impuestas a otros sistemas que exhiben comportamientos más complejos en otras condiciones. De esta manera, Archard es consciente de las limitaciones de su modelo.

La tasa de desgaste es independiente de la velocidad de deslizamiento siempre y cuando se demuestre que la presión de flujo plástico y el factor K permanecen constantes¹⁹.

2.7 TRATAMIENTO SUPERFICIAL

Los tratamientos superficiales se realizan para mejorar las propiedades de los materiales sin afectar las dimensiones o geometría de la pieza.

2.7.1 Tratamientos superficiales y acabados industriales. En los procesos industriales cada vez es más necesario tener uno o varios tratamientos superficiales que mejoren las propiedades de los metales tales como: micro dureza, resistencia al desgaste por fricción, resistencia a la corrosión, entre otras.

¹⁹ SUÁREZ, Fabio y VELEZ, Juan. Estudio del modelo de desgaste propuesto por ARCHARD [en línea]. Medellín; Universidad Nacional de Colombia. 2004. (Recuperado en 02 de agosto de 2019). Disponible en <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v72n146/a03v72n146.pdf>

En la actualidad los avances tecnológicos van encaminados a los mejoramientos de las propiedades tribológicas por eso la técnica de la implantación iónica tridimensional permite mejorar las propiedades del material disminuyendo el desgaste ocasionado por la fricción.²⁰

Las características de los tratamientos superficiales en los procesos de deposición describen como es el proceso de ionización del material reactivo, a continuación, se describe cada uno de estos.

- **Obtención del material reactivo**

Se realiza al evaporar una cantidad de metal en un ambiente vacío por lo que se ioniza en su estado puro, este proceso se obtiene por diversos métodos, siendo los más empleados el ion-plating, evaporación por arco eléctrico y sputtering. Esta técnica se denomina Deposición Física de Vapor (PVD) la cual trabaja con el cátodo y la diferencia de potencial de las piezas a recubrir por el metal evaporado ionizado y la reacción de los gases introducidos dentro de una cámara a temperaturas moderadas.

- **Presión y temperatura del proceso**

- En los procesos de PVD la temperatura en la cámara es un factor que depende de la aplicación o tipo de recubrimiento, como fines decorativos (50°C - 60°C), de baja fricción (inferiores a 480°C) o cerámicos de alta dureza (480°C - 550°C).
- En los procesos de PVD es requisito tener presiones de alto vacío hasta 10^{-5} mBar.

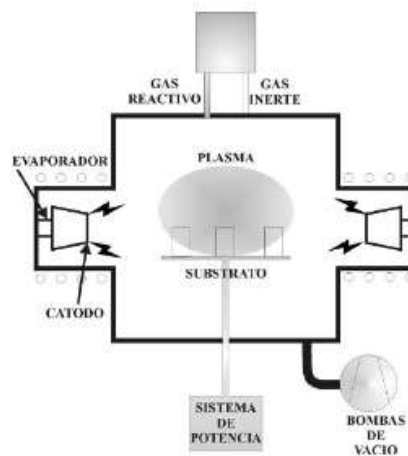
²⁰ NIÑO, E.D. y otros. Caracterización del Acero API 5LX 65 Implantado por Iones de Nitrógeno e Iones de Titanio. Revista Colombiana de Física. 2011, vol. 43 no. 1. 4p

2.7.1.1 Procesos de modificación superficial.²¹ En la actualidad existen varias técnicas de modificación superficial utilizadas para mejorar las propiedades de los materiales, la que ha estado a la vanguardia en los recientes avances tecnológicos en el área de los recubrimientos es la PVD, que se explica a continuación.

Deposición física de vapor (PVD). Esta técnica de recubrimiento emplea medios físicos para obtener el material que formara una capa a partir de la fase de vapor. La naturaleza del enlace químico y la propiedad mecánica de los componentes de la capa de PVD son los encargados de la determinación de su comportamiento.

En la figura 9 se puede observar el funcionamiento dentro de la cámara en la que se realiza el recubrimiento.

Figura 9. Esquema de un reactor PVD



Fuente: Tratamientos térmicos recubrimientos avanzados (TTC). Deposición física en fase vapor. Disponible en <https://docplayer.es/76425652-P-v-d-deposicion-fisica-en-fase-vapor-introduccion- evaporacion-por-arco-catodico-recubrimientos-pvd.html>

²¹ MENA, Ronald y VILLAMIZAR, Sergio. Diseño y desarrollo experimental del comportamiento de piezas metálicas de mecanización con y sin recubrimiento de TiN mediante un proceso PVD, sometidas a desgaste. Trabajo de grado ingeniero mecánico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de ingeniería mecánica. 2012. P25-26

En el momento en que se generan los iones en la cámara de vacío a bajas presiones se introduce el gas para que se formen los compuestos debido a la reacción de estos y así posteriormente depositarse en las piezas por la acción de un campo eléctrico.

Esta técnica a llevado a realizar recubrimientos como TiN, TiCN, AlTiN, entre otros aplicados como capas en distintas formas. Para esto es necesario que la pieza tenga una detallada preparación y limpieza de la superficie para facilitar la adherencia de la película de sustrato, garantizando que los iones del metal a implantar penetren en la superficie.

2.7.1.2 Propiedades del Zirconio. El zirconio es un metal de color brillante blanco grisáceo duro, es uno de los más resistentes a la corrosión y es muy parecido al acero. Debido a sus propiedades se ha convertido en un metal óptimo para el tratamiento superficial.

En la tabla 1, podemos observar las principales características del zirconio.

Tabla 1. Propiedades del zirconio.

Símbolo	Zr
Número atómico	40
Masa atómica	91,224 u
Radio covalente	148 pm
Estados de oxidación	4
Punto de fusión	1855 [°C]
Punto de ebullición	4644 [°C]
Estructura cristalina	α (HCP) para $T < 863$ °C β (HCC) para $T > 863$ °C
Densidad	6,501 [g/cm ³]
Calor específico	0,27 [J/(K.kg)]
Conductividad térmica	22,7 [W/(K.m)]

2.7.1.4 Propiedades del nitrógeno.²² El nitrógeno es un gas que está presente en la atmósfera, incoloro, no inflamable y no tiene olor ni sabor. Puede combinarse a elevadas temperaturas con metales formando nitruros como TiN o ZrN, además, es soluble en el agua y es ligeramente menos pesado que el aire.

En la tabla 2, se puede observar las principales características del nitrógeno.

Tabla 2. Propiedades del nitrógeno.

Símbolo	N ₂
Peso molecular	28,013 g/mol
Temperatura de ebullición	195,8 °C
Temperatura crítica	146,9 °C
Presión crítica	33,9 bar
Densidad del gas	1,161 g/l
Peso específico	0,967
Solubilidad en agua a 0°C y 1 atm	2,33 cm ³ N ₂ /100 cm ³ H ₂ O
Calor latente de vaporización	47,44 cal/g

2.7.1.5 Propiedades del nitruro de zirconio. Este compuesto se forma por medio a la interacción del Zirconio (Zr) y el Nitrógeno (N₂) “formando enlaces covalentes que requieren una energía de dislocación de enlace muy alta que contribuyen a una dureza elevada y actúa como barrera de difusión iónica”. El nitruro de zirconio tiene propiedades físicas para una variedad de aplicaciones industriales en donde posee una buena resistencia al desgaste, buena adhesión, alta dureza, superficie lisa y alta resistencia a la corrosión.²³

²² GÓMES, Oscar y PATIÑO, Miguel. Evaluación del desgaste de una broca en acero rápido (HSS) modificada superficialmente con iones de nitrógeno y titanio usando la metodología ANOVA. Trabajo de grado ingeniero mecánico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2013. P45-46

²³ CARDENAS, Leydi. Resistencia a la corrosión de recubrimientos nanoestructurados de Ti-Zr-Si-N. Tesis de grado Magister en Ingeniería Mecánica. Bogotá D.C. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica. 2018. p55

En la tabla 3, se puede evidenciar las características más importantes del nitruro de zirconio.

Tabla 3. Propiedades del nitruro de zirconio.

Símbolo	ZrN
Micro dureza HV 0.05	2800 ± 300
Coeficiente de fricción del acero seco	0.5
Limite térmico	600 °C
Color del recubrimiento	Amarillo pálido
Características clave	Color decorativo, buen desgaste y resistente a la corrosión
Aplicaciones clave	Corte, punzado, medico

2.7.2 Reactor MOSMET. El reactor MOSMET (Modificación superficial de metales) presente en el Laboratorio de Plasma de la Universidad Industrial de Santander es la transformación del equipo JUPITER (Joint Universal Plasma and Ion Technologies Experimental Reactor) para descargas de alto voltaje en un equipo híbrido a bajas presiones y es el encargado de realizar los tratamientos superficiales a las camisas para la realización del desgaste en el banco de pruebas.

Figura 10. Reactor MOSMET



2.7.3 Partes del reactor MOSMET ²⁴ En la figura 10, se pueden observar los principales componentes del reactor MOSMET.

1) Cámara de descargas: hecha de acero inoxidable AISI 304 y madera con espesor de 50mm para aislamiento de los rayos x con el exterior. Posee un volumen de 0.3 m³.

2) Sistema de vacío: posee dos bombas en serie una rotativa y una bomba turbomolecular con velocidad de bombeo de 720 litros/s con relación al nitrógeno para lograr una presión en la cámara de hasta 10⁻⁴ Pa.

3) Fuente de voltaje: asegura un flujo de iones monoenergéticos por medio de los pulsos hacia el cátodo y su amplitud es de (5-60 KeV) y frecuencia de (1-60 Hz), durando de 80μs 0 2500μs consumiendo una potencia de 2.5 KW.

4) Panel de encendido: se encarga de encender la fuente para la descarga del arco eléctrico.

5) Fuente para arco eléctrico: la fuente es la encargada de soportar el arco eléctrico ya que se requiere de bastante electricidad.

6) Panel de control general: consta de 4 módulos;

- Módulo de alimentación: conecta o desconecta la electricidad.
- Módulo de control de sistema de vacío: controla las bombas y su estado.
- Módulo de control de parámetros de descarga: controla los diferentes parámetros de la descarga.
- Módulo de control de flujo de gas: varía el flujo de gas.

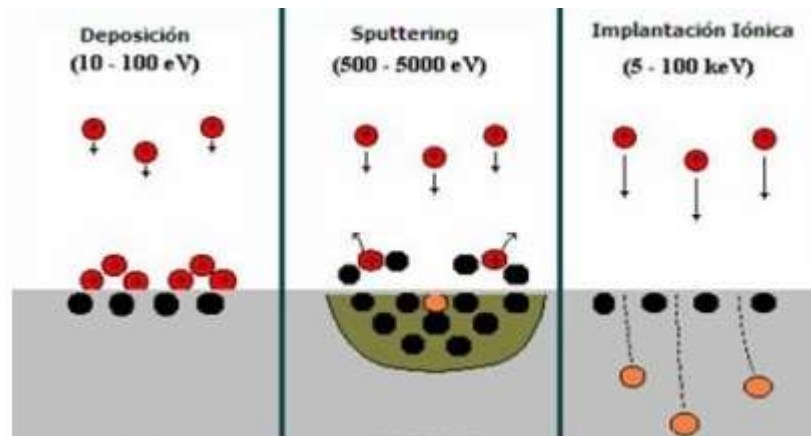
2.7.4 Tipos de tratamientos que se pueden realizar en el reactor MOSMET. En el reactor MOSMET se pueden realizar 3 tipos de tratamientos, para realizar el recubrimiento de la camisa de se empleó el método de implantación iónica.

²⁴ GÓMES, Oscar y PATIÑO, Miguel. Evaluación del desgaste de una broca en acero rápido (HSS) modificada superficialmente con iones de nitrógeno y titanio usando la metodología ANOVA. Trabajo de grado ingeniero mecánico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2013. P45-46

- **Deposición:** la energía no es suficiente para penetrar la superficie por lo que queda como una película superficial.
- **Sputtering:** las partículas inciden en la superficie arrancando uno o varios átomos de la red cristalina para el proceso de limpieza de la superficie eliminando residuos o impurezas.
- **Implantación iónica:** es la extracción de iones los cuales son dirigidos hacia la superficie del metal, donde se necesita gran energía para poder penetrar la estructura interna del material para aumentar su dureza y disminuir el coeficiente de fricción.

En la figura 11, se pueden observar los diferentes tratamientos superficiales que se pueden realizar en el reactor MOSMET.

Figura 11. Tipos de tratamiento



Fuente: GÓMES, Oscar y PATIÑO, Miguel. Evaluación del desgaste de una broca en acero rápido (HSS) modificada superficialmente con iones de nitrógeno y titanio usando la metodología ANOVA. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. 2013

Los pulsos en la cámara son rectangulares de alta tensión que se impone a través del cátodo de alto voltaje. El cátodo de arco eléctrico y el cátodo de alto voltaje están en lados opuestos para crear condiciones favorables de los iones metálicos que son implantados en los sustratos metálicos ubicados sobre el cátodo de alto voltaje. Las

descargas funcionan independientemente sin perturbación mutua están aislados eléctricamente permitiendo así una descarga de arco, de alto voltaje o simultáneas (descarga híbrida que es implantación + deposición).²⁵

²⁵ PORTILLA, Miguel. Influencia de la modificación superficial con iones de titanio y nitrógeno en materiales utilizados en la fabricación de pistones de motocicleta. Trabajo de grado ingeniero mecánico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2017. p37

3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS

En este capítulo se presentan las alternativas de diseño implementadas en la realización del banco de pruebas, así como sus diferentes requerimientos para su debida construcción, además, se presenta el paso a paso del proceso de diseño del banco de pruebas donde se pueden simular y realizar las pruebas de desgaste en las camisas de un MCI. Se divide en dos etapas: la primera corresponde al diseño preliminar y planos del banco de pruebas y la segunda fase es la construcción y puesta a punto de este.

3.1 DESPLIEGUE DE LA FUNCION CALIDAD (QFD)

3.1.1 Requerimientos del consumidor. A continuación, se presenta una lista con las necesidades que el cliente desea a la hora de adquirir una camisa para el óptimo funcionamiento del motor y en base a estos requerimientos se realiza el diseño del banco de pruebas.

- Capacidad de trabajo.
- Consumo de energía.
- Seguridad.
- Tamaño moderado: debe ser compacto.
- Facilidad de operación.
- Soporte técnico: considerando el peso, las dimensiones y las especificaciones.
- Durabilidad.
- Estructura resistente.
- Movilidad: se debe considerar el peso y el volumen.

3.1.2 Requerimientos del ingeniero. A continuación, se presenta la lista de los requerimientos que el ingeniero tiene en cuenta a la hora de realizar el diseño del banco de pruebas para la medición del desgaste.

- Tamaño.
- Material.
- Seguridad.
- Durabilidad.
- Repuestos.
- Garantía.
- Manufactura.
- Capacidad.
- Movilidad.

3.2 MATRIZ DE CALIDAD

En la tabla 4 se presenta la matriz QFD donde se relacionan los requerimientos del consumidor con los requerimientos del ingeniero, en la cual se obtienen los 5 requerimientos de prioridad más alta al momento de realizar el diseño.

Tabla 4. Matriz QFD

requerimientos del ingeniero → requerimientos consumidor	P R I O R I D A D	Tamaño	Material	Seguridad	Durabilidad	Repuestos	Garantía	Manufactura	Capacidad	Movilidad	Relación									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9										
Facilidad de operación	9	0	0	0	9	81	0	0	3	27	0	0	1	9	1	9	9	81		
Capacidad de trabajo	8	9	72	9	72	1	8	1	8	0	0	3	24	3	24	9	72	1	8	
Seguridad	7	3	21	0	0	9	63	1	7	3	21	0	0	0	0	0	3	21		
Tamaño moderado	6	9	54	1	6	1	6	1	6	9	54	1	6	3	18	3	18	9	54	
Movilidad	5	9	45	3	15	3	15	0	0	1	5	0	0	3	15	1	5	9	45	
Durabilidad	4	0	0	9	36	1	4	9	36	9	36	9	36	3	12	3	12	1	4	
Consumo de energía	3	3	9	0	0	0	0	0	0	0	3	9	1	3	3	9	0	0		
Soporte técnico	2	3	6	3	6	3	6	9	18	3	6	9	18	0	0	1	2	1	2	
Estructura resistente	1	3	3	9	9	0	0	9	9	9	9	9	3	3	0	0	9	9	1	1
EVALUACIÓN CARACTERÍSTICA DE NUESTRO SERVICIO		210	144	183	84	158	96	81	136	216										
EVALUACION DE INGENIERÍA		2	5	3		4													1	

Después de realizada la matriz QFD, se obtuvo que los 5 requerimientos más importantes al momento del diseño y la construcción del banco de pruebas son: la movilidad, el tamaño, la seguridad, los repuestos y los materiales.

3.3 PONDERACIÓN DE RESULTADOS

Una vez realizada la matriz de calidad, y obtenidos los 5 requerimientos con mayor prioridad se realiza la ponderación de estos, para posteriormente relacionarlos con las diferentes alternativas de diseño y así escoger la óptima para su debida construcción, véase la tabla 5. Donde el valor de la magnitud se obtiene tomando el valor de cada requerimiento y dividiéndolo en el valor total de la suma de todos los requerimientos.

Tabla 5. Ponderación de los requerimientos importantes.

REQUERIMIENTOS	VALOR	MAGNITUD	PORCENTAJE (%)
MOVILIDAD	216	0.237103	23.7103
TAMAÑO	210	0.230516	23.0516
SEGURIDAD	183	0.200878	20.0878
REPUESTOS	158	0.173435	17.3435
MATERIAL	144	0.158068	15.8068
TOTAL	911	1	100

3.4 ALTERNATIVAS DE DISEÑO

Los métodos más relevantes para el diseño del banco de pruebas son los siguientes:

3.4.1 Alternativa uno. Consiste en que el movimiento del pistón es de forma horizontal donde el cigüeñal es accionado por medio de un motor eléctrico, esta alternativa sería óptima para las pruebas de desgaste en la camisa, pero no se puede tener una óptima lubricación y esto ocasionaría que se aumente el desgaste, véase figura 12.

Ventajas

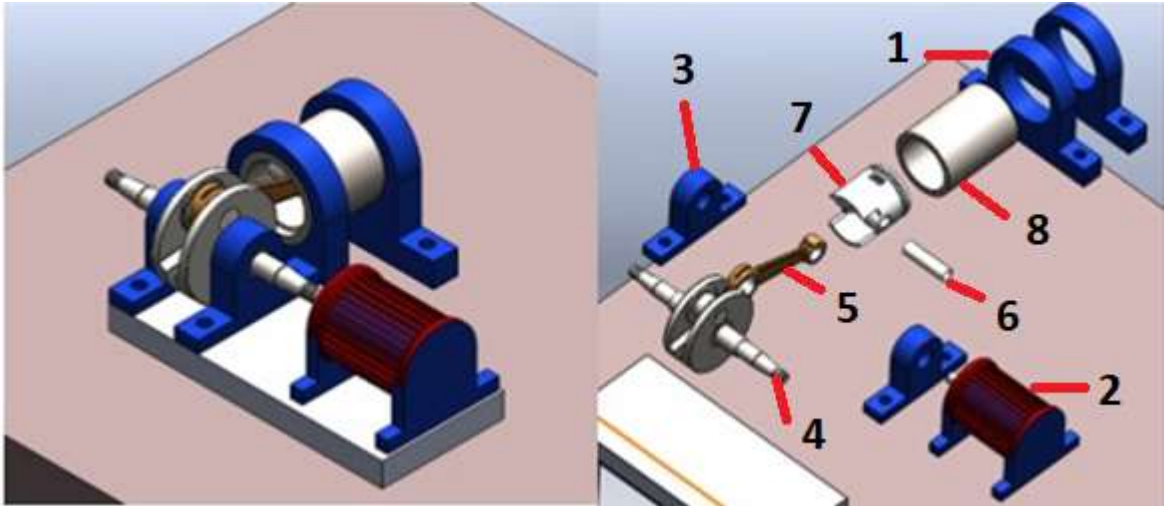
- Debido a su posición horizontal es fácil de reemplazar la camisa para la repetición de las pruebas
- Menos componentes para la sujeción de la camisa
- Diseño simple
- No requiere desensamblar otros componentes aparte que el de la sujeción de la camisa

Desventajas

- Mala lubricación.

- Costo adicional en bomba para lubricación del componente.

Figura 12. Componente camisa-pistón horizontal



- 1) Chumacera para el soporte de la camisa.
- 2) Motor eléctrico.
- 3) Chumacera para el soporte del cigüeñal.
- 4) Cigüeñal.
- 5) Biela.
- 6) Bulón.
- 7) Pistón o émbolo.
- 8) Camisa.

3.4.2 Alternativa dos. Esta alternativa consiste en que el pistón hace su movimiento alternativo en forma vertical hacia arriba donde el cigüeñal es accionado por medio de un motor eléctrico, esta alternativa es óptima para las pruebas de desgaste debido a que la mayoría de los MCI tienen el mismo sentido de funcionamiento y el cual es de gran ventaja en cuanto a que la lubricación se incorporaría por medio de la gravedad, véase la figura 13.

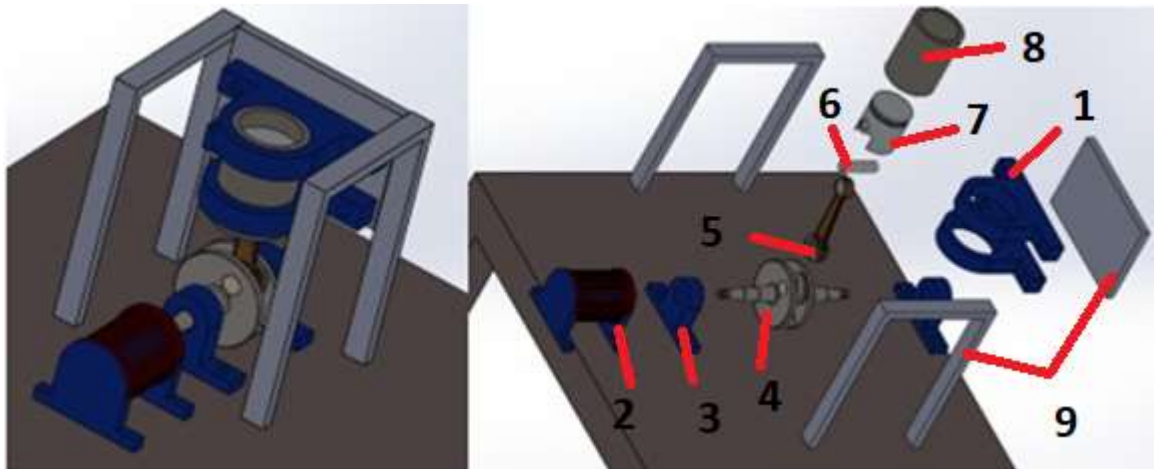
Ventajas:

- Facilidad en la lubricación por medio de la gravedad.
- Diseño simple.
- No requiere desensamblar otros componentes aparte que el de la sujeción de la camisa.

Desventajas:

- Complejidad en la sujeción de la camisa.
- La lubricación entraría por la parte superior del pistón por lo que no tendría una buena distribución de aceite en toda la camisa.

Figura 13. Componente camisa-pistón hacia arriba



- 1) Chumacera para el soporte de la camisa
- 2) Motor eléctrico
- 3) Chumacera para el soporte del cigüeñal
- 4) Cigüeñal
- 5) Biela
- 6) Bulón
- 7) Pistón o émbolo
- 8) Camisa

9) Estructura de base de la chumacera para el soporte de la camisa

3.4.3 Alternativa tres. Consiste en que el movimiento alterno del pistón será hacia abajo, donde el cigüeñal es accionado por medio de un motor eléctrico. Esta alternativa es óptima para las pruebas de desgaste debido a que permitirá que la lubricación sea por medio de la gravedad y mayor transferencia de calor debido a las aletas que posee el bloque impidiendo el incremento de temperatura en la camisa. Además, gracias a unos conductos que posee el pistón y que comunican el interior con la ranura del anillo de aceite, permite una óptima distribución de aceite para la buena lubricación de la camisa, véase la figura 14.

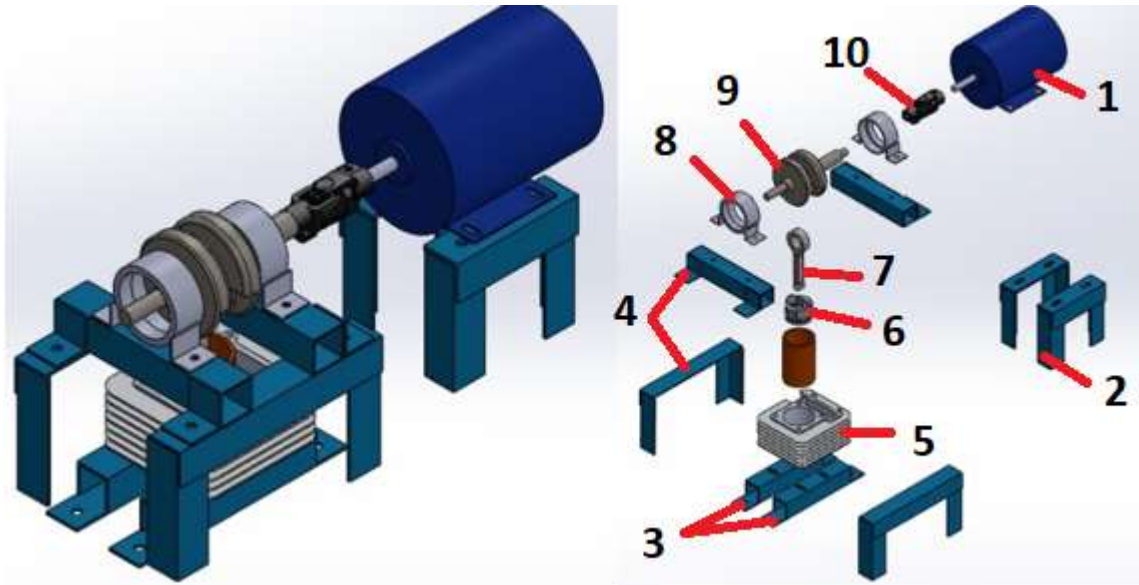
Ventajas:

- Facilidad en la lubricación por medio de la gravedad.
- Óptima lubricación en toda la camisa.
- No requiere desensamblar otros componentes aparte que el de la sujeción de la camisa.
- Mayor transferencia de calor debido al bloque.

Desventajas:

- Complejidad en el soporte del bloque de la camisa.

Figura 14. Componente camisa-pistón hacia abajo



- 1) Motor eléctrico.
- 2) Soporte del motor eléctrico.
- 3) Soporte del bloque.
- 4) Soporte de las chumaceras del cigüeñal.
- 5) Bloque.
- 6) Pistón o émbolo.
- 7) Biela.
- 8) Chumacera del cigüeñal.
- 9) Cigüeñal.
- 10) Acople.

3.5 EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS

En la tabla 6 se realiza la evaluación de las alternativas, la cual consiste en realizar una comparación entre las tres alternativas antes expuestas con una valoración de

1 a 5 respecto a la ponderación porcentual de los requerimientos de la tabla 5, para así determinar cuál de las alternativas es más factible.

Tabla 6. Matriz de ponderación

REQUERIMIENTOS	VALOR (%)	ALTERNATIVAS					
		Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
MOVILIDAD	0.237103	4	0.9484	4	0.9484	4	0.9484
TAMAÑO	0.230516	4	0.9220	4	0.9220	4	0.9220
SEGURIDAD	0.200878	3.5	0.7030	4	0.8035	4	0.8035
REPUESTOS	0.173435	3.5	0.6070	3.5	0.6070	3.6	0.6244
MATERIAL	0.158068	4	0.6322	4	0.6322	4	0.6322
TOTAL	1	3.8126		3.9131		3.9305	

3.5.1 Alternativa seleccionada. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la matriz de ponderación la alternativa que mejor se adapta es la alternativa 3 porque cumple con los requisitos obtenidos debido a que brinda una mayor seguridad, economía y gracias a la lubricación que es implementada por la acción de la gravedad distribuyéndose uniformemente entre la camisa y el pistón.

3.6 BANCO DE PRUEBAS SELECCIONADO

En esta sección se realiza una descripción general del banco para la realización de las pruebas de desgaste de las camisas de un motor de combustión interna. En la figura 15 se muestra la configuración del banco que está compuesto por el motor eléctrico, el cigüeñal, la biela, el bloque de un motor mono cilíndrico, el acople, la base, etc.

El banco de pruebas se construyó con la finalidad de realizar pruebas de desgaste a las camisas de un MCI. El estudio se realiza por medio de una estructura donde se ubica el motor eléctrico que está acoplado al cigüeñal, el cual transformará su

movimiento radial en movimiento lineal alternativo haciendo desplazar el pistón dentro de la camisa. Estos desplazamientos del pistón dentro de la camisa se generan con el fin de simular ciertas condiciones que presenta un MCI.

Figura 15. Configuración del banco



3.6.1 Descripción de los componentes del banco²⁶

- **Cigüeñal, biela, pistón y anillos**

Estos componentes se tomaron de un motor AKT 125 CGR el cual tiene las siguientes especificaciones:

- Motor compacto de 4T refrigerado por aire.

²⁶ OSPINA, Daniel. Ensamble de un banco de pruebas de fricción a un motor de combustión interna mono-cilíndrico. Trabajo de Grado Tecnólogo Mecánico. Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnología. Escuela de Tecnología Mecánica. 2015. p37-49

- Fácil mantenimiento, tiene accesibilidad en todas sus piezas.
- Bajo peso, ya que todas sus piezas son fabricadas en aluminio y fundición.
- Este motor tiene bajo nivel de vibraciones gracias a su disposición geométrica que garantiza una mejor estabilidad.
- Tiene una relación de compresión alta para generar más potencia por menos cilindraje.
- Económico por el bajo consumo de combustible.

En la tabla 7, se presentan las especificaciones técnicas del motor seleccionado para la realización de las pruebas de desgaste.

Tabla 7. Especificaciones del motor AKT 125 CGR

Tipo	CGR 4T, vertical, mono cilíndrico
Sistema de válvulas	OHV
Cilindrada exacta	125 c.c.
Refrigeración	Aire forzado
Relación de compresión	9.5:1
Potencia máxima	10.34HP @ 8000 ± 500RPM
Torque máximo	9.3 N.m @ 7000 ± 500RPM
Arranque	Eléctrico y patada
Encendido	CDI
Aceite recomendado	SAE 20W-50
Consumo promedio	128.5 km/gal
Combustible	Gasolina
Diámetro	55.6 mm
Carrera	51.4mm
Descentramiento	0
Alimentación	Carburador

- **Bloque**

El bloque que sujeta la camisa para la realización de las pruebas fue tomado del motor de una motocicleta de referencia Yamaha YBR125, por su facilidad para el

cambio de la camisa después de realizado el desgaste debido a que para este estudio se han de utilizar varias camisas.

- **Motor eléctrico**

Es el encargado de generar el movimiento de rotación y por medio del acople le transmite el movimiento al eje del cigüeñal. La tabla 8 muestra las especificaciones del motor eléctrico monofásico marca Siemens, el cual se encargará de hacer girar el cigüeñal. Este motor está diseñado para operar bombas centrífugas, ventiladores, máquinas, entre otros.

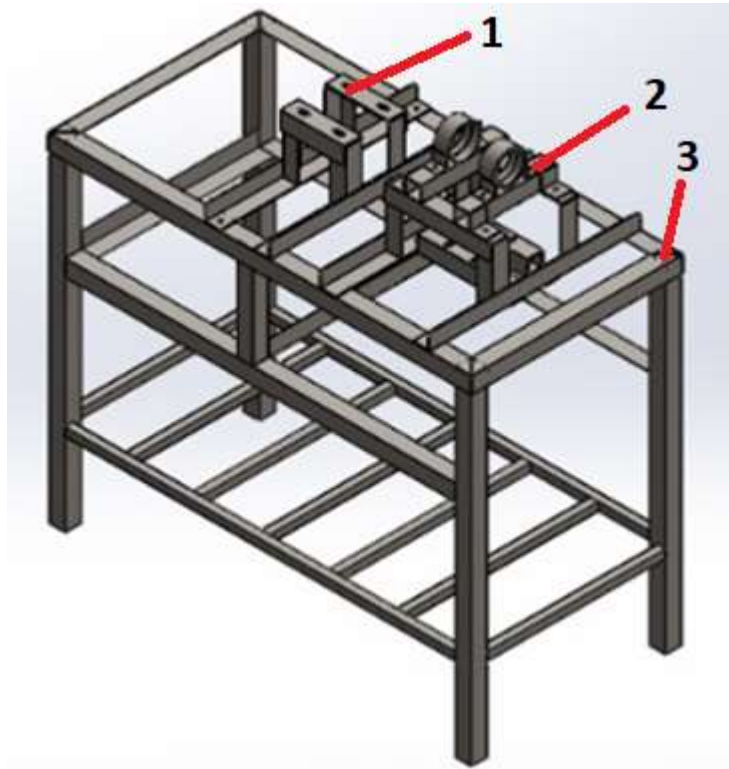
Tabla 8. Características del motor eléctrico

Modelo	SIEMENS
Tipo	1RF20000DB41AA1
Serie	Q2-C18
HP	1
Tensión (V)	115 / 230
Corriente (A)	13,6 / 6,8
RPM	1755
Eficiencia nominal (%)	64
Frecuencia (Hz)	60
Temperatura ambiente(°C)	40
Dimensiones (cm)	22.5 x 32 x 17

- **Estructura**

La estructura se construyó en ángulos de 1 ½ pulgada, de acero estructural A-36 y tubos de lado y espesor de 1 1/2 x 1/8 pulgada. Se utilizó una base rígida para sujetar los componentes del banco y se emplearon rodachines en las patas de la estructura con la finalidad de reducir las vibraciones ocasionadas, véase figura 16.

Figura 16. Estructura del banco



- 1) Soporte del motor eléctrico.
- 2) Soporte del cigüeñal.
- 3) Soporte de la mesa para la adecuación del banco de pruebas.

3.6.2 Ensamble del banco de pruebas. Para el ensamble del banco se procedió a soldar algunos componentes de la estructura como los ángulos y tubos para la mesa del banco, y se elaboró una lista de componentes para identificar cada una de las partes que conforman el banco. En la figura 17 y la tabla 9 se detallan los componentes que conforman el banco de pruebas para el desgaste en la camisa de un MCI.

Figura 17. Elementos del banco

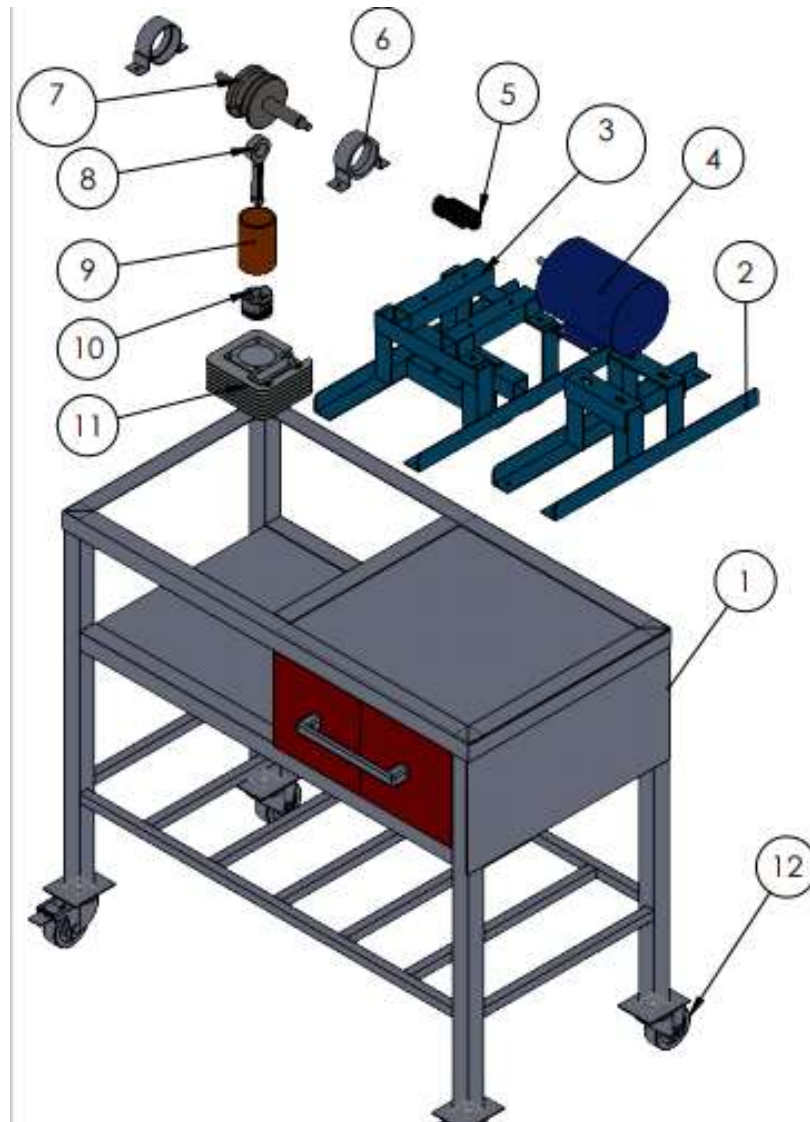


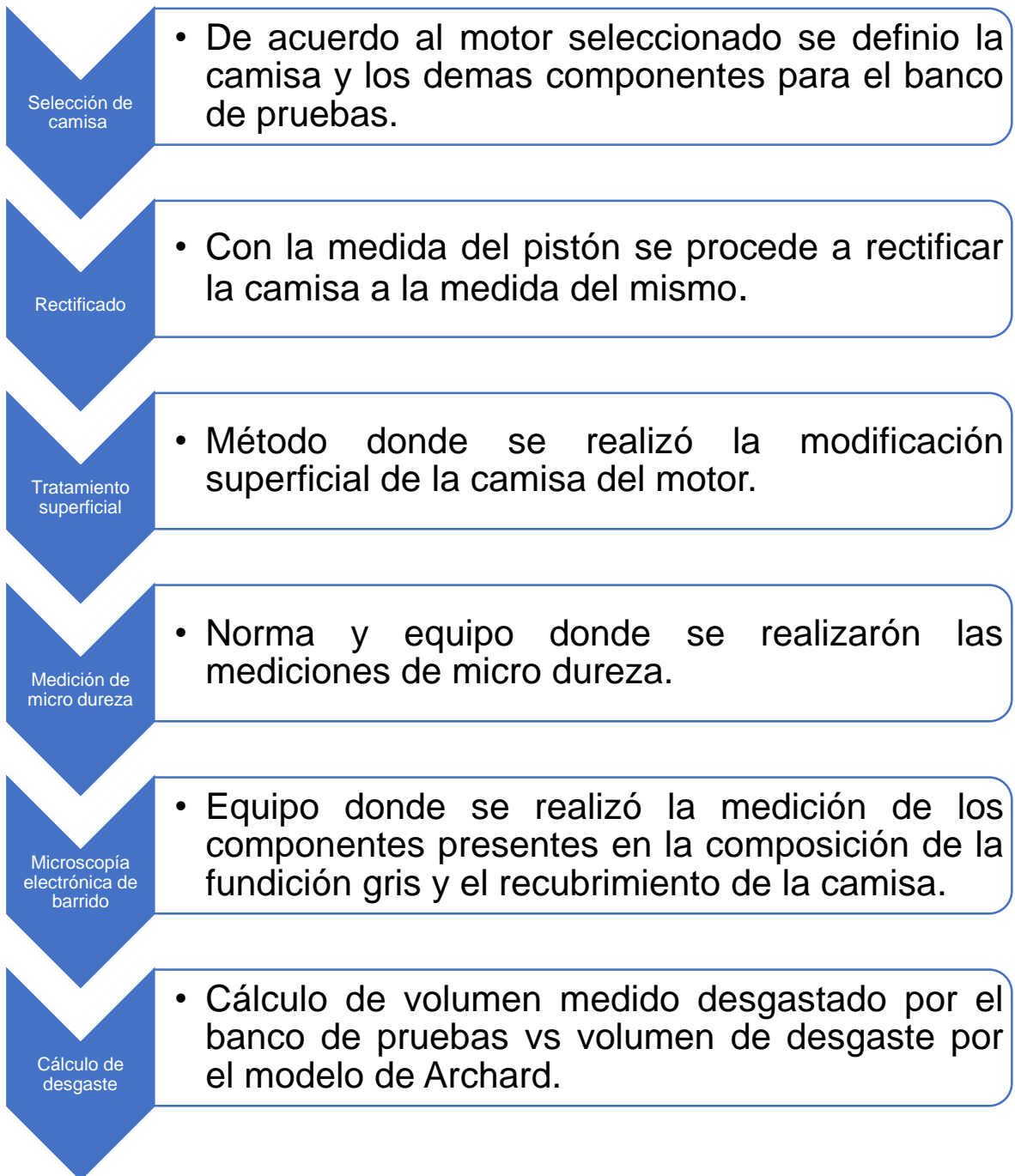
Tabla 9. Elementos del banco

N° DE ELEMENTO	NOMBRE DEL ELEMENTO	MATERIAL	CANTIDAD
1	Mesa	Acero A-36 y acero galvanizado	1
2	Soporte motor eléctrico	Acero A-36	1
3	Soporte cigüeñal	Acero A-36	1
4	Motor eléctrico	Siemens 1 HP	1
5	Acople	Tipo yoke	1

N° DE ELEMENTO	NOMBRE DEL ELEMENTO	MATERIAL	CANTIDAD
6	Chumacera	Hierro fundido	2
7	Cigüeñal	Acero al carbono	1
8	Biela	Acero al carbono	1
9	Camisa	Fundición gris	1
10	Pistón	Aluminio	1
11	Bloque	Aluminio	1
12	Rodachin	Acero galvanizado	4

Después de la identificación de cada una de las partes se procedió a la realización de los planos, tomando las respectivas dimensiones con la ayuda de instrumentos de medición como: metro y calibrador. Con las respectivas medidas se procedió a modelar las piezas en SolidWorks y sus respectivos planos se pueden detallar en el anexo B.

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL PARA LA MEDICIÓN DE DESGASTE EN LA CAMISA DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA



En este capítulo se describe el proceso que se realizó en la selección de la camisa a utilizar para el proceso de rectificado, recubrimiento superficial, desgaste producido en el banco de pruebas a la camisa con y sin recubrimiento las cuales después de cada 2 horas se tomó una medida de volumen y así establecer la pérdida de volumen que se iba dando luego de cada medida, medición de micro dureza para el cálculo de desgaste del modelo de Archard.

Obteniendo esto, se puede establecer si el recubrimiento empleado en la camisa es eficiente al disminuir el desgaste ocasionado por el contacto con los anillos del pistón.

4.1 SELECCIÓN DEL MATERIAL

El material para investigar de las camisas de los motores de combustión interna es la fundición gris de industrias LAVCO. En el mercado existen muchas marcas de fabricantes de camisas para diferentes motores y han adoptado conservar ciertas especificaciones auténticas de los motores para la comercialización.

Industrias LAVCO es una empresa especializada en la fundición de hierro gris centrifugado para la fabricación de camisas para todo tipo de motores de combustión interna, entre otras aplicaciones estas camisas poseen las siguientes características:

- Altas propiedades de auto lubricación.
- Alta resistencia a la temperatura.
- Alta resistencia al desgaste.
- Alta reducción de la fricción.
- Excelentes propiedades de mecanizado.
- Excelente retención de lubricación.
- Dureza 220 – 285 HB.

- Espesores de pared variables.

Estas camisas vienen con un acabado externo terminado y el acabado interno semiterminado por lo que se debe rectificar la superficie según la medida del pistón. Esto se debe a la posibilidad de reparar los motores con solo rectificar la superficie de la camisa o reemplazarla, por eso existen pistones de distintos diámetros como: el estándar y con 0.25mm o 0.5mm más de diámetro.

4.1.1 Geometría de la camisa. De acuerdo con las especificaciones de diseño del banco de pruebas la camisa tiene 100mm de largo, su diámetro externo es de 62mm y su diámetro interno es de 56mm. Por lo cual estas camisas se tuvieron que recortar ya que originalmente tenían un largo de 152mm y después se llevaron a la rectificadora para obtener el diámetro interno deseada.

En la figura 18, se muestra la camisa y unas probetas que tienen unas medidas de (1.5x1.8cm) para determinar los parámetros de la implantación iónica y realizar el cálculo de la micro dureza del material, las medidas de la camisa se muestran en el anexo C.

Figura 18. Camisa de fundición gris



4.1.2 Rectificado de la camisa. Esta técnica se utiliza para corregir el desgaste y las deformaciones disminuyendo el rozamiento favoreciendo la lubricación del pistón y la camisa. El rectificado de camisas es similar al mecanizado realizado por fresadoras. Su herramienta de arranque de material es una rueda abrasiva robusta sin un filo definido, con esto se obtiene un acabado con dimensiones muy precisas y una baja rugosidad. El rectificado tiene unas tolerancias muy pequeñas y se realiza varias veces hasta que se obtiene la medida deseada.

El rectificado de las camisas para el estudio se realiza en una rectificadora SBM 100 véase en la figura 19. Esta rectificadora cuenta con una capacidad máxima de diámetro de bruñido de 100mm, un mínimo de 36 mm y un máximo recorrido de bruñido de 185mm.

Figura 19. Rectificadora SBM100



Las camisas venían con una longitud de 15 cm lo cual antes de realizar el rectificado se procedía a cortar a una longitud de 13 cm, luego de tener este corte se procede a rectificar la camisa con un diámetro interno de 55.6 mm, después de obtener este rectificado se procedía nuevamente a cortar a una longitud de 10.5 cm dejando este

sobrante para sacar las probetas del cual se utilizaron para calcular la micro dureza del material.

4.2 PROCESO DE TRATAMIENTO SUPERFICIAL

Las camisas ya rectificadas fueron modificadas con iones de Zr y N en la cámara de descargas del reactor MOSMET del Laboratorio de Plasma y Física de Superficies de la Universidad Industrial de Santander. Las camisas fueron colocadas en la cámara de descargas, véase figura 20.

Figura 20. Cámara de descargas del reactor MOSMET



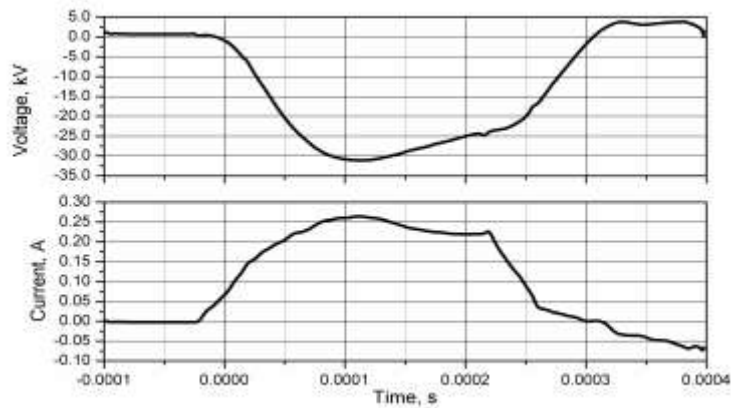
4.2.1 Bombardeo Iónico (Sputtering). Después de que las camisas están dentro de la cámara de descargas se cierra, se activan las válvulas e inicia el vacío para introducir el argón (Ar) para el proceso de limpiando de la superficie y remoción de impurezas. La presión del gas controla el pulso de corriente de la descarga eléctrica. Los registros para el proceso del bombardeo iónico se presentan en la tabla 10.

Tabla 10. Parámetros bombardeo iónico

PARÁMETROS SPUTTERING	
Tipo de gas	Argón (Ar)
Presión de descarga (Pa)	2>P>2.6
Duración del pulso (ms)	0.4
Frecuencia del pulso (Hz)	30
Voltaje (kV)	5
Tiempo de exposición (min)	50

4.2.2 Implantación iónica tridimensional (3DII). Después de la limpieza de las superficies se procede a la modificación superficial con una descarga híbrida en un ambiente o atmósfera de zirconio y nitrógeno. Esta tecnología pertenece a la clase de tecnologías de modificación de superficie cuando los iones acelerados a energías significativas penetran en la superficie y la modifican. Este proceso es impulsivo por lo cual los diagramas de corriente y voltaje durante el procesamiento de muestras de hierro fundido se muestran en la figura 21.

Figura 21. Diagrama de corriente y voltaje de la implantación iónica



Fuente: TSYGANKOV, Piotr. Laboratorio de Plasma y Física de Superficies. Universidad Industrial de Santander.

Los parámetros de la implantación iónica se muestran en la tabla 11 y con ellos se controló la presión de descarga.

Tabla 11. Parámetros implantación iónica tridimensional

PARÁMETROS DE IMPLANTACIÓN IÓNICA	
Componentes para implantar	Zirconio (Zr) y nitrógeno (N)
Presión de descarga (Pa)	0.7>P>1.4
Duración del pulso (ms)	0.25
Frecuencia del pulso (Hz)	30
Tensión (kV)	-25
Tiempo de exposición (min)	20
Tensión arco eléctrico (V)	20
Corriente arco eléctrico (A)	165
Corriente de iones (A)	0.2

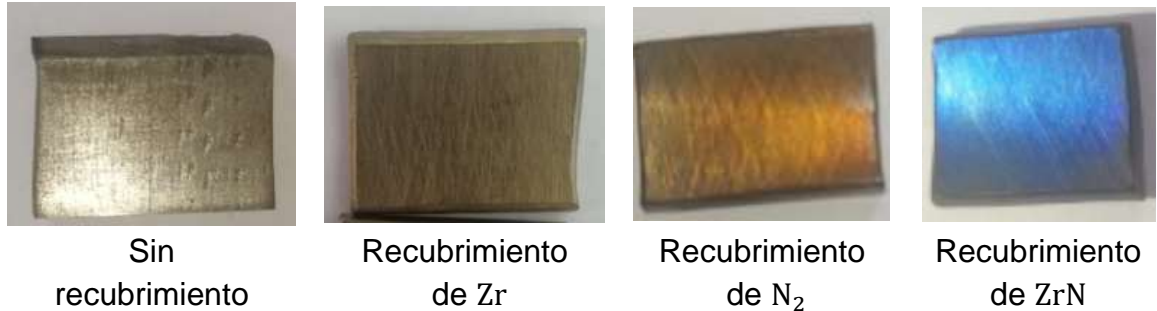
El hierro fundido tiene una pequeña cantidad de elementos de aleación libre capaces de formar enlaces químicos con nitrógeno para formar nitruros sólidos. Por esta razón, la nitruración no tiene alta eficiencia para su endurecimiento, entonces para fortalecer el hierro fundido, se propone utilizar la tecnología de procesamiento en dos etapas: en la primera etapa, la capa superficial está saturada con un elemento que forma nitruros altamente duros. En este caso el zirconio. En la segunda etapa, la superficie se implanta con nitrógeno, que reacciona con el zirconio y forma fases de refuerzo de nitruros.

4.3 CARACTERIZACIÓN SUPERFICIAL DE LA CAMISA

Este proyecto consistió en evaluar la influencia del recubrimiento del nitruro de zirconio (ZrN) en las camisas de fundición gris utilizadas en los MCI con la finalidad de reducir el desgaste por fricción. Estas camisas fueron sometidas a desgaste con y sin recubrimiento en el banco de pruebas para determinar si es un recubrimiento óptimo.

4.3.1 Inspección visual de las probetas

Figura 22. Tonalidad de la superficie



En la figura 22 se observan las probetas que se utilizaron para determinar la micro dureza Vickers para el tratamiento de las camisas. Es importante evidenciar los cambios en la superficie como su color, uniformidad superficial, entre otros, dependiendo del tipo de recubrimiento.

4.3.2 Micro dureza del material empleado en las camisas. Las pruebas de micro dureza Vickers fueron realizadas de acuerdo con los parámetros estipulados en la norma ISO 6507-1 “Metallic materials – Vickers hardness test” (Materiales metálicos – Ensayo de dureza Vickers), (ver anexo A), en el equipo UMT TriboLab (Buker) del Laboratorio de Metalografía de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, ver figura 23.

Figura 23. UMT TriboLab



El UMT TriboLab es un equipo universal que cuenta con muchas características como ensayo dureza, ensayo de rayado, prueba de desgaste, prueba de fricción, entre otras pruebas exhaustivas para propiedades mecánicas y tribológicas, además cuenta con una plataforma para ser controlado de forma más versátil ofreciendo más velocidades, más par y mejor medición de fuerza.

4.3.3 Microscopía electrónica de barrido. La superficie de las camisas de un MCI con y sin recubrimiento fueron analizadas mediante microscopía electrónica de barrido en el equipo marca FEG (Field Emisión Gun) QUANTA FEG 650 ubicado en el Laboratorio de Microscopía del Parque Tecnológico de Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander, ver figura 24.

Figura 24. Microscópio electrónico de barrido marca QUANTA FEG 650



La microscopia permite analizar y observar la superficie implantada y no implantada, además de sus defectos superficiales por medio de imágenes obtenidas a través de un haz de electrones de alta energía, estas imágenes sirven para observar la morfología (Electrones secundarios (SE): Everhart Thornley detector ETD) y para observar variaciones de la composición del material (Electrones retro dispersados (BSE): Back scattered electrón detector (BSED) tipo SSD).

Para realizar la microscopia de las muestras se colocaron sobre un soporte metálico y se adhieren con cinta adhesiva de carbón, véase figura 25.

Figura 25. Soporte metálico de muestras



Las imágenes se toman con las siguientes características:

- Alto vacío
- Voltaje de aceleración de 15 kV

4.4 CÁLCULO DE DESGASTE DE MODELO DE ARCHARD Y EL VOLUMEN MEDIDO DE DESGASTE

Se desea calcular la fuerza normal que actúa entre los anillos del pistón y la camisa, debido a que este contacto es el que está produciendo el desgaste.

Primero se calcula la fuerza alternativa a partir de la ecuación (12), donde se necesita conocer cada una de sus variables.

Partiendo del valor de la cilindrada del motor (Vd) se calcula la carrera del pistón (S) con la ecuación (19).²⁷

$$Vd = \frac{\pi}{4} * D^2 * S \quad (19)$$

Donde

- ✓ $Vd = 125 \text{ cm}^3$.
- ✓ $D = 5,56 \text{ cm}$, diámetro interior de la camisa.

Con el valor calculado de la carrera del pistón $S = 5,148 \text{ cm}$, se calcula el radio (R) de la ecuación (20) y obteniendo el radio se calcula el valor de lambda (λ) a partir ecuación (21).

$$S = 2 * R \quad (20)$$

$$\lambda = \frac{R}{L} = \frac{2,57}{14,1} = 0,1826 \quad (21)$$

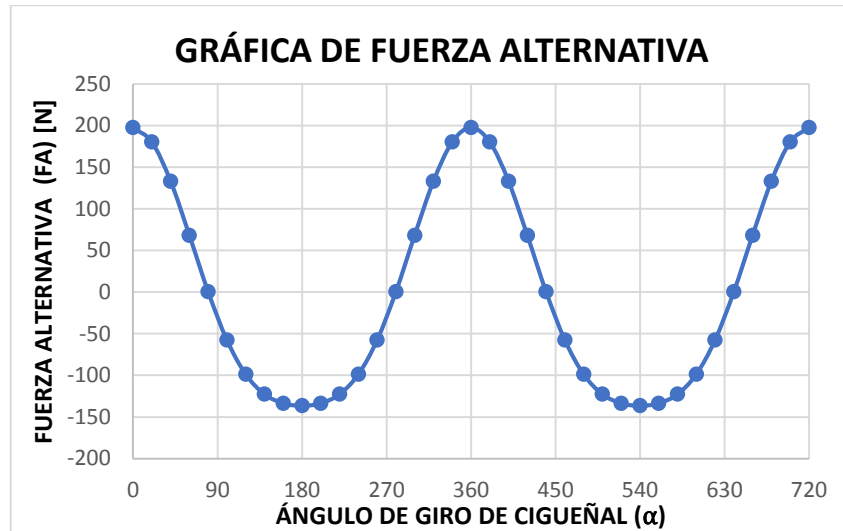
Donde

- ✓ $R = 2,57 \text{ cm}$.
- ✓ $L = 14,1 \text{ cm}$, longitud de la biela.
- ✓ $\omega = 1755 \text{ RPM} * \frac{1 \text{ M}}{60 \text{ s}} = \frac{117}{4} \left[\frac{\text{Rev}}{\text{s}} \right]$.

Debido a que la fuerza alternativa cambia con respecto al ángulo de giro del cigüeñal, se realizó una gráfica en función del ángulo que será de 0 a 720 grados por ser un motor de 4T, véase la figura 26.

²⁷ HEYWOOD, John B. Internal combustion engine fundamentals, McGraw-Hill primera edición, 1988

Figura 26. Gráfica de la variación de la fuerza alternativa con respecto al ángulo de giro durante el ciclo



En la figura 26, se pudo evidenciar el comportamiento de la fuerza alternativa la cual da un valor máximo de 200 N.

La fuerza total se calcula a través de la ecuación (22), donde es igual a la fuerza alternativa más la fuerza de gases producida por la combustión, en este caso debido a que no se realiza la combustión la fuerza de gases es igual a cero por lo tanto la fuerza total es igual a la fuerza alternativa.

$$F = Fa + Fg \quad (22)$$

$$F = Fa [N]$$

Para el cálculo de la fuerza normal se tiene en cuenta la ecuación (23), donde la descomposición de esta fuerza se puede observar en la figura 6.

$$Fn = F * \tan(\beta)$$

$$Fn = F * \frac{\sin\beta}{\cos\beta} \quad (23)$$

En la cual de la ecuación (24), (25) y (12) las remplazamos en la ecuación (23) dejando todo en función del ángulo de giro del cigüeñal.

$$\text{sen}\beta = \lambda * \text{sen}\alpha \quad (24)$$

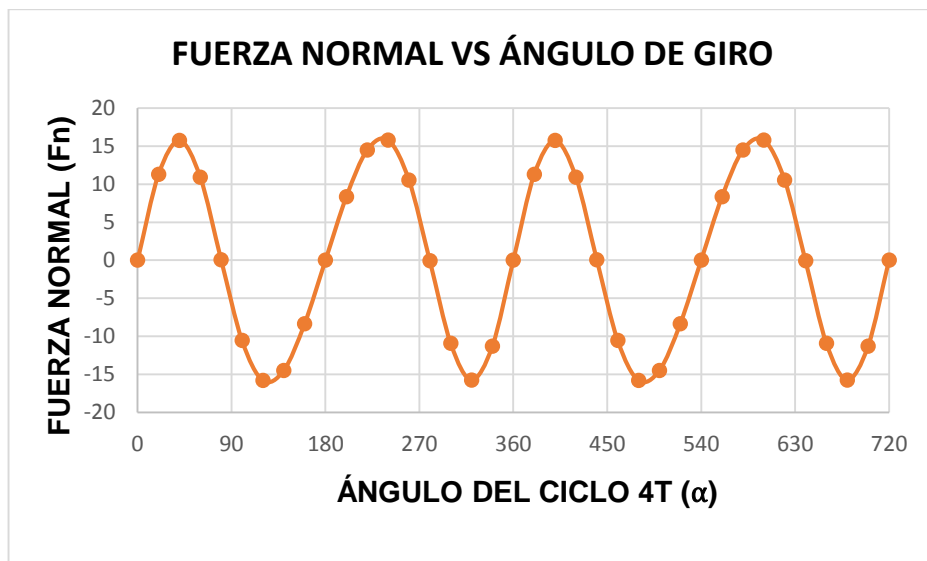
$$\text{cos}\beta = \sqrt{1 - \lambda^2 * \text{sen}^2\alpha} \quad (25)$$

$$F_n = m_a * R * \omega^2 * (\text{cos}\alpha + \lambda * \text{cos}2\alpha) * \frac{\lambda * \text{sen}\alpha}{\sqrt{1 - \lambda^2 * \text{sen}^2\alpha}} \quad (23)$$

Partiendo de esta ecuación se calcula una gráfica la cual muestra el valor de la fuerza en cada posición del ángulo, donde esta varía desde 0 a 720 grados completando así un ciclo del motor.

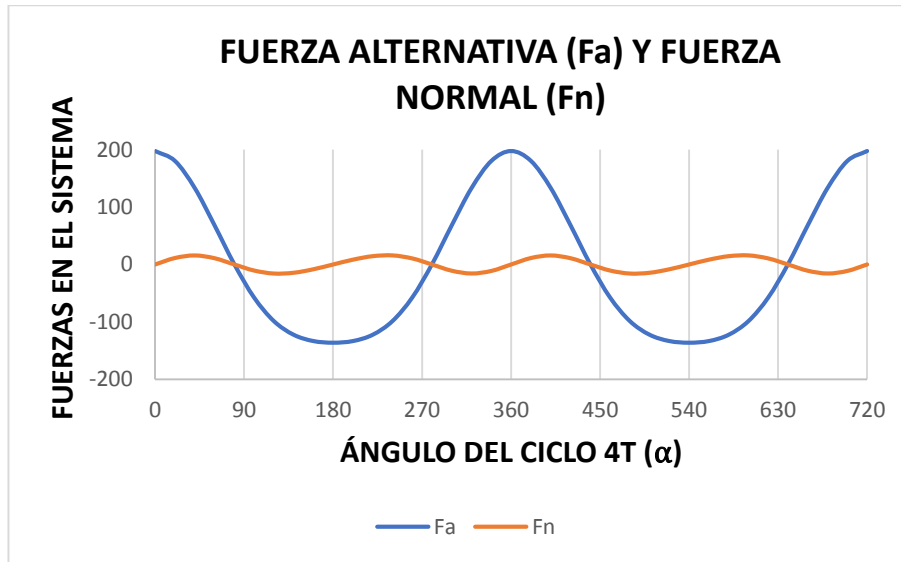
En la figura 27, se observa el comportamiento que tiene la fuerza normal según el ángulo de giro del cigüeñal durante los 720 grados del ciclo.

Figura 27. Gráfica de la variación de la fuerza normal con respecto al ángulo de giro durante el ciclo.



En la figura 28, se observan las fuerzas normal y alternativa con respecto al ángulo de giro del cigüeñal durante el ciclo.

Figura 28. Gráfica de la variación de la fuerza alternativa y la fuerza normal con respecto al ángulo de giro del cigüeñal durante el ciclo.



Obteniendo el valor de las fuerzas en función del ángulo de giro del cigüeñal se determinó el valor máximo de la fuerza normal el cual es de 15.81 N y así calcular el de desgaste en el modelo de Archard debido a que este modelo tiene en cuenta es la fuerza normal.

4.5 DETERMINACIÓN DEL MODELO DE DESGASTE DE ARCHARD

Este se utiliza para determinar el desgaste ocasionado con el paso del tiempo en el banco de pruebas y así poder calcular si la camisa con el recubrimiento es más resistente al desgaste producido por los anillos del pistón en la camisa.

Para calcular el desgaste por el modelo de Archard se necesita conocer las siguientes variables:

- La fuerza normal en Newton (N).
- Distancia de desgaste en metros (m).

- Dureza Vickers en Pascales (Pa).

4.5.1 Fuerza normal. La fuerza normal se determinó anteriormente con la variación del giro del cigüeñal donde se toma la de mayor valor, la cual es la que produce el mayor desgaste, por consiguiente, se toma este valor de fuerza.

$$Fn = 15,81 \text{ [N]}$$

4.5.2 Distancia de desgaste en la camisa. Para determinar la distancia de desgaste se necesita conocer la velocidad media del pistón lo cual se calcula a partir de la ecuación (26).

$$SP = 2 * L * N \quad (26)$$

Donde:

SP - Es la velocidad media del pistón.

$L = 0,0514 \text{ [m]}$, es la carrera que realiza el pistón.

$N = 1755 \text{ [rev/min]}$, es el número de revoluciones del motor eléctrico.

Dando como resultado una velocidad media del pistón de:

$$SP = 10824 \left[\frac{m}{h} \right] = 3,0066 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Conociendo la velocidad media del pistón calculo la distancia de desgaste de acuerdo con el tiempo de trabajo que se somete a desgaste la camisa con los anillos del pistón a partir de la ecuación (27)

$$X = V * t \quad (27)$$

Donde:

$$V = SP$$

$$t = 2,4,6 \text{ y } 8 \text{ horas}$$

$$X = 10824 * 2$$

$$X = 21648 [m]$$

Calculando de esta manera el desgaste para cada tiempo de medida, debido a que el desgaste a la camisa con recubrimiento se realizó en las mismas condiciones, el cálculo de desgaste es el mismo que la camisa sin recubrimiento.

4.5.3 Micro dureza Vickers. Se calcula el valor de micro dureza de la fundición gris y el recubrimiento, para poderlo utilizar en el modelo de desgaste de Archard. La micro dureza del material se utilizó el valor de 50 *gf* basándose en la norma ISO 6507, donde está entre un valor de 10 *gf* a 100 *kgf*, debido a que el recubrimiento no supera los 10 μm se utilizó ese valor.

En la tabla 12, se puede observar el valor obtenido de la micro dureza Vickers en pascales a una carga de 50 *gf* en la camisa con y sin recubrimiento según la norma ISO 6507-1.

Tabla 12. Tabla de micro dureza tomada para el análisis

Material a carga de 50 gf	Micro Dureza en pascales [MPa]
Sin recubrimiento	298
Con recubrimiento	497

4.5.4 Cálculo de modelo de desgaste de Archard. Partiendo de los valores anteriores se procede a calcular el desgaste de Archard a partir de la ecuación (18).

Donde:

$K = 0,0001$, es el valor de la constante de Archard que varía desde 10^{-1} a 10^{-6}

$$W = 0,0001 * \frac{15,81 * 21648}{298000000} = 1,1485 * 10^{-7}$$

$$W = \mathbf{0,00000011485 [m^3]} = V_{Archard}$$

Este valor se calcula para cada distancia recorrida durante cada periodo de tiempo de medida que fue cada 2 horas, estos valores se pueden observar en la tabla 19 y 20, al reemplazar este valor se puede determinar su variación en la figura 41 y 42.

Para corroborar el comportamiento de este modelo de desgaste de Archard, se procede al calcular el de desgaste medido por la pérdida de masa que se iba presentado de las diferentes medidas que se realizaron durante la prueba y así poder calcular el volumen real de desgaste.

4.5.5 Cálculo de volumen medido de desgaste. El volumen real de desgaste se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$V = \pi * (r_2^2 - r_1^2) * L \quad (28)$$

Donde:

$r_2 = 3,0955 [cm]$, es el radio exterior de la camisa.

$r_1 = 2,78 [cm]$, es el radio interior de la camisa.

$L = 10,8 [cm]$, es el largo de la camisa sin recubrimiento y $10,5 [cm]$, para la camisa con recubrimiento.

$$V = 62,8952 [cm^3] = 0,000062895 [m^3]$$

$V = \mathbf{62,8952 * 10^{-6} [m^3]}$, volumen inicial de la camisa sin recubrimiento.

$V = \mathbf{61,1485 * 10^{-6} [m^3]}$, volumen inicial de la camisa con recubrimiento.

Conociendo el volumen inicial de la camisa sin desgaste, se procede a calcular la densidad del material a partir de la ecuación (29) y así poder calcular el volumen desprendido con la variación de la masa en cada hora de medida.

En la tabla 13 se presentan los valores de masa en las camisas después de cada 2 horas de desgaste en el banco con y sin recubrimiento. Estas camisas se pesaron en una balanza de dos decimales, véase el anexo D.

Tabla 13. Masas de la camisa después de realizado el desgaste

Tiempo (h)	Masa de la camisa sin recubrimiento (g)	Masa de la camisa con recubrimiento (g)
0	392,48	387,67
2	390,53	386,52
4	388,79	385,23
6	387,67	384,34
8	387,25	384,11

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (29)$$

Donde:

ρ - Es la densidad del material.

$m = 392,48$ [g], es la masa de la camisa inicialmente sin recubrimiento.

$V = 62,8958$ [cm³], es el volumen inicial de la camisa.

$\rho = 6,2401$ [$\frac{g}{cm^3}$], **densidad de la camisa sin recubrimiento.**

$\rho = 6,3398$ [$\frac{g}{cm^3}$], **densidad de la camisa con recubrimiento.**

Conociendo este valor de densidad y el valor de la variación de la masa en cada intervalo de tiempo se procede a despejar el volumen de la ecuación (29) donde se calcula el volumen real desprendido de la camisa.

$$m = 390,53 \text{ [gr]}$$

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{390,53}{6,2401} = 62,5839 [cm^3]$$

$$V = 0,0000625839 [m^3] = 6,25839 * 10^{-5} [m^3]$$

De esta manera se calcula el volumen luego de cada valor de masa medida en los intervalos de tiempo establecidos durante las pruebas de desgaste para las dos camisas y así poder comparar tanto el volumen medido de desgaste con el calculado por el modelo de Archard sacado así un porcentaje de error con la siguiente ecuación:

$$\%error = \left| \frac{V_{medido} - V_{Archard}}{V_{medido}} \right| * 100 \quad (30)$$

$$\%error = \left| \frac{0,0000001814 - 0,0000000837}{0,0000001814} \right| * 100$$

$$\%error = 53,86 \%$$

Este valor se calcula para cada una de las medidas las cuales se mostrarán en el análisis de resultados en la tabla 21 y 22.

5. ANÁLISIS Y RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados del proceso de caracterización del material, el análisis de desgaste del banco de pruebas y la comparación con el modelo propuesto por Archard con la finalidad de evaluar la influencia del recubrimiento superficial utilizado en las camisas de los MCI.

5.1 ANÁLISIS DE MICRO DUREZA

En la tabla 14 se muestran los valores de las micro durezas obtenidas por el TriboLab de las muestras recubiertas y no recubiertas con Zr y N. El punzado se realizó tres veces para así obtener tres valores de micro dureza con cada carga estipulada y después se sacó el promedio según la norma ISO 6507-1.

Tabla 14. Micro durezas Vickers obtenidas

Ensayo / Carga (g)	25	50	75	100	250	500
Sin recubrimiento (MPa)	262	298	275	258	296	280
Zr (MPa)	405	348	323	308	275	255
N₂ (MPa)	449	380	361	351	315	281
ZrN (MPa)	497	409	375	371	325	300

La distancia de profundidad de penetración para pruebas de dureza Vickers en la implantación de iones debe ser igual o menor a 10 μm , ya que los cambios en la dureza se producen en la capa superficial. A una profundidad de 10 μm corresponde con una carga de penetración de 100 g.

La implantación de iones de zirconio conduce a un endurecimiento insignificante de la capa superficial debido a la formación de defectos de radiación superficial y tensiones de compresión-tensión en esta capa. A altas cargas, el material demuestra una dureza aún menor en comparación con el hierro fundido original.

La implantación de nitrógeno de hierro fundido conduce a un aumento en la dureza de la superficie debido a la formación de nitruros de hierro, y aparentemente, debido a la formación de nitruros con baja concentración de silicio dopante, pero el mayor aumento en la dureza se destaca por el tratamiento combinado en el que se forman fases de alta resistencia del nitruro de zirconio ZrN.

$$\%error = \left| \frac{HV_{con\ recubrimiento} - HV_{sin\ recubrimiento}}{HV_{con\ recubrimiento}} \right| * 100 = \frac{409 - 298}{409} = 27,14\%$$

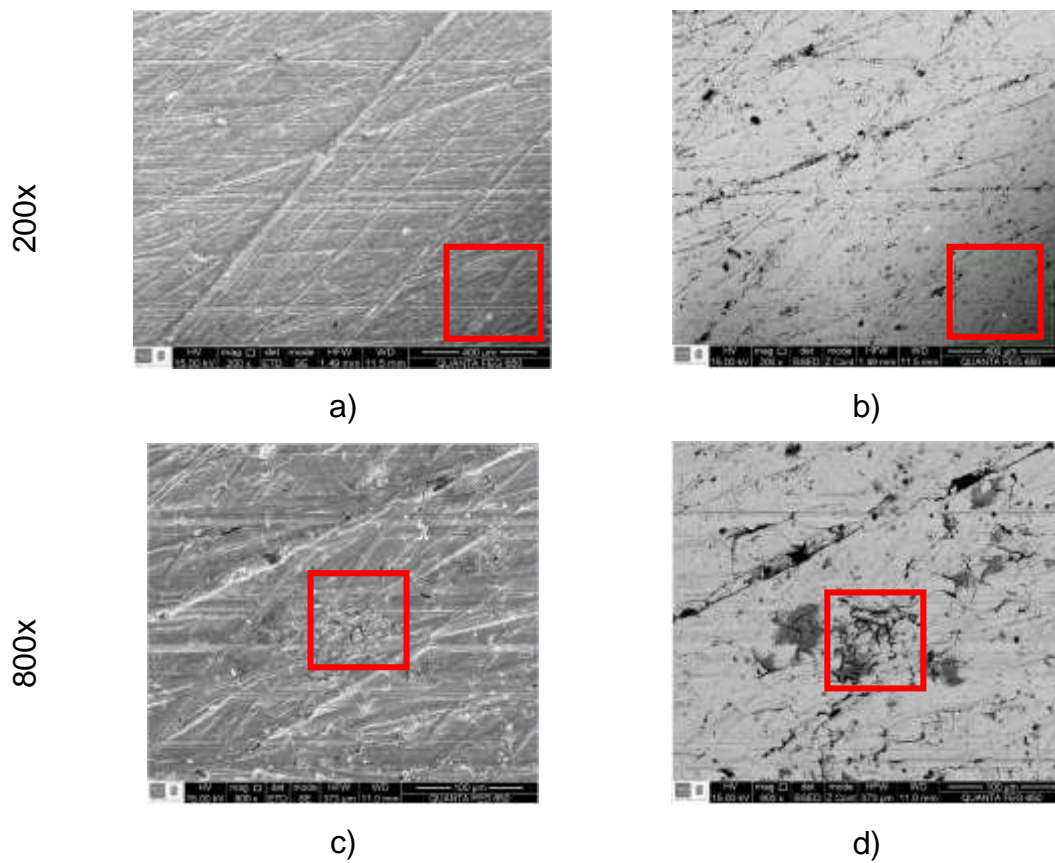
Al comparar los resultados de la variación de la micro dureza Vickers de las muestras recubiertas y no recubiertas con Zr, N y ZrN. Se evidencia un cambio significativo mayor en la dureza de 27,14% para una carga de 50g con el recubrimiento de ZrN respecto a la que no tiene recubrimiento.

5.2 ANÁLISIS DE LA MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

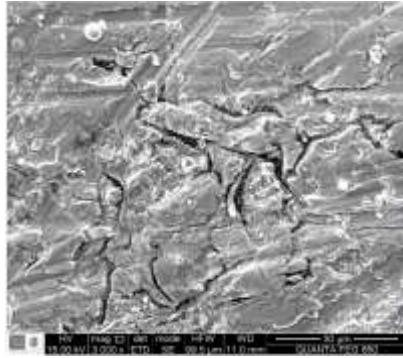
Las micrográficas obtenidas de la superficie de la camisa recubierta y no recubierta con ZrN por medio de Microscopia Electrónica de Barrido (SEM), se comparan antes y después del desgaste ocasionado por el banco de pruebas. Estas micrográficas se presentan en las figuras 29, 31, 33 y 35, y el espectro de composición de los elementos presentes en la superficie de la camisa se puede observar en las figuras 30, 32, 34 y 36 por medio de espectroscopia de energía dispersa (EDS).

En la figura 29 se aprecia la superficie de la camisa con recubrimiento de ZrN sin desgaste, donde se observan algunas irregularidades debido a la topografía del material producidas por el rectificado y presencia de óxidos producto de la interacción con el ambiente. El cuadro rojo que aparece en la micrografía hace referencia a la zona de la camisa donde se aplicó el aumento.

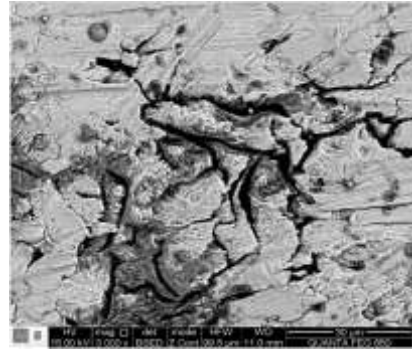
Figura 29. Micrografías de la superficie de la camisa con recubrimiento de ZrN sin desgaste.



3000x



e)



f)

- a) Micrografía de la morfología con un aumento de 200x.
- b) Micrografía del espectro de composición de los elementos presentes con un aumento de 200x.
- c) Micrografía de la morfología con un aumento de 800x.
- d) Micrografía del espectro de composición de los elementos presentes con un aumento de 800x.
- e) Micrografía de la morfología con un aumento de 3000x.
- f) Micrografía del espectro de composición de los elementos presentes con un aumento de 3000x.

Figura 30. Espectro de composición de elementos presentes en la superficie de la camisa con recubrimiento de ZrN y sin desgaste

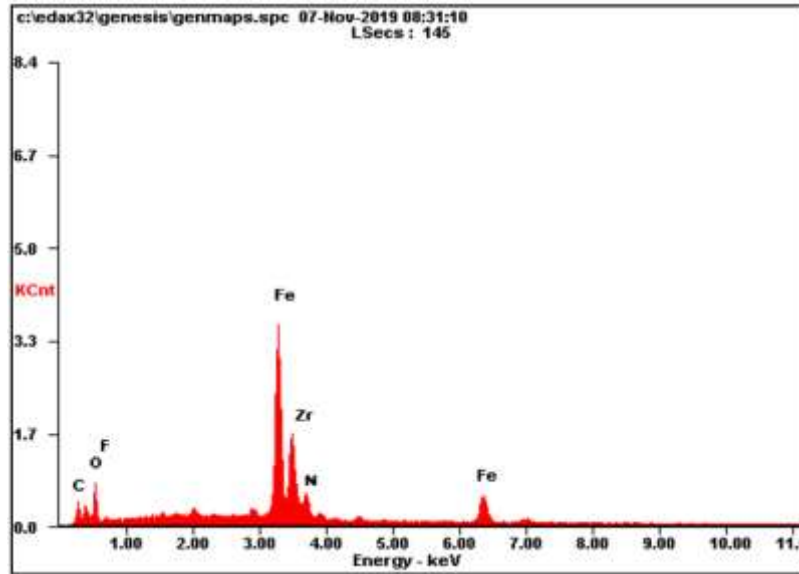


Tabla 15. Porcentaje de composición de elementos presentes en la superficie de la camisa con recubrimiento de ZrN y sin desgaste

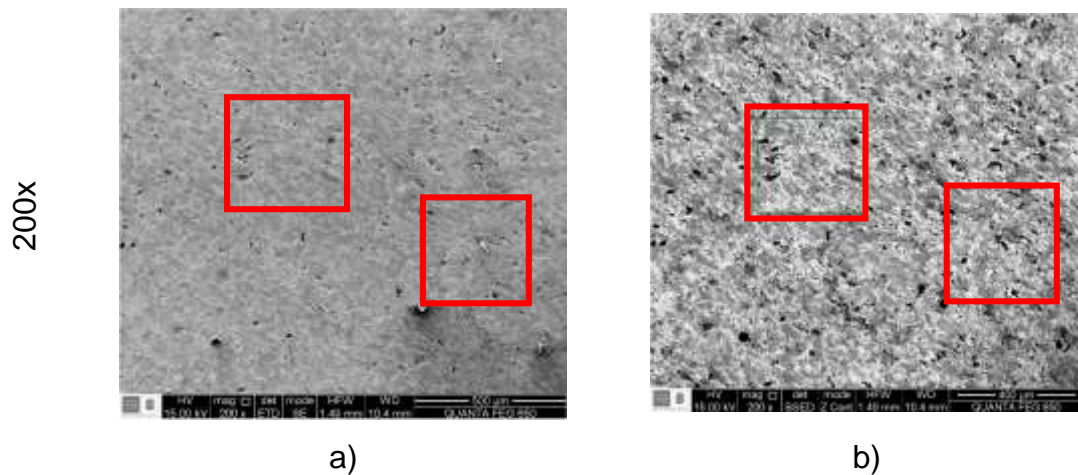
Elemento	Wt%	At%
CK	02.75	12.95
OK	08.88	31.40
FK	00.91	02.72
NK	01.82	01.49
FeK	69.77	34.36
ZrK	16.87	17.08
Matriz	Corrección	ZAF

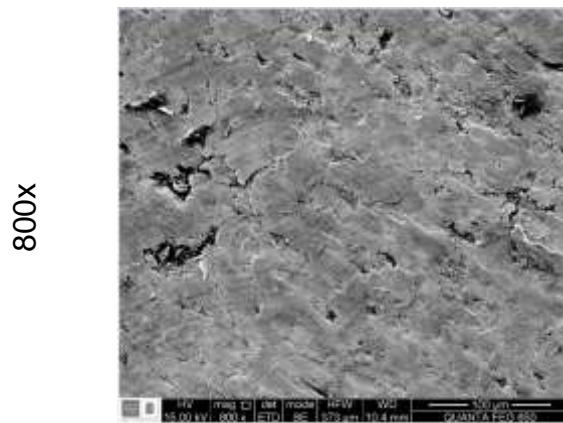
En la figura 30 se observa el espectro de composición de los elementos presentes en la superficie de la camisa recubierta con ZrN sin desgaste y en la tabla 15 los valores en porcentaje atómico (At%) y porcentaje de masa (Wt%) presentes por EDS, como es de esperarse se obtiene un alto contenido de hierro en comparación con los otros elementos presentes en la superficie de la camisa.

Se observa que el recubrimiento no se adhirió muy bien debido a que su porcentaje en masa y su porcentaje atómico son bajos, además, se observan varias zonas oscuras las cuales son cráteres en las micrografías de la composición de la camisa por lo que en estas zonas se presenta un elevado porcentaje de carbono y formación de óxidos, véase la figura 29.

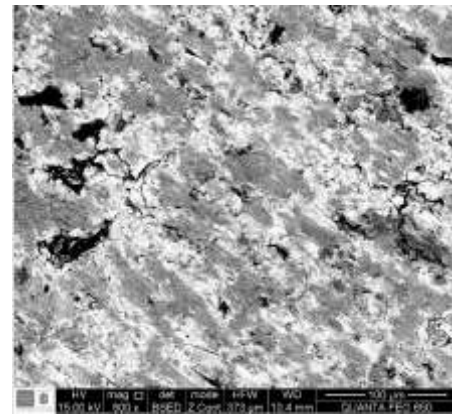
En la figura 31 se aprecia la superficie de la camisa con recubrimiento de ZrN con desgaste, donde se observa que las irregularidades debido a la topografía del material producidas por el rectificado y presencia de óxidos producto de la interacción con el ambiente son menores respecto a las micrografías de la figura 29 debido al desgaste provocado por el movimiento alternativo del pistón y los anillos. El cuadro rojo que aparece en la micrografía hace referencia a la zona de la camisa donde se aplicó el aumento.

Figura 31. Micrografías de la superficie de la camisa con recubrimiento de ZrN con desgaste.

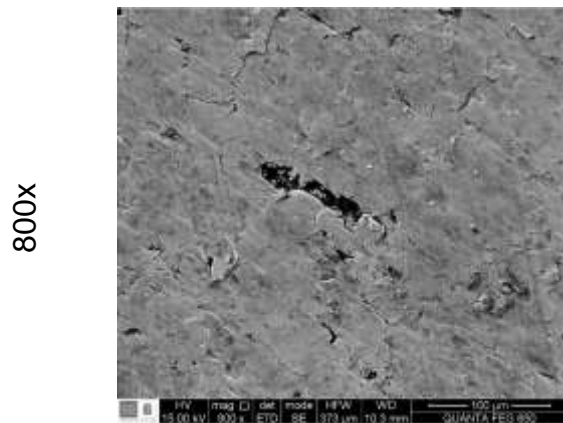




c)



d)



e)



f)

- a) Micrografía de la morfología con un aumento de 200x.
- b) Micrografía del espectro de composición de los elementos presentes con un aumento de 200x.
- c) Micrografía de la morfología con un aumento de 800x.
- d) Micrografía del espectro de composición de los elementos presentes con un aumento de 800x.
- e) Micrografía de la morfología con un aumento de 800x.
- f) Micrografía del espectro de composición de los elementos presentes con un aumento de 800x

En un sistema tribológico la forma geométrica de una superficie está determinada por el proceso de acabado superficial y existen ondulaciones que pueden ir desde dimensiones atómicas incluso después de pulir cuidadosamente la superficie de la camisa. Esto se debe a que inicialmente no ha ocurrido un asentamiento por lo que el desgaste es mayor y se genera una eliminación de las rugosidades más sobresalientes y concluye cuando el desgaste se vuelve constante.

Se observa que el recubrimiento es mínimo en la superficie de la camisa después de realizado el desgaste debido a la cantidad de material desprendido provocado por el contacto metal-metal, además se evidencia una disminución de las zonas oscuras o cráteres en las micrografías de la composición de la camisa. Debido al desgaste provocado por el contacto metal-metal se presenta un desgaste adhesivo resultado de la interacción de la adherencia entre asperezas de las superficies del pistón, anillos y camisa, lo que provoca que queden restos de aluminio del pistón adheridos a la superficie de la camisa.

Figura 32. Espectro de composición de elementos presentes en la superficie de la camisa con recubrimiento de ZrN y con desgaste

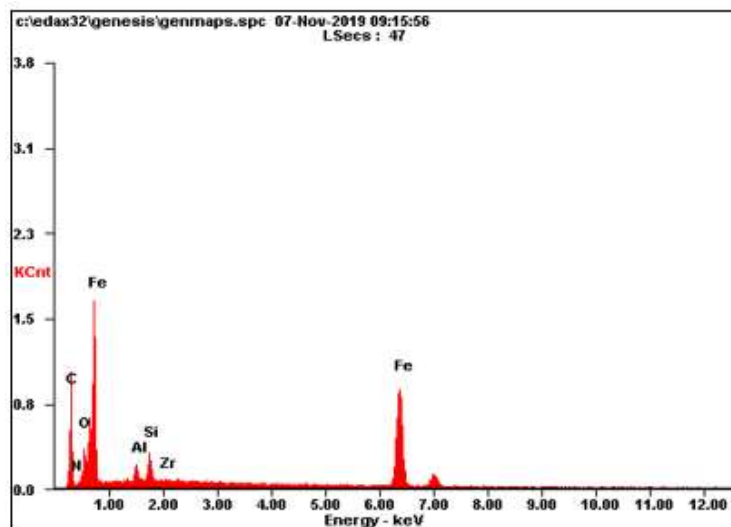


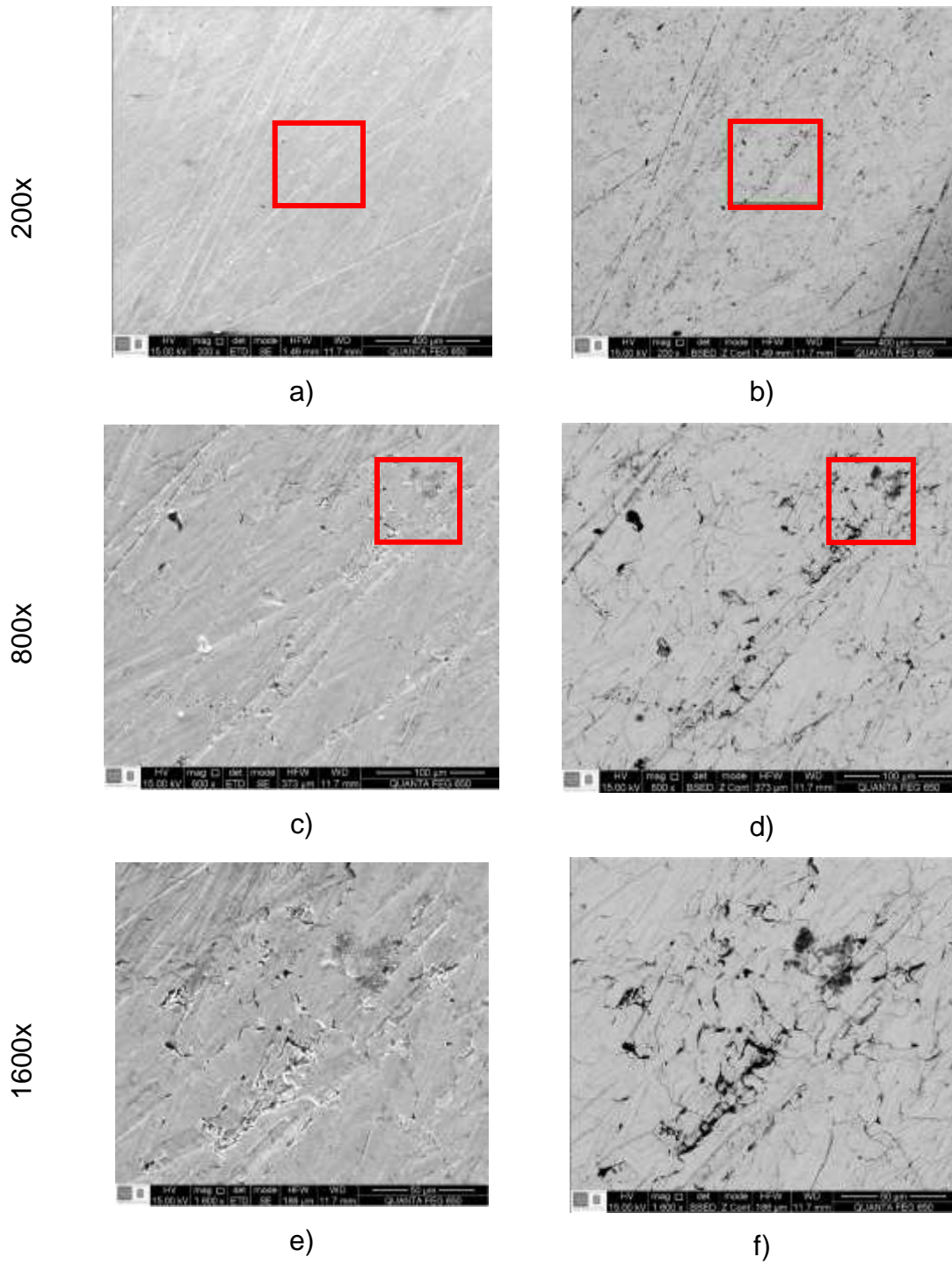
Tabla 16. Porcentaje de composición de elementos presentes en la superficie de la camisa con recubrimiento de ZrN y con desgaste

Elemento	Wt%	At%
CK	22.25	51.85
NK	00.80	01.60
OK	04.62	08.08
AlK	01.86	01.93
SiK	02.49	02.49
FeK	67.81	33.99
ZrK	00.53	00.15
Matriz	Corrección	ZAF

En la figura 32 se observa el espectro de composición de los elementos presentes en la superficie de la camisa recubierta con ZrN con desgaste y en la tabla 16 los valores en porcentaje atómico (At%) y porcentaje de masa (Wt%) presentes por EDS, como es de esperarse se obtiene un alto contenido de hierro en comparación con los otros elementos presentes en la superficie de la camisa y disminuye considerablemente el contenido de ZrN debido al desgaste generado.

En la figura 33 se aprecia la superficie de la camisa sin recubrimiento de ZrN y sin desgaste, donde se observan algunas irregularidades debido a la topografía del material producidas por el rectificado y presencia de óxidos producto de la interacción con el ambiente. El cuadro rojo que aparece en la micrografía hace referencia a la zona de la camisa donde se aplicó el aumento.

Figura 33. Micrografías de la superficie de la camisa sin recubrimiento y sin desgaste.



- a) Micrografía de la morfología con un aumento de 200x.
- b) Micrografía del espectro de composición de los elementos presentes con un aumento de 200x.
- c) Micrografía de la morfología con un aumento de 800x.
- d) Micrografía del espectro de composición de los elementos presentes con un aumento de 800x.
- e) Micrografía de la morfología con un aumento de 1600x.
- f) Micrografía del espectro de composición de los elementos presentes con un aumento de 1600x.

Figura 34. Espectro de composición de elementos presentes en la superficie de la camisa sin recubrimiento y sin desgaste

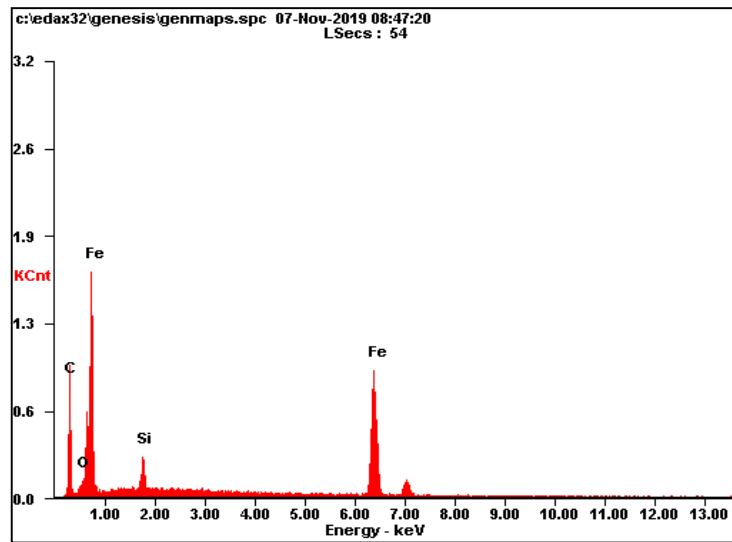


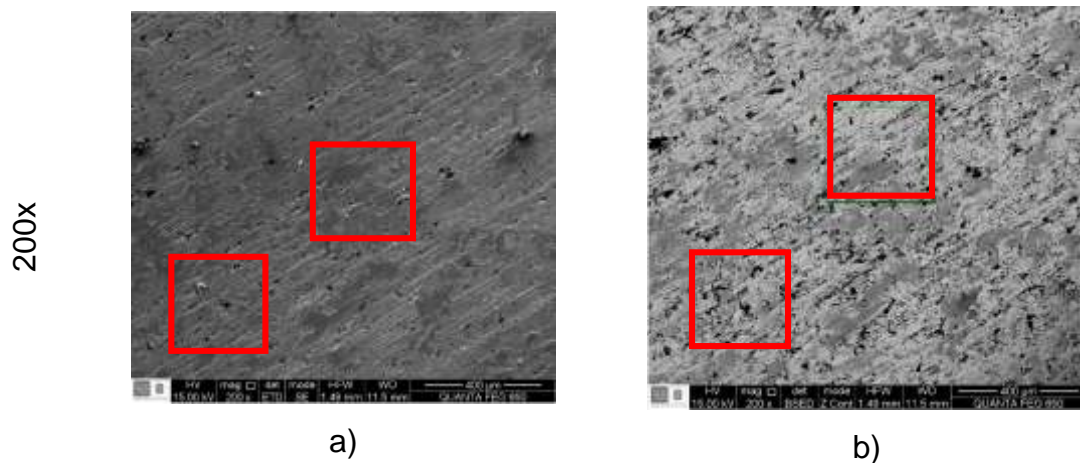
Tabla 17. Porcentaje de composición de elementos presentes en la superficie de la camisa sin recubrimiento y sin desgaste.

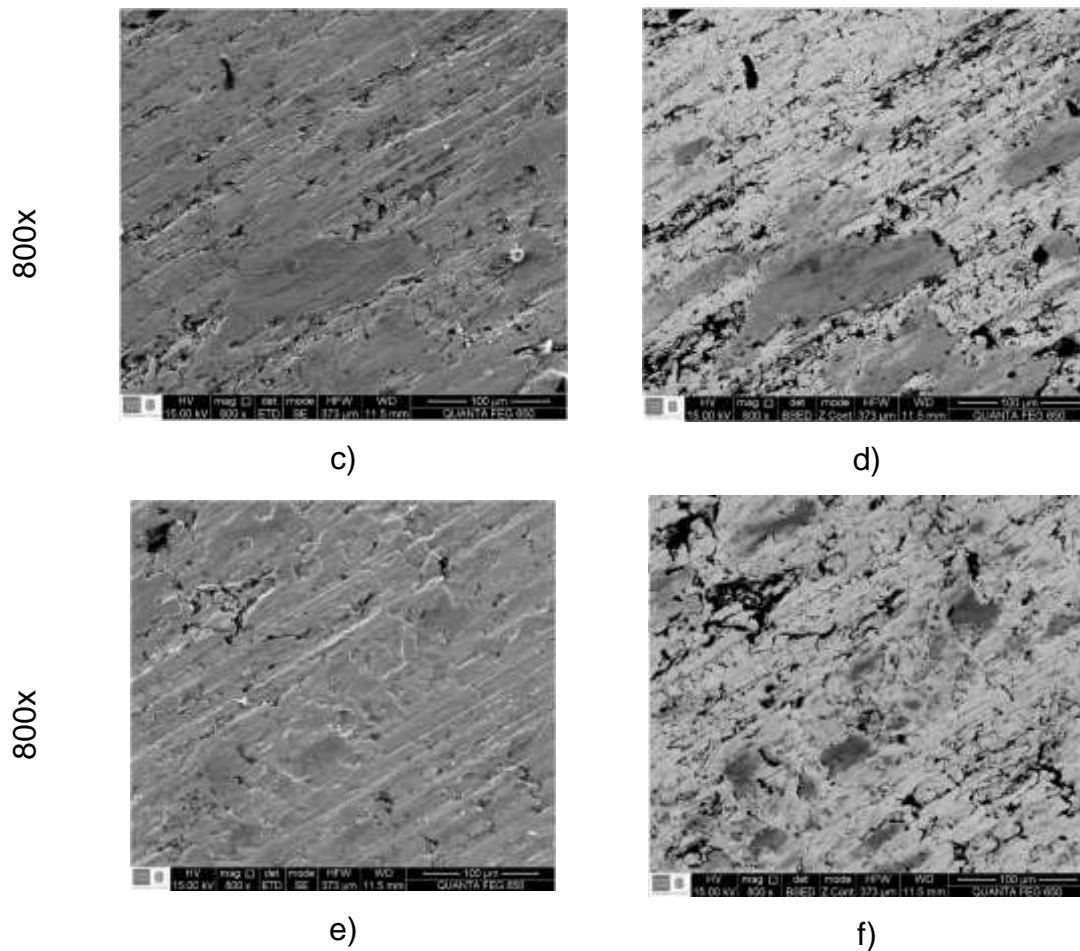
Elemento	Wt%	At%
CK	22.12	54.84
OK	01.50	02.79
SiK	03.09	03.27
FeK	73.30	39.09
Matriz	Corrección	ZAF

En la figura 34 se observa el espectro de composición de los elementos presentes en la superficie de la camisa sin recubrimiento de ZrN y sin desgaste, y en la tabla 17 los valores en porcentaje atómico (At%) y porcentaje de masa (Wt%) presentes por EDS, como es de esperarse se obtiene un alto contenido de hierro en comparación con los otros elementos presentes en la superficie de la camisa.

En la figura 35 se aprecia la superficie de la camisa sin recubrimiento de ZrN con desgaste, donde se observa que las irregularidades debido a la topografía del material producidas por el rectificado y presencia de óxidos producto de la interacción con el ambiente son menores respecto a las micrografías de la figura 33 debido al desgaste provocado por el movimiento alternativo del pistón y los anillos. El cuadro rojo que aparece en la micrografía hace referencia a la zona de la camisa donde se aplicó el aumento.

Figura 35. Micrografías de la superficie de la camisa sin recubrimiento y con desgaste





- a) Micrografía de la morfología con un aumento de 200x.
- b) Micrografía del espectro de composición de los elementos presentes con un aumento de 200x.
- c) Micrografía de la morfología con un aumento de 800x.
- d) Micrografía del espectro de composición de los elementos presentes con un aumento de 800x.
- e) Micrografía de la morfología con un aumento de 800x.
- f) Micrografía del espectro de composición de los elementos presentes con un aumento de 800x

Como se puede observar en la figura 35 la topografía de la camisa es menor en comparación con la topografía de la camisa de la figura 33 debido al desgaste

provocado con los anillos. Esto se debe a que inicialmente no ha ocurrido un asentamiento por lo que el desgaste es mayor y se genera una eliminación de las rugosidades más sobresalientes y concluye cuando el desgaste se vuelve constante.

Figura 36. Espectro de composición de elementos presentes en la superficie de la camisa sin recubrimiento y sin desgaste.

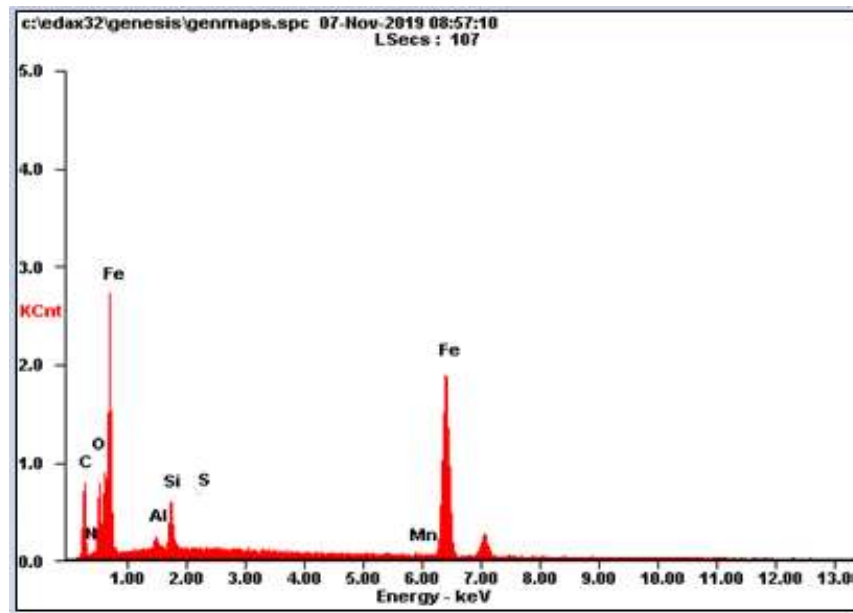


Tabla 18. Porcentaje de composición de elementos presentes en la superficie de la camisa sin recubrimiento y con desgaste.

Elemento	Wt%	At%
CK	16.27	38.26
OK	10.66	15.06
AlK	03.76	03.97
SiK	03.24	03.98
SK	00.16	00.17
FeK	69.52	40.89
MnK	00.70	00.44
Matriz	Corrección	ZAF

En la figura 36 se observa el espectro de composición de los elementos presentes en la superficie de la camisa sin recubrimiento de ZrN con desgaste y en la tabla 18 los valores en porcentaje atómico (At%) y porcentaje de masa (Wt%) presentes por EDS, como es de esperarse se obtiene un alto contenido de hierro en comparación con los otros elementos presentes en la superficie de la camisa.

Se observa un contenido de aluminio considerable en la superficie de la camisa después de realizado el desgaste debido a la cantidad de material desprendido provocado por el contacto metal-metal, lo que ocasiona que se presente un desgaste adhesivo como resultado de la interacción de la adherencia entre asperezas de la superficie del pistón, los anillos y la camisa, además se evidencia una disminución de las zonas oscuras o cráteres en las micrográficas de la composición de la camisa.

5.3 DISTANCIA DE DESGASTE EN LA CAMISA DEL MCI

Con el banco de pruebas se realizan las pruebas de desgaste en la camisa donde en un intervalo de tiempo de cada 2 horas y con una velocidad promedio se determina la distancia total de desgaste en la camisa, para posteriormente utilizar esta distancia en el modelo de desgaste de Archard.

Tabla 19. Distancia de desgaste de camisas con y sin recubrimiento

sin recubrimiento		
Tiempo (h)	Velocidad (m/h)	Distancia de desgaste (m)
0	10824	0
2	10824	21648
4	10824	43296
6	10824	64944
8	10824	86592

En la tabla 19, se observa los valores de distancia de desgaste en cada intervalo de tiempo estipulados para las medidas de desgaste, estos valores obtenidos de distancia de desgaste son los mismos para la camisa con y sin recubrimiento debido a que las condiciones de operación fueron iguales para las 2 camisas.

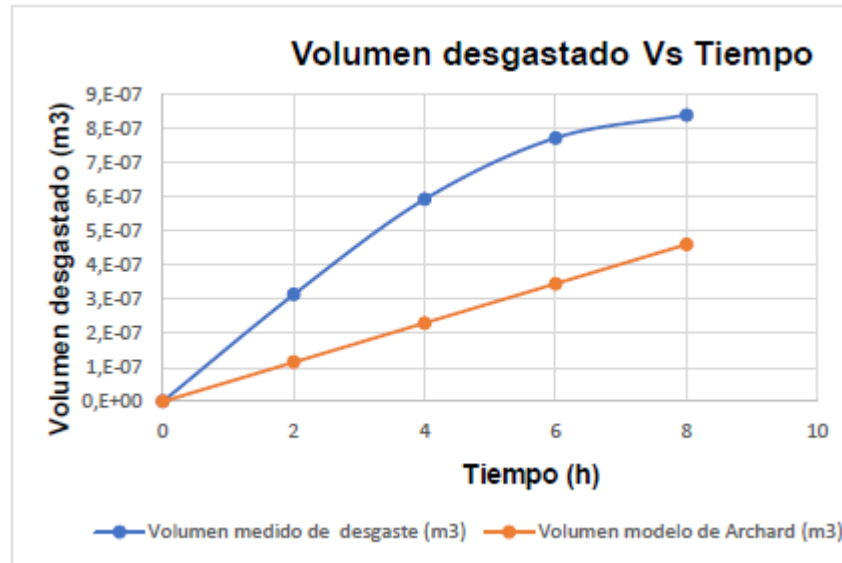
5.3.1 Camisa sin recubrimiento. En la siguiente tabla se muestran los valores que se tienen en cuenta para el cálculo de desgaste de Archard y volumen real desgastado.

Tabla 20. Tabla de desgaste medido vs desgaste de Archard sin recubrimiento

CAMISA SIN RECUBRIMIENTO												
Tiempo (h)	Distancia desgaste en (m)	Volumen (cm3)	volumen (m3)	diferencia de volumen (m3)	Volumen medido de desgaste (m3)	Densidad (gr/cm3)	masa (gr)	diferencia de masa (gr)	Fuerza normal (N)	Dureza (Pa)	K 10-1 a 10-6	Desgaste de Archard (m3)
0	0	62,8952	6,29E-05	0	0	6,2402	392,48	0	15,81	298000000	0,0001	0
2	21648	62,58293	6,258E-05	0,31248998	3,1249E-07	6,2402	390,53	1,95	15,81	298000000	0,0001	1,14851E-07
4	43296	62,304093	6,23E-05	0,5913272	5,91327E-07	6,2402	388,79	3,69	15,81	298000000	0,0001	2,29701E-07
6	64944	62,124611	6,212E-05	0,77080863	7,70809E-07	6,2402	387,67	4,81	15,81	298000000	0,0001	3,44552E-07
8	86592	62,057306	6,206E-05	0,83811416	8,38114E-07	6,2402	387,25	5,23	15,81	298000000	0,0001	4,59403E-07

De acuerdo con los valores calculados se puede comparar el volumen real desgastado Vs desgaste de Archard, esto con el fin de determinar si el modelo de Archard tiene un comportamiento similar al volumen real desgastado, esto lo podemos observar a partir de la siguiente gráfica.

Figura 37. Gráfica de volumen medido vs modelo de Archard sin recubrimiento



En la figura 37, se puede observar la tendencia del desgaste producido en el banco de pruebas de acuerdo a la medición que se realizó cada 2 horas, el desgaste de Archard es inferior al desgaste medido y su comportamiento es lineal ascendente proporcionalmente, en cambio el volumen medido de desgaste tiende a disminuir y estabilizarse a medida que aumenten las horas de desgaste en el banco de pruebas por lo que se puede denotar que el modelo de Archard no tiene un comportamiento similar al provocado por el banco de pruebas. Por lo que se concluye que este modelo no es eficiente para analizar el desgaste que se produce en la camisa de un MCI.

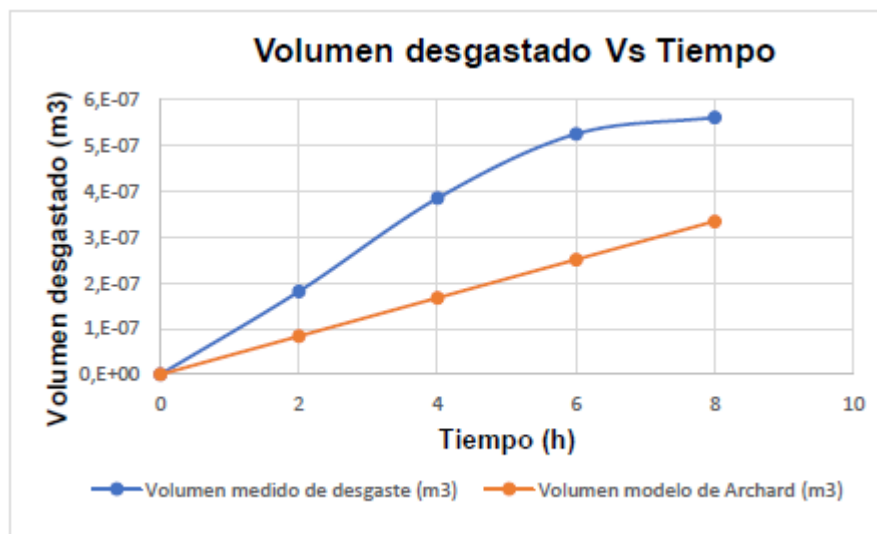
5.3.2 Camisa con recubrimiento. En la siguiente tabla se muestran los valores que se tienen en cuenta para el cálculo de desgaste de Archard y volumen real desgastado en la camisa con el recubrimiento superficial de nitruro de zirconio ZrN.

Tabla 21. Tabla de desgaste medido vs desgaste de Archard con recubrimiento

CAMISA CON RECUBRIMIENTO												
Tiempo (h)	Distancia desgaste en (m)	Volumen (cm3)	volumen (m3)	diferencia de volumen (m3)	Volumen medido de desgaste (m3)	Densidad (gr/cm3)	masa (gr)	diferencia de masa (gr)	Fuerza normal (N)	Dureza (Pa)	K 10-1 a 10-6	Desgaste de Archard (m3)
0	0	61,1481	6,115E-05	0	0	6,3398	387,67	0	15,81	409000000	0,0001	0
2	21648	60,967223	6,097E-05	0,18139373	1,81394E-07	6,3398	386,52	1,15	15,81	409000000	0,0001	8,36809E-08
4	43296	60,763746	6,076E-05	0,38487019	3,8487E-07	6,3398	385,23	2,44	15,81	409000000	0,0001	1,67362E-07
6	64944	60,623364	6,062E-05	0,52525316	5,25253E-07	6,3398	384,34	3,33	15,81	409000000	0,0001	2,51043E-07
8	86592	60,587085	6,059E-05	0,56153191	5,61532E-07	6,3398	384,11	3,56	15,81	409000000	0,0001	3,34724E-07

Con los resultados obtenidos para la camisa con recubrimiento se realiza la siguiente gráfica de comparación de volumen real desgastado Vs el modelo de Archard.

Figura 38. Gráfica de volumen medido vs modelo de Archard con recubrimiento



Observando el comportamiento de la gráfica 38 se puede notar que el modelo de desgaste propuesto por Archard siempre va hacer lineal ascendente debido a que toma en cuenta es la distancia de desgaste que hay durante el tiempo de operación que se somete la camisa con el pistón y sus anillos.

5.3.3 Porcentajes de error entre el volumen medido y el volumen del modelo de Archard. La comparación entre el volumen medido desgastado y el volumen de desgaste del modelo de Archard nos da a entender que este modelo no es óptimo para el desgaste que se produce entre los anillos, el pistón y la camisa. Para esto se calculó un porcentaje de error que se muestra en la tabla 22 y 23 entre los dos volúmenes calculados.

Tabla 22. Camisa sin recubrimiento

Tiempo (h)	Volumen real desgastado (m3)	Volumen de desgaste de Archard (m3)	% Error
0	0	0	0
2	$3,125 \cdot 10^{-7}$	$1,1485 \cdot 10^{-7}$	63,248
4	$5,913 \cdot 10^{-7}$	$2,297 \cdot 10^{-7}$	61,153
6	$7,708 \cdot 10^{-7}$	$3,4455 \cdot 10^{-7}$	55,299
8	$8,381 \cdot 10^{-7}$	$4,594 \cdot 10^{-7}$	45,185

Tabla 23. Camisa con recubrimiento

Tiempo (h)	Volumen medido desgastado (m3)	Volumen desgaste de Archard (m3)	% Error
0	0	0	0
2	$1,814 \cdot 10^{-7}$	$8,368 \cdot 10^{-8}$	53,869
4	$3,849 \cdot 10^{-7}$	$1,6736 \cdot 10^{-7}$	56,518
6	$5,253 \cdot 10^{-7}$	$2,5104 \cdot 10^{-7}$	52,210
8	$5,615 \cdot 10^{-7}$	$3,3472 \cdot 10^{-7}$	40,388

Según los valores obtenidos en las tablas 22 y 23, se puede evidenciar que el error es grande al inicio y luego va disminuyendo, esto es debido a que el desgaste calculado por el modelo de Archard tiene un comportamiento lineal ascendente por lo que este desgaste siempre seguirá creciendo y el desgaste medido después de la sexta hora de trabajo va a tender a estabilizarse, de acuerdo a los valores obtenidos de porcentaje de error se puede concluir que el modelo de desgaste de Archard no es óptimo para el desgaste producido por los anillos del pistón y la

camisa del MCI, por lo que se sugiere buscar un nuevo modelo el cual tenga un comportamiento similar al que se calculó de volumen medido de desgaste.

Comparando la resistencia al desgaste entre la camisa con recubrimiento de ZrN y la camisa sin recubrimiento se evidencia que el porcentaje de error es de 49,26%.

$$\%error = \left| \frac{D_{con\ recubrimiento} - D_{sin\ recubrimiento}}{D_{con\ recubrimiento}} \right| * 100$$

$$\%error = \frac{5,615 * 10^{-7} - 8,381 * 10^{-7}}{5,615 * 10^{-7}} * 100 = 49,26\%$$

Donde, se obtiene una mejora en la perdida de material debido a que se presenta menos desgaste entre la camisa con recubrimiento, el pistón y los anillos.

6. CONCLUSIONES

- Se concluye que el banco de pruebas diseñado y construido es óptimo para realizar pruebas de desgaste en las camisas de un motor de combustión interna, debido a que el movimiento alternativo del pistón produce el desgaste en la camisa.
- Se evaluó la resistencia al desgaste donde se pudo evidenciar que la camisa sin recubrimiento presenta un desgaste de 49,26% mayor que el desgaste en la camisa con recubrimiento de ZrN, esto fue evaluado bajo las mismas condiciones de funcionamiento producido por el banco de pruebas.
- Según los resultados del análisis de Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) y de Espectroscopia de Energía Dispersa (EDS) los materiales presentes antes y después del desgaste en las camisas del MCI se tiene que la modificación superficial a 25 [keV] presenta una baja concentración de nitruro de zirconio (ZrN). El porcentaje en masa (Wt%) es de 16.87% y el porcentaje atómico (At%) es de 17.08% para la camisa con recubrimiento sin desgaste, y el porcentaje en masa (Wt%) es de 0.53% y el porcentaje atómico (At%) es de 0.15% para la camisa con recubrimiento con desgaste. A pesar del bajo contenido en porcentaje de recubrimiento se presenta una disminución en el desgaste realizado con el banco de pruebas, además las camisas presentan un porcentaje de silicio que no es bueno para este tipo de piezas de 2.49% de porcentaje en masa y atómico.
- Los desgastes generados por el banco de pruebas se desarrollaron sin ningún tipo de lubricante debido a que al momento de aplicarle lubricante y determinar el volumen de material desprendido era muy pequeño y esto ocasionaba que

no se pudiera tener un valor exacto, por lo que se necesitaría una balanza de por lo menos 4 decimales. La Escuela de Ingeniería Mecánica cuenta con una balanza de este tipo, pero tiene un límite de peso de 200g por lo que la camisa al tener un valor superior a este no se pudieron realizar estas pruebas.

- Por medio del modelo de Archard se analizó el comportamiento de desgaste en donde se pudo evidenciar y se comparó con el volumen medido desprendido durante el tiempo de desgaste al que se sometió la camisa y se determinó que en las 8 horas de funcionamiento se obtiene un error de 45,18% para la camisa sin recubrimiento y un 40,38% para la camisa con recubrimiento. Donde se pudo identificar que el modelo de Archard no es óptimo para la evaluación de desgaste en las camisas de un MCI, debido a que no presenta un comportamiento similar al producido por el banco de pruebas generando una tendencia proporcional de crecimiento que está dependiendo directamente de la distancia de desgaste al que se somete a prueba la camisa.

7. RECOMENDACIONES

- Integrar un sistema de lubricación al banco de pruebas que se diseñó y construyó para las pruebas de desgaste para tener más factores en cuenta en el análisis de desgaste que se produce entre la camisa y los anillos del pistón.
- Implantar a distintas condiciones cada camisa el mismo tipo de recubrimiento para mirar su comportamiento en el desgaste, para poder determinar cuál puede llegar a hacer el óptimo bajo las condiciones de desgaste que se someten estas camisas.
- Integrar un sistema de variación de velocidad en el motor eléctrico para determinar el desgaste a diferentes velocidades.
- Diseñar una cabina de ruido especial para el banco de pruebas debido a que pueden llegar a ser muy altos debido a la fricción y desgaste generados.
- Adquirir una balanza de por lo menos cuatro decimales con una capacidad mínima de 500 g, para poder implementar las pruebas de desgaste con lubricación en el banco de pruebas.

BIBLIOGRAFÍA

ARCHARD, J.F. Contact and Rubbing of Flat Surfaces. [Base de datos en línea]. Junio 07 de 2004. Revista Journal of Applied Phisys. Vol 24, number 8. (Recuperado en 21 Noviembre 2019) Disponible en <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1721448>

AYLAN, Maxi. El desgaste de los motores de encendido por compresión. Comodoro Rivadavia: Universidad Nacional de La Patagonia San Juan Bosco. Mantenimiento ME003.2018

CARDENAS, Leydi. Resistencia a la corrosión de recubrimientos nanoestructurados de Ti-Zr-Si-N. Tesis de grado Magister en Ingeniería Mecánica. Bogotá D.C. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica. 2018.

CASTILLO, Felipe. Tribología: fricción, desgaste y lubricación. Laboratorio tecnológico de materiales. Cuatitlán. Facultad de estudios superiores Cuatitlán. Departamento de ingeniería. 2007

CLETO, Jorge y GÓMEZ, Leonardo. Simulación y análisis de la dinámica de un motor de combustión interna de cinco cilindros manufacturado por Volkswagen, mediante el software Virtual Lab. Licenciatura en Ingeniería Mecánica. Puebla: Universidad de las Américas Puebla. Departamento de Ingeniería Industrial y Mecánica. Escuela de Ingeniería y Ciencias. 2008

ECURED Contributors. Motor de combustión interna. [en línea]. EcuRed. Cuba. 2015. (Recuperado en 29 octubre 2019). Disponible en

https://www.ecured.cu/index.php?title=Motor_de_combusti%C3%B3n_interna&oldid=2560777

ENGLISCH, Carl. Motores de combustión interna. Desgaste, coste de explotación y rentabilidad. Alemania. Editorial Labor, S. A. 1950

FERNANDEZ, Carlos y VARGAS, Edgar. Sistemas y tecnología de motores Diesel. [En línea]. SlideShare. 2015. (Recuperado en 30 de Julio de 2019) Disponible en <https://www.slideshare.net/EdgarVargasMedina/exposicion-motores-diesel>

GÓMES, Oscar y PATIÑO, Miguel. Evaluación del desgaste de una broca en acero rápido (HSS) modificada superficialmente con iones de nitrógeno y titanio usando la metodología ANOVA. Trabajo de grado ingeniero mecánico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2013

HEYWOOD, John B. Internal combustion engine fundamentals, McGraw-Hill primera edición, 1988

MARTÍNEZ, Albert. Motores de combustión interna. [en línea]. Sant Celoni. Treball de recerca. 2007 (Recuperado en 15 Octubre de 2019). Disponible en <https://www.coursehero.com/file/22874088/Motores-de-combusti%C3%B3n-interna/>

MENA, Ronald y VILLAMIZAR, Sergio. Diseño y desarrollo experimental del comportamiento de piezas metálicas de mecanización con y sin recubrimiento de TiN mediante un proceso PVD, sometidas a desgaste. Trabajo de grado ingeniero mecánico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías fisicomecánicas. Escuela de ingeniería mecánica. 2012.

MUÑOS, M y PAYRI, F. Motores de combustión interna alternativos. Madrid: Rustica Editorial. Sección de publicaciones de la E.T.S. de ingenieros industriales. Fundación general U.P.M. 1989.

NIÑO, E.D. y otros. Caracterización del Acero API 5LX 65 Implantado por Iones de Nitrógeno e Iones de Titanio. Revista Colombiana de Física. 2011, vol. 43 no. 1. 4p

ORTEGA, Karen y SALAZAR, Víctor. Evaluación del desgaste del material utilizado en la fabricación de las camisas de combustión interna modificado superficialmente con nitruro de titanio (TiN) mediante el análisis de varianza ANOVA. Trabajo de grado ingeniero mecánico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2017

PORTILLA, Miguel. Influencia de la modificación superficial con iones de titanio y nitrógeno en materiales utilizados en la fabricación de pistones de motocicleta. Trabajo de grado ingeniero mecánico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2017

QUIGUANGO, Richard; ROJAS, Jhon y NACIMBA, Wilmer. Ovalamiento y conicidad de los cilindros de un motor. Quito: Instituto Tecnológico Superior Central Técnico. Escuela de mecánica automotriz. 2015

SUÁREZ, Fabio y VELEZ, Juan. Estudio del modelo de desgaste propuesto por ARCHARD [en línea]. Medellín; Universidad Nacional de Colombia. 2004. (Recuperado en 02 de agosto de 2019). Disponible en <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v72n146/a03v72n146.pdf>

Tratamientos térmicos recubrimientos avanzados (TTC). Deposición física en fase vapor. Disponible en <https://docplayer.es/76425652-P-v-d-deposicion-fisica-en-fase-vapor-introduccion-evaporacion-por-arco-catodico-recubrimientos-pvd.html>