

**INFLUENCIA DE LA MODIFICACIÓN SUPERFICIAL CON IONES DE TITANIO Y
NITRÓGENO EN MATERIALES UTILIZADOS EN LA FABRICACIÓN DE
PISTONES DE MOTOCICLETA**

LUIS MIGUEL PORTILLA CARRILLO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2017**

**INFLUENCIA DE LA MODIFICACIÓN SUPERFICIAL CON IONES DE TITANIO Y
NITRÓGENO EN MATERIALES UTILIZADOS EN LA FABRICACIÓN DE
PISTONES DE MOTOCICLETA**

LUIS MIGUEL PORTILLA CARRILLO

Tesis de grado para obtener el título de Ingeniero Mecánico

Director

Dr. JORGE LUIS CHACÓN VELASCO

Doctor en Ingeniería

Codirector

MSc. ELY DANNIER V. NIÑO

Magíster en Física

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2017**

A mis padres, quienes entienden la importancia de la formación académica como un pilar fundamental del desarrollo del ser.

A mi compañera, quien me ha brindado el apoyo necesario para continuar.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mis agradecimientos a:

Ely Dannier Valbuena, MSc en Física, quien gracias a su dedicación incondicional en el fomento de la ciencia y la investigación ha sido posible desarrollar este proyecto, al laboratorio del plasma, especialmente al profesor Fredy, al grupo de investigación FITEK, su personal, a sus responsables por su gran vocación hacia la investigación científica y su confianza.

Dr. Jorge Luis Chacón, Docente de planta de la Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander.

Hernán Garnica, Msc en Física, Universidad Industrial de Santander.

Al laboratorio de tribología y al laboratorio de Espectroscopía de la facultad de minas de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín por su tiempo y disposición.

Al Laboratorio de Espectroscopía de la Universidad Industrial de Santander, por su apoyo en el servicio adquisición de datos y resultados. Agradezco al Laboratorio de Microscopía de la Universidad Industrial de Santander – Parque Tecnológico de Guatiguará y su personal, por el servicio de microscopía suministrado para la adquisición de datos.

Al Laboratorio de Microscopía de la Universidad Industrial de Santander – Parque Tecnológico de Guatiguará y su personal, por el servicio de microscopía suministrado para la adquisición de datos.

A los docentes de la Escuela de Ingeniería Mecánica en general por su labor diaria de orientarnos profesionalmente.

A todas esas fuerzas que a veces confluyen, se contravienen, ocasionan que el mundo gire, que el tiempo siga, que la energía tenga un uso y que lo perceptible exista en medio de la vida y el caos.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1 OBJETIVOS	19
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	19
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
2 MARCO REFERENCIAL	20
2.1 TRIBOLOGÍA.....	20
2.2 DINÁMICA DEL GRUPO PISTÓN.....	22
2.3 MODIFICACIÓN SUPERFICIAL.....	27
2.3.1 Deposición Química a Vapor (Chemical Vapor Deposition - CVD).....	27
2.3.2 Deposición Física a Vapor (Physical Vapor Deposition - PVD).....	28
2.3.3 Bombardeo Iónico (Sputtering).....	29
2.3.4 Implantación Iónica.....	29
3 METODOLOGÍA	31
3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	31
3.2 PREPARACIÓN DE PROBETAS.....	32
3.2.1 Preparación Metalográfica.....	36
3.2.2 Limpieza por Ultrasonido.....	36
3.3 PROCESO DE MODIFICACIÓN SUPERFICIAL.....	37
3.3.1 Bombardeo Iónico.....	40
3.3.2 Implantación Iónica Tridimensional (3DII).....	41
3.4 CARACTERIZACIÓN SUPERFICIAL.....	42
3.4.1 Inspección Visual.....	43
3.4.2 Topografía Superficial.....	44
3.4.3 Espectroscopía Raman.....	45
3.4.3 Ensayo Pin Sobre Disco.....	46
4 ANÁLISIS Y RESULTADOS	51
4.1 ESPECTROSCOPÍA DE EMISIÓN ÓPTICA (OES).....	51
4.2 ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD SUPERFICIAL DE IONES IMPLANTADOS.....	52
4.3 ESTIMACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN POR PROFUNDIDAD DE IONES IMPLANTADOS.....	55
4.4 ENSAYO PIN SOBRE DISCO.....	56

4.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	64
4.5.1 Planteamiento de la Hipótesis	64
4.6 ANÁLISIS POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) Y ESPECTROSCOPIA DE ENERGÍA DISPERSIVA (EDS).....	66
4.7 ENSAYOS Y ANÁLISIS POR ESPECTROSCOPIA RAMAN.....	78
5 CONCLUSIONES	84
6 RECOMENDACIONES	86
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
BIBLIOGRAFÍA	97
ANEXOS	107

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Fenómenos de desgaste.....	20
Figura 2. Ensayo pin sobre disco	22
Figura 3. Ciclo Otto	23
Figura 4. Diagrama de cuerpo libre del pistón.....	26
Figura 5. Diagrama del mecanismo manivela-biela	26
Figura 6. Procesos que ocurren al bombardear un blanco con iones	29
Figura 7. Diseño metodológico de la investigación.	31
Figura 8. Distintos modelos del pistón AKT TT150	32
Figura 9. Distintas marcas que ofrecen la misma autoparte	32
Figura 10. Distintos diámetros de pistón	33
Figura 11. Pistones modificados superficialmente por el fabricante.....	33
Figura 12. Renderizado del pistón elaborado en CAD	34
Figura 13. Materiales para émbolos.....	34
Figura 14. Elaboración de discos	35
Figura 15. Elaboración de pines.....	35
Figura 16 Renderizado del pin y disco elaborados en CAD	36
Figura 17. Preparación superficial de sustratos	36
Figura 18. Limpiador Ultrasónico BRANSON	37
Figura 19. Reactor JUPITER.....	38
Figura 20. Esquema de la cámara de descarga del reactor JUPITER.....	38
Figura 21. Renderizado del porta sustratos diseñado en CAD	39
Figura 22. Ubicación de sustratos en la cámara de descargas.....	39
Figura 23. Pulso de la descarga con gas de Argón.....	41
Figura 24. Probetas disponibles.....	42
Figura 25. Tonalidad superficial de los discos a distintos tiempos de exposición .	43
Figura 26. Microscopio electrónico de barrido QUANTA FEG 650. Laboratorio de Microscopia, Parque Tecnológico Guatiguará UIS	44
Figura 27. Origen de la difusión de Rayleigh y de Raman	46
Figura 28. Espectroscopio Raman HORIBA LabRam HR	46
Figura 29. Proceso de limpieza y pesado de sustratos.....	47
Figura 30. Partes que componen el equipo de ensayos pin sobre disco	47
Figura 31. Porta disco del ensayo de pin sobre disco	48
Figura 32. Distribución de sustratos en el ensayo de pin sobre disco.....	48
Figura 33. Disposición de sustratos y modelado para la obtención del área superficial.....	52
Figura 34. Información del pulso de corriente cargada al sistema	53
Figura 35. Valores de los parámetros experimentales ingresados al sistema.....	54
Figura 36. Perfiles de concentración por profundidad de los iones de Ti y N	55
Figura 37. Ensayo de pin sobre disco en: (a) disco B, (b) disco Q y (c) disco T ...	56
Figura 38. Discos antes y después del ensayo de pin sobre disco	56

Figura 39. Pines después del ensayo de pin sobre disco	57
Figura 40. Fuerza aplicada versus tasa de desgaste de los discos B	58
Figura 41. Fuerza aplicada versus tasa de desgaste de los discos Q	59
Figura 42. Fuerza aplicada versus tasa de desgaste de los discos T	60
Figura 43. Tasa de desgaste en distintos pares a las mismas condiciones de operación	61
Figura 44. Coeficientes de fricción experimental de los disco B	62
Figura 45. Coeficientes de fricción experimental de los disco Q	62
Figura 46. Coeficientes de fricción experimental de los disco T	63
Figura 47. Comparativo del coeficiente de fricción en las distintas superficies ensayadas con fuerza normal aplicada de 5N	64
Figura 48. Micrografías SEM en el disco B. Superficie sin desgaste a una magnificación de 200X (a), 1000X (b) y 5000X (c). Superficie desgastada a una magnificación de 200X (d) y 500X (e)	67
Figura 49. Espectro de composición EDS en la superficie del disco B sin desgaste	68
Figura 50. Espectro de composición EDS del disco B en la superficie desgastada	69
Figura 51. Micrografía SEM en el Disco Q. Superficie sin desgaste a una magnificación de (a) 200X, (b) 1000X, (c) 5000X, (d) 100000X. Superficie desgastada a una magnificación de (e) 500X, (f) 5000X	70
Figura 52. Espectro de composición EDS en la superficie sin desgaste del disco Q	71
Figura 53. Micro gotas en la superficie del disco Q	72
Figura 54. Espectro de composición EDS en la superficie desgastada del disco Q	73
Figura 55. Micrografía SEM en el Disco T. Superficie sin desgaste a una magnificación de (a) 200X, (b) 1000X, (c) 5000X y (d) 100000X. Superficie desgastada a una magnificación de (e) 500X y (f) 5000X	74
Figura 56. Espectro de composición EDS en la superficie sin desgaste del disco T	75
Figura 57. Micro gotas en la superficie del disco T. Magnificación a 200X (a) y 1000X (b)	76
Figura 58. Espectro de composición EDS en la superficie desgastada del disco T	77
Figura 59. Micrografías SEM de la superficie no desgastada del pin. Magnificación a 200X (a), 1000X (b) y 5000X (c)	77
Figura 60. Espectro de composición EDS de la superficie del pin	78
Figura 61. Micrografías en la superficie del disco B	79
Figura 62. Espectro Raman en distintos puntos del disco B	80
Figura 63. Micrografías en la superficie del disco Q	80
Figura 64. Espectro Raman en distintos puntos del disco Q	80
Figura 65. Micro graficas de superficie en disco T	81
Figura 66. Espectro Raman en distintos puntos del disco T	81
Figura 67. Espectros Raman en la zona no desgastada	83

Figura 68. Espectro Raman en la zona desgastada	83
Figura 69. Datos de entrada para la simulación. (a) Ti y (b) N.....	115
Figura 70. Datos de entrada para la simulación. (a) Ti y (b) N.....	115
Figura 71. Trayectorias de los iones de (a) Ti y (b) N implantados	116
Figura 72. Perfil de concentración 3D de iones implantados. (a) Ti y (b) N	116
Figura 73. Perfil de concentración 2D de iones implantados. (a) Ti y (b) N	117

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Presiones y temperaturas en motor de combustión interna de 4T a carburador.....	25
Tabla 2. Parámetros del primer proceso de bombardeo iónico	40
Tabla 3. Parámetros del segundo proceso de bombardeo iónico.....	40
Tabla 4. Parámetros de descarga híbrida en el proceso 1	41
Tabla 5. Parámetros de descarga híbrida en el proceso 2	42
Tabla 6. Inventario de las probetas para los ensayos de caracterización superficial	43
Tabla 7. Composición química elemental por espectroscopía de emisión óptica..	51
Tabla 8. Estimación de la dosis implantada en cada uno de los procesos.....	54
Tabla 9. Parámetros y resultados obtenidos en el ensayo de pin sobre disco	58
Tabla 10. Comparativo de la tasa de desgaste en los discos B	59
Tabla 11. Comparativo de la tasa de desgaste en los discos Q	59
Tabla 12. Comparativo de la tasa de desgaste en los discos T	60
Tabla 13. Coeficientes de fricción promedio.....	63
Tabla 14. Parámetros del análisis estadístico	65
Tabla 15. Estadístico F calculado del coeficiente de fricción a fuerza normal de 5N	66
Tabla 16. Composición elemental EDS en la superficie del disco B sin desgaste.	68
Tabla 17. Composición elemental EDS en la superficie desgastada del disco B ..	69
Tabla 18. Composición elemental EDS en la superficie sin desgaste del disco Q	71
Tabla 19. Composición elemental EDS en la superficie desgastada del disco Q..	72
Tabla 20. Composición elemental EDS en la superficie sin desgaste del disco T.	75
Tabla 21. Composición elemental EDS en la superficie desgastada del disco T ..	76
Tabla 22. Composición elemental EDS de la superficie del Pin	78
Tabla 23. Condiciones establecidas en la espectroscopía Raman.....	79
Tabla 24. Análisis de los espectros Raman.....	82

ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. PIEZAS DISEÑADAS EN CAD.....	107
ANEXO B. RESULTADOS ANÁLISIS ELEMENTAL DE ABSORCIÓN ATÓMICA POR CHISPA DE ARCO DE LOS DISCOS B, Q Y T.....	111
ANEXO C. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE SRIM-TRIM.....	115
ANEXO D. NORMA ASTM G99.....	117

RESUMEN

TITULO: INFLUENCIA DE LA MODIFICACIÓN SUPERFICIAL CON IONES DE TITANIO Y NITRÓGENO EN MATERIALES UTILIZADOS EN LA FABRICACIÓN DE PISTONES DE MOTOCICLETA*

AUTOR: PORTILLA CARRILLO, Luis Miguel**

PALABRAS CLAVE: Modificación superficial, implantación iónica, tribología, pin sobre disco, pistones de motocicleta.

DESCRIPCIÓN:

La modificación superficial se estudia actualmente en la ciencia e ingeniería de los materiales como una alternativa de mejorar las propiedades físicas y químicas en distintas aplicaciones industriales y tecnológicas. En la presente investigación, se realizó un trabajo experimental para evaluar la influencia de la técnica 3DII (Three Dimensional Ion Implantation) en el material utilizado en la fabricación de pistones de motocicleta.

La investigación consistió en diseñar, fabricar, modificar superficialmente y evaluar probetas tipo disco de aluminio extraídas de los pistones de motocicleta AKT TT 150 +025 REF: 707749, con y sin implantación de iones de titanio (Ti) y nitrógeno (N) en una de sus superficies. En el proceso de modificación superficial se estimaron los valores de la densidad superficial y concentración por profundidad de iones implantados. La superficie de los sustratos fue evaluada mediante el ensayo de pin sobre disco, con pines extraídos del cilindro de motocicleta correspondiente, microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopía dispersiva de rayos x (EDX), espectroscopía de emisión óptica (OES) y espectroscopía Raman. Además, se realizó un análisis estadístico de varianza (ANOVA).

Los resultados obtenidos de los ensayos en el tribómetro de pin sobre disco indican un incremento de la resistencia al desgaste en los discos implantados debido a la variación en la concentración de las especies utilizadas y las estructuras moleculares formadas, las cuales permitieron mejorar las propiedades mecánicas superficiales del sustrato.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Jorge Luis Chacón. Codirector: Ely Dannier Valbuena Niño.

ABSTRACT

TITLE: INFLUENCE OF THE SUPERFICIAL MODIFICATION WITH TITANIUM AND NITROGEN IONS IN MATERIALS USED IN THE MANUFACTURE OF MOTORCYCLE PISTONS *

AUTOR: PORTILLA CARRILLO, Luis Miguel.**

KEY WORDS: Surface modification, ion implantation, tribology, pin on disk, motorcycle pistons.

CONTENTS:

Surface modification is currently being studied in materials science and engineering as an alternative to improve physical and chemical properties in various industrial and technological applications. In the present investigation, an experimental work was carried out to evaluate the influence of 3DII (Three Dimensional Ion Implantation) technique on the material used in the manufacture of motorcycle pistons.

The research consisted in designing, manufacturing, modify surface and evaluating aluminum disc specimens extracted from motorcycle pistons, AKT TT 150 +025 REF: 707749, with and without implantation of titanium (Ti) and nitrogen (N) ions in one of its surfaces. In the process of superficial modification, the values of superficial density and the concentration by the depth of implanted ions was estimated. The surface of the substrates was evaluated through pin-on-disk testing, with pins extracted from the corresponding motorcycle cylinder, optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM), x-ray dispersive spectroscopy (EDX), Optical emission spectroscopy (OES) and Raman spectroscopy. Moreover, a statistical analysis of variance (ANOVA) was performed.

The results obtained from tribometer test by pin-on-disk indicate an increase in the wear resistance of the implanted discs, which allowed enhancing mechanicals properties superficial of the substrate due to variety in the concentration of the specimens used and the formed molecular structures.

* Degree project.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Jorge Luis Chacón. Codirector: Ely Dannier Valbuena Niño.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen desarrollos tecnológicos encaminados hacia el mejoramiento de las propiedades superficiales de los materiales, las emisiones de gases contaminantes que generan serias afectaciones al medio ambiente están siendo abordadas utilizando técnicas especiales de acabado superficial en motores de combustión interna [44] y se desarrollan investigaciones tanto en el sector automovilístico como en otros sectores de la industria con la intención de reducir el desgaste en sistemas mecánicos [16].

La actual crisis ambiental ha ocasionado que distintos gobiernos postulen nuevas legislaciones ambientales con lo cual se hacen más estrictos los controles de emisiones contaminantes, en consecuencia, los fabricantes de autopartes han empezado a tomar decisiones ante la importancia de aumentar la durabilidad de sus productos para mitigar las afectaciones al medio ambiente [49]. Los procesos de ingeniería de superficies en el campo automovilístico avanzan hacia el mejoramiento de las propiedades superficiales para la reducción del desgaste, la fricción y la corrosión en las piezas que componen el interior del motor [91].

Los materiales involucrados en el proceso de operación de un motor de combustión interna se encuentran afectados por distintos fenómenos, siendo los más representativos el efecto térmico, el impacto, desgaste, esfuerzos alternantes, entre otros. [52] La temperatura en la superficie de los cilindros puede alcanzar valores elevados en la zona aledaña al punto muerto superior en donde se hace efectivo el proceso de combustión [44].

La ciencia de superficies aborda soluciones a los problemas ocasionados en situaciones extremas tales como altas tensiones de contacto, ambientes hostiles, altas temperaturas y altas vibraciones [24]. En los últimos años se ha incrementado la variedad de procesos de modificación superficial asistidos por plasma aplicados a la industria automovilística [91].

El proceso de implantación iónica tridimensional (Three Dimensional Ion Implantation - 3DII) es uno de los métodos aplicados al mejoramiento de las características tribológicas en metales, utilizando descargas de alto voltaje a bajas presiones, que permiten la implantación iónica en sólidos con base a las interacciones cinéticas de los iones de alta energía con la estructura cristalina; La calidad del tratamiento es particular debido al ángulo normal de incidencia, el flujo de iones mono energéticos y la uniformidad de la dosis implantada [11,14,36]. De acuerdo a lo anterior, se busca obtener una penetración de iones dopantes en la superficie sólida distribuidos de una manera uniforme [53] con una densidad de flujo más alta que la obtenida con otras técnicas de implantación iónica existentes, este proceso además permite adecuar los sistemas de implantación tradicionales sin mayores costos y con un desempeño superior [15-18].

El proceso de 3DII se realiza en el equipo denominado JUPITER (Joint Universal Plasma and Ion Technology Experimental Reactor) que junto con el dispositivo de vaporización por arco catódico extiende sus aplicaciones, logrando hacer tratamientos híbridos [17] con el funcionamiento simultáneo de la descarga de arco eléctrico junto con la descarga de alta tensión [88] para mejorar las propiedades tribológicas de los metales [89].

Los trabajos desarrollados previamente en el reactor JUPITER han mostrado un gran potencial para la modificación superficial [17,18, 84, 86, 87]. Dependiendo de la energía con la cual se hace llegar los iones a la superficie pueden ocurrir tres situaciones de acuerdo como lo describen Dulcé et al [16], ocurre implantación iónica efectivamente al ser aplicadas energías superiores a los 5keV, en los procesos existentes podemos encontrar profundidades de implantación de capas atómicas entre los 0.05 y 0.5 micrómetros dependiendo del tipo de ion, el material implantado y la energía de bombardeo [68], lo que permite mejorar las propiedades mecánicas del material sin la necesidad de modificar las dimensiones del mismo.

Es importante resaltar que en el proceso de 3DII no es necesario realizar un aumento de temperatura, evitando que la pieza a modificar presente alteraciones adicionales en su estructura molecular o deformación de sus dimensiones [16].

El titanio es un material que se encuentra disponible abundantemente en la tierra, se ha detectado en meteoritos, la luna, el sol y otras estrellas, es el cuarto material metálico más abundante y sus primeros productos comerciales se desarrollaron por la TMCA (Titanium Metals Company of America) en el año 1950 [97]. Es un material que posee ventajas sobre otros debido a sus propiedades físicas como resistencia al desgaste, a la degradación química, dureza, entre otras, lo que le convierte en un material interesante para distintas aplicaciones industriales especialmente a las que requieren buenas propiedades tribológicas (engranajes, cojinetes, etc) [66].

Las propiedades mecánicas de una aleación de titanio dependen de su composición, adhesión, textura y tensiones residuales [42]. En la actualidad se desarrollan avanzados recubrimientos multifásicos para aplicaciones aeroespaciales que buscan propiedades tribológicas únicas para soportar los requerimientos extremos de dicha industria [93].

Las películas duras de nitruro de titanio (TiN), se consideran de alta tecnología debido a sus características particulares entre las cuales se destaca la alta dureza y módulo de Young [2], baja fricción, buena resistencia a la corrosión, buena conductividad térmica, resistencia al desgaste, buena adhesión, alta conductividad eléctrica y altas temperaturas de fusión [28,29]. Sus revestimientos son actualmente el grupo más estudiado de películas poli cristalinas debido a los exitosos resultados orientados a las aplicaciones industriales [89] particularmente las que implican resistencia a la fricción y al desgaste a temperaturas elevadas [59].

Las multicapas de titanio, carbono, nitrógeno (TiCN) son uno de los recubrimientos de tercera generación en el que se varían parámetros como espesor de capa, tipo de secuencia, tipo de desgaste y método de deposición para lograr nuevos desarrollos [3].

Los métodos de caracterización de superficies que se utilizan para evaluar, analizar e interpretar la modificación superficial de los materiales, especialmente las realizadas por la técnica de implantación iónica tridimensional son: Difracción de rayos x (XRD), Reacción nuclear (NRA), Microscopia electrónica de barrido (SEM), Espectroscopia de dispersión de energía (EDS), Microscopia de sonda de barrido (SPM), Microscopia electrónica de transmisión (TEM), Espectroscopia de emisión óptica de descarga luminiscente (GD-OES), Espectroscopia de rayos x de fotoelectrones (XPS), Haz de ion concentrado (FIB), Espectroscopia de retro dispersión de Rutherford (RBS), Microscopía de fuerza atómica (AFM), Perfilometría, Espectroscopia RAMAN, Espectroscopia de masas de iones secundarios (SIMS) [75], entre otros. También existen ensayos para la medición y análisis de superficies como lo son los ensayos de Pin sobre disco, rayado e indentación.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, el objetivo principal del presente trabajo de investigación, consiste en plantear un modelo experimental que permita evaluar probetas tipo disco de aluminio extraído de pistones de motocicleta, AKT TT 150 +025 REF: 707749, con y sin implantación superficial de iones de Ti y N ensayadas en un tribómetro de Pin sobre disco, donde los sustratos tipo pin son manufacturados de su respectivo cilindro. Las superficies de las probetas fueron analizadas antes y después de los ensayos tribométricos por medio de microscopia electrónica de barrido), espectroscopia de energía dispersiva de rayos X y Raman.

1 OBJETIVOS

A continuación se presentan los objetivos propuestos en el trabajo de investigación.

1.1.OBJETIVO GENERAL

Evaluar la influencia de la modificación superficial con iones de Ti y N en materiales utilizados en la fabricación de pistones de motocicleta.

1.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Realizar la modificación superficial de los sustratos mediante la técnica de implantación iónica tridimensional (3DII) generada por descargas híbridas de alto voltaje y arco eléctrico a bajas presiones en atmósfera controlada de especies metálicas (Ti) y no metálicas (N).
- ✓ Evaluar la resistencia al desgaste de las superficies modificadas y no modificadas por medio del ensayo tribológico de pin sobre disco.
- ✓ Caracterizar mediante inspección visual, microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía de energía dispersa de rayos X (EDX) las superficies modificadas y no modificadas.

2 MARCO REFERENCIAL

La descripción de los temas abordados en el trabajo de investigación es presentada a continuación.

2.1 TRIBOLOGÍA

La ciencia que estudia los fenómenos de interacción entre dos superficies en contacto es bien conocida como tribología.

Figura 1. Fenómenos de desgaste



El fenómeno de desgaste de una pieza metálica incide directamente en su tiempo de vida útil, de modo que en ocasiones se ve la necesidad de cambiar la pieza o el componente de una máquina dado el trabajo inadecuado, la reducción de la eficiencia, pérdidas de potencia, incremento de consumo de combustible y lubricante, llevando a las empresas a paradas de producción, demoras y finalmente pérdidas económicas. Tal desgaste puede ser debido a fenómenos como abrasión, adhesión, corrosión, erosión, impacto, fretting, cavitación (ver figura 1). Los factores a analizar en el estudio del fenómeno de desgaste son la dureza, la tenacidad, la estructura, la composición química, la carga aplicada, la velocidad, la rugosidad de la superficie, la distancia recorrida, la lubricidad y demás [40].

Uno de los aspectos importantes a tener en cuenta en un par camisa-pistón es la fricción, esta depende de varios factores tales como las velocidades, las cargas, las vibraciones, la composición de los materiales, los acabados superficiales, los efectos térmicos, la calidad de lubricación, la humedad ambiental, la transferencia

de partículas, entre otros que hacen muy complejo su estudio y obliga al investigador a llevar a cabo simplificaciones e hipótesis [4].

Existen esfuerzos desde la tecnología de materiales enfocados a modificar las propiedades físicas al recubrir, implantar o alterar las superficies para mejorar propiedades como la dureza, la resistencia al desgaste, a la abrasión y la corrosión. Se ha encontrado que el comportamiento de la superficie modificada puede variar con el sustrato, su estructura, el método de deposición, el espesor o profundidad [51], la composición química, la estequiometría de recubrimientos compuestos [96], la adhesión del sustrato a la especie adicionada, las condiciones de trabajo y condiciones de su preparación [59,60]. Existe una relación importante entre la microestructura del material y las propiedades mecánicas, por tanto es de utilidad conocer el fenómeno de alteración de dichas estructuras para mejorar la vida útil de las capas implantadas [74].

En ocasiones es inconveniente para un sistema tribológico alterar una superficie, puesto que al aumentar la resistencia al desgaste, a la abrasión, la tenacidad o la dureza se puede afectar a la superficie contraria [98], es entonces necesario definir los parámetros convenientes para ambas superficies involucradas y sus afectaciones. Se busca que los recubrimientos tengan suficiente dureza para las herramientas de corte, pero la mayoría de las aplicaciones tribológicas necesitan revestimientos resistentes y de baja fricción [92], un enfoque acertado para realizar estudios en esta materia debe tener en cuenta tres niveles distintos, dicho enfoque denominado triplete tribológico consiste en analizar el sistema de trabajo, el material de los dos cuerpos en contacto y las sustancias que se encuentren entre tales cuerpos [58].

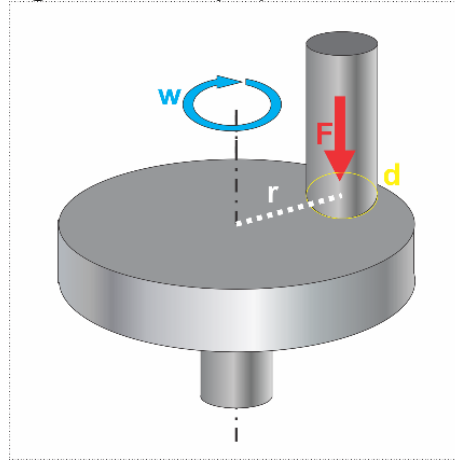
Los experimentos realizados por distintos investigadores han encontrado en el coeficiente de fricción y la velocidad de desgaste de la superficie una dependencia con la temperatura de trabajo. Es de anotar que un proceso de cambios cíclicos de temperatura en Titanio y Nitrógeno genera alteraciones de dichas propiedades de una manera no repetitiva, agregando un efecto de histéresis a la respuesta del material [60].

La indentación y el tribómetro de Pin sobre disco se utilizan para la caracterización de materiales obteniendo valores de dureza, velocidad de desgaste, módulo de elasticidad, plasticidad y coeficiente de fricción de los recubrimientos [7].

El ensayo de Pin sobre disco (ver figura 2) contempla comúnmente variables tales como la velocidad de rozamiento, la fuerza normal, la temperatura y la lubricidad de las superficies en contacto, el propósito de este ensayo es determinar el comportamiento de las mismas ante el desgaste influenciado por las variables mencionadas [40,70].

La indentación ha emergido como una técnica importante para evaluar el rendimiento mecánico de las superficies valorando dureza, modulo elástico y comportamiento plástico [41], sin embargo, el uso correcto de esta técnica requiere conocer sus particularidades y limitaciones para evitar interpretaciones erróneas [48]. El carácter heterogéneo de la microestructura recubierta (o implantada), la anisotropía elástica, la textura de crecimiento y el sustrato puede complicar la interpretación de datos de un proceso de nanoindentación [74].

Figura 2. Ensayo pin sobre disco



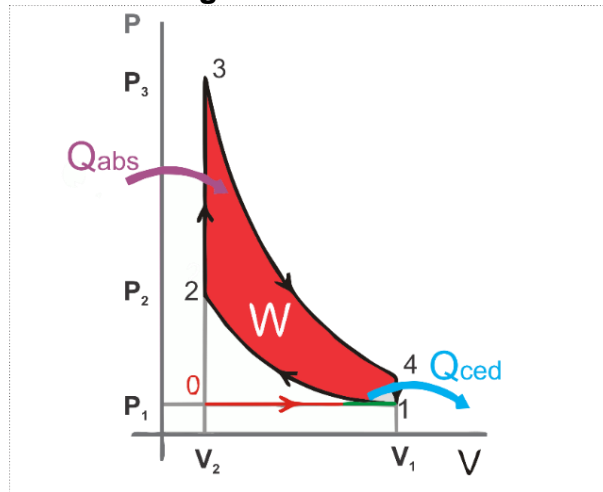
2.2 DINÁMICA DEL GRUPO PISTÓN

Los principales parámetros de funcionamiento de un motor de combustión interna son temperaturas y presiones en cada uno de los tiempos del ciclo de combustión, Suescún & Fuentes [80] aplican la teoría del fenómeno termodinámico para el cual se encuentran valores aproximados de tales parámetros.

El ciclo de trabajo de los motores a cuatro tiempos se conoce como ciclo Otto, debido al ingeniero alemán Nicolaus Otto (ver figura 3). Este ciclo está compuesto por seis etapas que son admisión, compresión adiabática, explosión, expansión adiabática, enfriamiento isocórico y escape [67].

La realización de los cálculos aproximados de las presiones y las temperaturas de las condiciones particulares del pistón seleccionado se desarrollan a continuación en base a la teoría aplicada por distintos autores [4,33,80], es de tener en cuenta que los modelos y ecuaciones planteadas asumen simplificaciones y suposiciones que permiten la aproximación teórica al ciclo real de trabajo. La información relacionada con la ciudad de Bucaramanga fue adquirida de estudios realizados por el IDEAM [31].

Figura 3. Ciclo Otto



La presión de admisión se aproxima a un valor de $P_a=95.19\text{kPa}$ en la ciudad de Bucaramanga a 960msnm y una presión atmosférica $P_0=90.6\text{kPa}$.

$$P_a = 1.05P_k \quad (1)$$

Dónde:

- ✓ P_k se asume igual a P_0 puesto que no existe sobre alimentación.
- ✓ P_a es la presión de alimentación.
- ✓ P_k es la presión en la entrada.
- ✓ P_0 es la presión atmosférica.

Luego, de la ecuación (1) se encuentra que $P_a=0.91\text{bar}$, la cual se encuentra entre el rango de presión de los motores de pequeña cilindrada, entre 0.8–1.6 (bar).

La temperatura de admisión del motor se calculó por medio de la ecuación (2) y su valor fue de $T_a=342\text{K}$, la cual se encuentra en el rango de los valores admisibles reportados (200K–2500K). La temperatura ambiente promedio ($T_0=295\text{K}$), considerada, fue la registrada en la ciudad de Bucaramanga.

$$T_a = \frac{T_0 + \Delta T + \phi \gamma_r T_r}{1 + \gamma_r} \quad (2)$$

Dónde:

- ✓ T_a es la temperatura de alimentación.
- ✓ ΔT es aproximadamente 20, para motores con formación externa de la mezcla según Jovaj [32].

- ✓ $\phi=1$, debido a que se desprecia la relación de los calores específicos entre la carga fresca y los gases residuales.
- ✓ $\gamma_r=0.06$, valor adimensional del coeficiente de gases residuales en un motor de combustión interna de 4T, [32].
- ✓ $T_r=800K$, rango de valores entre 700–900(K) en motores a gasolina de cuatro tiempos.

El cálculo de la presión en el ciclo de compresión se realiza mediante la ecuación (3), donde $P_c=15.39bar$, la cual se encuentra entre el rango de presiones de un motor de cuatro tiempos (4T) que trabaja entre 3000 y 9000(rpm).

$$P_c = P_a \epsilon^{n_1} \quad (3)$$

Dónde:

- ✓ $P_a=0.91bar$, es la presión de admisión.
- ✓ $\epsilon=8$, es la relación de compresión.
- ✓ $n_1=1.36$, es el exponente poli trópico medio de compresión.

El valor de la temperatura al final de la compresión $T_c=724K$ se determina a partir de la expresión matemática (4), se encuentra dentro de los rangos normales, 550–750(K).

$$T_c = T_a \epsilon^{(n_1-1)} \quad (4)$$

El valor de la temperatura máxima de combustión se encuentra con la ecuación (5), $T_{max}=1445K$, donde al analizar el proceso de combustión a volumen constante, se establece dentro del rango normal 1200–1500(K).

$$T_{max} = T_c + \frac{AF * Q_{LV} * \eta_c}{C_v} \quad (5)$$

Dónde:

- ✓ $AF=14.5$, es la mezcla estequiometría máxima recomendada por Pulkrabek [60].
- ✓ Q_{LV} se toma igual a 43000(kJ/kg), y es el poder calorífico inferior del combustible.
- ✓ $\eta_c=0.95$, es la eficiencia de combustión, se toman valores típicos entre 0.95 y 0.98 [65].
- ✓ $C_v=821(J/kgK)$, es el calor específico del combustible a volumen constante [60].

La ecuación (6) determina el valor de la presión máxima de combustión, la cual es $P_{max}=33.05bar=3.3MPa$, la cual se encuentra entre los valores normales para motores de combustión interna a gasolina de 4T con carburador, 0.35–0.50MPa.

$$P_{max} = \left(\frac{mu_0 + \gamma_r}{1 + \gamma_r} \right) * \frac{T_{max}}{T_c} P_c \quad (6)$$

Dónde:

- ✓ mu_0 es el coeficiente teórico de variación molecular y se toma igual a 1.08.

En la tabla 1, se reportan los valores obtenidos de presión y temperatura atmosférica, ciclo de compresión y máximas de combustión interna en un motor de 4T con carburador.

Tabla 1. Presiones y temperaturas en motor de combustión interna de 4T a carburador

PRESIONES (bar)		TEMPERATURAS (K)	
Pa	0.91	Ta	342
Pc	15.39	Tc	724
Pmax	33.05	Tmax	1445

Los valores de las fuerzas que actúan sobre el pistón se determinan por medio del método de la segunda ley de Newton [80] (ver ecuación 7), partiendo de la cinemática del mecanismo manivela, biela embolo, donde se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- ✓ El bulón sirve como elemento de conexión y forma parte integral del pistón, de modo que no se tiene en cuenta las reacciones existentes entre bulón-pistón.
- ✓ Los elementos que componen el mecanismo se asumen como cuerpos rígidos sin deformación.
- ✓ El movimiento se limita a un plano en donde se describe el recorrido bidimensional.

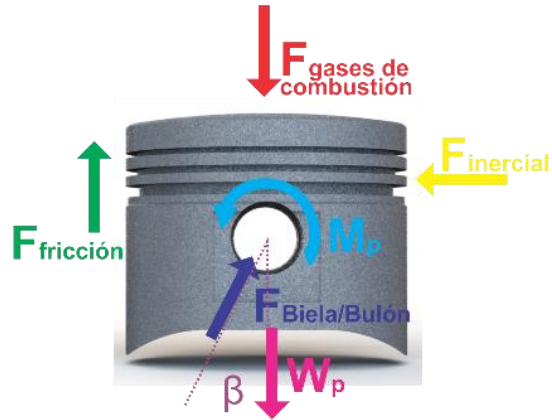
En la figura 4 se presenta el diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan sobre el pistón y aplicando la segunda ley de movimiento de Newton se obtiene la expresión matemática (7).

$$\sum F_y = F_g + W_p + F_b \cos \beta + F_f = m_p \ddot{s} \quad (7)$$

Dónde:

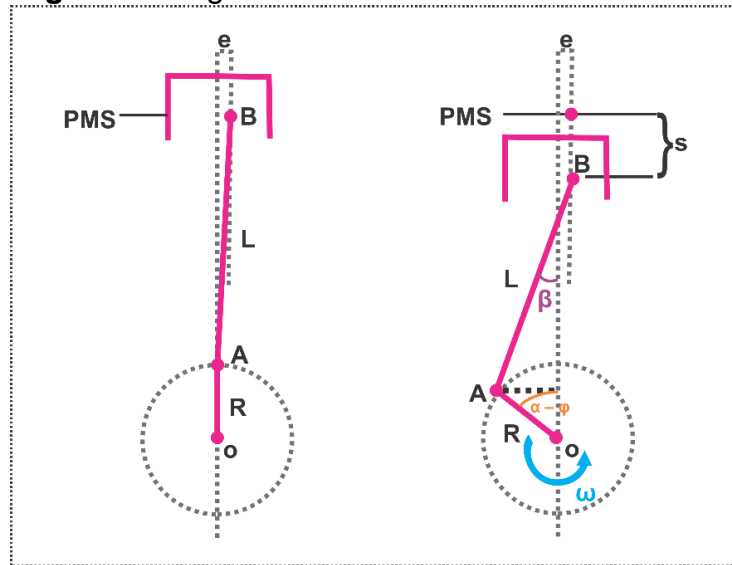
- ✓ F_g es la fuerza de los gases de combustión en Newton.
- ✓ W_p es el peso del pistón Newton.
- ✓ F_b es la fuerza ejercida por la biela sobre el bulón Newton.
- ✓ F_f es la fuerza de fricción en Newton.
- ✓ $m_p \ddot{s}$ es la fuerza inercial del pistón en Newton.

Figura 4. Diagrama de cuerpo libre del pistón



Por medio del desarrollo del método IMEP (Indicated Mean Effective Pressure), se realiza el esquema cinemático ilustrado en la figura 5, donde, Montoya [1] propone la ecuación (8) que determina la fuerza de fricción ejercida sobre el conjunto pistón-cilindro.

Figura 5. Diagrama del mecanismo manivela-biela



$$F_f = F_g + W_p + F_b \cos \beta - m_p \ddot{s} + \frac{W'_b \cos \beta}{\cos \beta + \tan \beta \sin \beta} + \frac{m'_b \cos \beta (a'_{Gx} \tan \beta - a'_{Gy})}{\cos \beta + \tan \beta \sin \beta} \quad (8)$$

Se han obtenido distintos valores de la fuerza de fricción (220N [84], 900N [80], 1994N [62] y 2500N [1]) tanto en estudios teóricos como experimentales en los que han variado las condiciones de lubricación, el régimen de giro, el ángulo de cigüeñal, los materiales, la compresión y la mezcla de la combustión [1], en un motor 4T con carburador de mediana cilindrada, entre 1000–3000(rpm).

2.3 MODIFICACIÓN SUPERFICIAL

Durante los últimos años, las tecnologías aplicadas a la ingeniería de superficies han tenido una creciente atención por parte de las comunidades científicas e industriales [31]. Existen distintas técnicas, químicas o físicas, utilizadas para modificar las superficies de los materiales [45].

La primera clasificación hallada entre las técnicas de modificación superficial de materiales, es debida a las interacciones químicas que ocurren en la superficie, siendo que algunas permiten alteración de la estructura química del sustrato y otras únicamente permiten la unión o intercambio de iones en la interfaz de contacto.

A continuación, se presentan algunos procesos tecnológicos físico-químicos existentes y reportados por artículos científicos como resultado de investigaciones de actualidad.

2.3.1 Deposición Química a Vapor (Chemical Vapor Deposition - CVD)

La deposición química a vapor consiste en la modificación de un material mediante interacciones químicas de gases que se difunden por la superficie del material. A continuación, se presentan algunas técnicas que utilizan CVD:

- ✓ Deposición química de vapor mejorada por plasma (Plasma Enhanced CVD - PECVD) [91].
- ✓ Tratamiento de calor termoquímico (Thermochemical Heat Treatment - TCHT) (como nitruración o carbonitruración con oxidación IONITOX) [91].
- ✓ Deposición de vapor químico orgánico metálico (Metallic Organic Chemical Vapor Deposition - MOCVD) [20].
- ✓ Deposición química de vapor asistida por plasma (Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition - CVD) [20].
- ✓ Deposición química de vapor mejorada por plasma (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition - PECVD) [20]

2.3.2 Deposición Física a Vapor (Physical Vapor Deposition - PVD)

El proceso de PVD consiste en la aspersion de material particulado sobre la superficie del material, a la que se adhiere generando un recubrimiento. Un resumen de algunas de las técnicas que utilizan PVD se presenta a continuación:

- ✓ Deposición de iones (ion deposition) [70].
- ✓ Deposición de plasma (plasma deposition) [70].
- ✓ Deposición a laser pulsado (Pulsed Laser Deposition - PLD) [70].
- ✓ Deposición catódica (sputter deposition) [45].
- ✓ Deposición por arco de vapor (arc vapor deposition) [45].
- ✓ Deposición asistida por rayo de iones (Ion Beam Assisted Deposition - IBAD) [45].
- ✓ Deposición de área larga por arco filtrado (Large Area Filtered Arc Deposition - LAFAD) [7,24].
- ✓ Deposición de plasma de arco catódico (Cathodic Arc Plasma Deposition - CAPD) [20].
- ✓ Deposición de plasma catódico (Cathodic Arc Plasma Deposition - CAPD) [61].
- ✓ Deposición de cátodo en agujero caliente (Hot Hollow Cathod Deposition -HHCD) [61].
- ✓ Sistema de deposición de arco filtrado (Filtered Arc Deposition - FAD) [46].

Los procesos físicos de modificación superficial generalmente se realizan mediante las siguientes técnicas:

- ✓ Arco catódico de vacío (cathodic vacuum arc) [70].
- ✓ Pulverización térmica (termal spray) [91].
- ✓ Evaporación en vacío (vacuum evaporation) [45].
- ✓ Chapado iónico (ion plating) [35,45].
- ✓ Reactor de chorro de plasma de baja intensidad (low intensity plasma jet reactor) [2].
- ✓ Procesamiento asistido por plasma intensificado (Intenisified Plasma Assisted Processing - IPAP) [46].
- ✓ Pulverización direccional por explosión electro-térmica (Electro-Thermal Explosion Directional Spraying - EEDS) [32].
- ✓ Plasma de alta intensidad de energía pulsada (Pulsed High Energy Density Plasma - PHEDP) [21].
- ✓ Proceso de inmersión por plasma con descarga de arco remoto (remote arc discharge plasma immersion process) [25].

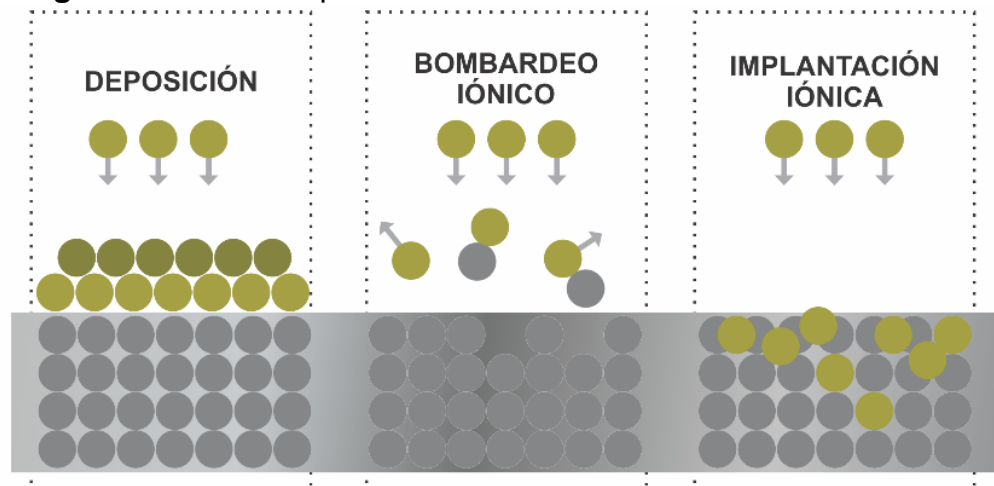
Si bien los procesos de deposición pueden realizarse en elementos específicos, los equipos de implantación iónica también permiten realizar este tipo procesos, en el caso particular del reactor JUPITER depende de la energía de ionización, donde la deposición ocurre a energías inferiores a 5keV, el bombardeo iónico entre 5keV y 10keV y la implantación iónica a valores superiores de los 10keV [16] (ver figura 6).

2.3.3 Bombardeo Iónico (Sputtering)

El sputtering consiste en bombardear con iones, generalmente de especies no metálicas, la superficie de un material, blanco (cátodo), con el objetivo de recubrir o limpiar la superficie en la que inciden (ver figura 6). Las técnicas más comunes que utilizan el proceso de sputtering son presentadas a continuación:

- ✓ Pulverización catódica asistida por iones (ion assisted sputtering) [70].
- ✓ Pulverización catódica (sputtering) [70].
- ✓ Pulverización catódica por magnetrón (magnetron sputtering) [20, 30].
- ✓ Evaporación por arco catódico (cathodic arc evaporation) [30].
- ✓ Pulverización catódica reactiva de tasa alta (High Rate Reactive Sputtering - HRRS) [61].
- ✓ Bombardeo desequilibrado magnetrón controlado por monitor de emisión de plasma (unbalanced magnetron sputtering controlled by plasma emission monitor) [94].

Figura 6. Procesos que ocurren al bombardear un blanco con iones



2.3.4 Implantación Iónica

La implantación iónica en principio se resume en la extracción de cierta cantidad de iones de una fuente que son dirigidos hacia una superficie con energía suficiente para penetrar y establecerse en la estructura interna del material (ver figura 6). A lo largo de este proceso existen una serie de fenómenos complejos que son motivo de investigación y no tienen un desarrollo teórico completo [83]. A continuación se presentan algunos de los procesos de que utilizan la técnica de implantación iónica en el tratamiento superficial de materiales.

- ✓ Implantación iónica por inmersión en plasma (Plasma Immersion Ion Implantation - PIII) [39,11].
- ✓ Implantación iónica con fuente de plasma (Plasma Source Ion Implantation - PSII) [11].
- ✓ Implantación iónica basada en plasma (Plasma Based Ion Implantation - PBII) [11].
- ✓ Implantación iónica de inmersión de plasma bajo voltaje pulsante (Fast Pulsing Low Voltage Plasma Immersion Ion Implantation - FLPIII) [82].
- ✓ Implantación iónica Tridimensional (Three Dimensional Ion Implantation - 3DIII).

3.2 PREPARACIÓN DE PROBETAS

El material investigado es una aleación de aluminio extraída de pistones de motocicletas, donde en el mercado de autopartes existen distintos tipos de pistones que varían en geometría dependiendo del modelo. En el caso particular de la motocicleta AKT TT 150, el pistón puede presentar una variación en el diámetro del agujero que aloja el bulón (ver círculo punteado en color rojo) y en la altura del pistón como se aprecia en la figura 8.

Figura 8. Distintos modelos del pistón AKT TT150



Existen fabricantes y comercializadores que han adoptado similares características de los repuestos originales de la marca AKT, buscando conservar las especificaciones auténticas de la autoparte (ver figura 9).

Figura 9. Distintas marcas que ofrecen la misma autoparte



La posibilidad de reparar motores rectificando y encamisando el cilindro aleteado ha llevado a comercializar pistones de distintos diámetros, los de medida estándar y con 0.25mm o 0.5mm más de diámetro (ver figura 10).

Figura 10. Distintos diámetros de pistón



Adicionalmente, existen pistones con recubrimiento que tienen un costo adicional del 10 y 15% en relación a los que se comercializan sin recubrimiento, los cuales suponen un mejor desempeño y una mayor durabilidad, siendo un ejemplo de la aplicación de la ciencia e ingeniería de materiales en la industria (ver figura 11).

Figura 11. Pistones modificados superficialmente por el fabricante



Teniendo en cuenta el problema planteado en el trabajo de investigación, se seleccionó el pistón sin recubrimiento (en blanco), con el propósito de evitar alteraciones que se pudiesen presentar en el modelo experimental debido a la técnica de modificación superficial utilizada y al desprendimiento evidenciado de las

capas externas del mismo. En la figura 12 se presenta el diseño asistido por computador (CAD) del pistón AKT TT 150 +025 REF: 707749 modelo 2010 sin recubrimiento, donde el plano y el archivo parte se reporta en el anexo A. En la figura 13 se reporta un listado, encontrado en la literatura, con las especificaciones de los materiales, en especial las de las aleaciones de aluminio, utilizados en la fabricación de émbolos, los cuales no son publicados por el fabricante [38].

Figura 12. Renderizado del pistón elaborado en CAD

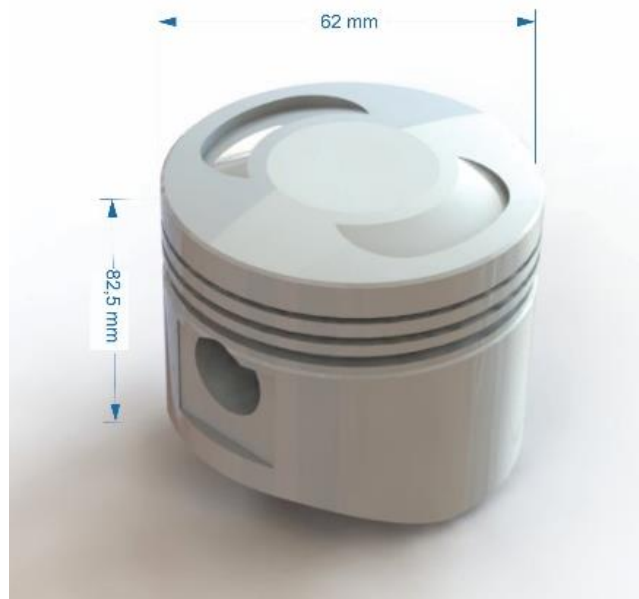


Figura 13. Materiales para émbolos

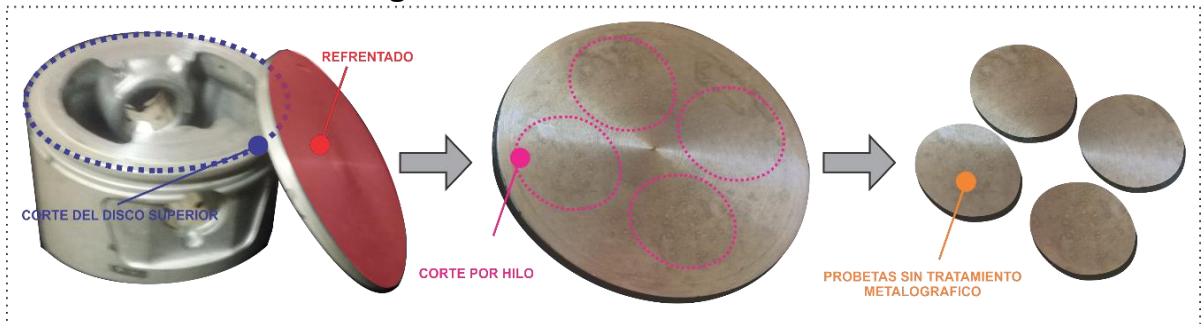
GRUPO	DESIGNACIÓN	%Cu	%Si	%Fe	%Ni	%Co	%Mn	%Mg	%Ti	%Al	PROCESAMIENTO DE FABRICACIÓN	TRATAMIENTO	DUREZA BRIENELL A 20°C	COEFICIENTE DE CONDUCTIBILIDAD cal/cm²**C	COEFICIENTE DE DILATACIÓN x10 ⁻⁶	
Aleación Aluminio - Silicio	Eutéctica	KS 245	4,5	14	0,5	1,5	-	1	0,7	-	Resto	Coquilla	Sin tratamiento - Revenido	130 - 170	0,27	20 - 21
												Estampado	Sin tratamiento - Revenido	85 - 140		
	Eutéctica	KS 1275, Nitral 132c,	0,8 - 2	~13	~0,8	0,8 - 2,5	-	-	~1	-	Resto	Coquilla	Sin tratamiento - Revenido	110 - 135	0,32 - 0,34	22
												Estampado	Sin tratamiento - Revenido	100 - 120		
	Hiper Eutéctica	Alusil, KS 280, EC 138	1,5	18 - 22	0,5 - 1	hasta 1,5	1,2	0,7	0,7	-	Resto	Coquilla	Sin tratamiento - Revenido	100 - 120	0,27	~18
												Estampado	Sin tratamiento - Revenido	110 - 130		

FUENTE: List, Hans. Motores de combustión interna: desgaste coste de explotación y rentabilidad. 2 ed. Barcelona: Labor, 1944. p. 464.

Dada la complejidad de la geometría presente en las paredes laterales del pistón, la necesidad de fabricar probetas en forma de disco y la homogeneidad del material, se seleccionó la zona plana superior del pistón para extraer las probetas (ver figura 14). Con el propósito de tener una superficie totalmente plana, se realizó un

refrentado, posteriormente se cortó un disco de aproximadamente 3 mm de espesor y se realizó un corte con hilo, donde de cada pistón se obtuvieron entre dos y cuatro discos de 18 mm de diámetro aproximadamente.

Figura 14. Elaboración de discos



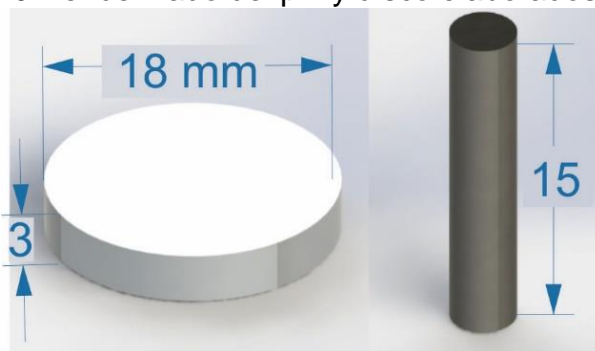
La fabricación de los pines, requeridos en los ensayos de pin sobre disco, se procedió mediante la separación de la camisa del cilindro de sus respectivas aletas, donde posteriormente se realizó un corte longitudinal, permitiendo extraer barras de 5 mm de espesor, luego las barras fueron torneadas dando forma circular a su sección transversal y finalmente se cortaron secciones de 15mm de alto (ver figura 15).

Figura 15. Elaboración de pines



En la figura 16 se presenta el diseño asistido por computador (CAD) del pin y los planos de las piezas fabricadas se encuentran reportados en el anexo A.

Figura 16 Renderizado del pin y disco elaborados en CAD



3.2.1 Preparación Metalográfica

La preparación superficial de cada probeta se realizó con papel abrasivo de carburo de silicio grado No. 80, 240, 400, 600, 1200 en la máquina pulidora de marca Metaserv referencia 2000 (ver figura 17).

Figura 17. Preparación superficial de sustratos



3.2.2 Limpieza por Ultrasonido

Las grasas e impurezas de los sustratos son minimizadas mediante una limpieza en un baño ultrasónico, durante un tiempo de 30 minutos en solución de agua jabón y 30 minutos en alcohol industrial al 96%, en el limpiador ultrasónico marca Branson modelo 1510 (ver figura 18).

Figura 18. Limpiador Ultrasónico BRANSON



3.3 PROCESO DE MODIFICACIÓN SUPERFICIAL

Los discos de aluminio son modificados superficialmente con iones de Ti y N en el reactor JUPITER del grupo de investigación FITEK de la escuela de física de la Universidad Industrial de Santander.

El reactor está compuesto por seis dispositivos básicos (ver figura 19):

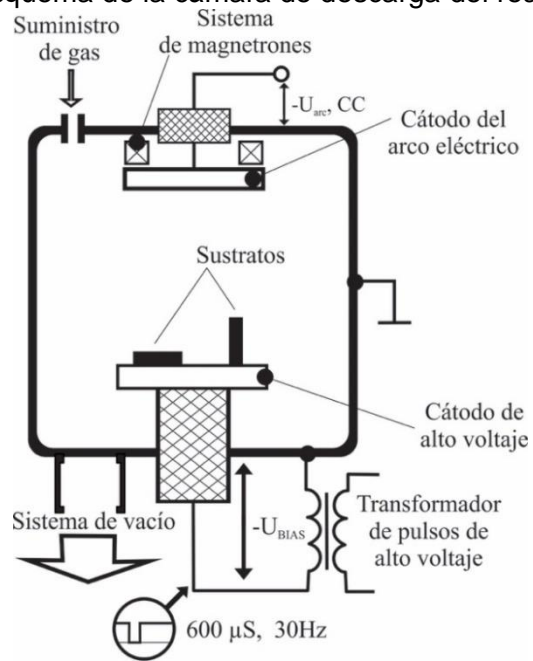
- 1) Osciloscopio
- 2) Fuente de arco eléctrico Miller
- 3) Cámara de descargas
- 4) Sistema de vacío
- 5) Generador de pulsos de voltaje
- 6) Tablero de control

El esquema general de la cámara de descarga del reactor JUPITER se presenta en la Figura 20. Las dimensiones de la cámara del reactor son de $80 \times 70 \times 70 \text{cm}^3$. Los pulsos rectangulares de alta tensión son generados por un dispositivo electrónico, transformador de impulsos de alto voltaje, que se imponen a través del cátodo de alto voltaje. El cátodo de arco eléctrico y el cátodo de alto voltaje están dispuestos en lados opuestos de la cámara de descarga con el fin de crear condiciones favorables de los iones metálicos, producidos por la descarga de arco eléctrico, que son implantados en los sustratos metálicos ubicados sobre el cátodo de alto voltaje. Los sistemas de arco eléctrico y alto voltaje están aislados eléctricamente a pesar de que las paredes de la cámara sirven como ánodo en ambos sistemas. Las descargas de arco eléctrico y alto voltaje pueden funcionar independientemente sin perturbación mutua, permitiendo así encender una descarga de arco o una descarga de alto voltaje, o ambas simultáneamente. Este último caso se conoce como descarga híbrida, la cual proporciona un tratamiento superficial híbrido (Implantación + deposición). Los cátodos y la bomba de vacío turbo molecular son refrigerados por agua.

Figura 19. Reactor JUPITER

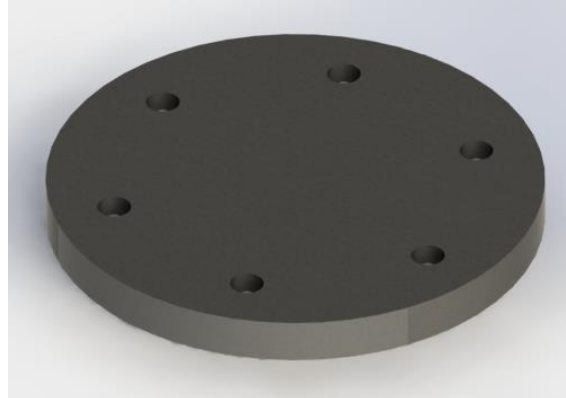


Figura 20. Esquema de la cámara de descarga del reactor JUPITER



Los sustratos fueron ubicados sobre soporte fabricado en acero al carbono. En la figura 21 se presenta el diseño del porta sustratos y los archivos correspondientes a la pieza y el plano son reportados en el anexo A.

Figura 21. Renderizado del porta sustratos diseñado en CAD



Los discos de aluminio junto con los pines fueron ubicados sobre el cátodo de la cámara de descargas del reactor JUPITER, la cual actúa como ánodo (ver figura 22).

Figura 22. Ubicación de sustratos en la cámara de descargas



Finalmente se cierra la cámara de descarga, se activan las válvulas y se procede a iniciar el vacío, inicialmente con la bomba mecánica se consigue una presión entre $1 \times 10^1 \text{Pa}$ y $2 \times 10^1 \text{Pa}$, posteriormente se activa la bomba turbo molecular hasta alcanzar una presión de fondo de vacío de aproximadamente $1 \times 10^{-4} \text{Pa}$ y finalmente

se introduce gas de argón (Ar) en la cámara y se establecen las condiciones que permiten generar un proceso de bombardeo iónico (sputtering), a una descarga de 5kV, ocasionando que los iones de argón colisionen con los átomos de las superficies de los sustratos y realicen un decapado iónico removiendo impurezas.

3.3.1 Bombardeo iónico

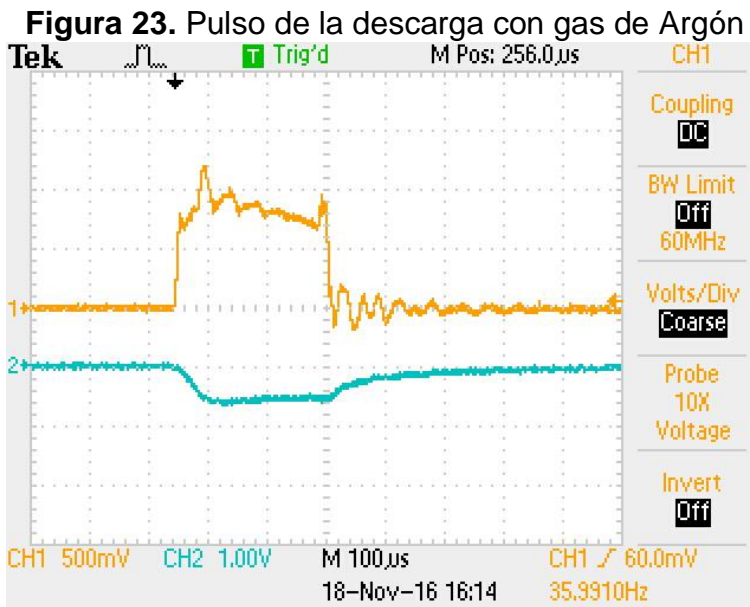
En el caso de los discos a ser modificados superficialmente, inicialmente se sometieron a una limpieza por bombardeo iónico con gas de argón en la cámara de descargas JUPITER momento previo al proceso de modificación superficial. El pulso de corriente de la descarga eléctrica, de color naranja en la figura 23, debe ser controlado por la presión del gas, con la ayuda de los registros reportados en la pantalla del osciloscopio. En la tabla 2 y 3 se presentan los parámetros establecidos en los dos procesos de bombardeo iónico realizados en la investigación.

Tabla 2. Parámetros del primer proceso de bombardeo iónico

PARÁMETROS SPUTTERING No. 1	
Tipo de gas	Argón
Presión de descarga (Pa)	1,8 > P > 2,4
Duración del pulso (ms)	0,25
Frecuencia del pulso (Hz)	30
Voltaje (kV)	5
Tiempo de exposición (min)	35

Tabla 3. Parámetros del segundo proceso de bombardeo iónico

PARÁMETROS SPUTTERING No. 2	
Tipo de gas	Argón
Presión de descarga (Pa)	2,2 > P > 2,8
Duración del pulso (ms)	0,25
Frecuencia del pulso (Hz)	30
Voltaje (kV)	5
Tiempo de exposición (min)	35



3.3.2 Implantación Iónica Tridimensional (3DII)

La modificación superficial, por la técnica 3DII, de los discos de aluminio se realiza por medio de una descarga híbrida (alto voltaje y arco eléctrico) en atmósfera de titanio y nitrógeno. En la investigación se realizaron dos procesos de implantación, donde la variable fue el tiempo de exposición y la presión de descarga. En cada proceso se implantaron siete discos y cinco discos quedaron sin implantar. Los parámetros definidos en cada proceso de implantación son reportados en la tabla 4 y 5 respectivamente.

Tabla 4. Parámetros de descarga híbrida en el proceso 1

PARÁMETROS IMPLANTACIÓN No. 1	
Especie a implantar	Ti+N
Presión de descarga (Pa)	0,8>P>1,2
Duración del pulso (ms)	0,25
Frecuencia del pulso (Hz)	30
Voltaje (kV)	10
Tiempo de exposición (min)	30
Tensión de arco eléctrico (V)	19,2
Corriente de arco eléctrico (A)	102

Tabla 5. Parámetros de descarga híbrida en el proceso 2

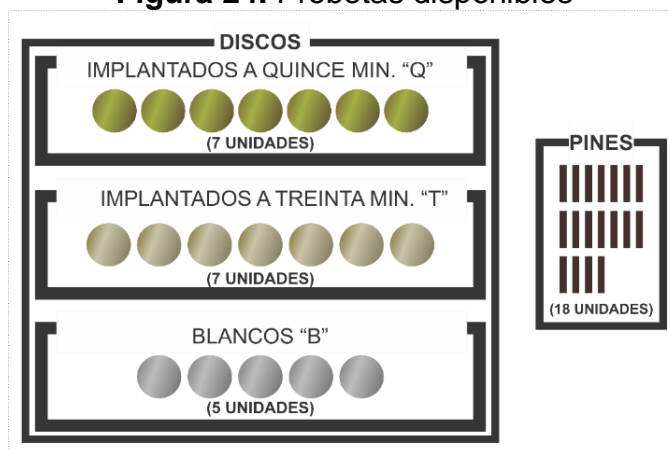
PARÁMETROS IMPLANTACIÓN No. 2	
Especie a implantar	Ti+N
Presión de descarga (Pa)	0,8>P>1,2
Duración del pulso (ms)	0,25
Frecuencia del pulso (Hz)	30
Voltaje (kV)	10
Tiempo de exposición (min)	15
Tensión de arco eléctrico (V)	19,2
Corriente de arco eléctrico (A)	102

La descarga híbrida fue monitoreada mediante los registros (pulsos de voltaje y corriente) obtenidos en la pantalla del osciloscopio y controlada con la presión de descarga.

3.4 CARACTERIZACIÓN SUPERFICIAL

El presente trabajo de investigación consistió en evaluar la influencia de la implantación iónica tridimensional mediante ensayo de pin sobre disco y técnicas de análisis instrumental. Las muestras fueron sometidas a ensayos tribométricos, espectroscopía de emisión óptica análisis elemental de absorción atómica por chispa de arco (OES), microscopia electrónica de barrido (SEM), espectroscopia de energía dispersiva (EDS) y espectroscopía Raman. En la figura 24 se muestra un inventario de pines y discos en sus distintas versiones, que serán utilizados en los ensayos de caracterización superficial.

Figura 24. Probetas disponibles



La distribución de las probetas por ensayo de caracterización superficial se reporta en la tabla 6. En pin sobre disco se utilizaron 12 pines en total, cada disco con su respectivo pin y en SEM-EDS sólo se analizó la superficie de un pin antes de ser ensayado tribológicamente (pin sobre disco).

Inventario de las probetas para los ensayos de caracterización superficial

ENSAYO	CANTIDAD DE DISCOS	CANTIDAD DE PINES	DETALLE
OES	1 Tipo B 1 Tipo Q 1 Tipo T	0	En la superficie del disco antes de los ensayos de pin sobre disco.
Pin sobre disco	4 Tipo B 4 Tipo Q 4 Tipo T	12	-
SEM-EDS	1 Tipo B 1 Tipo Q 1 Tipo T	1	Antes y después del ensayo de pin sobre disco en la región desgastada y no desgastada.
Raman	1 Tipo B 1 Tipo Q 1 Tipo T	0	Después del ensayo de pin sobre disco en la zona desgastada y no desgastada.

3.4.1 Inspección Visual

En toda evaluación superficial es importante realizar inicialmente una inspección visual, donde podemos evidenciar cambios en geometría, color, reflectividad, dimensiones, uniformidad superficial, entre otros.

Figura 25. Tonalidad superficial de los discos a distintos tiempos de exposición



En la figura 25, se evidencia un cambio en el color de las superficies de los sustratos implantados respecto a los no implantados. Las superficies implantadas durante 15 minutos adquieren una coloración cobriza, mientras las implantadas a 30 minutos tienen un color dorado, que es debido a las interacciones físicas complejas (interacción ion átomo) del proceso que aún son motivo de investigación, no se aprecia ningún tipo de discontinuidad superficial o variación en razón a su ubicación relativa al centro del cátodo.

3.4.2 Topografía Superficial

Las superficies de las probetas fueron analizadas mediante microscopía electrónica de barrido y espectroscopia de energía dispersiva de rayos x. El análisis de la topografía superficial fue realizado en el microscopio electrónico de barrido marca FEI, modelo QUANTA FEG 650 ambiental (ESEM) ubicado en el Laboratorio de Microscopia del Parque Tecnológico Guatiguará UIS (ver figura 26).

Figura 26. Microscopio electrónico de barrido QUANTA FEG 650. Laboratorio de Microscopia, Parque Tecnológico Guatiguará UIS



La microscopía permite observar y analizar el estado de la superficie implantada y no implantada, las irregularidades tales como micro gotas, discontinuidades o demás defectos superficiales y mediante la Espectroscopía se puede obtener un trazado de la composición de cada superficie. El microscopio electrónico de barrido obtiene imágenes de las superficies enviando un haz de electrones de alta energía (10keV–30keV), y recibiendo señales que se convierten en pulsos electrónicos que se amplifican y se interpretan. El sistema óptico se constituye por cinco módulos:

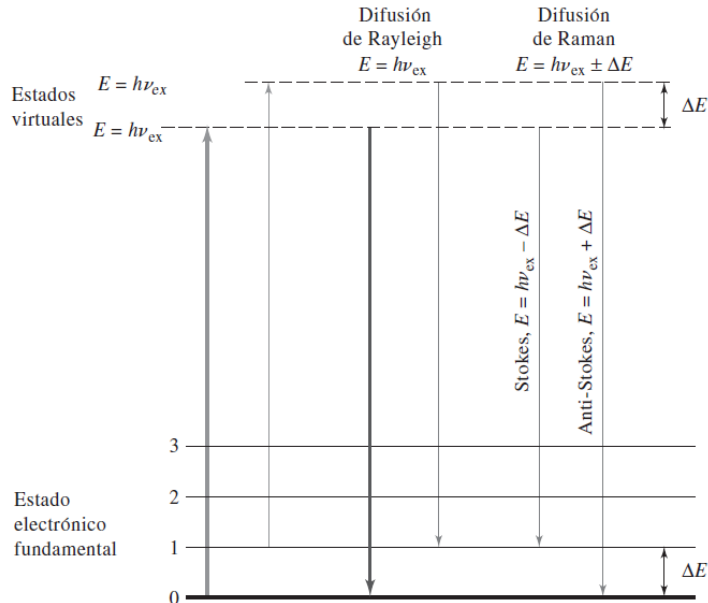
- ✓ Columna opto-electrónica generadora de un haz de electrones que alcanza la superficie a analizar.
- ✓ Sistema de doble deflexión del haz electrónico.
- ✓ Sistema de detección de señales recibidas de la muestra.
- ✓ Sistema de amplificación de señales.
- ✓ Sistema de visualización [22].

3.4.3 Espectroscopía Raman

La Espectroscopía Raman se basa en un fenómeno descubierto por el premio nobel de física Chandrasekara V. Raman, y es una técnica fotónica de alta resolución espacial y espectral que sólo hasta los años sesenta pudo ser aplicada con facilidad en la instrumentación de laboratorio. Los espectros Raman se obtienen al irradiar una superficie con una fuente de rayos laser de radiación monocromática, esta será absorbida, reflejada o transmitida por el material, la interacción provoca la dispersión de cierta parte de la radiación lo que lleva a las moléculas del material a un estado de excitación que posteriormente regresan a su estado normal mediante tres fenómenos diferentes conocidos como Rayleigh, Stokes y anti-Stokes (ver figura 27).

Los fenómenos presentados en la figura 27, permiten percibir las vibraciones moleculares y cristalinas latentes, lo cual es un proceso excepcional para la identificación de moléculas en cualquier estado físico [76]. Las superficies implantadas y no implantadas fueron analizadas mediante esta técnica en el equipo de marca HORIBA de referencia LabRam HR Evolution del Laboratorio de Espectroscopia de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín (ver figura 28). El espectroscopio consta de dos láseres (verde de 784nm e Infra Rojo de 532nm), un equipo de control y adquisición de datos, un microscopio óptico, un sensor de frecuencia y un sistema de transducción de señales.

Figura 27. Origen de la difusión de Rayleigh y de Raman



FUENTE: Skook, Douglas. Principios de análisis instrumental. 6 ed. México D.F.: Cengage learning editores, 2008. p 1063.

Figura 28. Espectroscopio Raman HORIBA LabRAM HR



3.4.3 Ensayo Pin Sobre Disco

Los ensayos de Pin sobre disco fueron realizados, de acuerdo a los parámetros estipulados por la norma ASTM G99-95 (ver anexo D), en la ciudad de Medellín con la cooperación del Laboratorio de Tribología de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia.

Las probetas tipo pin fueron limpiadas en el ultrasonido con agua destilada durante 5 min, en el limpiador ultrasónico marca ELMA referencia LC330H, posteriormente se secaron y se pesaron en la balanza de alta sensibilidad marca SARTORIUS referencia CP225D con legibilidad de 0.00001g (ver figura 28).

Figura 29. Proceso de limpieza y pesado de sustratos



Las partes que componen el equipo de pin sobre disco son (ver figura 30):

- ✓ Tablero de control.
- ✓ Celda de carga.
- ✓ Rotor.
- ✓ Interfaz de adquisición de datos de Labview.
- ✓ Sistema de sujeción de probetas.
- ✓ Contrapeso.
- ✓ Discos de carga de 30 a 4000 gramos.

Figura 30. Partes que componen el equipo de ensayos pin sobre disco



Cada disco se sujetó al eje del motor mediante el portadiscos diseñado y fabricado a la medida para tal fin (ver figura 31), y cada pin fue ubicado contra la cara del

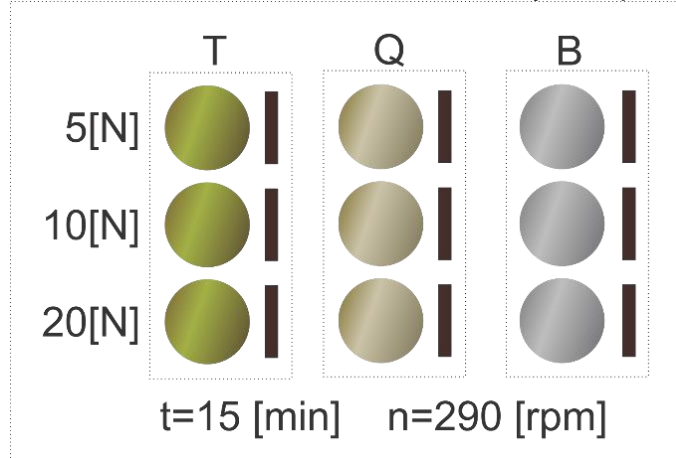
disco con un radio al centro de 6.25mm aproximadamente en su dispositivo de sujeción (porta pines).

Figura 31. Porta disco del ensayo de pin sobre disco



Posteriormente, se equilibró el brazo del porta pines ajustando su contrapeso, se ubicaron las cargas, de 5N, 10N y 20N, aplicadas entre el pin y el disco, se ajustó la celda de carga, se programó la velocidad a 290rpm y el tiempo de 15min como parámetros fijos en todos los ensayos. Finalmente, se bajaron las muestras, se limpiaron y se pesaron bajo las mismas indicaciones previas a la prueba. En la figura 32 se muestra la distribución de los sustratos por cada ensayo de pin sobre disco.

Figura 32. Distribución de sustratos en el ensayo de pin sobre disco



A cada pin y disco se le asignó un nombre de referencia con el propósito de hacer control y procesamiento de datos, de modo que QD1, QD2, QD3 corresponden a los discos implantados durante 15 minutos y ensayados a 5N, 10N y 20N respectivamente, la misma asignación para las demás muestras. El valor de la densidad del material fue obtenido mediante la selección de un sustrato de cada

tipo, donde las dimensiones fueron medidas con un micrómetro y el volumen fue calculado mediante la ecuación (9).

$$V = \pi * r^2 * h(\text{mm}^3) \quad (9)$$

Dónde:

- ✓ $r_{\text{disco}}=8.45\text{mm}$, es el radio del disco.
- ✓ $h_{\text{disco}}=2.5\text{mm}$, es la altura del disco.
- ✓ $r_{\text{pin}}=2.5\text{mm}$, es el radio del pin.
- ✓ $h_{\text{pin}}=14\text{mm}$, es la altura del pin.

Teniendo la masa de cada muestra medida en báscula de precisión, se obtuvo la densidad de ambos materiales por medio de la ecuación (10).

$$\rho = \frac{m}{V} (\text{g/mm}^3) \quad (10)$$

La distancia recorrida se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$DR = \pi * d * n * t * 1000(m) \quad (11)$$

Dónde:

- ✓ $d=12.5\text{mm}$, es el diámetro de la huella de desgaste.
- ✓ $n=290\text{rpm}$, son las revoluciones por minuto del disco.
- ✓ $t=15\text{min.}$ es el tiempo de duración del ensayo.

La masa perdida se calculó utilizando la ecuación (12), utilizando los valores de masas registrados por la balanza.

$$m_i = m_1 - m_2(g) \quad (12)$$

El volumen perdido de cada muestra se calculó con la ecuación (13):

$$VP = \frac{m_i}{\rho} (\text{mm}^3) \quad (13)$$

Dónde:

- ✓ m_i es la masa perdida de cada una de las muestras.
- ✓ ρ es la densidad de pin o disco, lo que corresponda.

La ecuación (14) se utiliza para calcular la tasa de desgaste, que es el cociente entre el volumen perdido y la distancia recorrida.

$$TD = \frac{VP}{DR} (\text{mm}^3/\text{m}) \quad (14)$$

Con las ecuaciones (15) y (16) se obtienen los valores de la resistencia al desgaste y la tasa de desgaste específica.

$$RD = \frac{1}{TD} (\text{m/mm}^3) \quad (15)$$

$$TDE = \frac{TD}{F} (\text{mm}^3/\text{Nm}) \quad (16)$$

El coeficiente de fricción entre el par tribológico se calcula mediante el uso de la información entregada por la celda de carga, la cual registra cada fracción de segundo un valor de fuerza tangencial, donde el valor del cociente entre la fuerza normal y la fuerza tangencial corresponde al coeficiente de fricción.

4 ANÁLISIS Y RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de los procesos de caracterización realizados con el propósito de evaluar la influencia de la modificación superficial en el material utilizado en la fabricación de pistones de motocicleta.

4.1 ESPECTROSCOPIA DE EMISIÓN ÓPTICA (OES)

Los sustratos utilizados en el trabajo de investigación fueron elaborados del material (aluminio) extraído de pistones de la motocicleta AKT TT 150 +025 REF: 707749 modelo 2010, donde la composición química elemental no es de conocimiento público. El uso del espectrómetro de emisión óptica (OES), análisis elemental de absorción atómica por chispa de arco, permitió obtener una composición porcentual de los elementos constituyentes del material del sustrato. El análisis se realizó en el espectroscopio de marca Bruker referencia Q4 TASMAN del laboratorio de espectroscopía del parque tecnológico de la Universidad Industrial de Santander en Piedecuesta, Colombia (ver Anexo B y tabla 7).

Tabla 6. Composición química elemental por espectroscopía de emisión óptica

ELEMENTO	DISCO B %	DISCO Q %	DISCO T %
Si	13.25	13.01	11.40
Fe	0.294	0.281	1.614
Cu	1.050	1.306	3.130
Mn	0.0052	0.0083	0.043
Mg	0.941	1.036	0.751
Cr	0.0027	0.0081	0.055
Ni	0.972	1.329	1.030
Zn	0.021	0.017	0.947
Ga	0.0077	0.048	0.048
Na	0.00056	0.00085	0.0035
V	0.020	0.079	0.144
Al	83.37	82.61	80.00

Los resultados, de la composición química elemental, obtenidos de la espectroscopía de emisión óptica y reportados en la tabla 7 fueron utilizados para simular mediante el software SRIM-TRIM, desarrollado por Ziegler J. [32], la concentración de iones por profundidad implantados en la superficie de los sustratos de aluminio. Adicionalmente, se realizó el análisis químico de composición

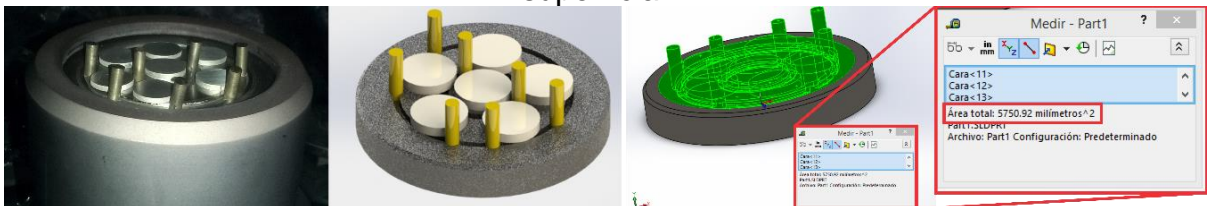
elemental de los discos implantados, donde se encuentran variaciones porcentuales entre los elementos constituyentes del material no implantado respecto a los implantados, aunque la técnica OES no permita determinar con precisión la cantidad porcentual de Nitrógeno (N) o Titanio (Ti) implantado.

4.2 ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD SUPERFICIAL DE IONES IMPLANTADOS

La cantidad de iones implantados por unidad de superficie (iones/cm²) se determina teniendo en cuenta el área total expuesta del cátodo (superficies a implantar) encargado de recibir los iones generados por la descarga de alto voltaje en el interior de la cámara de descargas, así como la densidad de corriente iónica, la duración del tratamiento, la frecuencia de repetición y duración del pulso y el coeficiente de emisión secundaria ion-electrón del material [65].

El área superficial del sólido, disposición de los sustratos en el disco porta probetas, que representa las superficies implantadas, fue calculada mediante el diseño asistido por computadora, reportando, de forma automática, un valor de $A=5750.92\text{mm}^2=57.5\text{cm}^2$ (ver figura 33).

Figura 33. Disposición de sustratos y modelado para la obtención del área superficial

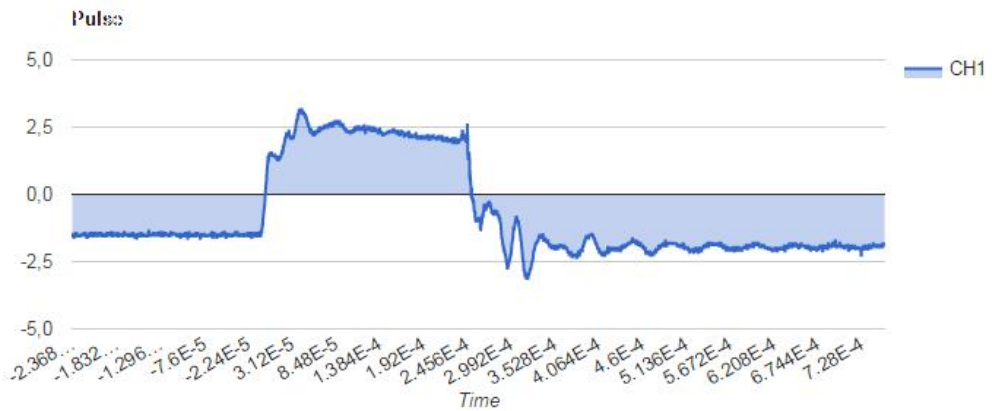


El cálculo de la densidad de iones implantados se realizó en el software reportado por Rivera et al. [63], que consiste en una aplicación web (http://sandbox1.ufps.edu.co:8080/ufps_3-dosisImplantada/) que utiliza los datos establecidos y adquiridos en el proceso experimental de implantación iónica realizado en el reactor JUPITER.

Los datos y la imagen del pulso de corriente obtenido por el osciloscopio, deben ser cargados en el sistema (ver figura 34), los valores de la frecuencia de pulso, tiempo de descarga, área total expuesta, número de carga iónica y coeficiente de emisión secundaria deben ser ingresados. El valor de coeficiente de emisión secundaria utilizado fue el reportado por Shamin et al. [73] (ver figura 35). La dosis estimada en cada uno de los procesos realizados en la investigación, se presenta en la tabla de datos 8.

Figura 34. Información del pulso de corriente cargada al sistema

Estimation of Superficial implanted dose



La figura 3 corresponde al cálculo de la estimación de densidad de iones de Ti y N implantados en las superficies de los discos durante un tiempo de 15 minutos.

Figura 35. Valores de los parámetros experimentales ingresados al sistema



Tabla 7. Estimación de la dosis implantada en cada uno de los procesos.

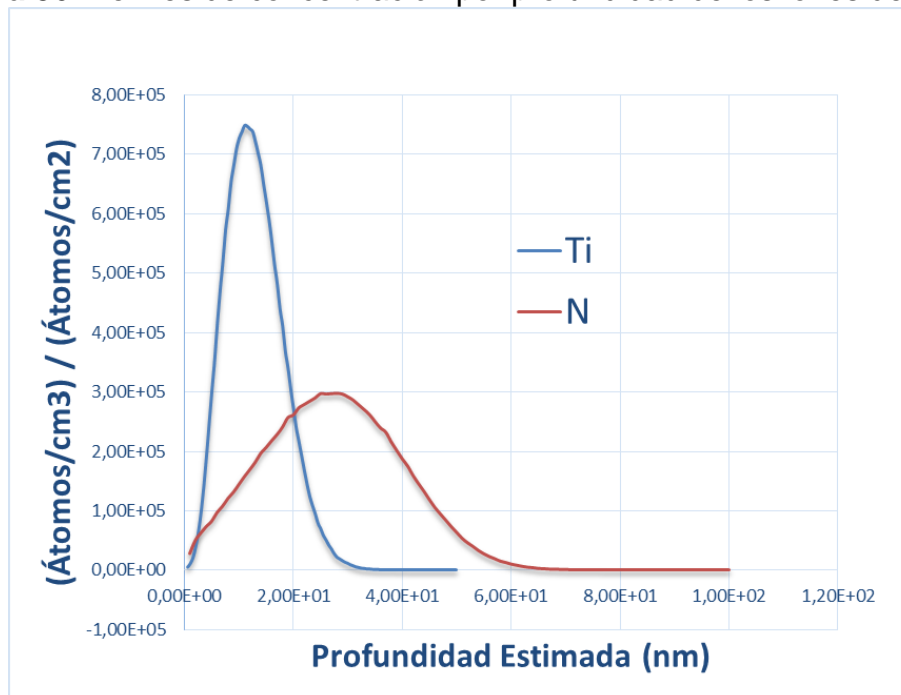
VOLTAJE DE DESCARGA (keV)	TIEMPO DE DESCARGA (min)	DOSIS IMPLANTADA (iones/cm ²)
10	30	1.40625x10 ²³
10	15	7.03125x10 ²²

Se entiende que, en los fenómenos físicos, las interacciones cinéticas y las variables a controlar tienen un papel importante en la generación de la corriente iónica, de modo que en la obtención de pulsos estables es importante mantener un control adecuado de la presión de la cámara en los rangos definidos experimentalmente.

4.3 ESTIMACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN POR PROFUNDIDAD DE IONES IMPLANTADOS

En la figura 36 se presentan los perfiles estimados de la concentración por profundidad de los iones de Ti (ver curva de color azul) y N (ver curva de color naranja) implantados con una descarga eléctrica de 10kV. Se observa en la figura 36 que los iones de titanio y nitrógeno implantados en los sustratos, cuya composición elemental fue obtenida con la técnica OES, tienen un máximo de concentración a 12.5nm y 26.8nm respectivamente. Además, se percibe que los iones de N alcanzan una mayor profundidad respecto a los de Ti, lo cual es de esperarse, debido a que los iones de nitrógeno tienen mayor movilidad que los de titanio en la interacción ion-sólido. Los parámetros establecidos y resultados adicionales reportados por el software TRIM son presentados en el anexo C.

Figura 36. Perfiles de concentración por profundidad de los iones de Ti y N



4.4 ENSAYO PIN SOBRE DISCO

En la figura 37 se muestra el proceso de desgaste de las superficies no implantadas e implantadas con iones de Ti y N, donde se evidencia el desprendimiento de material particulado debido al contacto, en movimiento relativo, entre las superficies pin y disco. El estado final e inicial de las superficies de los discos y pines en el ensayo de desgaste son presentados en la figura 38 y 39.

Figura 37. Ensayo de pin sobre disco en: (a) disco B, (b) disco Q y (c) disco T

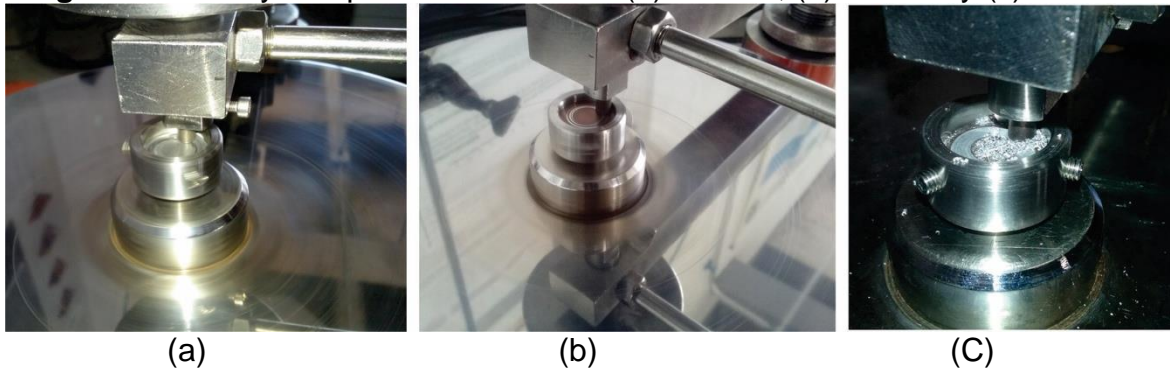
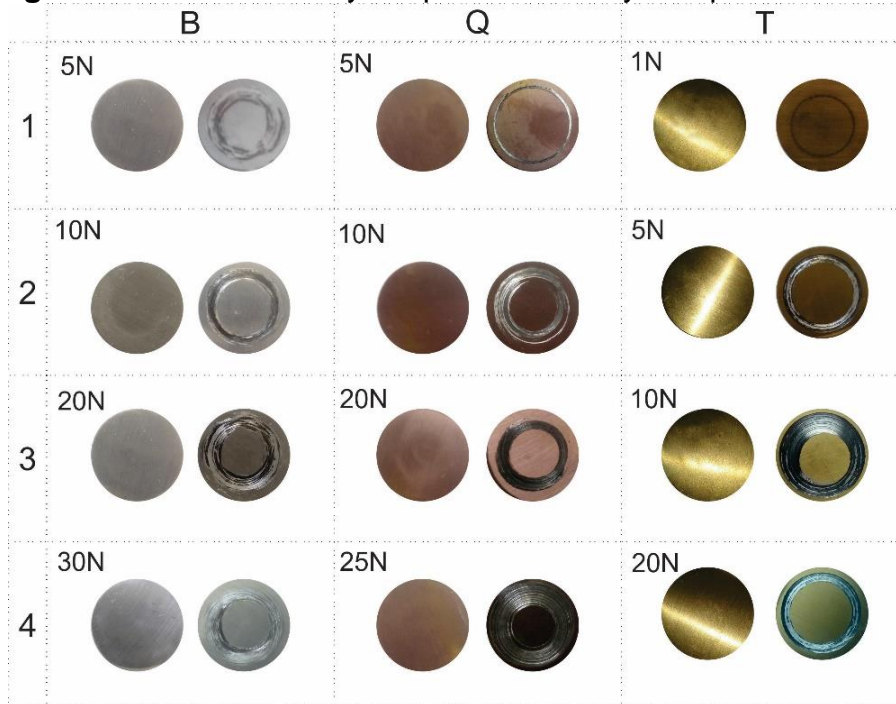
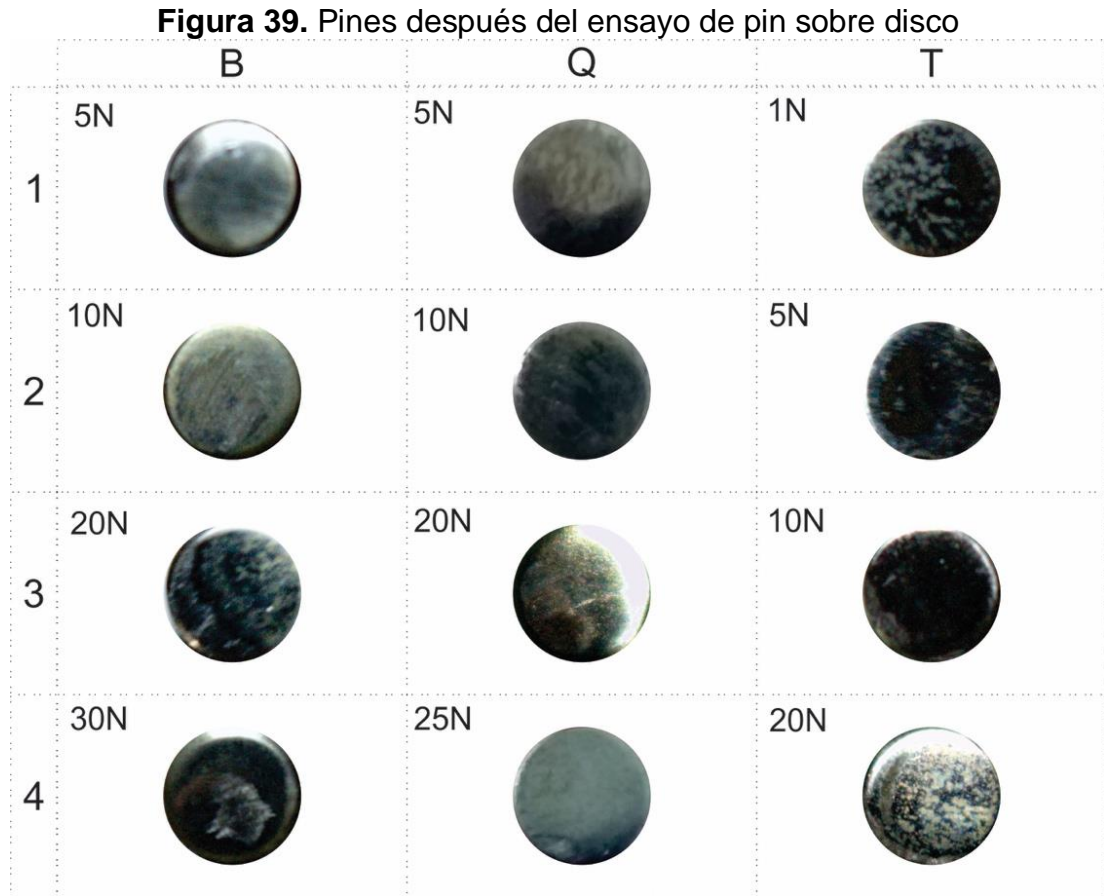


Figura 38. Discos antes y después del ensayo de pin sobre disco



En la figura 38 se muestran las imágenes de la superficie en cada uno de los discos B, Q y T antes (derecha) y después (izquierda) del ensayo de pin sobre disco realizados con diferente fuerza normal aplicada. El material particulado desprendido de los discos, durante los ensayos de desgaste, fue eliminado por medio de una limpieza en ultrasonido con agua destilada durante 5 minutos. En la en la figura 39 se muestra el estado final de la superficie de lo pines utilizados con cada uno de los discos en los ensayos de desgaste.



Los parámetros establecidos (velocidad angular, tiempo de ensayo, fuerza normal, tipo de superficie) y los resultados obtenidos de masa perdida, densidad, volumen perdido, distancia recorrida, tasa de desgaste y resistencia al desgaste en los ensayos de pin sobre disco son reportados en la tabla 9.

Tabla 8. Parámetros y resultados obtenidos en el ensayo de pin sobre disco

VELOCIDAD ANGULAR [RPM]	TIEMPO DE ENSAYO [min]	FUERZA NORMAL [N]	TIPO	SUPERFICIE	REFERENCIA	MASA DE LA MUESTRA ANTES DE ENSAYO [g]	MASA DE LA MUESTRA DESPUES DE ENSAYO [g]	MASA PERDIDA [g]	DENSIDAD DEL MATERIAL [g/mm ³]	VOLUMEN PERDIDO [mm ³]	DISTANCIA RECORRIDA [m]	TASA DE DESGASTE [mm ³ /m]	RESISTENCIA AL DESGASTE [m/mm ³]
290	15	5	DISCO	BLANCA	BD1	1,70337	1,70287	0,00050	0,002420892	0,20654	170,824	0,001209054	827,093
290	15	5	PIN	BLANCA	BP1	1,866	1,86593	0,00007	0,00660	0,01061	170,824	6,21236E-05	16096,944
290	15	10	DISCO	BLANCA	BD2	1,52441	1,52304	0,00137	0,002420892	0,56591	170,824	0,003312808	301,859
290	15	10	PIN	BLANCA	BP2	1,98852	1,98846	0,00006	0,00660	0,00910	170,824	5,32488E-05	18779,768
290	15	20	DISCO	BLANCA	BD3	1,39149	1,3843	0,00719	0,002420892	2,96998	170,824	0,017386199	57,517
290	15	20	PIN	BLANCA	BP3	1,95977	1,9591	0,00067	0,00660	0,10157	170,824	0,000594612	1681,770
290	15	5	DISCO	IMPLANT. 15min	QD1	1,51825	1,51816	0,00009	0,002420892	0,03718	170,824	0,00021763	4594,960
290	15	5	PIN	IMPLANT. 15min	QP1	1,83461	1,83458	0,00003	0,00660	0,00455	170,824	2,66244E-05	37559,535
290	15	10	DISCO	IMPLANT. 15min	QD2	1,77457	1,77322	0,00135	0,002420892	0,55765	170,824	0,003264446	306,331
290	15	10	PIN	IMPLANT. 15min	QP2	1,81357	1,81322	0,00035	0,00660	0,05306	170,824	0,000310618	3219,389
290	15	20	DISCO	IMPLANT. 15min	QD3	1,6747	1,67047	0,00423	0,002420892	1,74729	170,824	0,010228598	97,765
290	15	20	PIN	IMPLANT. 15min	QP3	1,94448	1,94424	0,00024	0,00660	0,03638	170,824	0,000212995	4694,942
290	15	5	DISCO	IMPLANT. 30min	TD2	1,52992	1,52984	0,00008	0,002420892	0,03305	170,824	0,000193449	5169,330
290	15	5	PIN	IMPLANT. 30min	TP2	1,93225	1,9321	0,00015	0,00660	0,02274	170,824	0,000133122	7511,907
290	15	10	DISCO	IMPLANT. 30min	TD3	1,69232	1,68738	0,00494	0,002420892	2,04057	170,824	0,011945455	83,714
290	15	10	PIN	IMPLANT. 30min	TP3	1,96947	1,96942	0,00005	0,00660	0,00758	170,824	4,4374E-05	22535,721
290	15	20	DISCO	IMPLANT. 30min	TD4	1,7622	1,7428	0,01940	0,002420892	8,01358	170,824	0,046911302	21,317
290	15	20	PIN	IMPLANT. 30min	TP4	1,93022	1,9301	0,00012	0,00660	0,01819	170,824	0,000106498	9389,884

Al comparar los resultados de la tasa de desgaste en función de la fuerza aplicada en los discos B (superficies no implantadas), se evidencia un comportamiento lineal donde la pendiente se mantiene dadas las condiciones de constantes de operación y la conservación de las propiedades físicas (ver tabla 10 y figura 40).

Figura 40. Fuerza aplicada versus tasa de desgaste de los discos B

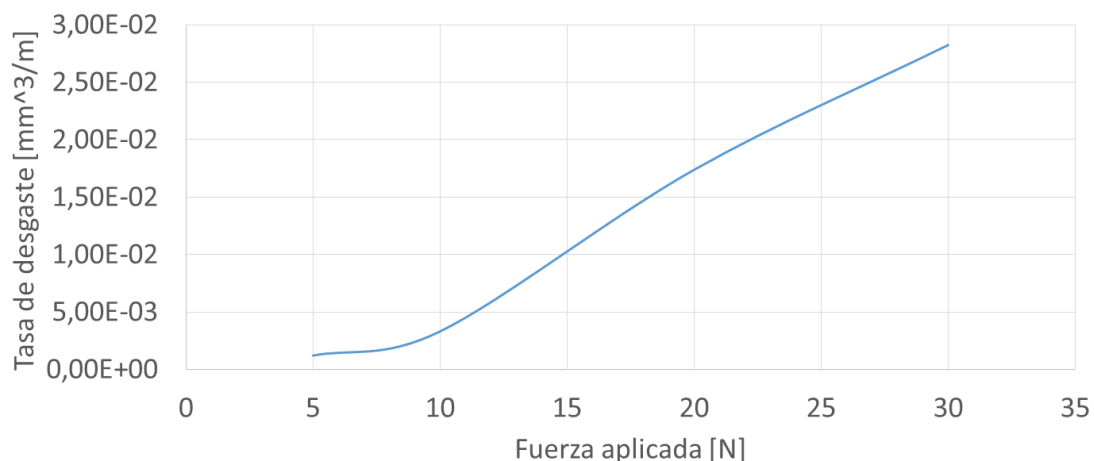


Tabla 9. Comparativo de la tasa de desgaste en los discos B

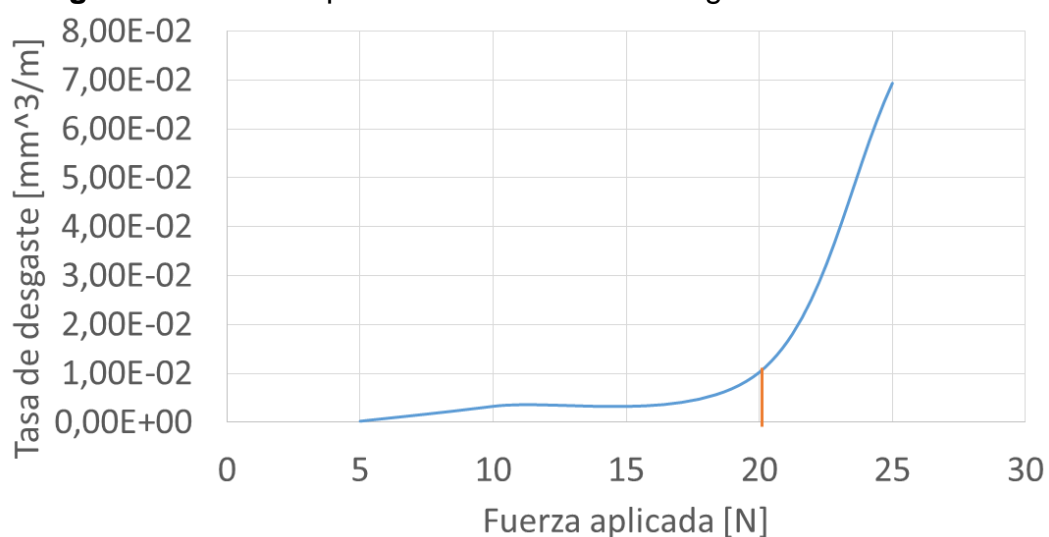
FUERZA NORMAL [N]	TIPO	SUPERFICIE	REFERENCIA	MASA DE LA MUESTRA ANTES DE ENSAYO [g]	MASA DE LA MUESTRA DESPUES DE ENSAYO [g]	MASA PERDIDA [g]	DENSIDAD DEL MATERIAL [g/mm ³]	VOLUMEN PERDIDO [mm ³]	DISTANCIA RECORRIDA [m]	TASA DE DESGASTE [mm ³ /m]
5	DISCO	BLANCA	BD1	1,70337	1,70287	0,00050	0,002420892	0,20654	170,824	0,001209054
10	DISCO	BLANCA	BD2	1,52441	1,52304	0,00137	0,002420892	0,56591	170,824	0,003312808
20	DISCO	BLANCA	BD3	1,39149	1,3843	0,00719	0,002420892	2,96998	170,824	0,017386199
30	DISCO	BLANCA	BD4	1,71397	1,70229	0,01168	0,002420892	4,82467	170,824	0,028243505

La tasa de desgaste, generada por las fuerzas aplicadas entre 5N y 20N, en los discos (Q) implantados durante 15 minutos sostiene una pendiente inferior a la obtenida en los discos no implantados, lo que indica una mayor resistencia al desgaste, mientras que los valores obtenidos con fuerzas superiores a 20N provocaron un desgaste excesivo en la superficie (ver tabla 11 y figura 41).

Tabla 10. Comparativo de la tasa de desgaste en los discos Q

FUERZA NORMAL [N]	TIPO	SUPERFICIE	REFERENCIA	MASA DE LA MUESTRA ANTES DE ENSAYO [g]	MASA DE LA MUESTRA DESPUES DE ENSAYO [g]	MASA PERDIDA [g]	DENSIDAD DEL MATERIAL [g/mm ³]	VOLUMEN PERDIDO [mm ³]	DISTANCIA RECORRIDA [m]	TASA DE DESGASTE [mm ³ /m]
5	DISCO	IMPLANT. 15min	QD1	1,51825	1,51816	0,00009	0,002420892	0,03718	170,824	0,00021763
10	DISCO	IMPLANT. 15min	QD2	1,77457	1,77322	0,00135	0,002420892	0,55765	170,824	0,003264446
20	DISCO	IMPLANT. 15min	QD3	1,6747	1,67047	0,00423	0,002420892	1,74729	170,824	0,010228598
25	DISCO	IMPLANT. 15min	QD4	1,419	1,39032	0,02868	0,002420892	11,84687	170,824	0,069351347

Figura 41. Fuerza aplicada versus tasa de desgaste de los discos Q

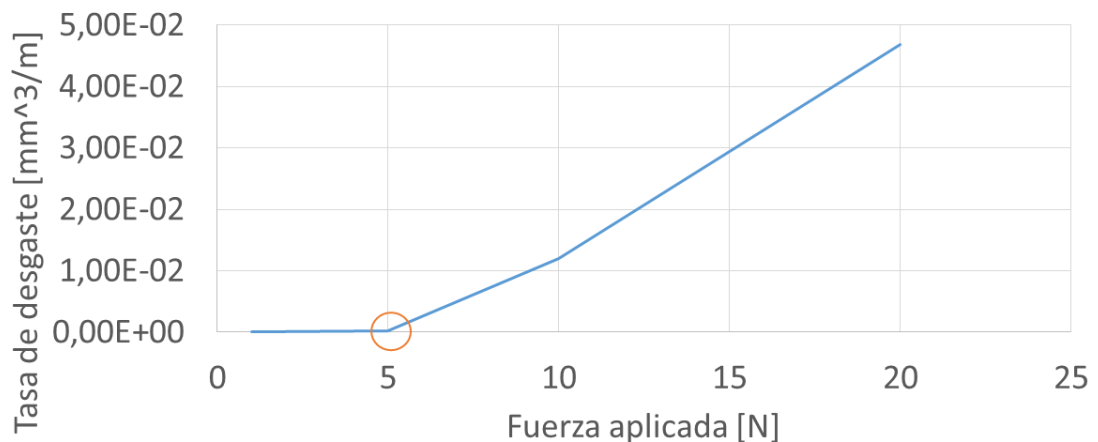


En los discos (T) implantados durante 30 minutos se presentó un comportamiento similar al encontrado en los discos B y Q, donde la tasa de desgaste fue mínima al aplicar fuerzas normales de 5N y se originó desgaste excesivo con el aumento de la fuerza normal (ver tabla 12 y figura 42).

Tabla 11. Comparativo de la tasa de desgaste en los discos T

FUERZA NORMAL [N]	TIPO	SUPERFICIE	REFERENCIA	MASA DE LA MUESTRA ANTES DE ENSAYO [g]	MASA DE LA MUESTRA DESPUES DE ENSAYO [g]	MASA PERDIDA [g]	DENSIDAD DEL MATERIAL [g/mm ³]	VOLUMEN PERDIDO [mm ³]	DISTANCIA RECORRIDA [m]	TASA DE DESGASTE [mm ³ /m]
1	DISCO	IMPLANT. 30min	TD1	1,54514	1,54512	0,00002	0,002420892	0,00826	170,824	4,83622E-05
5	DISCO	IMPLANT. 30min	TD2	1,52992	1,52984	0,00008	0,002420892	0,03305	170,824	0,000193449
10	DISCO	IMPLANT. 30min	TD3	1,69232	1,68738	0,00494	0,002420892	2,04057	170,824	0,011945455
20	DISCO	IMPLANT. 30min	TD4	1,7622	1,7428	0,01940	0,002420892	8,01358	170,824	0,046911302

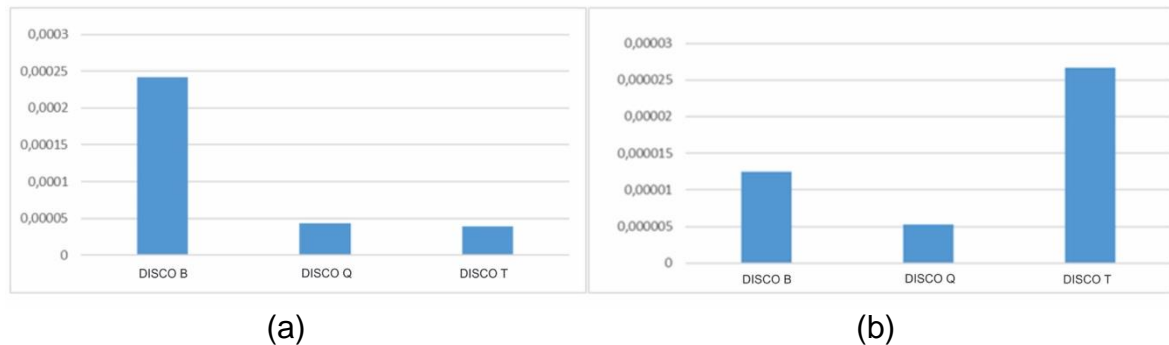
Figura 42. Fuerza aplicada versus tasa de desgaste de los discos T



Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los ensayos de desgaste de pin sobre disco, se realizó el comparativo del comportamiento de la tasa de desgaste con las superficies de los discos ensayados con fuerza normal aplicada de 5N, porque fue donde se evidenció un desgaste proporcional a la profundidad de iones implantados según lo encontrado en la simulación efectuada en el software TRIM (ver figura 36). En la figura 43(a) se aprecia que la superficie del disco B (no modificado superficialmente) fue la que sufrió el mayor desgaste, mientras que la tasa de desgaste en los discos Q y T (modificados con iones de Ti y N) fue mínima. Adicionalmente, en la figura 43 (b), se reporta la tasa de desgaste de los pines que se encuentran en contacto con los respectivos discos (B, Q y T), donde el pin del disco T sufrió el mayor esfuerzo superficial, presentando la mayor tasa de desgaste en comparación con los pines de los discos B y Q (ver figura 43(B)). El fenómeno ocurrido en el pin del disco T podría ser atribuido a un posible endurecimiento

superficial debido a la mayor concentración de iones de Ti y N implantados en la superficie del disco T (ver Figura 43).

Figura 43. Tasa de desgaste en distintos pares a las mismas condiciones de operación



Posterior al análisis de desgaste realizado en las superficies de los discos B, Q y T, se efectuó el estudio del coeficiente de fricción (COF), donde los registros obtenidos en los ensayos del disco B presentan mínimas variaciones mientras que en los discos modificados superficialmente con Ti y N (Q y T) se aprecia un cambio brusco cuando la fuerza normal aplicada se incrementa a valores superiores de los 5N, corroborando el comportamiento que tuvieron las superficies de los discos Q y T respecto a la tasa de desgaste. Las variaciones encontradas en el COF muy posiblemente son atribuidas a las afectaciones tales como el arranque del rotor, las diferencias de contacto entre las superficies pin-disco y el desgaste ocasionado por las partículas duras desprendidas, que tiene dos efectos: el desgaste producido por la abrasión y el incremento del esfuerzo superficial. En las figuras 44, 45 y 46 se encuentran reportados los coeficientes de fricción registrado en los discos B, Q y T respectivamente por cada fracción de segundo, donde el COF promedio fue calculado teniendo en cuenta las correcciones necesarias, tales como, la eliminación de los registros reportados en el arranque del ensayo y los valores erráticos adquiridos durante la prueba de pin sobre disco (ver tabla 13).

Figura 44. Coeficientes de fricción experimental de los discos B

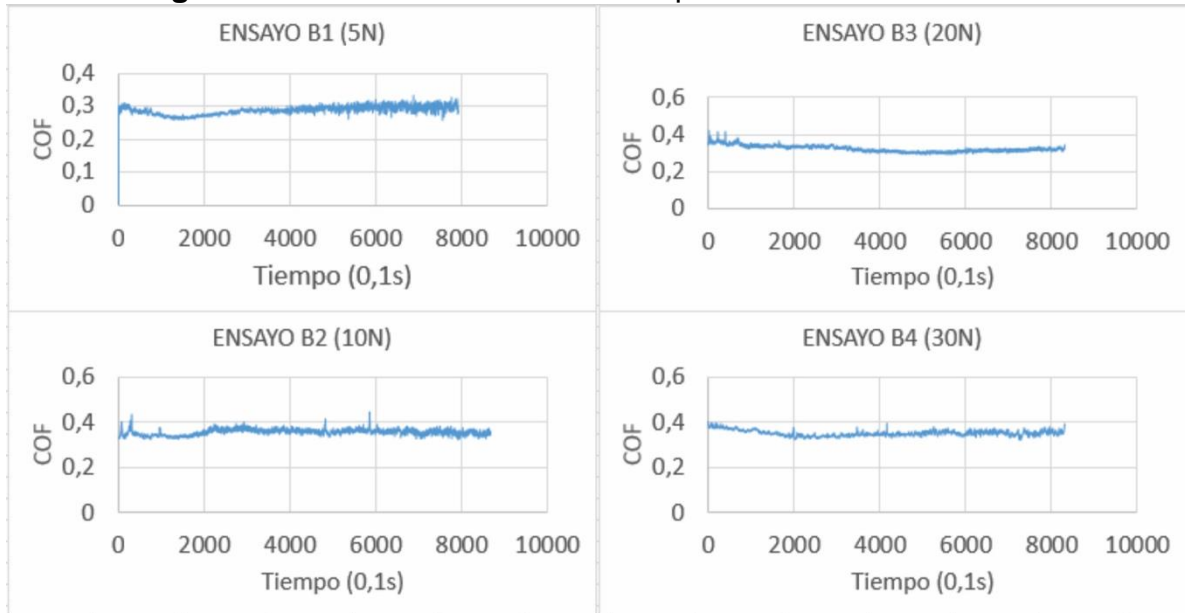


Figura 45. Coeficientes de fricción experimental de los discos Q

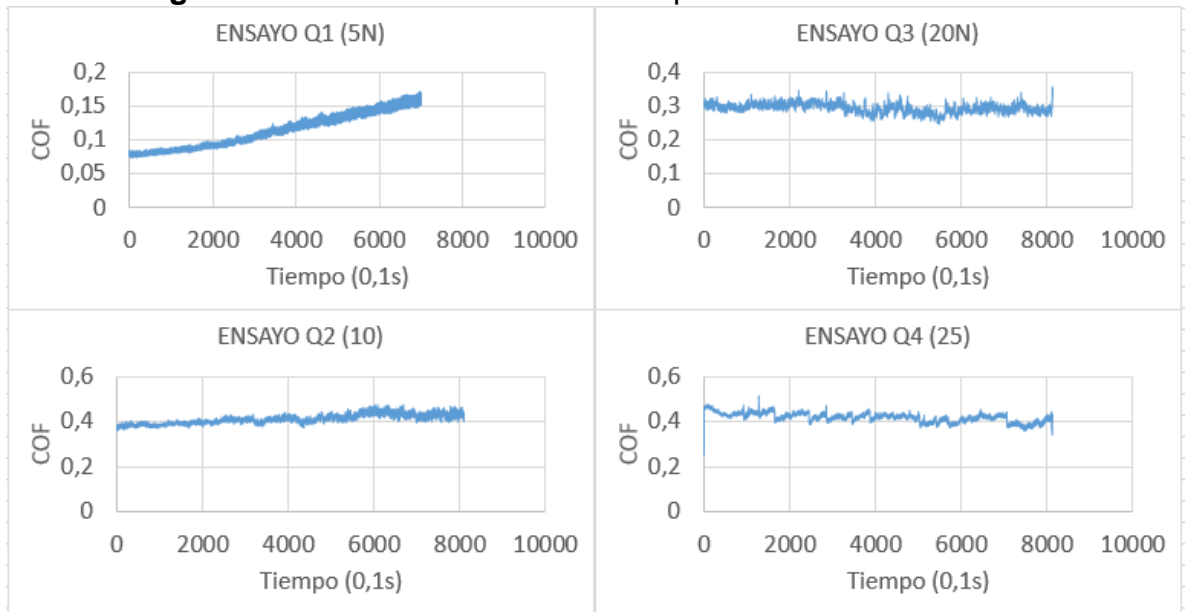
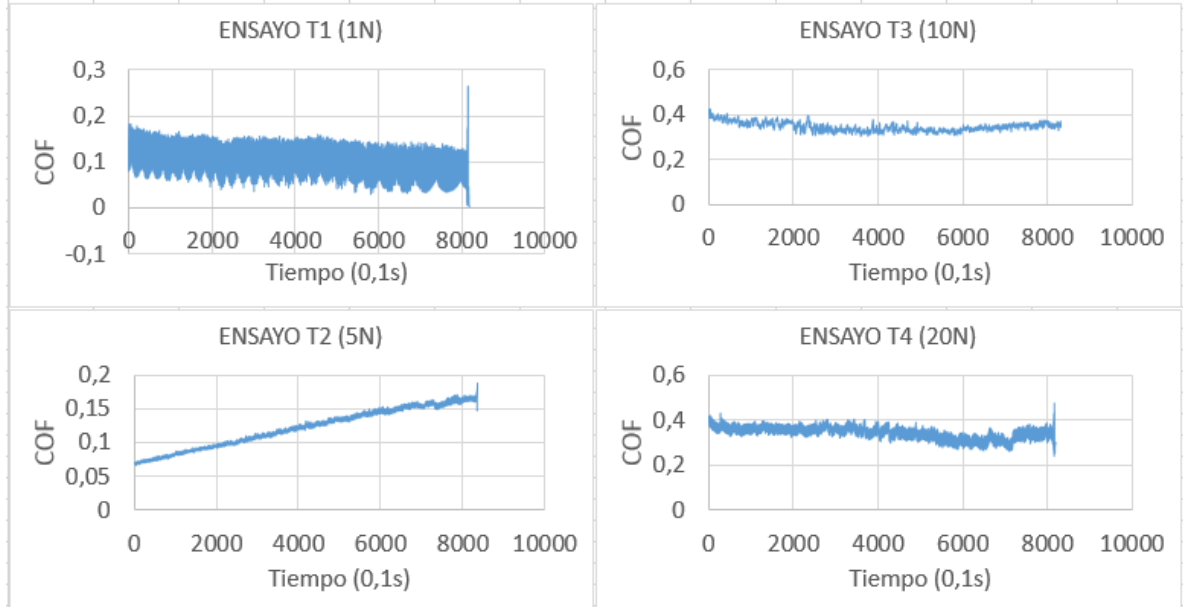


Figura 46. Coeficientes de fricción experimental de los discos T



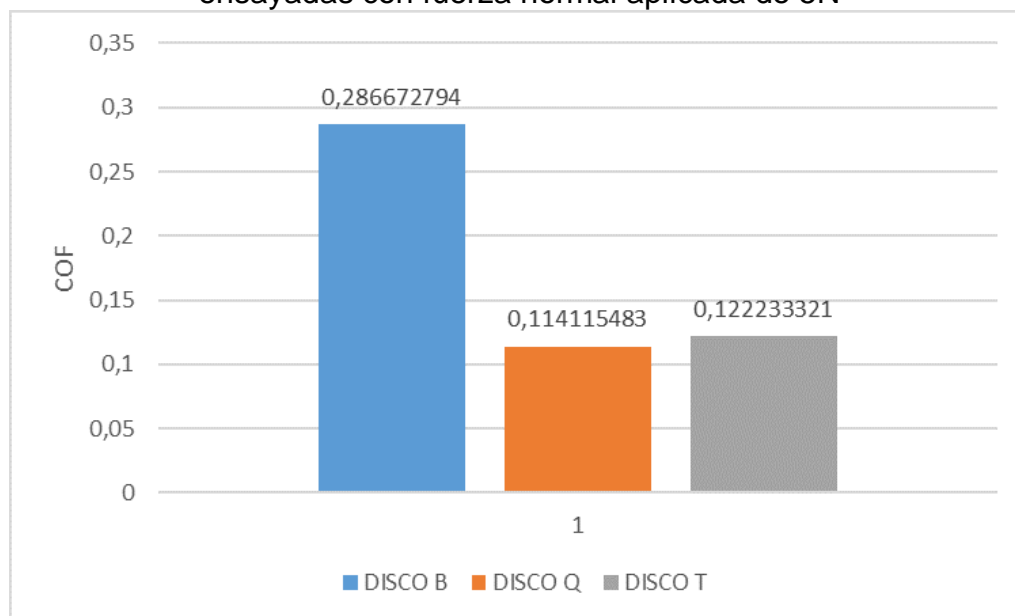
En la tabla 13 se reportan los coeficientes de fricción promedio calculados, entre 7000 valores registrados, en cada uno de los discos ensayados, donde las correcciones de los valores generados por las perturbaciones producidas por la inercia que conservan los elementos de la máquina fueron consideradas, omitiendo los valores erráticos y los registros posteriores al desgaste excesivo de la superficie implantada.

Tabla 12. Coeficientes de fricción promedio

B		Q		T	
FUERZA APLICADA	COF PROMEDIO	FUERZA APLICADA	COF PROMEDIO	FUERZA APLICADA	COF PROMEDIO
5 N	0,286672794	5 N	0,114115483	1 N	0,11710577
10 N	0,356701037	10 N	0,413099356	5 N	0,122233321
20 N	0,32671965	20 N	0,416671072	10 N	0,346462619
25 N	0,35139714	25 N	0,416671072	20 N	0,416

En la figura 47 se presenta el comportamiento del coeficiente de fricción encontrado en las superficies ensayadas con fuerza normal aplicada de 5N, donde se aprecia una disminución aproximadamente del 50% en los discos modificados superficialmente con iones de Ti y N respecto a los no tratados.

Figura 47. Comparativo del coeficiente de fricción en las distintas superficies ensayadas con fuerza normal aplicada de 5N



4.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

La verificación de los resultados obtenidos en el ensayo de pin sobre disco se realizó mediante el método de estadística inferencial denominado análisis de varianza (ANOVA).

4.5.1 Planteamiento de la Hipótesis

El coeficiente de fricción es una variable significativa que permite evaluar la influencia de la modificación superficial mediante la técnica 3DII en las probetas fabricadas y ensayadas bajo condiciones específicas establecidas en el capítulo 4. A continuación, se establecen las hipótesis considerando la varianza o invarianza de los resultados encontrados del ensayo de pin sobre disco en las distintas superficies.

- ✓ H0: Con un nivel de significancia estadística de $\alpha=0.05$, donde todas las superficies de las probetas darán el mismo resultado de coeficiente de fricción.
- ✓ H1: Con un nivel de significancia estadística de $\alpha=0.05$, donde por lo menos una de las superficies de las probetas utilizadas tendrá un resultado diferente de coeficiente de fricción.

Considerando un caso particular, se estudió el efecto de un único factor (la superficie) con tres variantes (discos B, Q y T) sobre la medida de la variable respuesta (valores de los coeficientes de fricción obtenidos a una fuerza de 5N) con determinada cantidad de datos (n). En la tabla 14 se presentan los parámetros seleccionados en el análisis estadístico prueba F de Fisher.

Tabla 13. Parámetros del análisis estadístico

B	Q	T	
$\text{COF}_{1}^{\text{B}}$	$\text{COF}_{1}^{\text{Q}}$	$\text{COF}_{1}^{\text{T}}$	
$\text{COF}_{2}^{\text{B}}$	$\text{COF}_{2}^{\text{Q}}$	$\text{COF}_{2}^{\text{T}}$	
.	.	.	
.	.	.	
.	.	.	
$\text{COF}_{n}^{\text{B}}$	$\text{COF}_{n}^{\text{Q}}$	$\text{COF}_{n}^{\text{T}}$	
$\text{COF}_{\text{PROM}}^{\text{B}}$	$\text{COF}_{\text{PROM}}^{\text{Q}}$	$\text{COF}_{\text{PROM}}^{\text{T}}$	$\text{COF}_{\text{PROM}}^{\text{PROM}}$

De acuerdo a la teoría reportada y recopilada por Mena R. & Villamizar S. [47], se busca cuantificar la variabilidad de los datos y comparar el resultado obtenido (ver ecuación 21) con la tasa de variabilidad aceptable en la distribución de Fisher.

Teniendo en cuenta la asignación de variables de la tabla 14 se realiza la suma de los cuadrados totales (SCT) como se muestra en la ecuación 18.

$$\text{SCT} = \sum_{i=1}^n (\text{COF}_i^{\text{B}} - \text{COF}_{\text{PROM}}^{\text{B}})^2 + \sum_{i=1}^n (\text{COF}_i^{\text{Q}} - \text{COF}_{\text{PROM}}^{\text{Q}})^2 + \sum_{i=1}^n (\text{COF}_i^{\text{T}} - \text{COF}_{\text{PROM}}^{\text{T}})^2 \quad (18)$$

La suma de los cuadrados de las desviaciones del promedio (SCF) en cada superficie con respecto al promedio general se calcula con la ecuación 19.

$$\text{SCF} = n * (\text{COF}_{\text{PROM}}^{\text{B}} - \text{COF}_{\text{PROM}}^{\text{PROM}})^2 + n * (\text{COF}_{\text{PROM}}^{\text{Q}} - \text{COF}_{\text{PROM}}^{\text{PROM}})^2 + n * (\text{COF}_{\text{PROM}}^{\text{T}} - \text{COF}_{\text{PROM}}^{\text{PROM}})^2 \quad (19)$$

La suma de los cuadrados residuales (SCR) de las desviaciones de cada dato con respecto al promedio de cada superficie es calculada con la ecuación 20.

$$\text{SCR} = \sum_{i=1}^n (\text{COF}_i^{\text{B}} - \text{COF}_{\text{PROM}}^{\text{B}})^2 + \sum_{i=1}^n (\text{COF}_i^{\text{Q}} - \text{COF}_{\text{PROM}}^{\text{Q}})^2 + \sum_{i=1}^n (\text{COF}_i^{\text{T}} - \text{COF}_{\text{PROM}}^{\text{T}})^2 \quad (20)$$

Posteriormente se determinan los grados de libertad, donde:

- ✓ GL_{SCT} es la cantidad de datos seleccionados – 1=(30–1)=29

- ✓ GL_{SCF} es la cantidad de superficies – 1 = (3–1)=2
- ✓ GL_{SCR} : $GL_{SCT}-GL_{SCF}=(29-2)=27$

Finalmente, con la ecuación 21 se calcula el valor estadístico F (F de Fischer calculado) el cual será comparado con el valor crítico de F de Fischer reportado en las tablas para un $\alpha=0.05$.

$$F = \frac{\frac{SCF}{GL_{SCF}}}{\frac{SCR}{GL_{SCR}}} \quad (21)$$

Donde:

- ✓ SCF es la suma de cuadrados factores.
- ✓ SCR es la suma de cuadrados residuales.
- ✓ GL son los grados de libertad de cada suma de cuadrados.

Si el valor de F encontrado es menor que el reportado por Fisher para un $\alpha=0.05$, significa que la hipótesis H_0 es verdadera. En la tabla 15 se reporta el valor estadístico de F calculado a partir de los resultados del coeficiente de fricción con fuerza normal aplicada de 5N.

Tabla 14. Estadístico F calculado del coeficiente de fricción a fuerza normal de 5N

ORIGEN VARIACIÓN	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	CUADRADO MEDIO	F CALCULADO
Total	0.30499	29		
Tratamientos	0.30587	2	0.152498	4667.97
residual	0.00088	27	3.26E-5	

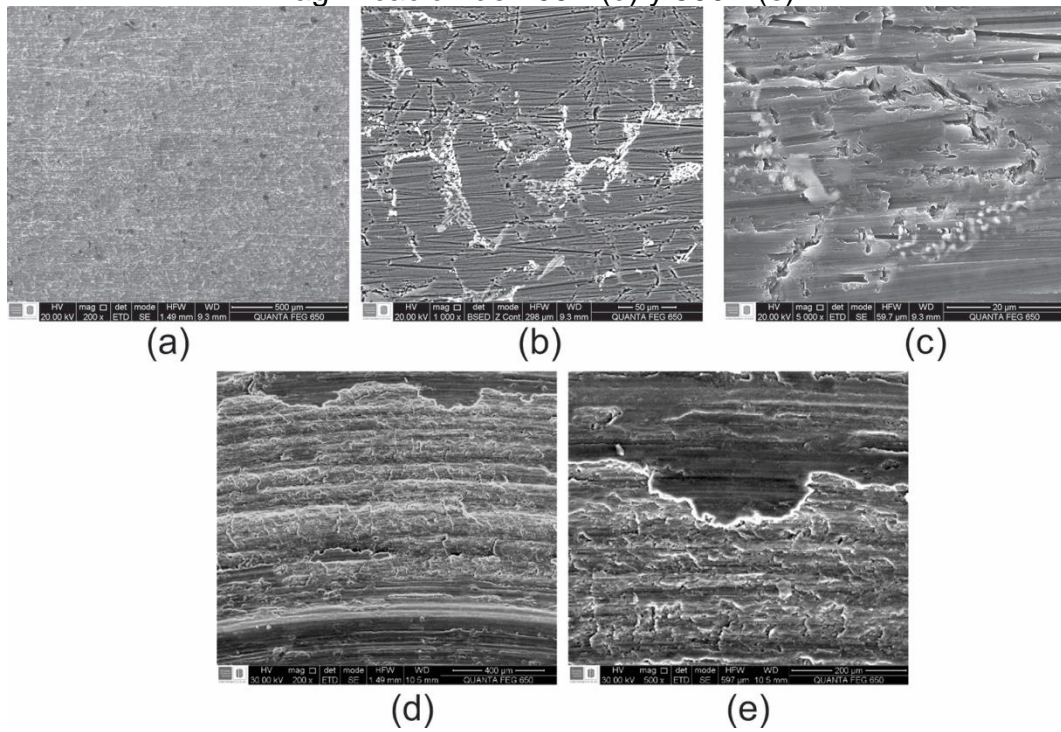
El valor de F de Fischer asignado e las tablas para $\alpha=0.05$ y con grados de libertad 2:27 es $F_{2,27}=3.35$, el cual es muy inferior al valor de F estadístico calculado a partir de los coeficientes de fricción con fuerza normal de 5N ($F_{Calculado} > F_{Fischer}$). De acuerdo a lo expresado anteriormente, se manifiesta que que la hipótesis H_0 es falsa, lo que significa que se cumple la hipótesis H_1 donde las superficies de los discos modificados con iones de Ti y N presentan diferencias significativas respecto a la superficie del disco no tratado, luego el modelo restringido fue el mejor.

4.6 ANÁLISIS POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) Y ESPECTROSCOPIA DE ENERGÍA DISPERSIVA (EDS)

Las micrografías obtenidas por SEM en la superficie de los discos B, Q y T (modificados y no modificados superficialmente con iones de Ti y N) antes y después del ensayo de pin sobre disco son presentadas en las figuras 48, 51, 53,

55, 57 y 59. Adicionalmente en las figuras 49, 50, 52, 54, 56, 58 y 60 se muestran los espectros adquiridos por EDS y en las tablas 16, 17, 18, 19, 20, 21 y 22 se reporta el análisis composicional de la superficie de los sustratos B, Q, T y pin antes y después del ensayo de desgaste de pin sobre disco con fuerza normal aplicada de 5N.

Figura 48. Micrografías SEM en el disco B. Superficie sin desgaste a una magnificación de 200X (a), 1000X (b) y 5000X (c). Superficie desgastada a una magnificación de 200X (d) y 500X (e).



En la figura 48 (a), (b) y (c) se aprecia la superficie no desgastada del disco B (sustratos de referencia, no modificados superficialmente), donde se observan algunas irregularidades debido a la preparación metalográfica realizada y a la presencia de óxidos producto de la sensibilidad superficial conseguida por la disminución del área superficial generada por el desbaste con papel de carburo de silicio hasta la referencia No 1200. En las micrografías (d) y (e) se muestra la superficie desgastada donde se evidencia la irregularidad del surco generado por el pin en el ensayo de desgaste con fuerza normal aplicada de 5N.

En la figura 49 se muestra el espectro de composición de los elementos presentes en la superficie no desgastada del disco B y en la tabla 16 los valores en porcentaje de masa (Wt%) y porcentaje atómico (At%) adquiridos por EDS. Cómo es de

esperarse, en la superficie de los sustratos se identifica un alto contenido de aluminio.

Figura 49. Espectro de composición EDS en la superficie del disco B sin desgaste

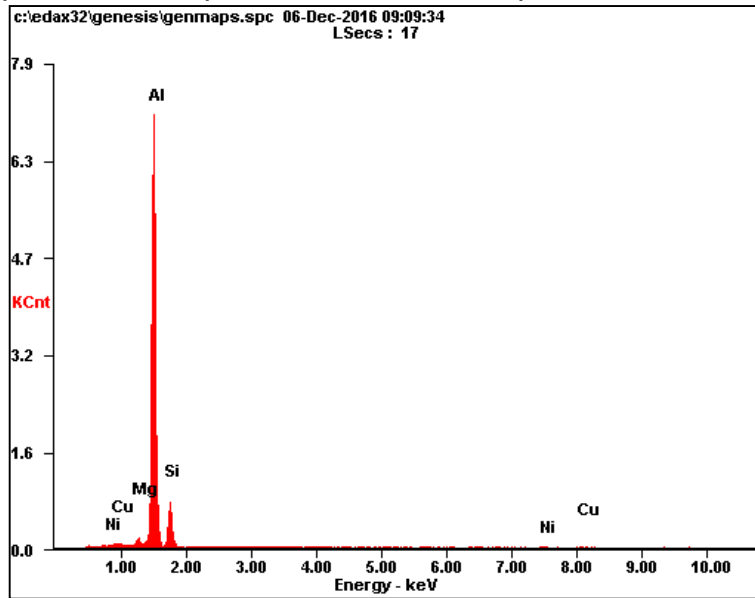


Tabla 15. Composición elemental EDS en la superficie del disco B sin desgaste

ELEMENTO	Wt%	At%
MgK	01.18	01.34
AlK	76.02	77.42
SiK	20.81	20.36
NiK	00.68	00.32
CuK	01.31	00.57
Matriz	Corrección	ZAF

Los espectros de composición y elementos presentes en la superficie desgastada el disco B durante los ensayos de pin sobre disco con fuerza normal aplicada de 5N son presentados en la figura 50 y tabla 17. En la superficie desgastada se evidencia la presencia de hierro, lo cual es atribuido al contacto entre las superficies pin-disco durante el ensayo de desgaste, teniendo en cuenta que los pines fueron fabricados en acero al carbono (material extraído de la camisa del cilindro).

Figura 50. Espectro de composición EDS del disco B en la superficie desgastada

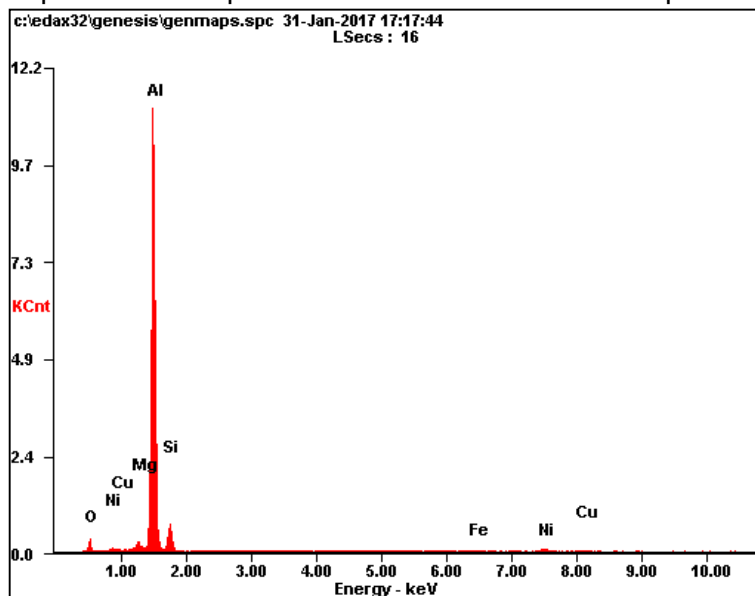
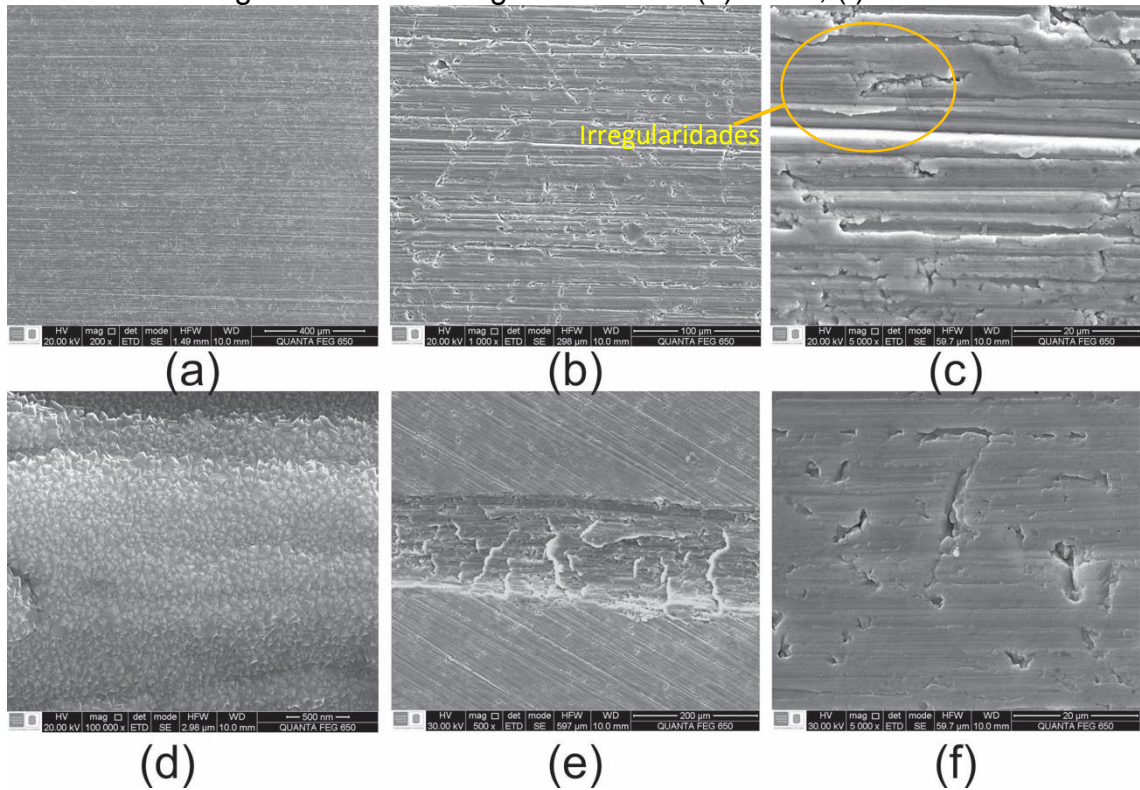


Tabla 16. Composición elemental EDS en la superficie desgastada del disco B

ELEMENTO	Wt%	At%
OK	09.95	15.44
MgK	01.54	01.64
AlK	70.08	67.16
SiK	15.60	14.37
NiK	01.66	00.73
CuK	01.31	00.46
Matriz	Corrección	ZAF

En la figura 51 se presentan las micrografías, a diferentes aumentos, de la superficie del sustrato modificado con iones de Ti y N durante 15 minutos (disco Q). Las irregularidades observadas en la superficie no desgastada de las micrografías (a), (b), (c) y (d) corresponden a las trazas generadas por la preparación metalográfica, a las impurezas adheridas a la superficie y a la formación de algunas micro gotas producidas durante la evaporación de la especie metálica (Ti) por el sistema de arco eléctrico del reactor JUPITER. Las micrografías (e) y (f) pertenecen a la superficie desgastada donde se evidencia la irregularidad del surco generado por el pin en el ensayo de desgaste con fuerza normal aplicada de 5N.

Figura 51. Micrográfica SEM en el Disco Q. Superficie sin desgaste a una magnificación de (a) 200X, (b) 1000X, (c) 5000X, (d) 100000X. Superficie desgastada a una magnificación de (e) 500X, (f) 5000X



El espectro de composición y los porcentajes de elementos detectados en un área de la superficie modificada con iones de Ti y N durante 15 minutos (disco Q), se muestran en la figura 52 y en la tabla 18 respectivamente. El análisis EDS identificó un porcentaje considerable de titanio y nitrógeno en la superficie de las probetas sin desgastar, comprobando que la superficie de los discos Q fueron modificadas con estas especies. El alto valor de porcentaje de aluminio obtenido es de esperarse por ser el material base del sustrato.

Figura 52. Espectro de composición EDS en la superficie sin desgaste del disco Q

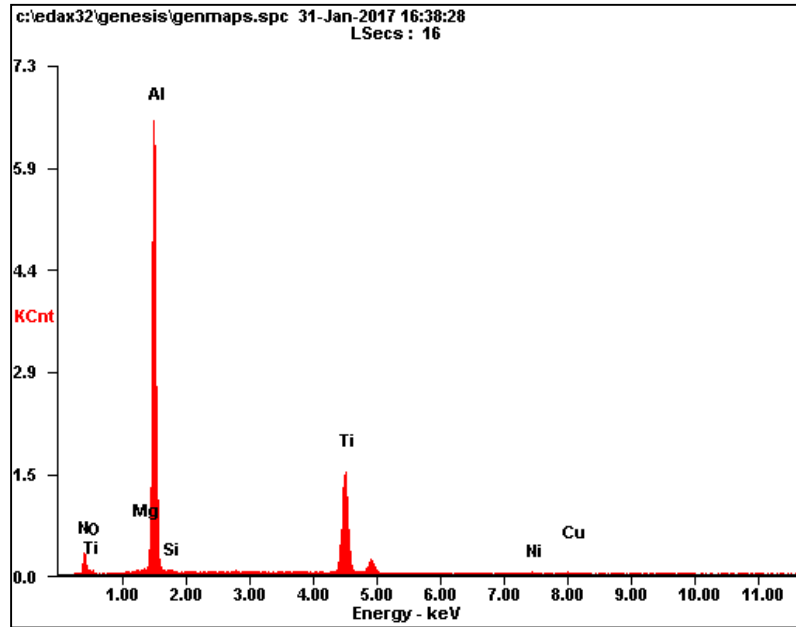
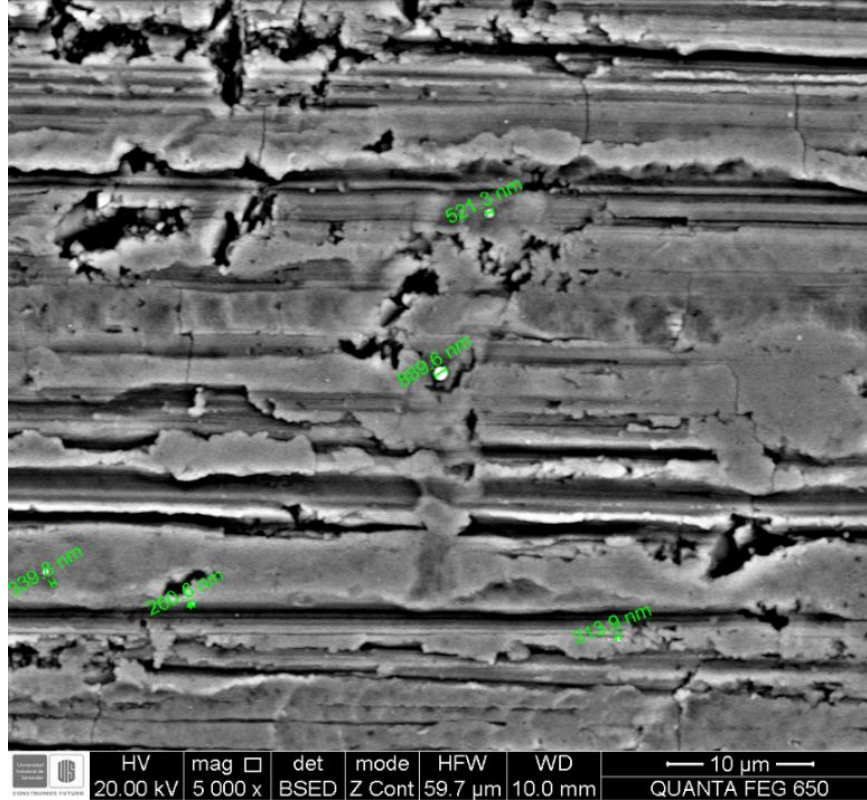


Tabla 17. Composición elemental EDS en la superficie sin desgaste del disco Q

ELEMENTO	Wt%	At%
NK	18.90	33.27
OK	02.34	03.61
MgK	00.44	00.45
AlK	55.64	50.86
SiK	00.82	00.72
TiK	20.55	10.58
NiK	00.37	00.16
CuK	00.93	00.36
Matriz	Corrección	ZAF

La micrografía de la figura 53 muestra la presencia de micro gotas con diámetro aproximado de 400 micrómetros en promedio sobre la superficie modificada con iones de Ti y N durante 15 minutos (disco Q). Las micro gotas son deformaciones generadas por la solidificación del material evaporado por el sistema de arco eléctrico del reactor JUPITER.

Figura 53. Micro gotas en la superficie del disco Q

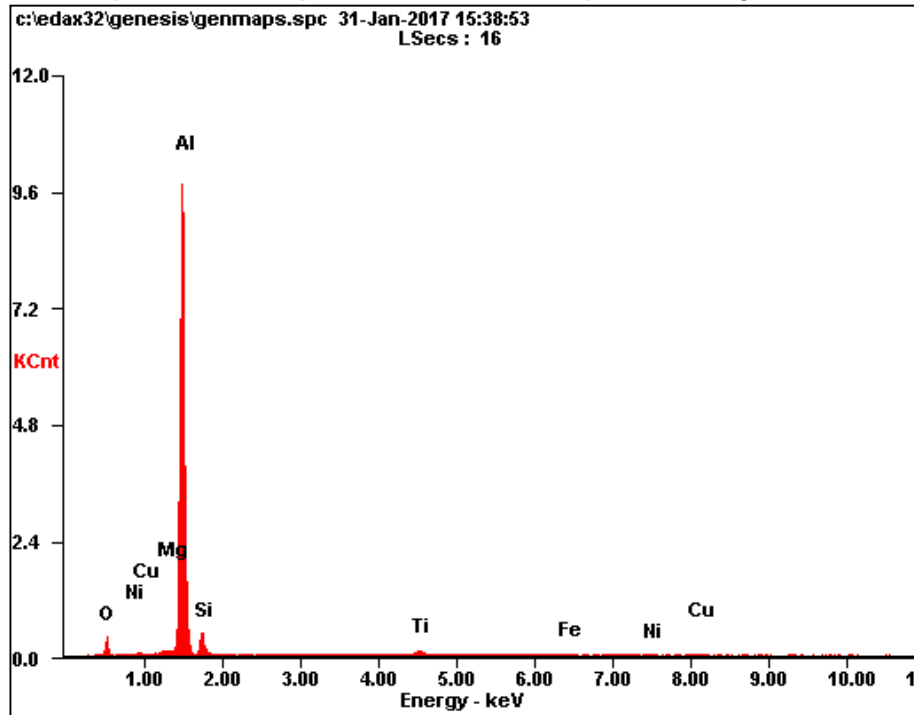


El espectro de composición y los porcentajes de los elementos identificados por EDS en la superficie desgastada del disco Q durante el ensayo de pin sobre disco con fuerza normal aplicada de 5N son presentados en la figura 58 y tabla 18. El análisis EDS reporta una disminución considerable de titanio, la desaparición del nitrógeno y la presencia de Hierro.

Tabla 18. Composición elemental EDS en la superficie desgastada del disco Q

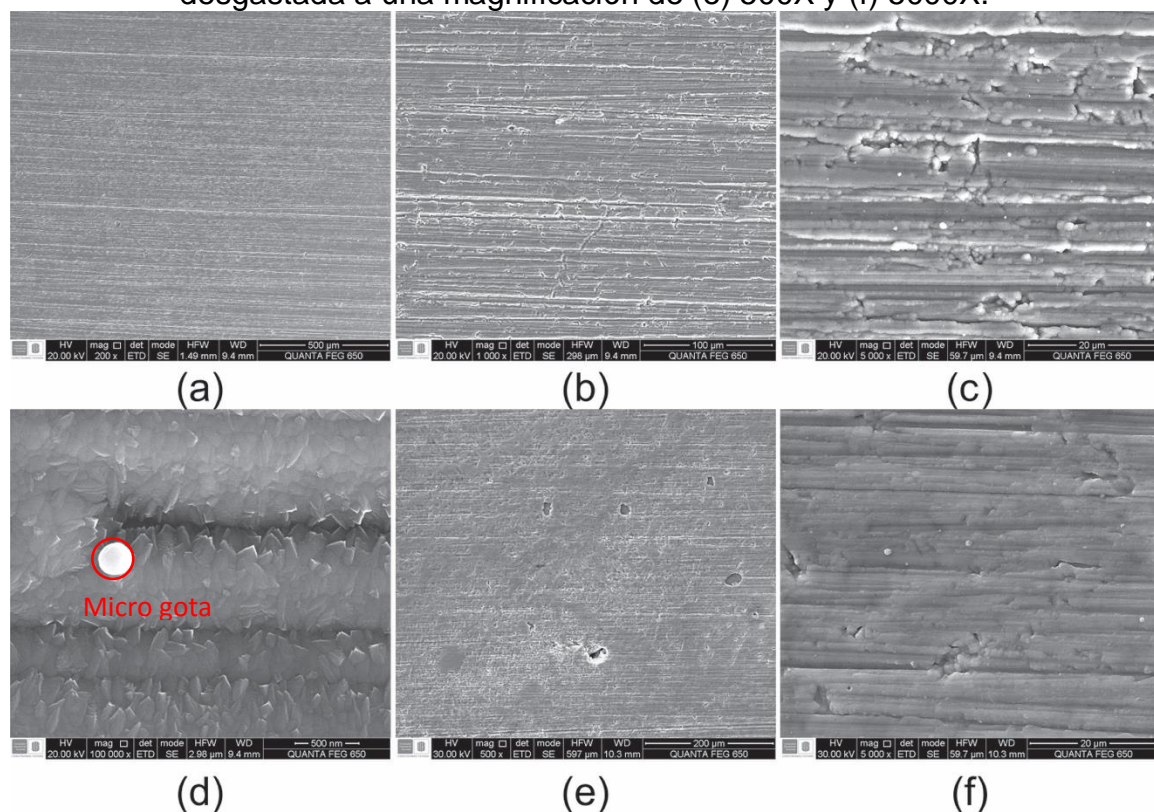
ELEMENTO	Wt%	At%
OK	12.39	19.70
MgK	00.85	00.89
AlK	71.29	67.20
SiK	11.35	10.28
TiK	01.64	00.87
FeK	00.73	00.33
NiK	00.67	00.29
CuK	01.07	00.43
Matriz	Corrección	ZAF

Figura 54. Espectro de composición EDS en la superficie desgastada del disco Q



Las micrografías a diferentes aumentos adquiridas sobre el área de la superficie del sustrato modificado con iones de Ti y N durante 30 minutos (disco T) se presentan en la figura 55. Las irregularidades observadas en las micrografías (a), (b), (c) y (d) de la superficie no desgastada corresponden a las trazas generadas en la preparación metalográfica, la formación de micro gotas durante la evaporación de la especie metálica (Ti) por el sistema de arco eléctrico del reactor JUPITER y algunas impurezas adheridas a la superficie del disco. Las micrografías (e) y (f) pertenecen a la superficie desgastada donde se evidencia levemente la irregularidad del surco generado por el pin en el ensayo de desgaste con fuerza normal aplicada de 5N.

Figura 55. Micrografía SEM en el Disco T. Superficie sin desgaste a una magnificación de (a) 200X, (b) 1000X, (c) 5000X y (d) 100000X. Superficie desgastada a una magnificación de (e) 500X y (f) 5000X.



El espectro de composición de la figura 56 y los valores porcentuales de los elementos reportados en la tabla 20, fueron adquiridos en un área seleccionada sin desgaste de la superficie implantada con iones de Ti y N durante 30 minutos (disco T). El alto porcentaje de titanio y nitrógeno registrado corrobora que la superficie de los discos T fueron tratados con estas de especies y durante un mayor tiempo en comparación con los discos Q. Al igual que los discos Q, el alto contenido en porcentaje de aluminio identificado es por el tipo de material base seleccionado en el trabajo de investigación.

Figura 56. Espectro de composición EDS en la superficie sin desgaste del disco T

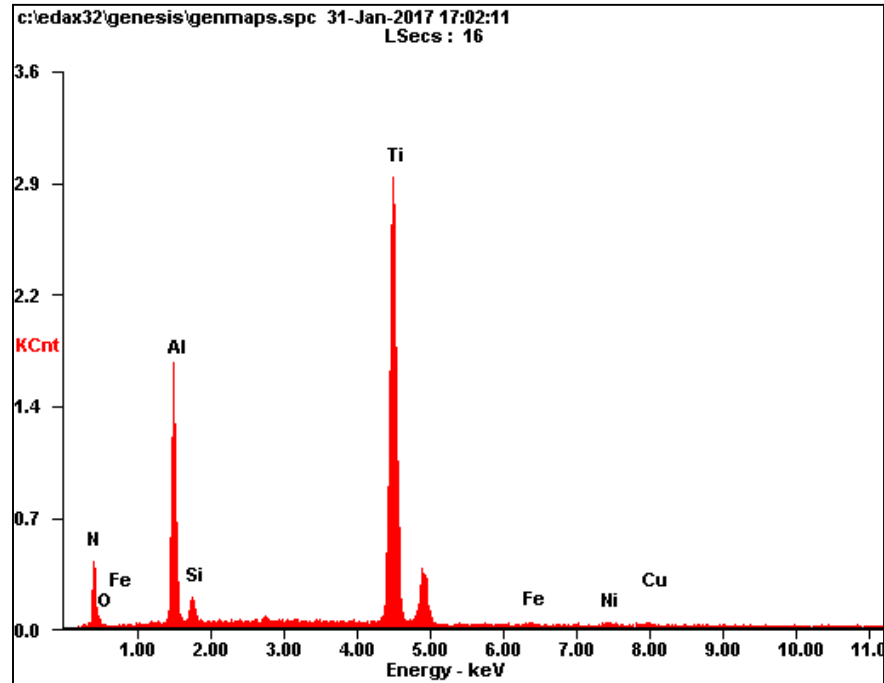
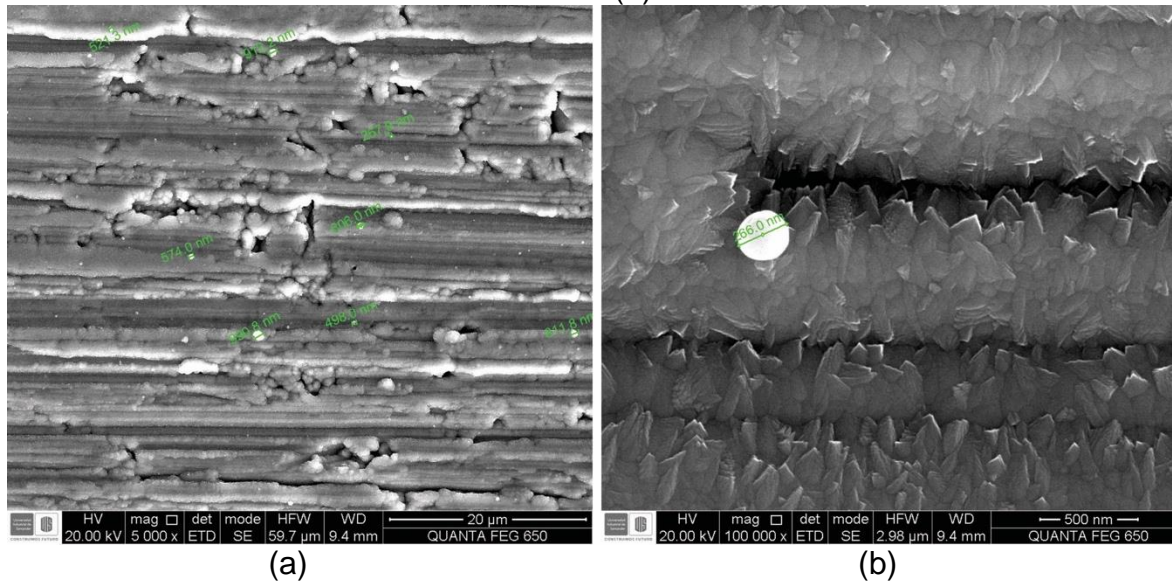


Tabla 19. Composición elemental EDS en la superficie sin desgaste del disco T

ELEMENTO	Wt%	At%
NK	24.01	45.40
OK	01.43	02.36
AlK	23.56	23.13
SiK	03.04	02.87
TiK	45.36	25.08
FeK	00.69	00.33
NiK	00.99	00.44
CuK	00.92	00.38
Matriz	Corrección	ZAF

En las micrografías (a) y (b) de la figura 57 se aprecia la presencia de micro gotas con diámetros de aproximadamente 650 micrómetros en promedio sobre la superficie del disco T sin desgaste. El aumento en tamaño de las micro gotas, en comparación con las generadas sobre las superficies tratadas durante 15 minutos (disco Q), es de esperarse porque las superficies, de los discos T, estuvieron mayor tiempo expuestas a la atmosfera del material de Ti evaporado por el sistema de arco eléctrico del reactor JUPITER.

Figura 57. Micro gotas en la superficie del disco T. Magnificación a 200X (a) y 1000X (b)

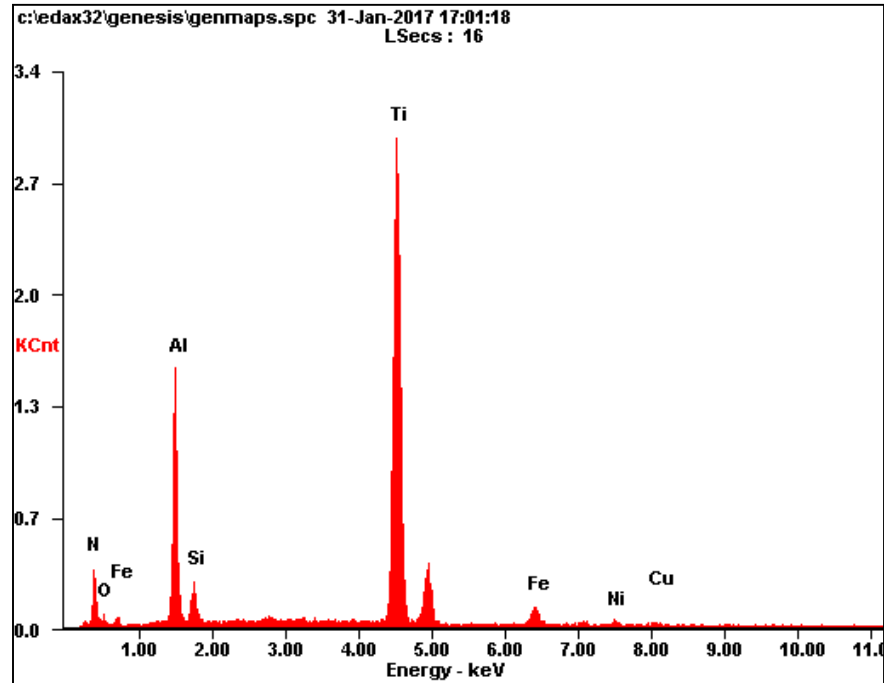


En la figura 58 se presenta el espectro de composición y en la tabla 21 el porcentaje de elementos detectados en la superficie desgastada, del disco T, con una fuerza normal aplicada de 5N. Como se puede apreciar, los elementos de titanio y nitrógeno no fueron removidos en su totalidad de la superficie presentando una disminución mínima, mientras que un aumento de hierro fue identificado en comparación con el análisis realizado en la región no desgastada.

Tabla 20. Composición elemental EDS en la superficie desgastada del disco T

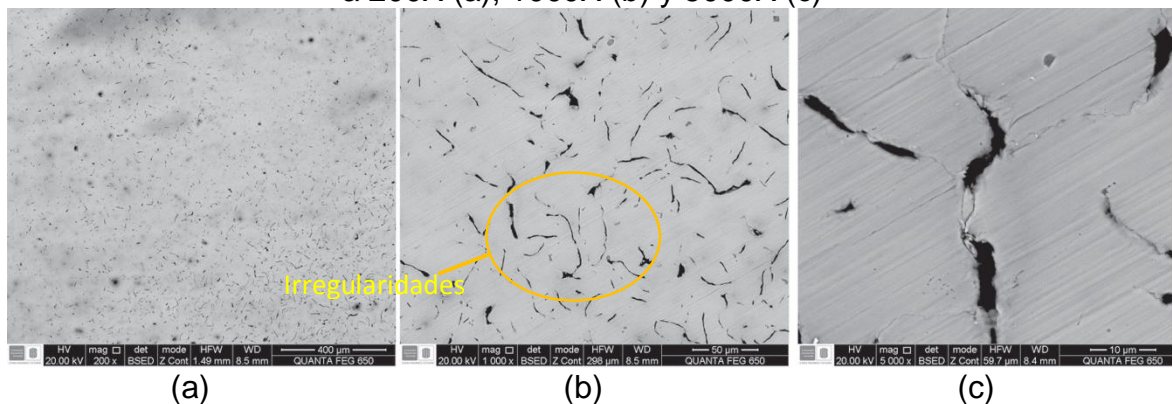
ELEMENTO	Wt%	At%
NK	19.70	37.95
OK	05.92	09.98
AlK	20.62	20.62
SiK	04.23	04.06
TiK	44.18	24.88
FeK	03.21	01.55
NiK	01.20	00.55
CuK	00.93	00.40
Matriz	Corrección	ZAF

Figura 58. Espectro de composición EDS en la superficie desgastada del disco T



Las micrografías (a), (b) y (c) presentadas en la figura 59 corresponden a la superficie del pin, sin modificación superficial, donde se observan algunas irregularidades debido al mecanizado realizado y a la presencia de impurezas adheridas a la superficie.

Figura 59. Micrografías SEM de la superficie no desgastada del pin. Magnificación a 200X (a), 1000X (b) y 5000X (c)



El espectro de energía dispersiva de la figura 60 y el porcentaje de composición elemental de la tabla 22, muestran un alto contenido de hierro y carbono debido al

tipo de material utilizado en la fabricación de la camisa del cilindro de los motores de motocicletas (acero al carbono).

Figura 60. Espectro de composición EDS de la superficie del pin

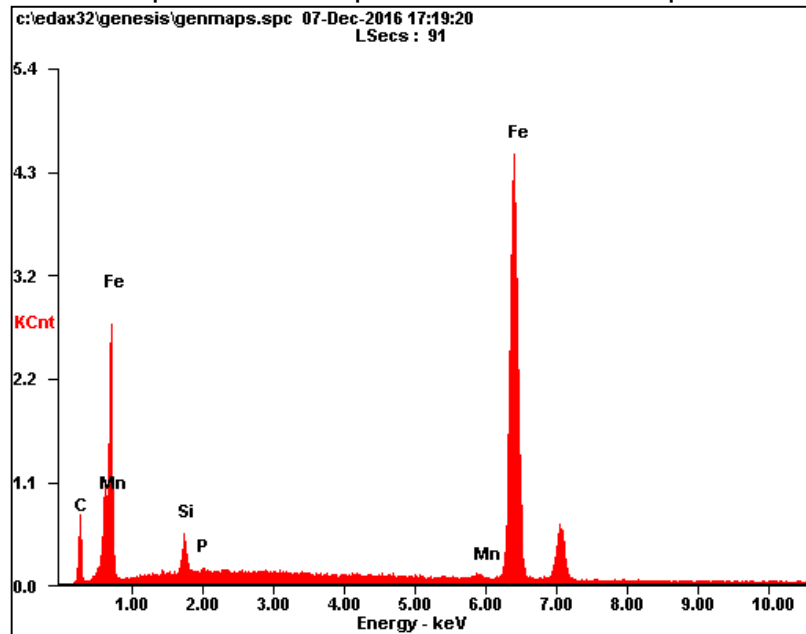


Tabla 21. Composición elemental EDS de la superficie del Pin

ELEMENTOS	Wt%	At%
CK	12.52	39.24
SiK	02.50	03.35
PK	00.27	00.33
MnK	00.88	00.60
FeK	83.83	56.48
Matriz	Corrección	ZAF

4.7 ENSAYOS Y ANÁLISIS POR ESPECTROSCOPIA RAMAN

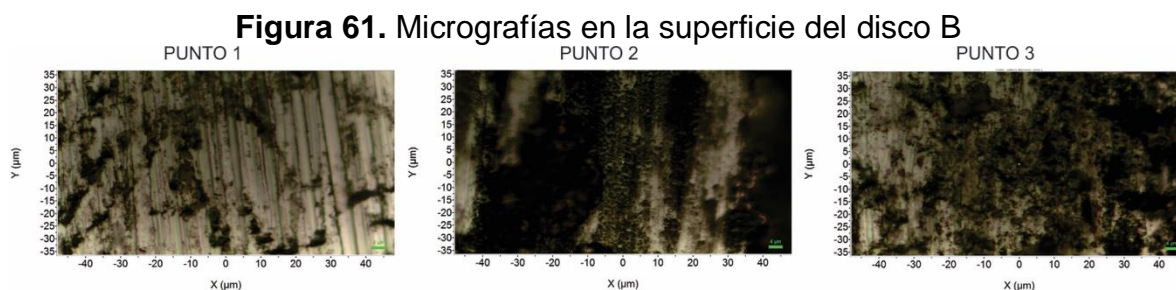
La superficie de los sustratos fue analizada mediante la técnica de espectroscopia Raman con la finalidad de encontrar el espectro de los enlaces moleculares que componen el material, además de conocer las modificaciones que se originan debido a la implantación iónica tridimensional y las alteraciones que pueden presentarse por el desgaste del ensayo de pin sobre disco. En la tabla 23 se reportan los parámetros de configuración del equipo durante los análisis.

Tabla 22. Condiciones establecidas en la espectroscopía Raman

CONDICIONES DE ESPECTROSCOPIA RAMAN	
Longitud de onda de laser (nm)	532
Rendija de difracción (gr/mm)	600
Objetivo	X100
Tiempo de adquisición (s)	8
Acumulación	6
Potencia de muestra (mW)	20

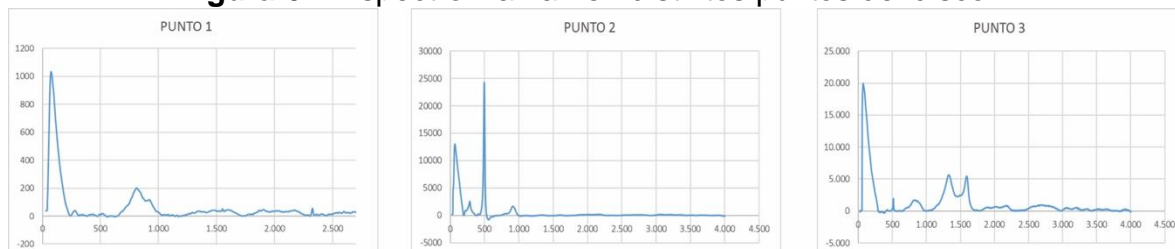
En las figuras 61, 63 y 65 se muestran las imágenes microscópicas de los puntos donde fueron adquiridos los espectros Raman en las superficies de los tres tipos de probetas (B, Q y T) después del ensayo de pin sobre disco con fuerza normal aplicada de 10N. Los espectros Raman obtenidos en los distintos puntos de la superficie, tanto desgastada como sin desgastar, son presentados en las figuras 62, 64 y 66.

Las micrografías y espectros adquiridos en la superficie del disco B, el punto 1 corresponde a la superficie sin desgastar, el punto 2 se encuentra en la interfaz (entre la superficie desgastada y sin desgastar) y el punto 3 en la zona desgastada (ver figura 61 y 62).



Los espectros Raman de la figura 62 muestran la conservación de dos bandas (a 80cm^{-1} y 800cm^{-1}), sin embargo, la aparición de distintas bandas (a 500cm^{-1} en el punto 2 y 3) en la zona desgastada suponen un cambio molecular en la estructura superficial, particularmente la presencia de óxidos (a 1300cm^{-1} y 1600cm^{-1} en el punto 3).

Figura 62. Espectro Raman en distintos puntos del disco B



El análisis del disco Q (modificado superficialmente con iones de Ti y N durante 15 minutos) se realizó en un punto de la zona sin desgastar (punto 1) y en dos puntos de la zona desgastada (punto 2 y 3) por el ensayo de pin sobre disco con fuerza normal aplicada de 10N (ver figura 63). Los espectros Raman de la figura 64 muestran la conservación de dos bandas (80cm^{-1} y 500cm^{-1}) seguido de la desaparición de una banda (600cm^{-1}), y la aparición de algunas bandas en la zona desgastada (800cm^{-1} , 1300cm^{-1} y 1600cm^{-1}), lo que significa que existe un cambio molecular en la estructura superficial del disco Q.

Figura 63. Micrografías en la superficie del disco Q

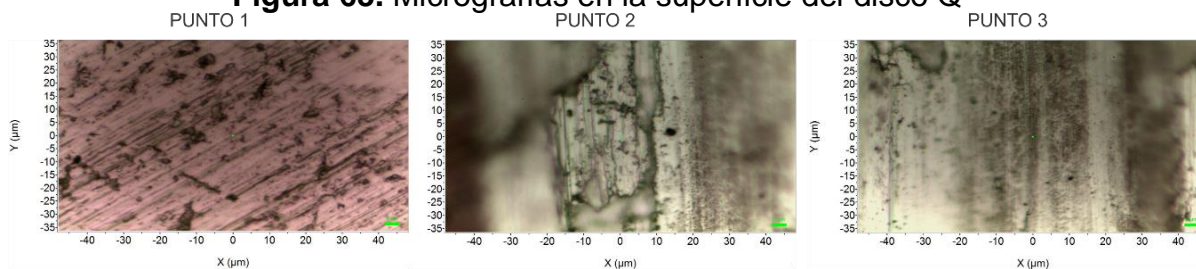
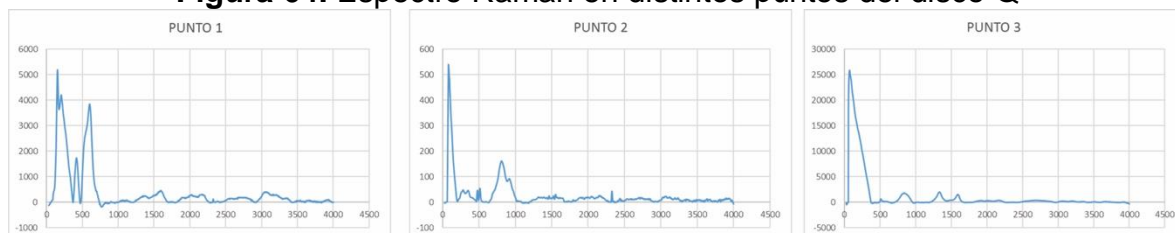


Figura 64. Espectro Raman en distintos puntos del disco Q



El análisis por espectroscopía Raman del disco modificado superficialmente con iones de Ti y N durante 30 minutos (disco T) se realizó en dos puntos de la zona no desgastada (punto 1 y punto 2) y en dos puntos de la zona desgastada (punto 3 y punto 4) por el ensayo de pin sobre disco con fuerza normal aplicada de 10N. En la figura 65 se muestran las micrografías de los puntos donde fueron adquiridos los espectros Raman, donde se identificaron seis bandas, de las cuales cuatro se

conservan en todos los puntos analizados de la superficie del disco T (80cm^{-1} , 600cm^{-1} , 1300cm^{-1} y 1600cm^{-1}) y dos bandas desaparecen en los espectros de los puntos 3 y 4 (2100cm^{-1} y 2800cm^{-1}) correspondientes a la zona desgastada (ver figura 66).

Figura 65. Micro graficas de superficie en disco T

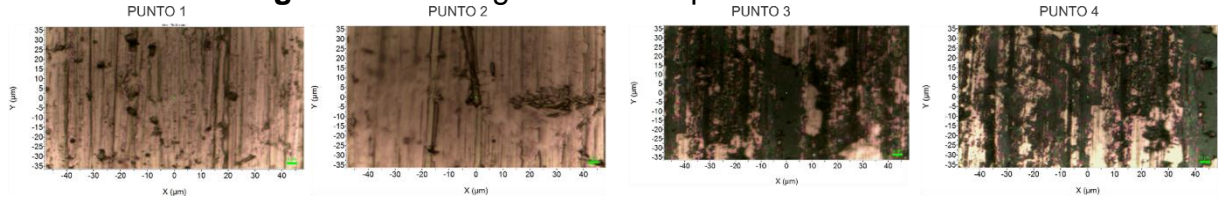
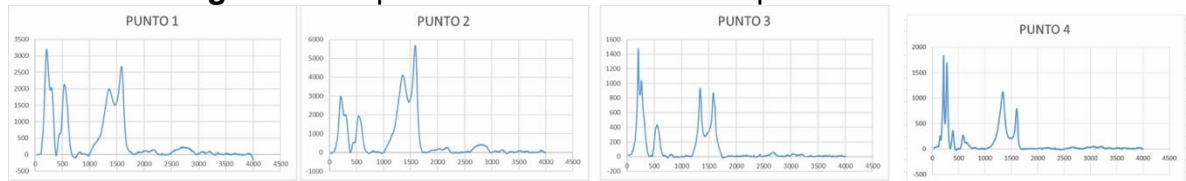


Figura 66. Espectro Raman en distintos puntos del disco T



Las estructuras moleculares encontradas por medio de los espectros Raman (ver figuras 67 y 68), obtenidos en las zonas no desgastadas y desgastadas por el ensayo de pin sobre disco con fuerza normal de 10N, son posiblemente silicatos de aluminio, cuarzo y óxidos de hierro (hematita y goethita), adicionalmente, en los discos modificados superficialmente con iones de Ti y N, se encuentra posibles óxidos de titanio (anatasa, avicennita, brookita y rutilo).

El análisis de los espectros, reportados en las figuras 67 y 68, se realizó según el procedimiento abordado por Niessen [51] y la comparación de los picos de intensidad con las moléculas identificadas en la base de datos de espectroscopia Raman denominada Ruff [8] (ver tabla 24).

Tabla 23. Análisis de los espectros Raman

NOMBRE	PICOS CARACTERISTICOS	DETALLE
Aerinita	200, 380, 500, 900	$(Ca,Na)_6(Fe^{3+},Fe^{2+},Mg,Al)_4(Al,Mg)_6[Si_{12}O_{36}(OH)_{12}](CO_3) \cdot 12H_2O$
Almandina	350, 950	$Fe^{2+}_3Al_2(SiO_4)_3$
Anatasa	100, 4000, 5000	TiO_2
Avicennita	250, 350	Tl_2O_3
Bannisterita	650	$(Ca,K,Na)(Mn^{2+},Fe^{2+})_{10}(Si,Al)_{16}O_{38}(OH)_8 \cdot nH_2O$
Böhmita	380, 500	$AlO(OH)$
Geikielita	200, 250, 350, 380, 460, 700	$MgTiO_3$
Brookita	380, 210, 300, 630	TiO_2
Brucita	240, 420	$Mg(OH)_2$
Carlosturanita	200, 400, 700, 1000	$(Mg,Fe^{2+},Ti)_{21}(Si,Al)_{12}O_{28}(OH)_{34} \cdot H_2O$
Cristobalita	100, 200, 400, 1400	SiO_2
Cuarzo	200, 450	SiO_2
Goethita	400, 600, 1000, 1300	$FeO(OH)$
Hematita	250, 400, 600, 1300	Fe_2O_3
Lepidocrocita	200, 400, 580	$Fe^{3+}O(OH)$
Oligoclase	170, 280, 500	$(Na,Ca)(Si,Al)_4O_8$
Rutilo	200, 400, 600, 1500	TiO_2
Spertiniita	280, 490	$Cu(OH)_2$
Albita	180, 300, 500, 1100	$NaAlSi_3O_8$
Microclina	180, 280, 500	$KAlSi_3O_8$
B- PUNTO 1	74, 277, 811, 920	Punto sin desgaste - disco B
B- PUNTO 2	68, 426, 490, 800	Punto en la interfaz del desgaste - disco B
B- PUNTO 3	76, 500, 800, 1300, 1600	Punto sobre la zona de desgaste - disco B
Q- PUNTO 1	150, 200, 426, 599, 1600, 2200, 3050	Punto sin desgaste - disco Q
Q- PUNTO 2	81, 283, 514, 800, 1480, 2050, 3100	Punto sobre la zona de desgaste - disco Q
Q- PUNTO 3	75, 800, 1300, 1600	Punto sobre la zona de desgaste - disco Q
T- PUNTO 1	200, 580, 1300, 2200, 2750	Punto sin desgaste - disco T
T- PUNTO 2	200, 510, 1400, 2100, 2750	Punto sin desgaste - disco T
T- PUNTO 3	220, 280, 510, 1400, 1600, 2600	Punto sobre la zona de desgaste - disco T
T- PUNTO 4	200, 300, 550, 1400, 1600	Punto sobre la zona de desgaste - disco T

En el espectro Raman de la figuras 67 se logró identificar bandas de Cristobalita (CRI), Hematita (HEM), Rutilo (RUT), Brookita (BRO) y Almandina (ALM), mientras que las bandas identificadas en los espectros de la figura 68 fueron Cristobalita (CRI), Hematita (HEM) y Aerinita (AER), corroborando la formación, desaparición y disminución en intensidad de algunas bandas moleculares debido a los ensayos de pin sobre disco con fuerza normal aplicada de 10N. Adicionalmente, se evidencian picos cuyas estructuras moleculares no fueron asignadas debido a que no se encontraron coincidencia con los registros Raman reportados en la bibliografía y en las bases de datos, por tal motivo es importante mencionar que que gran parte de los espectros y sus posibles bandas formadas aún se encuentran en investigación.

Figura 67. Espectros Raman en la zona no desgastada

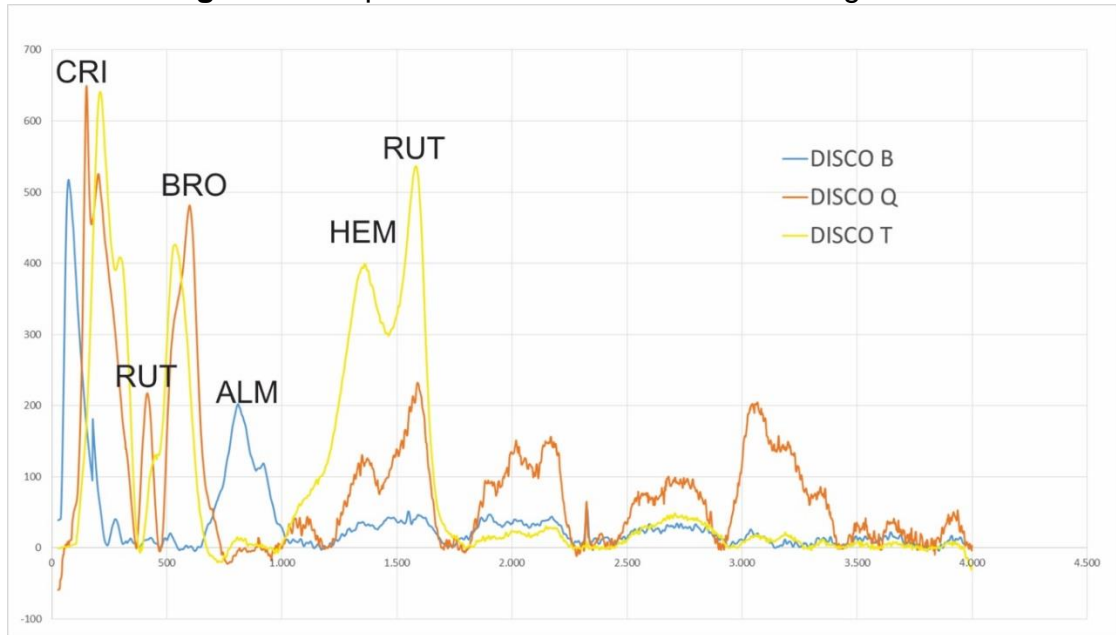
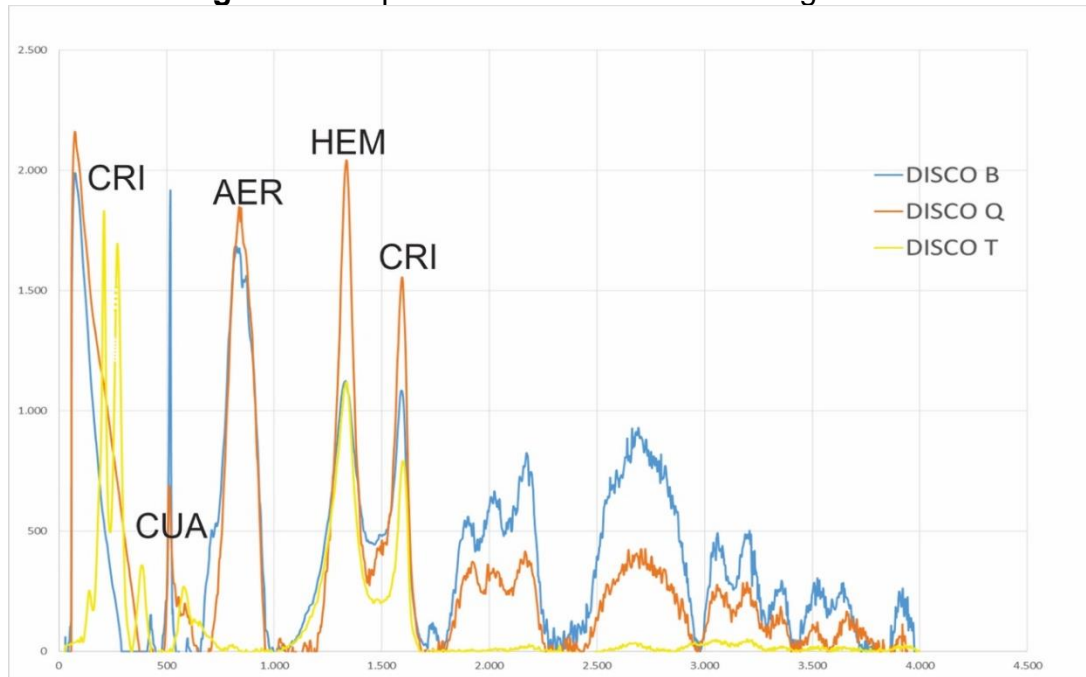


Figura 68. Espectro Raman en la zona desgastada



5 CONCLUSIONES

- ✓ Se realizó el análisis de la composición química del material utilizado en la fabricación de los pistones de motocicleta, el cual comprueba que corresponde a una aleación de aluminio de porcentaje aproximado en peso entre el 75% y el 80% con presencia significativa de Silicio (20%), Cobre (1.1%) y Magnesio (1.18%) entre otros elementos.
- ✓ Se logró realizar en el reactor JUPITER la modificación superficial mediante la técnica 3DII, generada por descarga híbrida pulsadas de alto voltaje y arco eléctrico a bajas presiones, del material utilizado en la fabricación de los pistones de motocicleta con parámetros establecidos de frecuencia y duración de pulso, voltaje y presión de la descarga. Adicionalmente, se estimó una densidad de iones implantados de 1.4×10^{22} iones/cm² en el tratamiento realizado durante 30 minutos y de 7.03×10^{23} iones/cm² en el tratamiento de 15 minutos.
- ✓ Por medio de la simulación realizada en el software SRIM-TRIM se logra estimar la concentración por profundidad de los iones de Ti y N implantados en la superficie de los sustratos de aluminio, donde la mayor concentración de titanio se estima aproximadamente a una profundidad de 12.5nm y la de nitrógeno a 26.8nm.
- ✓ La evaluación superficial mediante ensayos de pin sobre disco manifiesta una disminución considerable en la tasa de desgaste del material utilizado en la fabricación de pistones de motocicleta al ser modificado superficialmente con iones de Ti y N durante 30 minutos de exposición, donde el aumento de la resistencia al desgaste fue del 625% y la disminución del coeficiente de fricción del 42.6%, mientras que los pines presentaron un aumento del 214% en la tasa de desgaste. Adicionalmente, el espectro de composición EDS reportó una reducción de titanio de tan sólo el 2% aproximadamente.
- ✓ Los resultados de la resistencia al desgaste (con un incremento aproximado del 555%) y del coeficiente de fricción (con una reducción aproximada del 43.3%) obtenidos del ensayo de pin sobre disco certifican que es favorable modificar superficialmente con iones de titanio y nitrógeno los pistones de motocicleta mediante la técnica de implantación iónica tridimensional bajo los parámetros definidos en esta investigación y a un tiempo de exposición de 15 minutos, además de conseguir una reducción aproximada del 42.9% en el desgaste de la superficie extraída del cilindro.
- ✓ El análisis estadístico de varianza ANOVA determina que existen diferencias significativas entre los discos con y sin modificación superficial, donde se

comprueba que el modelo restringido (superficies implantadas con iones de Ti y N) presenta el mejor comportamiento de resistencia al desgaste.

- ✓ La espectroscopía de energía dispersiva de rayos X y Raman reportan un cambio en la composición superficial y enlaces moleculares del material modificado mediante la técnica 3DII, donde se evidencia una significativa presencia de especie metálica (Ti) y no metálica (N) en la superficie implantada.

6 RECOMENDACIONES

- ✓ Adquirir el módulo de pruebas tipo pin sobre disco y la cámara de calentamiento del equipo UMT BRUCKER de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, facilitando el estudio de propiedades tribológicas en los materiales y la realización de posteriores investigaciones en condiciones de temperatura y lubricación específica bajo la versatilidad, sensibilidad y control de las variaciones de velocidad, fuerza y tiempo.
- ✓ Analizar la influencia de la implantación iónica tridimensional con iones de Ti y N mediante técnicas de caracterización superficial tales como espectroscopia electrónica Auger (AES) y espectroscopia de masas de iones secundarios (SIMS).
- ✓ Evaluar la técnica 3DII a distintos tiempos de exposición y distintas energías que permitan construir una matriz experimental más amplia y profunda.
- ✓ Implantar a distintas condiciones, pines fabricados del material de la camisa que componen el par tribológico pistón-cilindro y posteriormente evaluarlos con discos implantados y sin implantar.
- ✓ Evaluar la influencia de la modificación superficial de pistones, anillos de contacto y cilindros mediante banco de pruebas dinamométrico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 AGUIRRE MONTOYA, V. (2008). Contribución al estudio experimental de la fricción pitón-camisa en un motor de combustión interna (Ingeniera Mecánica). Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, España.
- 2 BARBIERI, F., Otani, C., Lepienski, C., Urruchi, W., Maciel, H., & Petraconi, G. (2002). Nanoindentation study of Ti6Al4V alloy nitrided by low intensity plasma jet process. *Vacuum*, 67(3-4), 457-461. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0042-207x\(02\)00231-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0042-207x(02)00231-2)
- 3 BULL, S., Bhat, D., & Staia, M. (2003). Properties and performance of commercial TiCN coatings. Part 2: tribological performance. *Surface And Coatings Technology*, 163-164, 507-514. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972\(02\)00651-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972(02)00651-5)
- 4 CASANOVA, J., Aguirre, M. V. (2005) Banco de pruebas para medida de fricción en pistones. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*. Vol. 9, N.º 3, pp. 79-94, 2005
- 5 CHEN, K. & Jaung, G. (1997). D.c. diode ion nitriding behavior of titanium and Ti-6Al-4V. *Thin Solid Films*, 303(1-2), 226-231. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0040-6090\(97\)00075-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0040-6090(97)00075-8)
- 6 CHEN, R., Tu, J., Liu, D., Mai, Y., & Gu, C. (2011). Microstructure, mechanical and tribological properties of TiCN nanocomposite films deposited by DC magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 205(21-22), 5228-5234. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.05.034>
- 7 CHENG, Y., Browne, T., Heckerman, B., Bowman, C., Gorokhovskiy, V., & Meletis, E. (2010). Mechanical and tribological properties of TiN/Ti multilayer coating. *Surface and Coatings Technology*, 205(1), 146-151. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.06.023>
- 8 Database of Raman spectroscopy, X-ray diffraction and chemistry of minerals. (2017). [En línea]. Rruff.info. Retrieved 30 January 2017, Disponible en: <http://rruff.info/>
- 9 DOUGAR JABON, V., Chacón Velasco, A., & Vivas, F. (1998). Hydrogen negative ion production in an electron cyclotron resonance driven plasma. *Review of Scientific Instruments*, 69(2), 950-952. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1148618>

- 10 DOUGAR V., Dulcé M., J., Guerra-Mutiz, M. (1999) *Revista colombiana de Física*, ISSN 0120-2650, Vol. 31 No. 2, 173-176
- 11 DOUGAR, V., Castro, J., Dulcé M., J., Cabrera C.R. (2003). Estudio mediante xps de un acero al carbono implantado con nitrógeno por medio de descargas de alto voltaje a bajas presiones. *Revista Colombiana de Física*, Vol. 35, No. 2, p 5
- 12 DOUGAR, V., Castro, J., Dulcé M., J., Tsyganokv, P.A. (1999) Device "JUPITER" for ion implantation. *Revista colombiana de Física*, ISSN 0120-2650, Vol. 31 No. 2, 181-184
- 13 DOUGAR-JABON, V. (2001). Production of Hydrogen and Deuterium Negative Ions in an Electron Cyclotron Resonance Driven Plasma. *Physica Scripta*, 63(4), 322-325. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1238/physica.regular.063a00322>
- 14 DOUGAR-JABON, V., Moreno, J., & Tsygankov, P. (2002). High voltage pulse discharge for ion treatment of metals. *Review of Scientific Instruments*, 73(2), 828-830. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1429785>
- 15 DOUGAR-JABON, V., Silva, M. A., Uribe, I., Castro B., J., (2002) Cinética de permeación de hidrógeno en un acero implantado con iones de nitrógeno. *Revista Colombiana De Física*, Vol 34. p 4
- 16 DOUGAR-JABON, V., Dulcé Moreno, J., & Tsygankov, P. (2002). Implantación Iónica. *Revista Respuestas*, 19 (12), 19-31
- 17 DUGAR-ZHABON, V., Dulcé Moreno, H. J., Villamizar, H., & V. Niño, E. D. (2012). A new method for surface modifications of carbon steels and alloys. *Materials Research*, 15(6), 969-973. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1590/s1516-14392012005000133>
- 18 DULCÉ M., H., Rueda V., A., & Dougar-Jabon, V. (2005). 3DII implantation effect on corrosion properties of the AISI/SAE 1020 steel. *Physica Status Solidi (C)*, 2(10), 3778-3781. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1002/pssc.200461837>
- 19 E. DE LA GUERRA OCHOA, et al. (2016). Estudio del texturizado de superficies lubricadas para la mejora del coeficiente de fricción. XIX Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. *Asociacion Española de Ingeniería Mecánica*. p 8
- 20 FANG, T., Jian, S., & Chuu, D. (2004). Nanomechanical properties of TiC, TiN and TiCN thin films using scanning probe microscopy and nanoindentation. *Applied Surface Science*, 228(1-4), 365-372. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2004.01.053>

- 21 FENG, W., Zhou, H., & Yang, S. (2010). Nano-indentation and wear-resistance behaviors of TiCN films by pulsed plasma on cemented carbide cutting tool. *Materials Science and Engineering: A*, 527(18-19), 4767-4770. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2010.04.024>
- 22 GARNICA VILLAMIZAR, H. (2016). Evaluación del desempeño de superficies en acero al carbono implantadas con iones de titanio y nitrógeno frente a bacterias sulfato reductoras (Trabajo de Maestría). Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ciencias, Escuela de Física, Colombia
- 23 GARNICA, H., Valbuena Niño, E., & Dugar-Zhabon, V. (2011). Tecnología del plasma aplicada a problemáticas en el sector hidrocarburos en Colombia. *Revista Iteckne*, 8(1). [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.15332/iteckne.v8i1.260>
- 24 GOROKHOVSKY, V. (2010). Lafad-Assisted Plasma Surface Engineering Processes for Wear and Corrosion Protection: A Review. *Ceramic Engineering and Science Proceedings*. p 19
- 25 GOROKHOVSKY, V. & Belluz, P. (2013). Ion treatment by low pressure arc plasma immersion surface engineering processes. *Surface and Coatings Technology*, 215, 431-439. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.10.069>
- 26 GOROKHOVSKY, V., Bowman, C., Gannon, P., VanVorous, D., Voevodin, A., & Rutkowski, A. (2007). Tribological performance of hybrid filtered arc-magnetron coatings. Part II: Tribological properties characterization. *Surface and Coatings Technology*, 201(14), 6228-6238. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.11.017>
- 27 GUTIÉRREZ, B., Vera-Rivera, F., & Niño, E. (2017). Design and implementation of a web application to estimate the surface density of implanted ions in solid substrates. *Journal of Physics: Conference Series*, 786, 012015. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/786/1/012015>
- 28 HAINSWORTH, S. & Soh, W. (2003). The effect of the substrate on the mechanical properties of TiN coatings. *Surface and Coatings Technology*, 163-164, 515-520. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972\(02\)00652-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972(02)00652-7)
- 29 HUANG, S., Ng, M., Samandi, M., & Brandt, M. (2002). Tribological behaviour and microstructure of TiC_xN(1-x) coatings deposited by filtered arc. *Wear*, 252(7-8), 566-579. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0043-1648\(02\)00010-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0043-1648(02)00010-8)

- 30 HUBER, P., Manova, D., Mändl, S., & Rauschenbach, B. (2003). Formation of TiN, TiC and TiCN by metal plasma immersion ion implantation and deposition. *Surface and Coatings Technology*, 174-175, 1243-1247. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972\(03\)00458-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972(03)00458-4)
- 31 IDEAM - IDEAM. (2017). [Ideam.gov.co](http://www.ideam.gov.co). [En línea]. 04 de enero de 2017 Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/>
- 32 JIN, G., Xu, B., Wang, H., Li, Q., & Wei, S. (2006). Investigation on the formation and wear resistance of TiC coatings. *Materials Science and Engineering: A*, 435-436, 355-359. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2006.07.057>
- 33 JÓVAJ, M., Arjángelski, V., & Ludeña Luque, A. (1982). Motores de automóvil (1st ed.). Moscú: Mir
- 34 JU, S., Weng, C., Chang, J., & Hwang, C. (2002). A molecular dynamics study of deposition rate dependence of film morphology in the sputtering process. *Surface and Coatings Technology*, 149(2-3), 135-142. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972\(01\)01445-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972(01)01445-1)
- 35 KAJIOKA, H., Higuchi, K., & Nakasone, M. (1995). Low voltage-high current discharge of Ti vapour in high vacuum. *Thin Solid Films*, 256(1-2), 124-135. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/0040-6090\(94\)06387-7](http://dx.doi.org/10.1016/0040-6090(94)06387-7)
- 36 KHVESYUK, V. & Tsygankov, P. (1997). The use of a high-voltage discharge at low pressure for 3D ion implantation. *Surface and Coatings Technology*, 96(1), 68-74. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972\(97\)00117-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972(97)00117-5)
- 37 LIANG, C., Cheng, G., Zheng, R., & Liu, H. (2011). Fabrication and performance of TiN/TiAlN nanometer modulated coatings. *Thin Solid Films*, 520(2), 813-817. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2011.04.159>
- 38 LIST, Hans. Motores de combustión interna: Desgaste coste de explotación y rentabilidad. 2 ed. Barcelona: Labor, 1944. p 464
- 39 LIU, A., Wang, X., & Tang, B. (2002). Improve retained dose and impact energy of inner surface plasma immersion ion implantation using long pulse duration with deflecting electric field. *Surface and Coatings Technology*, 149(2-3), 114-118. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972\(01\)01494-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972(01)01494-3)
- 40 LÓPEZ VELÁZQUEZ, A. et al. (2011). Estudio tribológico del acero AISI 1045 empleando el método pin- disco. Congreso Internacional Anual de la SOMIM. San

Luis Potosí, México. pp 1-6. [En línea]. Disponible en: http://somim.org.mx/articulos2010/memorias/memorias2011/pdfs/A3/A3_68.pdf

41 MA, L., Cairney, J., Hoffman, M., & Munroe, P. (2004). Characterization of TiN thin films subjected to nanoindentation using focused ion beam milling. *Applied Surface Science*, 237(1-4), 627-631. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2004.06.135>

42 MANI, A., Aubert, P., Mercier, F., Khodja, H., Berthier, C., & Houdy, P. (2005). Effects of residual stress on the mechanical and structural properties of TiC thin films grown by RF sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 194(2-3), 190-195. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.06.017>

43 MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, D., López-Cartes, C., Fernández, A., & Sánchez-López, J. (2009). Influence of the microstructure on the mechanical and tribological behavior of TiC/a-C nanocomposite coatings. *Thin Solid Films*, 517(5), 1662-1671. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2008.09.091>

44 MARTÍNEZ-PÉREZ, F. & Barroso-Moreno, A. (2013). Mejoras en la construcción de camisas de cilindro de motores de combustión interna ciclo diesel. *Revista de Metalurgia*, 49(2), 100-110. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3989/revmetalm.1228>

45 MATTOX, D. (2000). Physical vapor deposition (PVD) processes. *Metal Finishing*, 98(1), 410-423. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0026-0576\(00\)80350-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0026-0576(00)80350-5)

46 MELETIS, E. (2002). Intensified plasma-assisted processing: science and engineering. *Surface and Coatings Technology*, 149(2-3), 95-113. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972\(01\)01441-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972(01)01441-4)

47 MENA GALVIS, Ronald Leandro; Villamizar Sierra, Sergio Giovanny. (2012). 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). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander..

48 MEZA, Juan Manuel, Chaves, Cesar A., & Vélez, Juan Manuel. (2006). Técnicas de indentación: medición de propiedades mecánicas en cerámicas. *DYNA*, 73(149), 81-93. [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532006000200007&lng=en&tlng=es

- 49 MUSIL, J. & Viček, J. (1999). A perspective of magnetron sputtering in surface engineering. *Surface and Coatings Technology*, 112(1-3), 162-169. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972\(98\)00748-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972(98)00748-8)
- 50 MUSIL, J. & Viček, J. (2001). Magnetron sputtering of hard nanocomposite coatings and their properties. *Surface and Coatings Technology*, 142-144, 557-566. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972\(01\)01139-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972(01)01139-2)
- 51 NIESSEN, A. (2010). Mapas por microscopia de Raman. Departamento de Conservação e Restauro. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa. p 75
- 52 NIGRO, N., Storti, M. A., Ambroggi, L. (1999) Modelización numérica de un motor de combustión interna monocilíndrico encendido por chispa. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*. Vol. 15, No. 1, 21-54
- 53 NINO V., Ely Dannier, PENA B. Darío Y, Reyes C. Martha S, Dugar-Zhabon. Valeriy. (2013) Estudio experimental de la resistencia a la corrosión de un acero al carbono AISI-SAE 1020 implantado con iones de titanio. *Rev. LatinAm. Metal. Mater.*, Vol. 33, No 1, pp. 138-146. ISSN 0255-6952
- 54 OBERT, Edward. MOTORES DE COMBUSTION INTERNA, Análisis y aplicaciones. Compañía continental, S.A., Mexico
- 55 OSCAR MAURICIO GÓMEZ, Miguel Leonardo Patiño. (2013) 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). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander
- 56 PALADINES, A.U., Aperador, W., Sequeda, F. (2010) Evaluación de las propiedades tribológicas y corrosión del Sistema CrN/Cr depositado sobre acero AISI 304, 4140,1075 por la técnica Magnetron Sputtering Reactivo DC. *Avances Investigación en Ingeniería*, 13, 61-70.
- 57 PARADA BECERRA. Fredy Fabián. et al. (2011) Estudio de los haces electrónicos en la descarga eléctrica de alto voltaje a bajas presiones. *Puente Revista Científica*, Vol. 5
- 58 PELLIER, J., Paris, J., Denape, J., Bry, J., & Genissieux, V. (2016). General Procedure for Selecting and Testing Materials and Coatings in Response to a Tribological Problem. *Journal of Tribology*, 139(3), 031302. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1115/1.4034331>
- 59 POLCAR, T., Kubart, T., Novák, R., Kopecký, L., & Šíroký, P. (2005). Comparison of tribological behaviour of TiN, TiCN and CrN at elevated

temperatures. *Surface and Coatings Technology*, 193(1-3), 192-199. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.07.098>

60 POLCAR, T., Novák, R., & Široký, P. (2006). The tribological characteristics of TiCN coating at elevated temperatures. *Wear*, 260(1-2), 40-49. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2004.12.031>

61 PRECHT, W., Lunarska, E., Czyzniewski, A., Pancielejko, M., & Walkowiak, W. (1996). Corrosion resistance, structure and mechanical properties of PVD, TiC_xN_{1-x} coatings. *Vacuum*, 47(6-8), 867-869. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/0042-207x\(96\)00084-x](http://dx.doi.org/10.1016/0042-207x(96)00084-x)

62 PULKRABEK, W. (2004). Engineering fundamentals of the internal combustion engine (1st ed.). Upper Saddle River N.J.: Pearson Prentice Hall.

63 RAUTRAY, T., Narayanan, R., & Kim, K. (2011). Ion implantation of titanium based biomaterials. *Progress in Materials Science*, 56(8), 1137-1177. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2011.03.002>

64 REYES CORZO. Martha. (2011) Estudio experimental de la resistencia a la corrosión de un acero al carbono AISI SAE 1020 implantado con iones de titanio vía plasma. (Trabajo de grado). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander

65 RIVERA, F., Gutiérrez, B., Dulce-Moreno, H., Duran-Flórez, F., & Niño, E. (2016). Estimate of the concentration of implanted ions in solid substrates using a web application. *Journal of Physics: Conference Series*, 743, 012016. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/743/1/012016>

66 ROCHA, R. C. S. (2011) Modificação da superfície e das propriedades tribológicas do titânio por carbonitreção a plasma. *Revista Matéria*, V. 16, No. 3, 767-774

67 RODRIGUEZ TORRES, D. (2007). Evaluación teórica del incremento de rendimiento del motor mcculloch mc-92 con la utilización de recubrimientos cerámicos en la cámara de combustión (Trabajo de Grado). Bogotá D.C.: Universidad de San Buenaventura

68 ROJAS TAVERA, J., Peña Ballesteros, D., & Estupiñán Durán, H. (2014). Relación entre las propiedades mecánicas y tribológicas de Ti6AL4V ELI nitrurado mediante descarga intensa de plasma. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 24(2), 7. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.18359/rcin.390>

69 SALINAS QUINTERO. Deisy Viviana, Chinchilla Ballesteros. Luisa Fernanda. Peña Ballesteros. Darío Yesid, V. Niño. Ely Dannier. (2011) Modificación superficial

de un acero AISI SAE 1045 mediante la implantación de iones de nitrógeno y titanio. *Revista Iteckne*, Vol 8. No.1.

70 SANTOS JÚNIOR, E., Camargo Júnior, S., Soares, G., & Delplancke-Ogletree, M. (2010). Mechanical and tribological properties of Ti-containing carbon nanocomposite coatings deposited on TiAlV alloys. *Materials Research*, 13(4), 527-533. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1590/s1516-14392010000400016>

71 SCHNEIDER, J., Voevodin, A., Rebholz, C., Matthews, A., Hogg, J., Lewis, D., & Ives, M. (1995). X-Ray diffraction investigations of magnetron sputtered TiCN coatings. *Surface and Coatings Technology*, 74-75, 312-319. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/0257-8972\(95\)08238-7](http://dx.doi.org/10.1016/0257-8972(95)08238-7)

72 SHAMIN M., Scheyr J.T., Conrad J. R., (1991). *J. Appl. Phys.*, 69, 2904-2908

73 SHIGLEY, J., Uicker, J., & Contin, H. (1988). Teoría de máquinas y mecanismos (1st ed.). México: McGraw-Hill.

74 SHOJAEI, O. & Karimi, A. (1998). Comparison of mechanical properties of TiN thin films using nanoindentation and bulge test. *Thin Solid Films*, 332(1-2), 202-208. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0040-6090\(98\)01057-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0040-6090(98)01057-8)

75 SILVA PLATA. Miguel Ángel. (2004) Estudio de la implantación iónica tridimensional (3DII) en descargas a baja presión como protección de aceros a la permeación de hidrogeno. (Trabajo de Maestría). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander

76 SKOOG, D., Holler, F., Nieman, T., & Martín Gómez, M. (2001). Principios de análisis instrumental (1st ed.). Madrid: McGraw-Hill Interamericana.

77 SMITH, E. (1998). Mechanical engineer's reference book (1st ed.). Oxford, England: Butterworth Heinemann.

78 ASTM (2000) Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. G99-95a. Pennsylvania: ASTM International

79 STONE, R. (1985). Introduction to internal combustion engines (1st ed.). Basingstoke: Macmillan

80 SUESCÚN RIVEROS, J. & Fuentes Bayona, A. (2015). Reingeniería y construcción del cilindro de un motor de dos tiempos mono-cilíndrico con pequeña cilindrada para aplicación agrícola (Trabajo de Grado). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander

- 81 TAKADOUM, J., Bennani, H., & Allouard, M. (1997). Friction and wear characteristics of TiN, TiCN and diamond-like carbon films. *Surface and Coatings Technology*, 88(1-3), 232-238. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972\(96\)02905-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972(96)02905-2)
- 82 TIAN, X., Zeng, Z., Tang, B., Kwok, T., & Chu, P. (2000). Fast pulsing plasma immersion ion implantation for tribological applications. *Surface and Coatings Technology*, 128-129, 226-230. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972\(00\)00652-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972(00)00652-6)
- 83 TORRES AMARIS, E. (2005). Simulación de implantación de nitrógeno en hierro policristalino por el método de dinámica molecular (Trabajo de Maestría). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander
- 84 URAS H. Mehmet, Patterson Donald J. (1984). effect of some lubricant and engine variables on instantaneous piston ring assembly friction. *SAE Technical Paper Series*, 840178
- 85 V. D. Dugar-Jabon, Silva M. A, Uribe I, Castro B. J, (2002) Cinética de permeación de hidrógeno en un acero implantado con iones de nitrógeno. *Revista Colombiana De Física*, Vol 34. p 4
"
- 86 V. NIÑO, E., Salinas, D., Y. Peña, D., & Chinchilla, L. (2011). Modificación superficial de un acero AISI SAE 1045 mediante la implantación de iones de nitrógeno y titanio. *Revista Iteckne*, 8(1). [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.15332/iteckne.v8i1.259>
- 87 Valbuena Niño, E. (2004). Comportamiento del Acero SAE-4140 implantado con iones de nitrógeno en ambientes hidrogenados (Trabajo de Grado). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander
- 88 VALBUENA NIÑO, E., Dugar-zhabon, V., Dulce Moreno, J., Peña Rodríguez, G., Garnica, H., & Tsygankov, P. (2012). Aplicación de descargas simultáneas de alto voltaje y arco eléctrico para el tratamiento superficial avanzado de metales. *Revista Iteckne*, 9(1). [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.15332/iteckne.v9i1.56>
- 89 VALBUENA NIÑO, Ely Dannier. Peña Ballesteros, Darío Yesid. Reyes, Martha. Dugar-Zhabon, Valeriy. (2013) Estudio Experimental De La Resistencia A La Corrosión De Un Acero Al Carbono AISI-SAE 1020 implantado con iones de titanio. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, Vol. 33. No.1

- 90 VALVODA, V. (1996). Structure of TiN coatings. *Surface and Coatings Technology*, 80(1-2), 61-65. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/0257-8972\(95\)02686-x](http://dx.doi.org/10.1016/0257-8972(95)02686-x)
- 91 VETTER, J., Barbezat, G., Crummenauer, J., & Avissar, J. (2005). Surface treatment selections for automotive applications. *Surface and Coatings Technology*, 200(5-6), 1962-1968. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.08.011>
- 92 VOEVODIN, A. & Zabinski, J. (2000). Supertough wear-resistant coatings with 'chameleon' surface adaptation. *Thin Solid Films*, 370(1-2), 223-231. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0040-6090\(00\)00917-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0040-6090(00)00917-2)
- 93 VOEVODIN, A. & Zabinski, J. (2005). Nanocomposite and nanostructured tribological materials for space applications. *Composites Science And Technology*. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.10.008>
- 94 VOEVODIN, A., Rebholz, C., Schneider, J., Stevenson, P., & Matthews, A. (1995). Wear resistant composite coatings deposited by electron enhanced closed field unbalanced magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 73(3), 185-197. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/0257-8972\(94\)02381-6](http://dx.doi.org/10.1016/0257-8972(94)02381-6)
- 95 WAS, G. (1989). Ion beam modification of metals: Compositional and microstructural changes. *Progress In Surface Science*, 32(3-4), 211-332. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/0079-6816\(89\)90005-1](http://dx.doi.org/10.1016/0079-6816(89)90005-1)
- 96 WEI, C., Lin, J., Jiang, T., & Ai, C. (2001). Tribological characteristics of titanium nitride and titanium carbonitride multilayer films. *Thin Solid Films*, 381(1), 104-118. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0040-6090\(00\)01541-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0040-6090(00)01541-8)
- 97 ZHECHEVA, A., Sha, W., Malinov, S., & Long, A. (2005). Enhancing the microstructure and properties of titanium alloys through nitriding and other surface engineering methods. *Surface and Coatings Technology*, 200(7), 2192-2207. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.07.115>
- 98 ZHENG, J., Hao, J., Liu, X., Gong, Q., & Liu, W. (2013). The plasma nitriding treatment of TiN/TiCN multilayer films. *Applied Surface Science*, 268, 195-203. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.12.058>

BIBLIOGRAFÍA

- AGUIRRE MONTOYA, V. (2008). Contribución al estudio experimental de la fricción pitón-camisa en un motor de combustión interna (Ingeniera Mecánica). Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, España.
- BARBIERI, F., Otani, C., Lepienski, C., Urruchi, W., Maciel, H., & Petraconi, G. (2002). Nanoindentation study of Ti6Al4V alloy nitrided by low intensity plasma jet process. *Vacuum*, 67(3-4), 457-461. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0042-207x\(02\)00231-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0042-207x(02)00231-2)
- BULL, S., Bhat, D., & Staia, M. (2003). Properties and performance of commercial TiCN coatings. Part 2: tribological performance. *Surface And Coatings Technology*, 163-164, 507-514. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972\(02\)00651-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972(02)00651-5)
- CASANOVA, J., Aguirre, M. V. (2005) Banco de pruebas para medida de fricción en pistones. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*. Vol. 9, N.º 3, pp. 79-94, 2005
- CHEN, K. & Jaung, G. (1997). D.c. diode ion nitriding behavior of titanium and Ti-6Al-4V. *Thin Solid Films*, 303(1-2), 226-231. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0040-6090\(97\)00075-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0040-6090(97)00075-8)
- CHEN, R., Tu, J., Liu, D., Mai, Y., & Gu, C. (2011). Microstructure, mechanical and tribological properties of TiCN nanocomposite films deposited by DC magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 205(21-22), 5228-5234. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.05.034>
- CHENG, Y., Browne, T., Heckerman, B., Bowman, C., Gorokhovskiy, V., & Meletis, E. (2010). Mechanical and tribological properties of TiN/Ti multilayer coating. *Surface and Coatings Technology*, 205(1), 146-151. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.06.023>
- Database of Raman spectroscopy, X-ray diffraction and chemistry of minerals. (2017). [En línea]. Rruff.info. Retrieved 30 January 2017, Disponible en: <http://rruff.info/>
- DOUGAR JABON, V., Chacón Velasco, A., & Vivas, F. (1998). Hydrogen negative ion production in an electron cyclotron resonance driven plasma. *Review of Scientific Instruments*, 69(2), 950-952. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1148618>

DOUGAR V., Dulcé M., J., Guerra-Mutiz, M. (1999) *Revista colombiana de Física*, ISSN 0120-2650, Vol. 31 No. 2, 173-176

DOUGAR, V., Castro, J., Dulcé M., J., Cabrera C.R. (2003). Estudio mediante xps de un acero al carbono implantado con nitrógeno por medio de descargas de alto voltaje abajas presiones. *Revista Colombiana de Física*, Vol. 35, No. 2, p 5

DOUGAR, V., Castro, J., Dulcé M., J., Tsyganokv, P.A. (1999) Device "JUPITER" for ion implantation. *Revista colombiana de Física*, ISSN 0120-2650, Vol. 31 No. 2, 181-184

DOUGAR-JABON, V. (2001). Production of Hydrogen and Deuterium Negative Ions in an Electron Cyclotron Resonance Driven Plasma. *Physica Scripta*, 63(4), 322-325. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1238/physica.regular.063a00322>

DOUGAR-JABON, V., Moreno, J., & Tsygankov, P. (2002). High voltage pulse discharge for ion treatment of metals. *Review of Scientific Instruments*, 73(2), 828-830. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1429785>

DOUGAR-JABON, V., Silva, M. A., Uribe, I., Castro B., J., (2002) Cinética de permeación de hidrógeno en un acero implantado con iones de nitrógeno. *Revista Colombiana De Física*, Vol 34. p 4

DOUGAR-JABON, V., Dulcé Moreno, J., & Tsygankov, P. (2002). Implantación iónica. *Revista Respuestas*, 19 (12), 19-31

DUGAR-ZHABON, V., Dulcé Moreno, H. J., Villamizar, H., & V. Niño, E. D. (2012). A new method for surface modifications of carbon steels and alloys. *Materials Research*, 15(6), 969-973. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1590/s1516-14392012005000133>

DULCÉ M., H., Rueda V., A., & Dougar-Jabon, V. (2005). 3DII implantation effect on corrosion properties of the AISI/SAE 1020 steel. *Physica Status Solidi (C)*, 2(10), 3778-3781. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1002/pssc.200461837>

E. DE LA GUERRA OCHOA, et al. (2016). Estudio del texturizado de superficies lubricadas para la mejora del coeficiente de fricción. XIX Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. *Asociacion Española de Ingenieria Mecanica*. p 8

FANG, T., Jian, S., & Chuu, D. (2004). Nanomechanical properties of TiC, TiN and TiCN thin films using scanning probe microscopy and nanoindentation. *Applied Surface Science*, 228(1-4), 365-372. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2004.01.053>

FENG, W., Zhou, H., & Yang, S. (2010). Nano-indentation and wear-resistance behaviors of TiCN films by pulsed plasma on cemented carbide cutting tool. *Materials Science and Engineering: A*, 527(18-19), 4767-4770. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2010.04.024>

GARNICA VILLAMIZAR, H. (2016). Evaluación del desempeño de superficies en acero al carbono implantadas con iones de titanio y nitrógeno frente a bacterias sulfato reductoras (Trabajo de Maestría). Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ciencias, Escuela de Física, Colombia

GARNICA, H., Valbuena Niño, E., & Dugar-Zhabon, V. (2011). Tecnología del plasma aplicada a problemáticas en el sector hidrocarburos en Colombia. *Revista Iteckne*, 8(1). [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.15332/iteckne.v8i1.260>

GOROKHOVSKY, V. (2010). Lafad-Assisted Plasma Surface Engineering Processes for Wear and Corrosion Protection: A Review. *Ceramic Engineering and Science Proceedings*. p 19

GOROKHOVSKY, V. & Belluz, P. (2013). Ion treatment by low pressure arc plasma immersion surface engineering processes. *Surface and Coatings Technology*, 215, 431-439. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.10.069>

GOROKHOVSKY, V., Bowman, C., Gannon, P., VanVorous, D., Voevodin, A., & Rutkowski, A. (2007). Tribological performance of hybrid filtered arc-magnetron coatings. Part II: Tribological properties characterization. *Surface and Coatings Technology*, 201(14), 6228-6238. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.11.017>

GUTIÉRREZ, B., Vera-Rivera, F., & Niño, E. (2017). Design and implementation of a web application to estimate the surface density of implanted ions in solid substrates. *Journal of Physics: Conference Series*, 786, 012015. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/786/1/012015>

HAINSWORTH, S. & Soh, W. (2003). The effect of the substrate on the mechanical properties of TiN coatings. *Surface and Coatings Technology*, 163-164, 515-520. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972\(02\)00652-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972(02)00652-7)

HUANG, S., Ng, M., Samandi, M., & Brandt, M. (2002). Tribological behaviour and microstructure of TiCxN(1-x) coatings deposited by filtered arc. *Wear*, 252(7-8), 566-579. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0043-1648\(02\)00010-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0043-1648(02)00010-8)

HUBER, P., Manova, D., Mändl, S., & Rauschenbach, B. (2003). Formation of TiN, TiC and TiCN by metal plasma immersion ion implantation and deposition. *Surface*

and Coatings Technology, 174-175, 1243-1247. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972\(03\)00458-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972(03)00458-4)

IDEAM - IDEAM. (2017). Ideam.gov.co. [En línea]. 04 de enero de 2017 Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/>

JIN, G., Xu, B., Wang, H., Li, Q., & Wei, S. (2006). Investigation on the formation and wear resistance of TiC coatings. *Materials Science and Engineering: A*, 435-436, 355-359. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2006.07.057>

JÓVAJ, M., Arjángelski, V., & Ludeña Luque, A. (1982). Motores de automóvil (1st ed.). Moscú: Mir

JU, S., Weng, C., Chang, J., & Hwang, C. (2002). A molecular dynamics study of deposition rate dependence of film morphology in the sputtering process. *Surface and Coatings Technology*, 149(2-3), 135-142. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972\(01\)01445-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972(01)01445-1)

KAJIOKA, H., Higuchi, K., & Nakasone, M. (1995). Low voltage-high current discharge of Ti vapour in high vacuum. *Thin Solid Films*, 256(1-2), 124-135. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/0040-6090\(94\)06387-7](http://dx.doi.org/10.1016/0040-6090(94)06387-7)

KHVESYUK, V. & Tsygankov, P. (1997). The use of a high-voltage discharge at low pressure for 3D ion implantation. *Surface and Coatings Technology*, 96(1), 68-74. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972\(97\)00117-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972(97)00117-5)

LIANG, C., Cheng, G., Zheng, R., & Liu, H. (2011). Fabrication and performance of TiN/TiAlN nanometer modulated coatings. *Thin Solid Films*, 520(2), 813-817. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2011.04.159>

LIST, Hans. Motores de combustión interna: Desgaste coste de explotación y rentabilidad. 2 ed. Barcelona: Labor, 1944. p 464

LIU, A., Wang, X., & Tang, B. (2002). Improve retained dose and impact energy of inner surface plasma immersion ion implantation using long pulse duration with deflecting electric field. *Surface and Coatings Technology*, 149(2-3), 114-118. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972\(01\)01494-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972(01)01494-3)

LÓPEZ VELÁZQUEZ, A. et al. (2011). Estudio tribológico del acero AISI 1045 empleando el método pin- disco. Congreso Internacional Anual de la SOMIM. San Luis Potosí, México. pp 1-6. [En línea]. Disponible en: http://somim.org.mx/articulos2010/memorias/memorias2011/pdfs/A3/A3_68.pdf

MA, L., Cairney, J., Hoffman, M., & Munroe, P. (2004). Characterization of TiN thin films subjected to nanoindentation using focused ion beam milling. *Applied Surface Science*, 237(1-4), 627-631. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2004.06.135>

MANI, A., Aubert, P., Mercier, F., Khodja, H., Berthier, C., & Houdy, P. (2005). Effects of residual stress on the mechanical and structural properties of TiC thin films grown by RF sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 194(2-3), 190-195. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.06.017>

MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, D., López-Cartes, C., Fernández, A., & Sánchez-López, J. (2009). Influence of the microstructure on the mechanical and tribological behavior of TiC/a-C nanocomposite coatings. *Thin Solid Films*, 517(5), 1662-1671. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2008.09.091>

MARTÍNEZ-PÉREZ, F. & Barroso-Moreno, A. (2013). Mejoras en la construcción de camisas de cilindro de motores de combustión interna ciclo diesel. *Revista de Metalurgia*, 49(2), 100-110. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3989/revmetalm.1228>

MATTOX, D. (2000). Physical vapor deposition (PVD) processes. *Metal Finishing*, 98(1), 410-423. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0026-0576\(00\)80350-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0026-0576(00)80350-5)

MELETIS, E. (2002). Intensified plasma-assisted processing: science and engineering. *Surface and Coatings Technology*, 149(2-3), 95-113. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972\(01\)01441-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972(01)01441-4)

MENA GALVIS, Ronald Leandro; Villamizar Sierra, Sergio Giovanni. (2012). 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). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

MEZA, Juan Manuel, Chaves, Cesar A., & Vélez, Juan Manuel. (2006). Técnicas de indentación: medición de propiedades mecánicas en cerámicas. *DYNA*, 73(149), 81-93. [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532006000200007&lng=en&tlng=es

MUSIL, J. & Vlček, J. (1999). A perspective of magnetron sputtering in surface engineering. *Surface and Coatings Technology*, 112(1-3), 162-169. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972\(98\)00748-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972(98)00748-8)

MUSIL, J. & Vlček, J. (2001). Magnetron sputtering of hard nanocomposite coatings and their properties. *Surface and Coatings Technology*, 142-144, 557-566. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972\(01\)01139-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972(01)01139-2)

NIESSEN, A. (2010). Mapas por microscopia de Raman. Departamento de Conservação e Restauo. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa. p 75

NIGRO, N., Storti, M. A., Ambroggi, L. (1999) Modelización numérica de un motor de combustión interna monocilíndrico encendido por chispa. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*. Vol. 15, No. 1, 21-54

NINO V., Ely Dannier, PENA B. Darío Y, Reyes C. Martha S, Dugar-Zhabon. Valeriy. (2013) Estudio experimental de la resistencia a la corrosión de un acero al carbono AISI-SAE 1020 implantado con iones de titanio. *Rev. LatinAm. Metal. Mater.*, Vol. 33, No 1, pp. 138-146. ISSN 0255-6952

OBERT, Edward. MOTORES DE COMBUSTION INTERNA, Análisis y aplicaciones. Compañía continental, S.A., Mexico

OSCAR MAURICIO GÓMEZ, Miguel Leonardo Patiño. (2013) 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). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander

PALADINES, A.U., Aperador, W., Sequeda, F. (2010) Evaluación de las propiedades tribológicas y corrosión del Sistema CrN/Cr depositado sobre acero AISI 304, 4140,1075 por la técnica Magnetron Sputtering Reactivo DC. *Avances Investigación en Ingeniería*, 13, 61-70.

PARADA BECERRA. Fredy Fabián. et al. (2011) Estudio de los haces electrónicos en la descarga eléctrica de alto voltaje a bajas presiones. *Puente Revista Científica*, Vol. 5

PELLIER, J., Paris, J., Denape, J., Bry, J., & Genissieux, V. (2016). General Procedure for Selecting and Testing Materials and Coatings in Response to a Tribological Problem. *Journal of Tribology*, 139(3), 031302. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1115/1.4034331>

POLCAR, T., Kubart, T., Novák, R., Kopecký, L., & Šíroký, P. (2005). Comparison of tribological behaviour of TiN, TiCN and CrN at elevated temperatures. *Surface and Coatings Technology*, 193(1-3), 192-199. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.07.098>

POLCAR, T., Novák, R., & Široký, P. (2006). The tribological characteristics of TiCN coating at elevated temperatures. *Wear*, 260(1-2), 40-49. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2004.12.031>

PRECHT, W., Lunarska, E., Czyzniewski, A., Pancielejko, M., & Walkowiak, W. (1996). Corrosion resistance, structure and mechanical properties of PVD, TiCxN 1-x coatings. *Vacuum*, 47(6-8), 867-869. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/0042-207x\(96\)00084-x](http://dx.doi.org/10.1016/0042-207x(96)00084-x)

PULKRABEK, W. (2004). Engineering fundamentals of the internal combustion engine (1st ed.). Upper Saddle River N.J.: Pearson Prentice Hall.

RAUTRAY, T., Narayanan, R., & Kim, K. (2011). Ion implantation of titanium based biomaterials. *Progress in Materials Science*, 56(8), 1137-1177. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2011.03.002>

REYES CORZO. Martha. (2011) Estudio experimental de la resistencia a la corrosión de un acero al carbono AISI SAE 1020 implantado con iones de titanio vía plasma. (Trabajo de grado). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander

RIVERA, F., Gutiérrez, B., Dulce-Moreno, H., Duran-Flórez, F., & Niño, E. (2016). Estimate of the concentration of implanted ions in solid substrates using a web application. *Journal of Physics: Conference Series*, 743, 012016. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/743/1/012016>

ROCHA, R. C. S. (2011) Modificação da superfície e das propriedades tribológicas do titânio por carbonitretação a plasma. *Revista Matéria*, V. 16, No. 3, 767–774

RODRIGUEZ TORRES, D. (2007). Evaluación teórica del incremento de rendimiento del motor mcculloch mc-92 con la utilización de recubrimientos cerámicos en la cámara de combustión (Trabajo de Grado). Bogotá D.C.: Universidad de San Buenaventura

ROJAS TAVERA, J., Peña Ballesteros, D., & Estupiñán Durán, H. (2014). Relación entre las propiedades mecánicas y tribológicas de Ti6AL4V ELI nitrurado mediante descarga intensa de plasma. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 24(2), 7. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.18359/rcin.390>

SALINAS QUINTERO. Deisy Viviana, Chinchilla Ballesteros. Luisa Fernanda. Peña Ballesteros. Darío Yesid, V. Niño. Ely Dannier. (2011) Modificación superficial de un acero AISI SAE 1045 mediante la implantación de iones de nitrógeno y titanio. *Revista Iteckne*, Vol 8. No.1.

SANTOS JÚNIOR, E., Camargo Júnior, S., Soares, G., & Delplancke-Ogletree, M. (2010). Mechanical and tribological properties of Ti-containing carbon

nanocomposite coatings deposited on TiAlV alloys. *Materials Research*, 13(4), 527-533. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1590/s1516-14392010000400016>

SCHNEIDER, J., Voevodin, A., Rebholz, C., Matthews, A., Hogg, J., Lewis, D., & Ives, M. (1995). X-Ray diffraction investigations of magnetron sputtered TiCN coatings. *Surface and Coatings Technology*, 74-75, 312-319. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/0257-8972\(95\)08238-7](http://dx.doi.org/10.1016/0257-8972(95)08238-7)

SHAMIN M., Scheyr J.T., Conrad J. R., (1991). *J. Appl. Phys.*, 69, 2904-2908

SHIGLEY, J., Uicker, J., & Contin, H. (1988). Teoría de máquinas y mecanismos (1st ed.). México: McGraw-Hill.

SHOJAEI, O. & Karimi, A. (1998). Comparison of mechanical properties of TiN thin films using nanoindentation and bulge test. *Thin Solid Films*, 332(1-2), 202-208. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0040-6090\(98\)01057-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0040-6090(98)01057-8)

SILVA PLATA. Miguel Ángel. (2004) Estudio de la implantación iónica tridimensional (3DII) en descargas a baja presión como protección de aceros a la permeación de hidrógeno. (Trabajo de Maestría). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander

SKOOG, D., Holler, F., Nieman, T., & Martín Gómez, M. (2001). Principios de análisis instrumental (1st ed.). Madrid: McGraw-Hill Interamericana.

SMITH, E. (1998). Mechanical engineer's reference book (1st ed.). Oxford, England: Butterworth Heinemann.

ASTM (2000) Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. G99-95a. Pennsylvania: ASTM International

STONE, R. (1985). Introduction to internal combustion engines (1st ed.). Basingstoke: Macmillan

SUESCÚN RIVEROS, J. & Fuentes Bayona, A. (2015). Reingeniería y construcción del cilindro de un motor de dos tiempos mono-cilíndrico con pequeña cilindrada para aplicación agrícola (Trabajo de Grado). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander

TAKADOUM, J., Bennani, H., & Allouard, M. (1997). Friction and wear characteristics of TiN, TiCN and diamond-like carbon films. *Surface and Coatings Technology*, 88(1-3), 232-238. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972\(96\)02905-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972(96)02905-2)

TIAN, X., Zeng, Z., Tang, B., Kwok, T., & Chu, P. (2000). Fast pulsing plasma immersion ion implantation for tribological applications. *Surface and Coatings Technology*, 128-129, 226-230. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972\(00\)00652-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0257-8972(00)00652-6)

TORRES AMARIS, E. (2005). Simulación de implantación de nitrógeno en hierro policristalino por el método de dinámica molecular (Trabajo de Maestría). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander

URAS H. Mehmet, Patterson Donald J. (1984). effect of some lubricant and engine variables on instantaneous piston ring assembly friction. *SAE Technical Paper Series*, 840178

V. D. Dugar-Jabon, Silva M. A, Uribe I, Castro B. J, (2002) Cinética de permeación de hidrógeno en un acero implantado con iones de nitrógeno. *Revista Colombiana De Física*, Vol 34. p 4

VALBUENA, E., Salinas, D., Y. Peña, D., & Chinchilla, L. (2011). Modificación superficial de un acero AISI SAE 1045 mediante la implantación de iones de nitrógeno y titanio. *Revista Iteckne*, 8(1). [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.15332/iteckne.v8i1.259>

VALBUENA, E. (2004). Comportamiento del Acero SAE-4140 implantado con iones de nitrógeno en ambientes hidrogenados (Trabajo de Grado). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander

VALBUENA, E., Dugar-zhabon, V., Dulce Moreno, J., Peña Rodríguez, G., Garnica, H., & Tsygankov, P. (2012). Aplicación de descargas simultáneas de alto voltaje y arco eléctrico para el tratamiento superficial avanzado de metales. *Revista Iteckne*, 9(1). [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.15332/iteckne.v9i1.56>

VALBUENA, Ely Dannier. Peña Ballesteros, Darío Yesid. Reyes, Martha. Dugar-Zhabon, Valeriy. (2013) Estudio Experimental De La Resistencia A La Corrosión De Un Acero Al Carbono AISI-SAE 1020 implantado con iones de titanio. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, Vol. 33. No.1

VALVODA, V. (1996). Structure of TiN coatings. *Surface and Coatings Technology*, 80(1-2), 61-65. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/0257-8972\(95\)02686-x](http://dx.doi.org/10.1016/0257-8972(95)02686-x)

VETTER, J., Barbezat, G., Crummenauer, J., & Avissar, J. (2005). Surface treatment selections for automotive applications. *Surface and Coatings Technology*, 200(5-6), 1962-1968. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.08.011>

VOEVODIN, A. & Zabinski, J. (2000). Supertough wear-resistant coatings with 'chameleon' surface adaptation. *Thin Solid Films*, 370(1-2), 223-231. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0040-6090\(00\)00917-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0040-6090(00)00917-2)

VOEVODIN, A. & Zabinski, J. (2005). Nanocomposite and nanostructured tribological materials for space applications. *Composites Science And Technology*. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.10.008>

VOEVODIN, A., Rebholz, C., Schneider, J., Stevenson, P., & Matthews, A. (1995). Wear resistant composite coatings deposited by electron enhanced closed field unbalanced magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 73(3), 185-197. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/0257-8972\(94\)02381-6](http://dx.doi.org/10.1016/0257-8972(94)02381-6)

WAS, G. (1989). Ion beam modification of metals: Compositional and microstructural changes. *Progress In Surface Science*, 32(3-4), 211-332. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/0079-6816\(89\)90005-1](http://dx.doi.org/10.1016/0079-6816(89)90005-1)

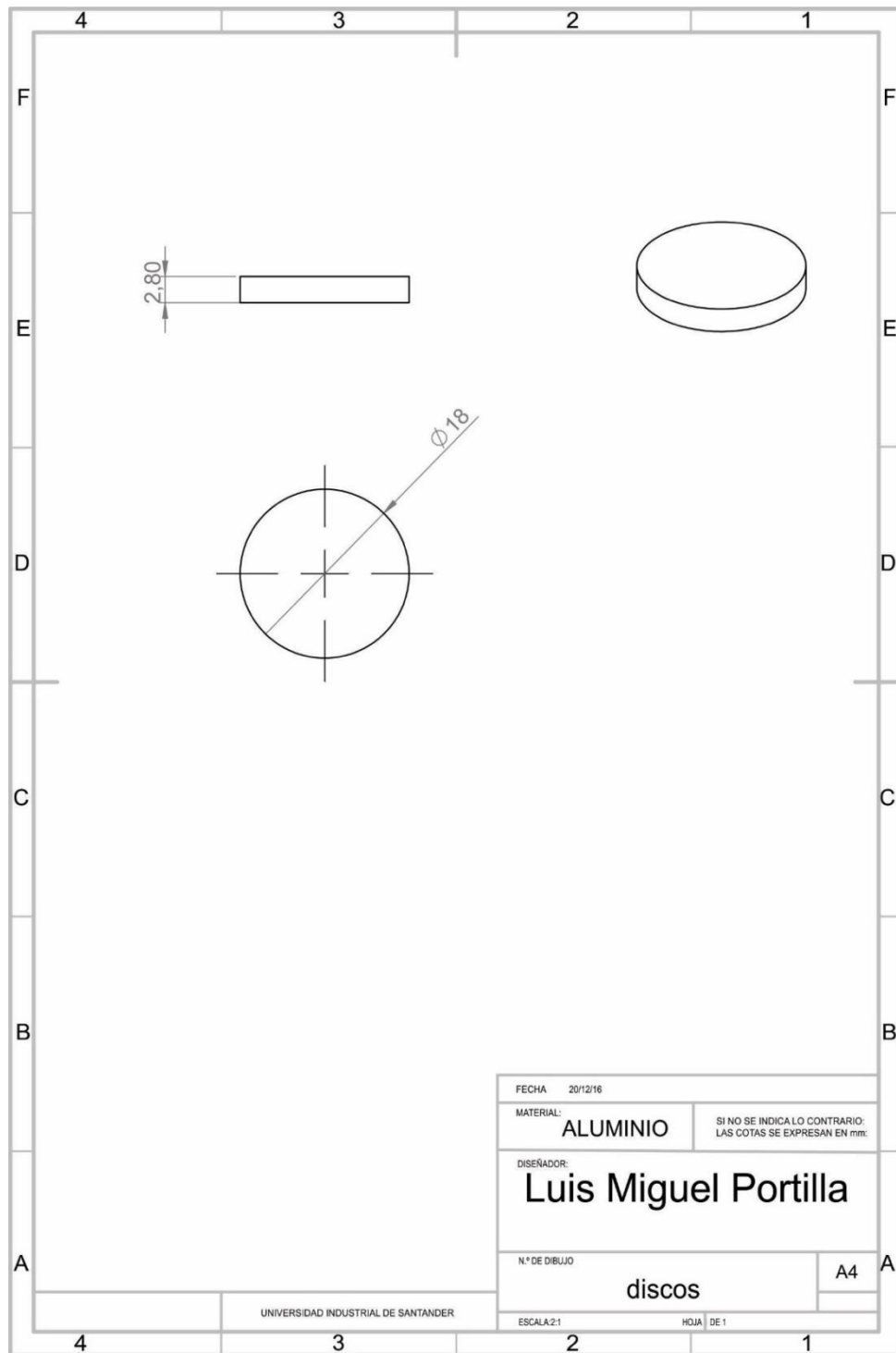
WEI, C., Lin, J., Jiang, T., & Ai, C. (2001). Tribological characteristics of titanium nitride and titanium carbonitride multilayer films. *Thin Solid Films*, 381(1), 104-118. [En línea]. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/s0040-6090\(00\)01541-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0040-6090(00)01541-8)

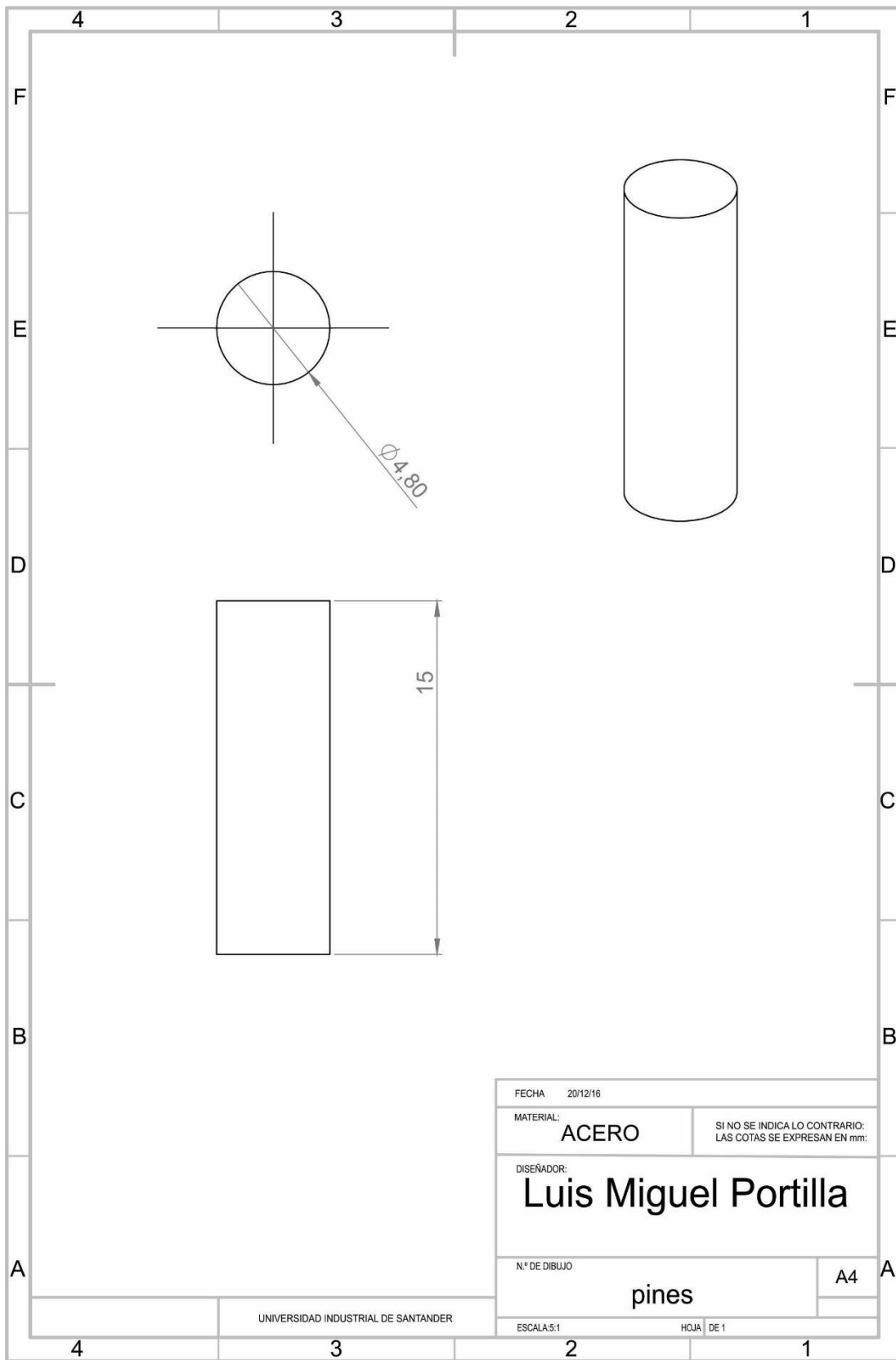
ZHECHEVA, A., Sha, W., Malinov, S., & Long, A. (2005). Enhancing the microstructure and properties of titanium alloys through nitriding and other surface engineering methods. *Surface and Coatings Technology*, 200(7), 2192-2207. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.07.115>

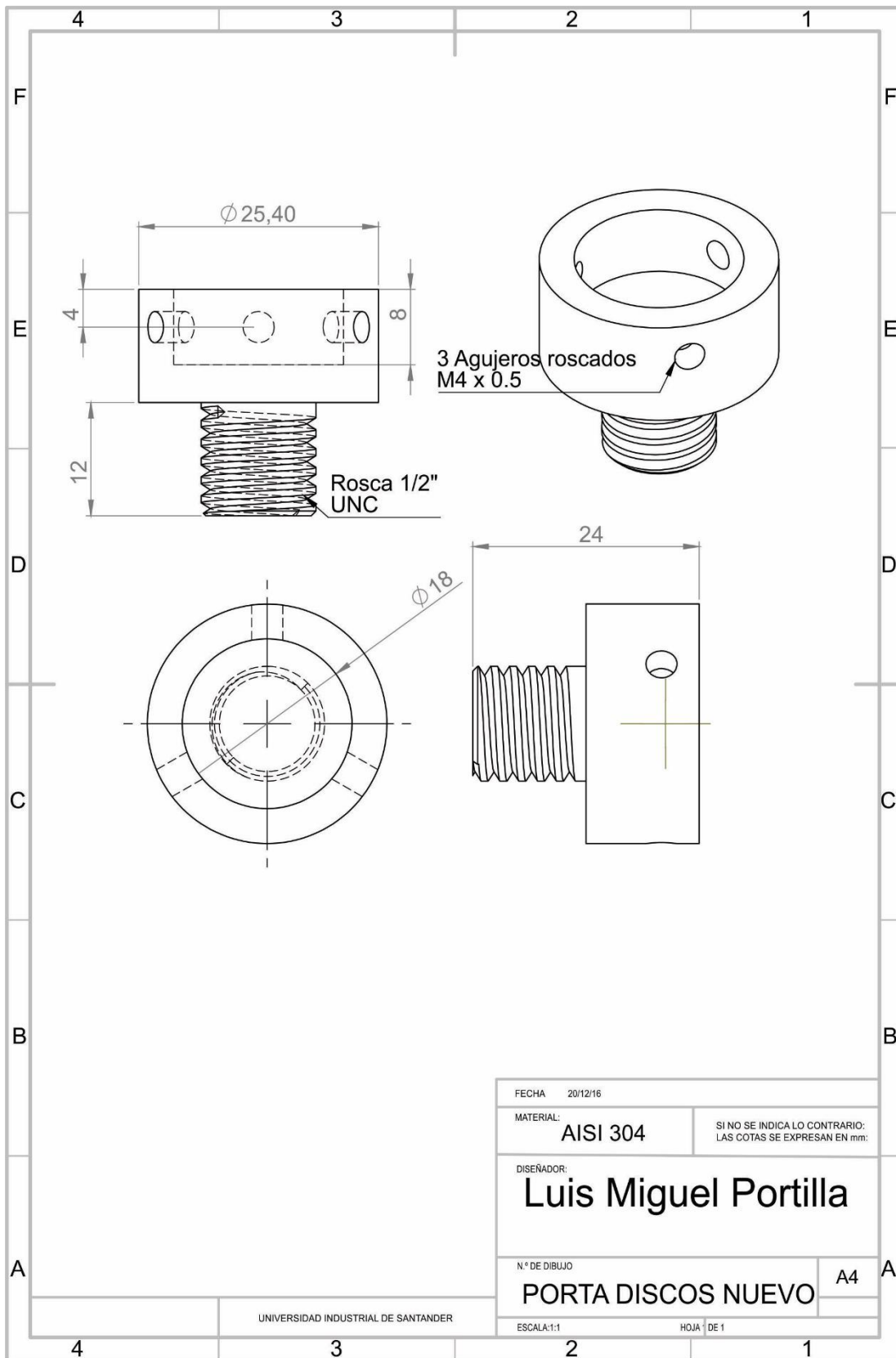
ZHENG, J., Hao, J., Liu, X., Gong, Q., & Liu, W. (2013). The plasma nitriding treatment of TiN/TiCN multilayer films. *Applied Surface Science*, 268, 195-203. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.12.058>

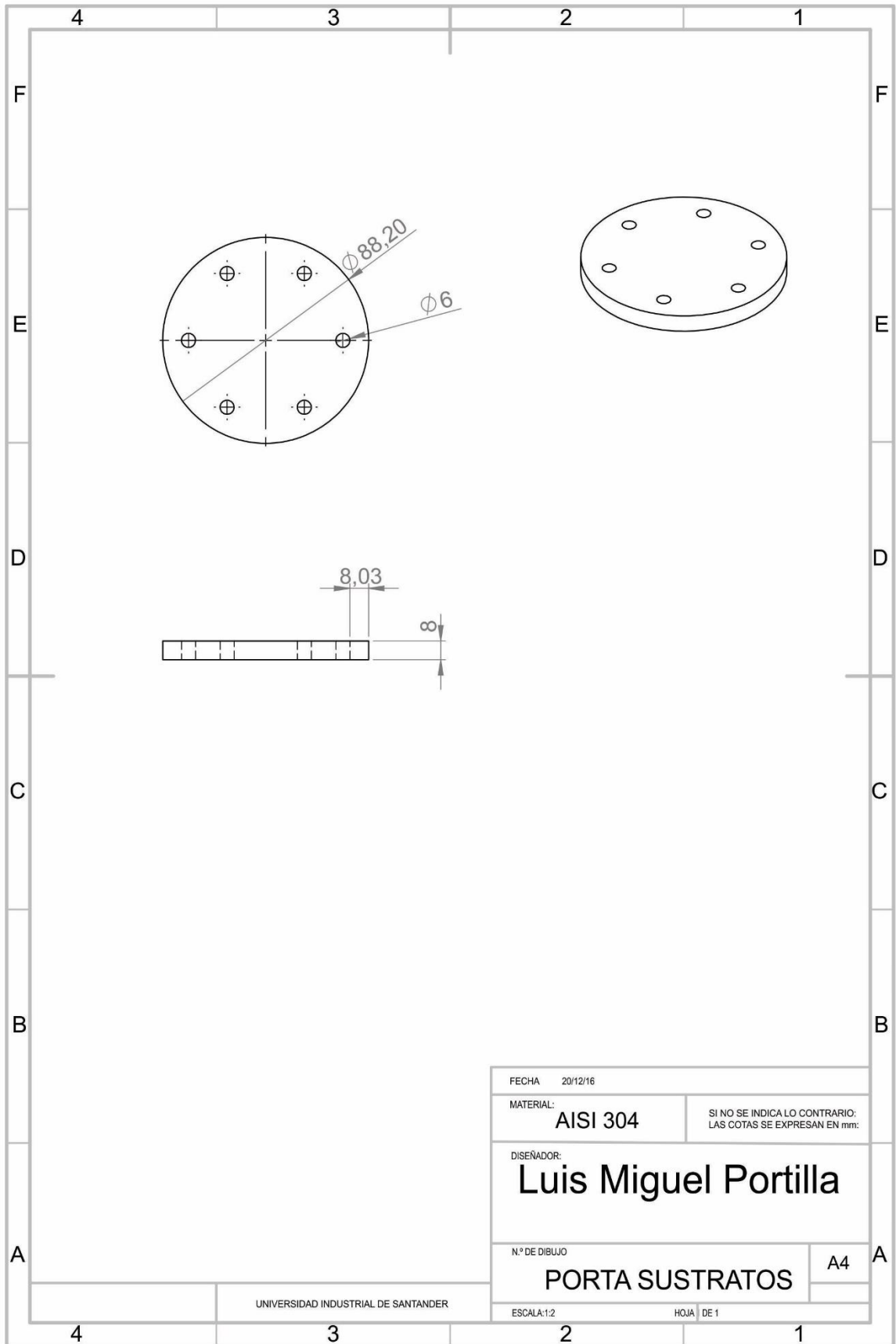
ANEXOS

ANEXO A. PIEZAS DISEÑADAS EN CAD









FECHA 20/12/16	
MATERIAL: AISI 304	SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm:
DISEÑADOR: Luis Miguel Portilla	
Nº DE DIBUJO PORTA SUSTRATOS	A4
ESCALA: 1:2	HOJA DE 1

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

ANEXO B. RESULTADOS ANÁLISIS ELEMENTAL DE ABSORCIÓN ATÓMICA POR CHISPA DE ARCO DE LOS DISCOS B, Q Y T.

A continuación se presentan los resultados entregados por el laboratorio de espectroscopía del parque tecnológico de la Universidad Industrial de Santander.

2/1/2017 10:36:46 AM

RESULTADOS DE ANALISIS

DISCO B										
SampleNo	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Be
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	13.17	0.330	1.076	0.0056	0.952	0.0026	0.991	0.024	0.059	<0.00030
2.	13.32	0.259	1.023	0.0048	0.930	0.0029	0.954	0.017	0.056	<0.00030
Ø	13.25	0.294	1.050	0.0052	0.941	0.0027	0.972	0.021	0.057	<0.00030
σ	0.106	0.050	0.037	0.00057	0.016	0.00022	0.026	0.0050	0.0022	
ν	0.800	17.01	3.524	10.96	1.700	8.148	2.675	23.81	3.860	
	Ca	Cd	Co	Ga	Na	Pb	Sn	Sr	V	Zr
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.0016	<0.00050	<0.0010	0.0080	0.00062	<0.0050	<0.0050	<0.0010	0.020	<0.0020
2.	0.0017	<0.00050	<0.0010	0.0074	<0.00050	<0.0050	<0.0050	<0.0010	0.019	<0.0020
Ø	0.0017	<0.00050	<0.0010	0.0077	0.00056	<0.0050	<0.0050	<0.0010	0.020	<0.0020
σ	0.00010			0.00042	0.00008				0.0010	
ν	5.882			5.455	14.29				5.000	
	Al									
	%									
1.	83.34									
2.	83.39									
Ø	83.37									
σ	0.036									
ν	0.043									

RESULTADOS DE ANALISIS

DISCO Q

SampleNo

	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Ni %	Zn %	Ti %	Be %
1.	12.95	0.338	1.358	0.011	1.009	0.011	1.346	0.022	<0.0010	<0.00030
2.	13.07	0.223	1.254	0.0057	1.063	0.0052	1.311	0.011	>0.360	<0.00030
Ø	13.01	0.281	1.306	0.0083	1.036	0.0081	1.329	0.017	0.180	<0.00030
σ	0.085	0.081	0.074	0.0037	0.038	0.0041	0.025	0.0078	0.254	
ν	0.653	28.83	5.666	44.58	3.668	50.62	1.881	45.88	141.11	

	Ca %	Cd %	Co %	Ga %	Na %	Pb %	Sn %	Sr %	V %	Zr %
1.	0.0016	<0.00050	0.012	>0.048	0.0012	0.032	0.088	<0.0010	0.116	0.0044
2.	0.0017	<0.00050	<0.0010	>0.048	<0.00050	0.0075	0.023	<0.0010	0.042	<0.0020
Ø	0.0017	<0.00050	0.0065	~0.048	0.00085	0.020	0.055	<0.0010	0.079	0.0032
σ	0.00010		0.0078		0.00049	0.017	0.046		0.052	0.0017
ν	5.882		120.00		57.65	85.00	83.64		65.82	53.13

	Al %
1.	82.65
2.	82.57
Ø	82.61
σ	0.057
ν	0.069

RESULTADOS DE ANALISIS

DISCO T

SampleNo

	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Ni %	Zn %	Ti %	Ag %
1.	11.24	1.892	<2.949	0.050	0.744	0.064	0.991	1.067	<0.0010	0.021
2.	11.56	1.336	3.310	0.037	0.758	0.045	1.069	0.827	<0.0010	0.017
Ø	11.40	1.614	3.130	0.043	0.751	0.055	1.030	0.947	<0.0010	0.019
σ	0.226	0.393	0.255	0.0092	0.0099	0.013	0.055	0.170		0.0028
ν	1.982	24.35	8.147	21.40	1.318	23.64	5.340	17.95		14.74

	B %	Ba %	Be %	Bi %	Ca %	Cd %	Co %	Ga %	In %	Li %
1.	0.011	0.0019	0.00097	0.224	0.0015	<0.00050	0.067	>0.048	>0.022	0.0096
2.	0.0081	0.0015	0.00078	0.186	0.0015	<0.00050	0.055	>0.048	>0.022	0.0086
Ø	0.0095	0.0017	0.00088	0.205	0.0015	<0.00050	0.061	~0.048	>0.022	0.0091
σ	0.0021	0.00028	0.00013	0.027			0.0085			0.00071
ν	22.11	16.47	14.77	13.17			13.93			7.802

	Mo %	Na %	P %	Pb %	Sn %	Sr %	V %	Zr %	Sb %	Hg %
1.	>0.018	0.0039	<0.0020	0.129	0.389	<0.0010	>0.144	0.015	<0.0070	<0.0020
2.	>0.018	0.0031	<0.0020	0.088	0.322	<0.0010	>0.144	0.013	<0.0070	<0.0020
Ø	~0.018	0.0035	<0.0020	0.109	0.356	<0.0010	~0.144	0.014	<0.0070	<0.0020
σ		0.00057		0.029	0.047			0.0014		
ν		16.29		26.61	13.20			10.00		

	Al %
1.	79.89
2.	80.11
Ø	80.00
σ	0.156
ν	0.195

ANEXO C. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE SRIM-TRIM

A continuación se presenta en las figuras 69, 70 y 71 los datos de ingreso y parámetros establecidos para efectuar la simulación de la implantación iónica tridimensional incidente en la superficie de aluminio aleado.

Figura 69. Datos de entrada para la simulación. (a) Ti y (b) N

The figure shows two screenshots of the SRIM-TRIM software interface. Both screenshots are titled "Ion Stopping and Range Tables".

(a) Titanium (Ti): The "Ion" field is set to "PT Ti" (Titanium) with atomic number 22 and mass 47.95. The "Ion Energy Range (keV)" is set from 2 to 30. The "Target" is "Titanium in Al" with a density of 2.70727 g/cm³. The "Target Description" is "Titanium in Al". The "Stopping Power Units" are set to "keV / micron". The "Compound Correction" is set to 1. The "Calculate Table" button is highlighted in green.

(b) Nitrogen (N): The "Ion" field is set to "PT N" (Nitrogen) with atomic number 7 and mass 14.003. The "Ion Energy Range (keV)" is set from 2 to 30. The "Target" is "Nitrogen in Al" with a density of 2.70727 g/cm³. The "Target Description" is "Nitrogen in Al". The "Stopping Power Units" are set to "keV / micron". The "Compound Correction" is set to 1. The "Calculate Table" button is highlighted in green.

(a)

(b)

FUENTE: Autor.

Figura 70. Datos de entrada para la simulación. (a) Ti y (b) N

The figure shows two screenshots of the SRIM-TRIM software interface, titled "TRIM (Setup Window)".

(a) Titanium (Ti): The "Type of TRIM Calculation" is "DAMAGE". The "Basic Plots" are "Ion Distribution with Recoils projected on Y-Plane". The "ION DATA" is "PT Ti" (Titanium) with atomic number 22 and mass 47.95. The "Angle of Incidence" is 0. The "TARGET DATA" shows "Target Layers" with "Al" (Aluminum) having a width of 500 Ang and a density of 2.707. The "Input Elements to Layer" table lists various elements: Mg, Cr, Ni, Zn, Ga, Na, V, Al. The "Special Parameters" section shows "Name of Calculation" as "Ti(10) into Al", "Stopping Power Version" as "SRIM-2008", "Total Number of Ions" as 100000, and "Plotting Window Depth" as 100000. The "Calculate Quick Range Table" button is highlighted in green.

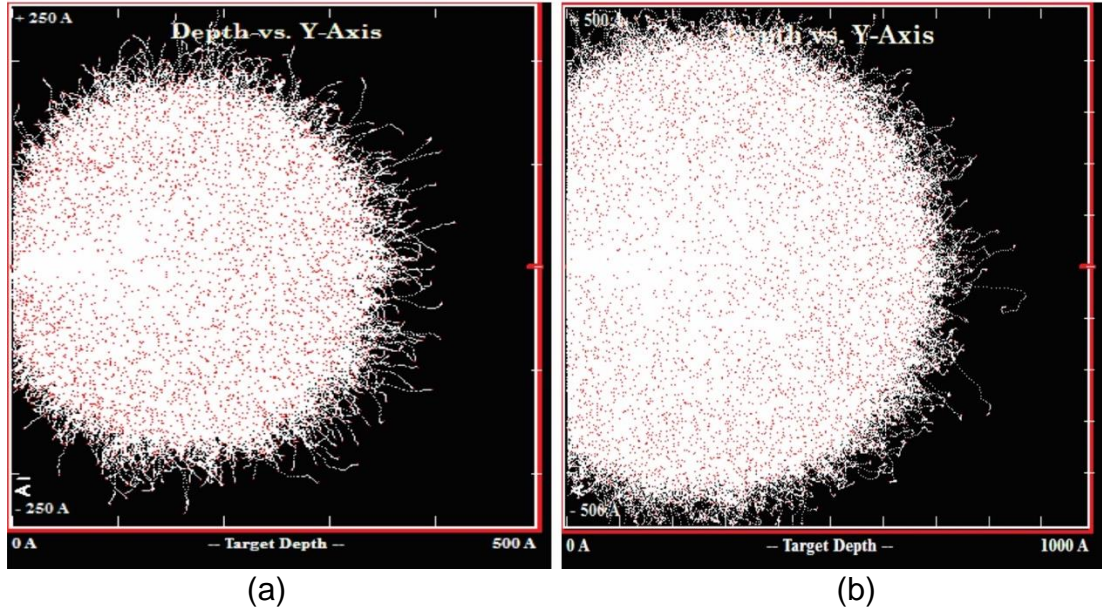
(b) Nitrogen (N): The "Type of TRIM Calculation" is "DAMAGE". The "Basic Plots" are "Ion Distribution with Recoils projected on Y-Plane". The "ION DATA" is "PT N" (Nitrogen) with atomic number 7 and mass 14.003. The "Angle of Incidence" is 0. The "TARGET DATA" shows "Target Layers" with "Al" (Aluminum) having a width of 1000 Ang and a density of 2.707. The "Input Elements to Layer" table lists various elements: Mg, Cr, Ni, Zn, Ga, Na, V, Al. The "Special Parameters" section shows "Name of Calculation" as "N(10) into Al", "Stopping Power Version" as "SRIM-2008", "Total Number of Ions" as 100000, and "Plotting Window Depth" as 100000. The "Calculate Quick Range Table" button is highlighted in green.

(a)

(b)

FUENTE: Autor.

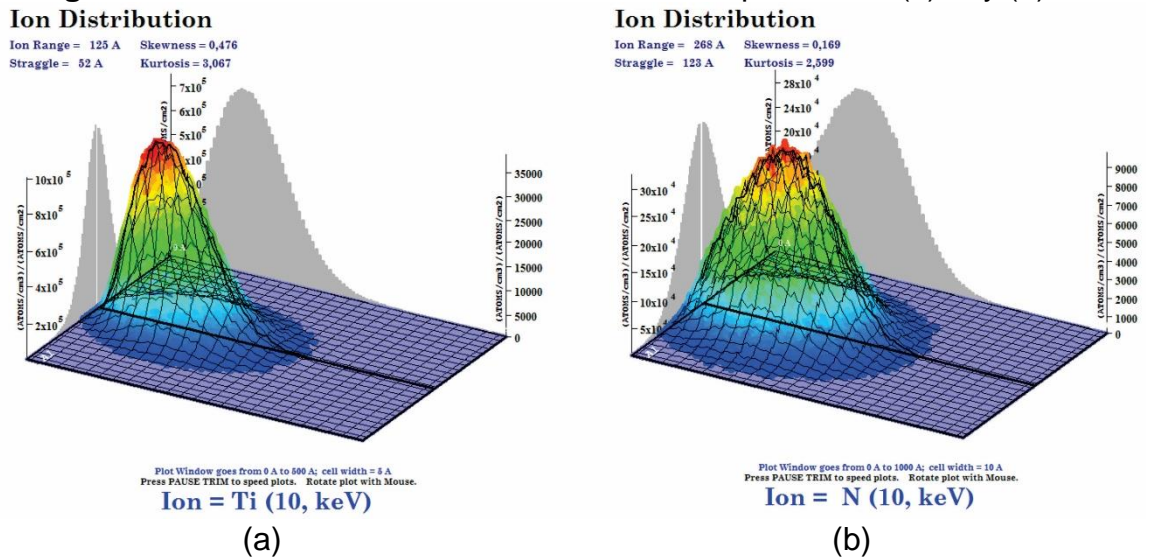
Figura 71. Trayectorias de los iones de (a) Ti y (b) N implantados



FUENTE: Autor.

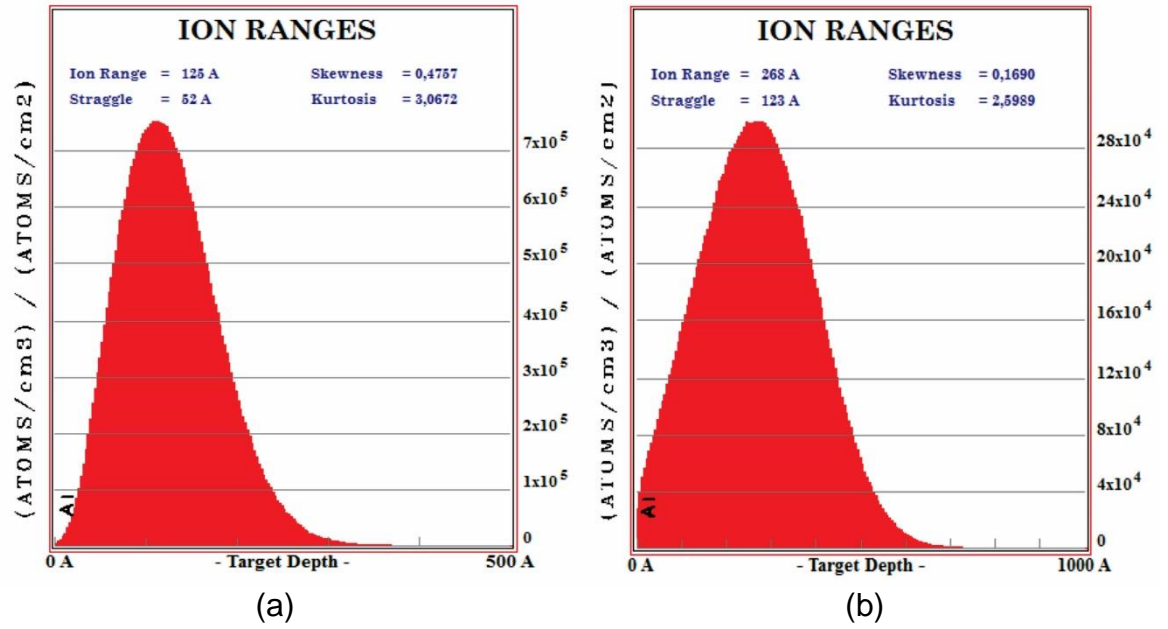
En la figura 71 se muestra la trayectoria de los iones de titanio (a) y nitrógeno (b) acelerados a 10keV sobre la superficie de aluminio aleado cuya composición elemental fue tomada de los resultados obtenidos por la técnica de espectroscopía OES, se percibe un recorrido de los iones implantados a profundidades de hasta 40nm y 70nm respectivamente. En la figura 72 y 73 se registran los perfiles de concentración por profundidad de los iones de Ti (a) y N (b) acelerados a 10keV.

Figura 72. Perfil de concentración 3D de iones implantados. (a) Ti y (b) N



FUENTE: Autor.

Figura 73. Perfil de concentración 2D de iones implantados. (a) Ti y (b) N



FUENTE: Autor.

ANEXO D. NORMA ASTM G99

A continuación se presenta la norma G99 de la American Society for Testing Materials (ASTM) por medio de la cual se estandariza el método de ensayo de desgaste con aparato de pin sobre disco.



Designation: G 99 – 95a (Reapproved 2000)^{e1}

Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus¹

This standard is issued under the fixed designation G 99; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

^{e1} NOTE—Editorial corrections were made throughout in May 2000.

1. Scope

1.1 This test method describes a laboratory procedure for determining the wear of materials during sliding using a pin-on-disk apparatus. Materials are tested in pairs under nominally non-abrasive conditions. The principal areas of experimental attention in using this type of apparatus to measure wear are described. The coefficient of friction may also be determined.

1.2 The values stated in SI units are to be regarded as standard.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

E 122 Practice for Choice of Sample Size to Estimate a Measure of Quality for a Lot or Process²

E 177 Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods²

E 178 Practice for Dealing with Outlying Observations²

G 40 Terminology Relating to Wear and Erosion³

2.2 Other Standard:⁴

DIN-50324 Testing of Friction and Wear

3. Summary of Test Method

3.1 For the pin-on-disk wear test, two specimens are required. One, a pin with a radiused tip, is positioned perpendicular to the other, usually a flat circular disk. A ball, rigidly held, is often used as the pin specimen. The test machine causes either the disk specimen or the pin specimen to revolve about the disk center. In either case, the sliding path is a circle on the disk surface. The plane of the disk may be oriented

either horizontally or vertically.

NOTE 1—Wear results may differ for different orientations.

3.1.1 The pin specimen is pressed against the disk at a specified load usually by means of an arm or lever and attached weights. Other loading methods have been used, such as, hydraulic or pneumatic.

NOTE 2—Wear results may differ for different loading methods.

3.2 Wear results are reported as volume loss in cubic millimetres for the pin and the disk separately. When two different materials are tested, it is recommended that each material be tested in both the pin and disk positions.

3.3 The amount of wear is determined by measuring appropriate linear dimensions of both specimens before and after the test, or by weighing both specimens before and after the test. If linear measures of wear are used, the length change or shape change of the pin, and the depth or shape change of the disk wear track (in millimetres) are determined by any suitable metrological technique, such as electronic distance gaging or stylus profiling. Linear measures of wear are converted to wear volume (in cubic millimetres) by using appropriate geometric relations. Linear measures of wear are used frequently in practice since mass loss is often too small to measure precisely. If loss of mass is measured, the mass loss value is converted to volume loss (in cubic millimetres) using an appropriate value for the specimen density.

3.4 Wear results are usually obtained by conducting a test for a selected sliding distance and for selected values of load and speed. One set of test conditions that was used in an interlaboratory measurement series is given in Table 1 and Table 2 as a guide. Other test conditions may be selected depending on the purpose of the test.

3.5 Wear results may in some cases be reported as plots of wear volume versus sliding distance using different specimens for different distances. Such plots may display non-linear relationships between wear volume and distance over certain portions of the total sliding distance, and linear relationships over other portions. Causes for such differing relationships include initial “break-in” processes, transitions between regions of different dominant wear mechanisms, etc. The extent of such non-linear periods depends on the details of the test system, materials, and test conditions.

3.6 It is not recommended that continuous wear depth data

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee G02 on Wear and Erosion and is the direct responsibility of Subcommittee G02.40 on Non-Abrasive Wear.

Current edition approved Nov. 10, 1995. Published January 1996. Originally published as G 99-90. Last previous edition G 99-95.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.02.

⁴ Available from Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstrasse 6, 1000 Berlin 30, Germany.

TABLE 1 Characteristics of the Interlaboratory Wear Test Specimens

NOTE 1—See Note 4 in 10.4 for information.

	Composition (weight%)	Microstructure	Hardness (HV 10)	Roughness ^A	
				R _z (mean) (μm)	R _a (mean) (μm)
Steel ball (100 Cr6) (AISI 52 100) ^B Diameter 10 mm	1.35 to 1.65 Cr 0.95 to 1.10 C 0.15 to 0.35 Si 0.25 to 0.45 Mn <0.030 P <0.030 S	martensitic with minor carbides and austenite	838 ± 21	0.100	0.010
Steel disc (100 Cr6) (AISI 52 100) ^C Diameter 40 mm	95 % Al ₂ O ₃ (with additives of TiO ₂ , MgO and ZnO)	equi-granular alpha alumina with very minor secondary phases	1610 ± 101 (HV 0.2)	1.369	0.123
Alumina ball, diameter ≤ 10 mm ^D	95 % Al ₂ O ₃ (with additives of TiO ₂ , MgO and ZnO)	equi-granular alpha alumina with very minor secondary phases	1599 ± 144 (HV 0.2)	0.968	0.041

^A Measured by stylus profilometry. R_z is maximum peak-to-valley roughness. R_a is arithmetic average roughness.

^B Standard ball-bearing balls (SKF).

^C Standard spacers for thrust bearings (INA).

^D Manufactured by Compagnie Industrielle des Ceramiques Electroniques, France.

TABLE 2 Results of the Interlaboratory Tests^A

NOTE 1— See Note 4 in 10.4.

NOTE 2—Numbers in parentheses refer to all data received in the tests. In accordance with Practice E 178, outlier data values were identified in some cases and discarded, resulting in the numbers without parentheses. The differences are seen to be small.

NOTE 3—Values preceded by ± are one standard deviation.

NOTE 4—Between eleven and twenty laboratories provided these data.

NOTE 5—Calculated quantities (for example, wear volume) are given as mean values only.

NOTE 6—Values labeled “NM” were found to be smaller than the reproducible limit of measurement.

NOTE 7—A similar compilation of test data is given in DIN-50324.

Results (ball) (disk)	Specimen Pairs			
	Steel-steel	Alumina-steel	Steel-alumina	Alumina-alumina
Ball wear scar diameter (mm)	2.11 ± 0.27 (2.11 ± 0.27)	NM	2.08 ± 0.35 (2.03 ± 0.41)	0.3 ± 0.06 (0.3 ± 0.06)
Ball wear volume (10 ⁻³ mm ³)	198 (198)	...	186 (169)	0.08 (0.08)
Number of values	102 (102)	...	60 (64)	56 (59)
Disk wear scar width (mm)	NM	0.64 ± 0.12 (0.64 ± 0.12)	NM	NM
Disk wear volume (10 ⁻³ mm ³)	...	480 (480)
Number of values	...	60 (60)
Friction coefficient	0.60 ± 0.11	0.76 ± 0.14	0.60 ± 0.12	0.41 ± 0.08
Number of values	109	75	64	76

^A Test conditions: F ≤ 10 N; v ≤ 0.1 ms⁻¹, T ≤ 23°C; relative humidity range 12 to 78 %; laboratory air; sliding distance 1000 m; wear track (nominal) diameter ≤ 32 mm; materials: steel ≤ AISI 52 100; and alumina ≤ α-Al₂O₃.

obtained from position-sensing gages be used because of the complicated effects of wear debris and transfer films present in the contact gap, and interferences from thermal expansion or contraction.

4. Significance and Use

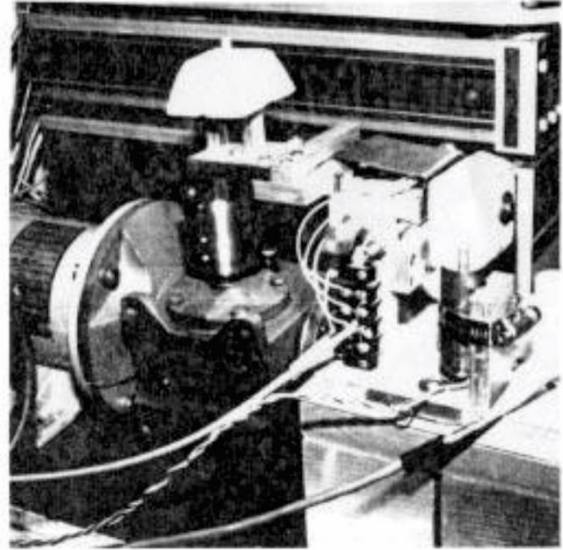
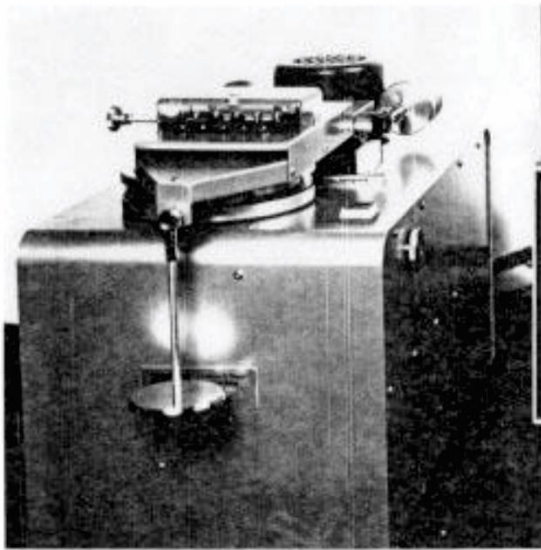
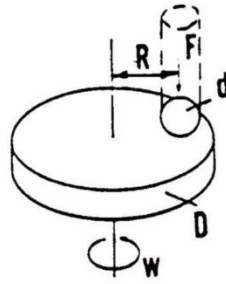
4.1 The amount of wear in any system will, in general, depend upon the number of system factors such as the applied load, machine characteristics, sliding speed, sliding distance, the environment, and the material properties. The value of any wear test method lies in predicting the relative ranking of

material combinations. Since the pin-on-disk test method does not attempt to duplicate all the conditions that may be experienced in service (for example; lubrication, load, pressure, contact geometry, removal of wear debris, and presence of corrosive environment), there is no assurance that the test will predict the wear rate of a given material under conditions differing from those in the test.

5. Apparatus

5.1 *General Description*—Fig. 1 shows a schematic drawing of a typical pin-on-disk wear test system, and photographs of two differently designed apparatuses.⁵ One type of typical system consists of a driven spindle and chuck for holding the revolving disk, a lever-arm device to hold the pin, and attachments to allow the pin specimen to be forced against the revolving disk specimen with a controlled load. Another type of system loads a pin revolving about the disk center against a stationary disk. In any case the wear track on the disk is a

⁵ A number of other reported designs for pin-on-disk systems are given in “A Catalog of Friction and Wear Devices,” American Society of Lubrication Engineers (1973). The sole source of supply of commercially built machines known to the committee at this time is Falex Corp., 1020 Airpark Dr., Sugar Grove, IL 60554. If you are aware of alternative suppliers, please provide this information to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee,¹ which you may attend.



NOTE 1— F is the normal force on the pin, d is the pin or ball diameter, D is the disk diameter, R is the wear track radius, and ω is the rotation velocity of the disk.

FIG. 1 (a) Schematic of pin-on-disk wear test system. (b) Photographs of two different designs.

circle, involving multiple wear passes on the same track. The system may have a friction force measuring system, for example, a load cell, that allows the coefficient of friction to be determined.

5.2 *Motor Drive*—A variable speed motor, capable of maintaining constant speed (±1 % of rated full load motor speed) under load is required. The motor should be mounted in such a manner that its vibration does not affect the test. Rotating speeds are typically in the range 0.3 to 3 rad/s (60 to 600 r/min).

5.3 *Revolution Counter*—The machine shall be equipped with a revolution counter or its equivalent that will record the number of disk revolutions, and preferably have the ability to shut off the machine after a pre-selected number of revolutions.

5.4 *Pin Specimen Holder and Lever Arm*—In one typical system, the stationary specimen holder is attached to a lever arm that has a pivot. Adding weights, as one option of loading, produces a test force proportional to the mass of the weights applied. Ideally, the pivot of the arm should be located in the plane of the wearing contact to avoid extraneous loading forces

due to the sliding friction. The pin holder and arm must be of substantial construction to reduce vibrational motion during the test.

5.5 *Wear Measuring Systems*—Instruments to obtain linear measures of wear should have a sensitivity of 2.5 μm or better. Any balance used to measure the mass loss of the test specimen shall have a sensitivity of 0.1 mg or better; in low wear situations greater sensitivity may be needed.

6. Test Specimens and Sample Preparation

6.1 *Materials*—This test method may be applied to a variety of materials. The only requirement is that specimens having the specified dimensions can be prepared and that they will withstand the stresses imposed during the test without failure or excessive flexure. The materials being tested shall be described by dimensions, surface finish, material type, form, composition, microstructure, processing treatments, and indentation hardness (if appropriate).

6.2 *Test Specimens*—The typical pin specimen is cylindrical or spherical in shape. Typical cylindrical or spherical pin

specimen diameters range from 2 to 10 mm. The typical disk specimen diameters range from 30 to 100 mm and have a thickness in the range of 2 to 10 mm. Specimen dimensions used in an interlaboratory test with pin-on-disk systems are given in Table 1.

6.3 *Surface Finish*—A ground surface roughness of 0.8 μm (32 μin.) arithmetic average or less is usually recommended.

NOTE 3—Rough surfaces make wear scar measurement difficult.

6.3.1 Care must be taken in surface preparation to avoid subsurface damage that alters the material significantly. Special surface preparation may be appropriate for some test programs. State the type of surface and surface preparation in the report.

7. Test Parameters

7.1 *Load*—Values of the force in Newtons at the wearing contact.

7.2 *Speed*—The relative sliding speed between the contacting surfaces in metres per second.

7.3 *Distance*—The accumulated sliding distance in meters.

7.4 *Temperature*—The temperature of one or both specimens at locations close to the wearing contact.

7.5 *Atmosphere*—The atmosphere (laboratory air, relative humidity, argon, lubricant, etc.) surrounding the wearing contact.

8. Procedure

8.1 Immediately prior to testing, and prior to measuring or weighing, clean and dry the specimens. Take care to remove all dirt and foreign matter from the specimens. Use non-chlorinated, non-film-forming cleaning agents and solvents. Dry materials with open grains to remove all traces of the cleaning fluids that may be entrapped in the material. Steel (ferromagnetic) specimens having residual magnetism should be demagnetized. Report the methods used for cleaning.

8.2 Measure appropriate specimen dimensions to the nearest 2.5 μm or weigh the specimens to the nearest 0.0001 g.

8.3 Insert the disk securely in the holding device so that the disk is fixed perpendicular (61°) to the axis of the resolution.

8.4 Insert the pin specimen securely in its holder and, if necessary, adjust so that the specimen is perpendicular (61°) to the disk surface when in contact, in order to maintain the necessary contact conditions.

8.5 Add the proper mass to the system lever or bale to develop the selected force pressing the pin against the disk.

8.6 Start the motor and adjust the speed to the desired value while holding the pin specimen out of contact with the disk. Stop the motor.

8.7 Set the revolution counter (or equivalent) to the desired number of revolutions.

8.8 Begin the test with the specimens in contact under load. The test is stopped when the desired number of revolutions is achieved. Tests should not be interrupted or restarted.

8.9 Remove the specimens and clean off any loose wear debris. Note the existence of features on or near the wear scar such as: protrusions, displaced metal, discoloration, microcracking, or spotting.

8.10 Remeasure the specimen dimensions to the nearest 2.5 μm or reweigh the specimens to the nearest 0.0001 g, as appropriate.

8.11 Repeat the test with additional specimens to obtain sufficient data for statistically significant results.

9. Calculation and Reporting

9.1 The wear measurements should be reported as the volume loss in cubic millimetres for the pin and disk, separately.

9.1.1 Use the following equations for calculating volume losses when the pin has initially a spherical end shape of radius R and the disk is initially flat, under the conditions that only one of the two members wears significantly:

$$\text{pin -spherical end! volume loss, mm}^3 \quad (1)$$

$$\leq \frac{p \text{-wear scar diameter, mm!}^4}{64 \text{-sphere radius, mm!}}$$

assuming that there is *no significant disk wear*. This is an approximate geometric relation that is correct to 1 % for (wear scar diameter/sphere radius) < 0.3, and is correct to 5 % for (wear scar diameter/sphere radius) < 0.7. The exact equation is given in Appendix X1.

$$\text{disk volume loss, mm}^3 \quad (2)$$

$$\leq \frac{p \text{-wear track radius, mm!} \cdot \text{track width, mm!}^3}{6 \text{-sphere radius, mm!}}$$

assuming that there is *no significant pin wear*. This is an approximate geometric relation that is correct to 1 % for (wear track width/sphere radius) < 0.3, and is correct to 5 % for (wear track width/sphere radius) < 0.8. The exact equation is given in Appendix X1.

9.1.2 Calculation of wear volumes for pin shapes of other geometries use the appropriate geometric relations, recognizing that assumptions regarding wear of each member may be required to justify the assumed final geometry.

9.1.3 Wear scar measurements should be done at least at two representative locations on the pin surfaces and disk surfaces, and the final results averaged.

9.1.4 In situations where both the pin and the disk wear significantly, it will be necessary to measure the wear depth profile on both members. A suitable method uses stylus profiling. Profiling is the only approach to determine the exact final shape of the wear surfaces and thereby to calculate the volume of material lost due to wear. In the case of disk wear, the average wear track profile can be integrated to obtain the track cross-section area, and multiplied by the average track length to obtain disk wear volume. In the case of pin wear, the wear scar profile can be measured in two orthogonal directions, the profile results averaged, and used in a figure-of-revolution calculated for pin wear volume.

9.1.5 While mass loss results may be used internally in laboratories to compare materials of equivalent densities, this test method reports wear as volume loss so that there is no confusion caused by variations in density. Take care to use and report the best available density value for the materials tested when calculating volume loss from measured mass loss.

9.1.6 Use the following equation for conversion of mass loss to volume loss.

$$\text{volume loss, mm}^3 \leq \frac{\text{mass loss, g}}{\text{density, g/cm}^3} \geq 1000. \quad (3)$$

9.2 If the materials being tested exhibit considerable transfer between specimens without loss from the system, volume loss may not adequately reflect the actual amount or severity of wear. In these cases, this test method for reporting wear should not be used.

9.3 Friction coefficient (defined in Terminology G 40) should be reported when available. Describe the conditions associated with the friction measurements, for example, initial, steady-state, etc.

9.4 Adequate specification of the materials tested is important. As a minimum, the report should specify material type, form, processing treatments, surface finish, and specimen preparation procedures. If appropriate, indentation hardness should be reported.

10. Precision and Bias ⁶

10.1 The precision and bias of the measurements obtained with this test method will depend upon the test parameters chosen.

10.2 The reproducibility of repeated tests on the same material will depend upon material homogeneity, machine and material interaction, and careful adherence to the specified procedure by the machine operator.

10.3 Normal variations in the procedure will tend to reduce the accuracy of the test method as compared to the accuracy of such material property tests as hardness, density, or thermal expansion rate. Properly conducted tests should, however, maintain a within-laboratory coefficient of variation of 20 % or less for wear loss values. Table 2 contains wear data obtained

⁶ Additional data are available at ASTM Headquarters.

from interlaboratory tests (see Note 4). Standard deviation values are given for the measured quantities. Limits of 95 % repeatability can be obtained by multiplying those standard deviation values by the factor 2.83. Reproducibility limits (between laboratories) are not available but are estimated to be twice as large as the repeatability limits.

10.4 No bias can be assigned to these results since there are no absolute accepted values for wear.

NOTE 4—The interlaboratory data given in Table 1 and Table 2 resulted through the cooperation of thirty one institutions in seven countries with the help of national representatives within the Versailles Advanced Materials and Standards (VAMAS) working party on wear test methods.⁷

10.5 In any test series, all data must be considered in the calculation, including outliers (data exceeding the obvious range); they are treated according to Practice E 178.

10.6 While two or more laboratories may develop test data that is within the acceptable coefficient of variation for their own individual test apparatus, the actual data of each laboratory may be relatively far apart. The selection of sample size and the test method for establishing the significance of the difference in averages shall be agreed upon between laboratories and shall be based on established statistical methods of Practice E 122, Practice E 177, and STP 15D.⁸

11. Keywords

11.1 ceramic wear; friction; metal wear; non-abrasive; pin-on-disk; wear

⁷ Czichos, H., Becker, S., and Lexow, J., *Wear*, Vol 114, 1987, pp 109–130 and *Wear*, Vol 118, 1987, pp 379–380.

⁸ Manual on Quality Control of Materials, ASTM STP 15D, ASTM, 1951.

APPENDIX

(Nonmandatory Information)

XI. EQUATIONS

X1.1 Exact equations for determining wear volume loss are as follows for:

X1.1.1 A spherical ended pin:

$$\text{pin volume loss} = \frac{\pi h}{6} [3d^2/4 + h^2] \quad (\text{X1.1})$$

where:

$$h = r - [r^2 - d^2/4]^{1/2}$$

d = wear scar diameter, and

r = pin end radius.

Assuming no significant disk wear.

X1.1.2 A disk:

$$\text{disk volume loss} = 2\pi R [r^2 \sin^2 \alpha - d/2r + d^2/4 - 4r^2 \alpha^2] \quad (\text{X1.2})$$

where:

R = wear track radius, and

d = wear track width.

Assuming no significant pin wear.

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.



This standard is copyrighted by ASTM, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).