

**EVALUACIÓN DEL DESGASTE DEL MATERIAL UTILIZADO EN LA
FABRICACIÓN DE LAS CAMISAS DE LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN
INTERNA MODIFICADO SUPERFICIALMENTE CON NITRURO DE TITANIO
(TiN) MEDIANTE EL ANÁLISIS DE LA VARIANZA ANOVA.**

**KAREN TATIANA ORTEGA BERMUDEZ
VICTOR JULIAN SALAZAR CHAPARRO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2017

**EVALUACIÓN DEL DESGASTE DEL MATERIAL UTILIZADO EN LA
FABRICACIÓN DE LAS CAMISAS DE LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN
INTERNA MODIFICADO SUPERFICIALMENTE CON NITRURO DE TITANIO
(TiN) MEDIANTE EL ANÁLISIS DE LA VARIANZA ANOVA.**

**KAREN TATIANA ORTEGA BERMUDEZ
VICTOR JULIAN SALAZAR CHAPARRO**

Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico

Director

ISNARDO GONZÁLEZ JAIMES

Ingeniero Mecánico

Codirector

ELY DANNIER V. NIÑO

Magister en Física

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2017

A mi Madre, mi mejor amiga, mi apoyo incondicional, gracias por creer en mis sueños, tu fuerza y tus enseñanzas han sido mi cimiento. A mi padre, por su apoyo brindado ofreciéndome las herramientas para crecer como ser. Sin ustedes, jamás hubiese podido conseguir lo que hasta ahora.

A mi hermana Xiomara por ser la mejor hermana mayor, he aprendido de tus aciertos y de cómo levantarme de las caídas, mi admiración constante para ti.

A mi hermano Alejandro, por siempre escuchar, cuando quería ser escuchada.

A la felicidad de la casa, Thomas, por llenar mi alma con tu existencia.

A ti, Luis, por producir esa única sonrisa, llenando mi mundo de esperanza.

Gracias por tu comprensión y amor.

A mis familiares profesores y amigos, por ser parte de este camino.

Karen Tatiana Ortega Bermudez

Dedico este proyecto de grado a Dios por ser mi guía, mi fortaleza y protección en cada paso de mi vida.

A mi padre quien desde el cielo me cuida y es mi más grande inspiración. Este logro es de los dos, sé que hoy estarás muy orgulloso de ver al hombre que criaste cumplir la promesa que un día te hizo.

A mi madre, que con su esfuerzo y apoyo incondicional logró que este sueño se hiciera realidad, por ser el apoyo más grande durante mi educación universitaria, por estar siempre a mi lado y ser mi ejemplo de vida. Muchas gracias mamá, tu eres parte de este sueño.

A mis hermanos quienes son mis motores y me impulsan a ser mejor cada día para que se sientan orgullosos de mí. Todo lo que hago es por ellos.

A mis abuelos Luis y Beatriz, por brindarme su amor, su paciencia, su apoyo incondicional sin importar que tan lejos esté.

A mis tíos, tías, primos y primas por apoyarme y animarme a lograr este sueño que se está haciendo realidad.

A mis amigos por su apoyo y acompañamiento durante este proceso.

Víctor Julián Salazar Chaparro

AGRADECIMIENTOS

Karen Tatiana Ortega Bermudez y Victor Julian Salazar Chaparro presentamos los más sinceros agradecimientos en la realización de este proyecto a:

Isnardo González Jaimes, Ingeniero Mecánico, quien con su ardua dedicación fue cimiento en el desarrollo del presente trabajo de grado.

Ely Dannier V. Niño, MSc en Física, por su constante dedicación y apoyo a la ciencia que ha permitido un adecuado desarrollo del proyecto brindando conocimiento y gestión en la otorgación de recursos.

A los Laboratorios de la empresa Nano4Energy ubicada en la Institución de Fusión Nuclear de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y su personal, por su apoyo y servicio durante la fase de modificación superficial.

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 servicio prestado.

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

A las Industrias LAVCO LTDA. Bucaramanga, por el suministro del material utilizado en el desarrollo de este proyecto aportando en la búsqueda de mejorar las competencias de la industria regional y la comunidad académica.

A los docentes de la Escuela de Ingeniería Mecánica por su noble labor de enseñar.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	23
1. PROBLEMA DEL DESGASTE EN CAMISAS DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA	25
1.1 DESGASTE EN LOS CILINDROS DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA	33
1.2 TIPOS DE DESGASTES SUPERFICIALES DE LAS CAMISAS	34
1.2.1 Desgaste de conicidad	34
1.2.2 Desgaste Ovalizado.	34
1.2.3 Desgaste Homogéneo	35
1.3 OBJETIVO GENERAL	35
1.4 OBJETIVOS ESPECIFICOS	35
1.5 JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA	37
2. MARCO TEÓRICO	38
2.1 CÁMARA DE COMBUSTIÓN	38
2.2 PRINCIPALES COMPONENTES DE UNA CÁMARA DE COMBUSTIÓN	40
2.2.1 Cilindro o camisa	40
2.2.2 Pistón	41
2.2.3 Anillos del pistón	42
2.3 DESGASTE	43
2.3.1 Evolución histórica de la tribología	44

2.3.2 Dinámica del grupo anillo-camisa	44
2.4 NITRURO DE TITANIO	51
2.5 MÉTODO DE RECUBRIMIENTO	52
2.5.1 Pulverización catódica (sputtering)	52
2.5.1.1 Proceso de colisión	54
2.5.1.2 Consideraciones energéticas	54
2.5.1.3 Proceso de depósito.	55
2.5.1.4 Parámetros de influencia	57
2.5.2 Sputtering magnetrón	59
2.5.3 Sputtering Magnetrón HIPIMS	60
3. METODOLOGÍA	61
3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	61
3.2 DISEÑO DEL EXPERIMENTO	61
3.2.1 Experimento unifactorial	62
3.2.2 Experimento factorial	64
3.2.3 Regresión lineal múltiple (ajuste de modelo)	66
3.2.4 Superficie de respuesta	67
3.3 PREPARACIÓN DE PROBETAS	68
3.3.1 Preparación metalográfica	70
3.3.2 Limpieza por ultrasonido	70
3.4 PROCESO DE RECUBRIMIENTO	71
3.4.1 Partes del reactor usado en proceso de recubrimiento	72
3.4.1.1 Cámara de vacío	72

3.4.1.2 Sistema de refrigeración	74
3.4.1.3 Sistema de bombeo	75
3.5 CARACTERIZACIÓN SUPERFICIAL	76
3.5.1 Inspección visual	77
3.5.2 Espectroscopía de emisión óptica	77
3.5.3 Espectroscopía Raman	78
3.5.4 Análisis superficial	79
3.6 ENSAYO PIN ON DISK	80
4. ANÁLISIS Y RESULTADOS	86
4.1 PIN ON DISK	86
4.2 ANÁLISIS POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) Y ESPECTROSCOPIA DE ENERGÍA DISPERSIVA (EDS)	101
4.3 ANÁLISIS POR ESPECTROSCOPIA RAMAN (ER).	116
4.3.1 Disco recubierto con TiN	116
4.3.2 Pin Recubierto con TiN	119
4.3.3 Disco sin Recubrimiento.	120
4.4 ESPECTROSCOPIA DE EMISIÓN ÓPTICA (OES)	121
5. ANÁLISIS ESTADISTICO PARA LA MEDICIÓN DEL DESGASTE DE LAS PROBETAS	124
5.1 EXPERIMENTO UNIFACTORIAL COMPLETAMENTE ALEATORIO	124
5.1.1 Análisis estadístico para la medición del desgaste de los pines	125
5.1.2 Análisis estadístico para la medición del desgaste de los discos	127
5.1.3 Análisis Duncan	128
5.2 EXPERIMENTO FACTORIAL	131

5.2.1 Análisis estadístico para la medición del desgaste de los pines	133
5.2.2 Análisis estadístico para la medición del desgaste de los discos	136
5.3 REGRESIÓN MÚLTIPLE	139
5.4 SUPERFICIE DE RESPUESTA	142
6. CONCLUSIONES	145
7. RECOMENDACIONES	149
BIBLIOGRAFÍA	150
ANEXOS	162

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Valores de presión	51
Tabla 2. Parámetros del experimento unifactorial	63
Tabla 3. Parámetros del experimento Factorial	65
Tabla 4. Condiciones de Trabajo utilizadas en la ESPECTROSCOPIA RAMAN.	79
Tabla 5. Peso de las probetas antes de la prueba de desgaste	82
Tabla 6. Pares tribológicos usados en el proyecto	83
Tabla 7. Valor de las fuerzas usadas en el proyecto	84
Tabla 8. Pruebas realizadas para el mismo par tribológico y la misma fuerza	84
Tabla 9. Datos promedios del experimento pin sobre disco	87
Tabla 10. Pérdida de masa para cada tipo de probeta	92
Tabla 11. Promedio del coeficiente de fricción por experimento	93
Tabla 12. Composición elemental EDS en la superficie del disco sin recubrir	103
Tabla 13. Composición elemental EDS en la superficie recubierta sin desgaste del disco	105
Tabla 14. Composición elemental EDS en la superficie recubierta y desgastada del disco	106
Tabla 15. Composición elemental EDS en la superficie recubierta sin desgaste del pin	108
Tabla 16. Composición elemental EDS en la superficie recubierta y desgastada del pin	109
Tabla 17. Composición elemental EDS en la superficie recubierta sin desgaste del disco	111
Tabla 18. Composición elemental EDS en la superficie recubierta y desgastada del disco	112
Tabla 19. Composición elemental EDS en la superficie recubierta sin desgaste del pin	114

Tabla 20. Composición elemental EDS en la superficie recubierta y desgastada del pin	115
Tabla 21. Composición química elemental por espectroscopía de emisión óptica	123
Tabla 22. Datos de la masa perdida en los pines	125
Tabla 23. Número de tratamientos y replicas por tratamiento (Pines)	125
Tabla 24. Análisis del experimento completamente aleatorio (Pines)	126
Tabla 25. Selección del factor F.T	126
Tabla 26. Datos de la masa perdida en los discos	127
Tabla 27. Número de tratamientos y replicas por tratamiento (Discos)	127
Tabla 28. Análisis del experimento completamente aleatorio (Discos)	127
Tabla 29. Valores Duncan de tablas y el error (Pines)	128
Tabla 30. Tabla Duncan	128
Tabla 31. Análisis Duncan (Pines)	129
Tabla 32. Valores Duncan de tablas y el error (Discos)	130
Tabla 33. Análisis Duncan (Discos)	130
Tabla 34. Datos de pérdida de masa en los pines	133
Tabla 35. Promedios	133
Tabla 36. Errores	134
Tabla 37. Número de tratamientos y replicas por tratamiento	134
Tabla 38. Análisis del experimento factorial	134
Tabla 39. Obtención de los factores F.T.	135
Tabla 40. Especificación de la combinación superficial	135
Tabla 41. Datos de pérdida de masa en los discos	136
Tabla 42. Promedios	137
Tabla 43. Errores	137
Tabla 44. Numero de tratamientos y replicas por tratamiento	137
Tabla 45. Análisis del experimento factorial	138
Tabla 46. Especificación de la combinación superficial	138
Tabla 47. Datos experimentales para el modelo de regresión	140

Tabla 48. Forma matricial	141
Tabla 49. Datos modelo de regresión experimental	142
Tabla 50. Datos superficie de respuesta	144
Tabla 51. Arreglo de un experimento completamente aleatorio	162
Tabla 52. Análisis de varianza para modelo unifactorial y efectos fijos	165
Tabla 53. Arreglo de un experimento factorial	166
Tabla 54. Análisis de varianza para modelo factorial de dos factores	170
Tabla 55. Parámetros y resultados obtenidos en las pruebas pin sobre disco	182

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Contacto entre los anillos de pistón y camisa	25
Figura 2. Tiempos del pistón	33
Figura 3. Desgaste cónico de un cilindro de motor	34
Figura 4. Cilindro con desgaste, cónico, ovalado y homogéneo	35
Figura 5. Cámara de combustión	38
Figura 6. Ciclo Otto	39
Figura 7. Camisa seca y camisa húmeda	41
Figura 8. Pistón	42
Figura 9. Disposición del paquete de anillos	42
Figura 10. Desgaste	44
Figura 11. Perfil de anillo de pistón	46
Figura 12. Distribución de presiones en los anillos de pistón	46
Figura 13. Esquema de fuerzas en un anillo de pistón	47
Figura 14. Presión de admisión para motores de dos tiempos	49
Figura 15. Pulverización catódica (sputtering)	54
Figura 16. Etapas del crecimiento de capas	56
Figura 17. Sputtering Magnetron	59
Figura 18. Fabricación de pines	69
Figura 19. Fabricación de pines	69
Figura 20. Diseño en CAD de las probetas (pin y disco)	70
Figura 21. Preparación superficial de sustratos	70
Figura 22. Limpiador ultrasónico. Fisherbrand 15050	71
Figura 23. Cámara de vacío	73
Figura 24. Interior de la cámara de vacío	73
Figura 25. Conjunto: (a) magnetron, (b) blanco y (c) montaje	74

Figura 26. Vista posterior de la cámara, conexiones de las líneas de gases y refrigeración	75
Figura 27. Bomba rotatoria	75
Figura 28. Turbo-bomba	76
Figura 29. Inventario de probetas	77
Figura 30. Tonalidad superficial de las probetas	77
Figura 31. Espectrómetro de emisión óptica Q4 Tasman	78
Figura 32. Espectroscopio Raman HORIBA LabRAM HR	79
Figura 33. Microscopio electrónico de barrido QUANTA FEG 650. Equipo en general (a), cámara de vacío (b), soporte para el montaje de los objetivos (c) e interfaz de adquisición de datos (d)	80
Figura 34. Balanza SARTORIUS referencia CP225D	81
Figura 35. Partes del tribómetro pin sobre disco	81
Figura 36. Posicionamiento de las probetas en el tribómetro pin on disk	82
Figura 37. Número de probetas usadas por experimento	84
Figura 38. Ensayo pin sobre disco: (a) disco blanco y (b) disco recubierto	86
Figura 39. Superficie de los discos recubiertos después del ensayo de desgaste	88
Figura 40. Superficie de los discos sin recubrir después del ensayo de desgaste	89
Figura 41. Superficie de los pines recubiertos después del ensayo de desgaste	90
Figura 42. Superficie de los pines sin recubrimiento después del ensayo de desgaste	91
Figura 43. Coeficiente de fricción en disco y pin recubiertos: (a) disco 1B-pin 1B, (b) disco 2B-pin 2A, (c) disco 3A-pin 3B	93
Figura 44. Coeficiente de fricción en disco recubierto-pin sin recubrir: (a) disco 3B-pin 10B, (b) disco 9A-pin 10A, (c) disco 5A-pin 1B	94
Figura 45. Coeficiente de fricción en disco sin recubrir-pin recubierto: (a) disco 10A-pin 5B, (b) disco 1B-pin 5A, (c) disco 3A-pin 6B	95
Figura 46. Coeficiente de fricción en disco sin recubrir-pin sin recubrir: (a) disco 10A-pin 10B, (b) disco 5A-pin 10A, (c) disco 5B-pin 5B	96

Figura 47. Coeficiente de fricción en disco y pin recubiertos: (a) disco 2A-pin 2B, (b) disco 4A-pin 4B, (c) disco 4B-pin 4A	98
Figura 48. Coeficiente de fricción en disco recubierto-pin sin recubrir: (a) disco 5B-pin 1A, (b) disco 6A-pin 2B, (c) disco 6B-pin 2A	99
Figura 49. Coeficiente de fricción en disco sin recubrir-pin recubierto: (a) disco 3B-pin 6B, (b) disco 4A-pin 7A, (c) disco 4B-pin 8B	100
Figura 50. Coeficiente de fricción en disco sin recubrir-pin sin recubrir: (a) disco 6B-pin 5A, (b) disco 9A-pin 4B, (c) disco 1A-pin 6B	101
Figura 51. Micrografías SEM en disco sin recubrir. Magnificación de 200X (a) y 2000X (b).	102
Figura 52. Espectro de composición EDS en la superficie del disco sin recubrir	103
Figura 53. Micrografías SEM en disco recubierto. Superficie sin desgaste a una magnificación de 200X (a) y 2000X (b). Superficie desgastada a una magnificación de 200X (c) y 2000X (d).	104
Figura 54. Espectro de composición EDS en la superficie recubierta sin desgaste del disco	105
Figura 55. Espectro de composición EDS en la superficie recubierta y desgastada del disco	106
Figura 56. Micrografías SEM en pin recubierto. Superficie sin desgaste a una magnificación de 200X (a) y 2000X (b). Superficie desgastada a una magnificación de 200X (c) y 2000X (d).	107
Figura 57. Espectro de composición EDS en la superficie recubierta sin desgaste del pin	108
Figura 58. Espectro de composición EDS en la superficie recubierta y desgastada del pin	109
Figura 59. Micrografías SEM en disco recubierto. Superficie sin desgaste a una magnificación de 200X (a) y 2000X (b). Superficie desgastada a una magnificación de 200X (c) y 2000X (d).	110
Figura 60. Espectro de composición EDS en la superficie recubierta sin desgaste del disco	111

Figura 61. Espectro de composición EDS en la superficie recubierta y desgastada del disco	112
Figura 62. Micrografías SEM en pin recubierto. Superficie sin desgaste a una magnificación de 200X (a) y 2000X (b). Superficie desgastada a una magnificación de 200X (c) y 2000X (d).	113
Figura 63. Espectro de composición EDS en la superficie recubierta sin desgaste del pin	114
Figura 64. Espectro de composición EDS en la superficie recubierta y desgastada del pin	115
Figura 65. Micrografía y Espectro Raman en el punto 1A del Disco Recubierto con TiN	117
Figura 66. Micrografía y Espectro Raman en el punto 1B del Disco Recubierto con TiN	117
Figura 67. Micrografía y Espectro Raman en el punto 1C del Disco Recubierto con TiN	117
Figura 68. Espectro Raman en los puntos 1A -1B-1C del Disco Recubierto con TiN	118
Figura 69. Espectro Raman en los puntos 1A -1B-1C del Disco Recubierto con TiN, resaltando el espectro con menor intensidad en 2 primeras bandas.	119
Figura 70. Micrografía y Espectro Raman en el punto 1A del Pin Recubierto con TiN	120
Figura 71. Espectro Raman en el punto 1A del Pin y el punto 1B del Disco Recubierto con TiN	120
Figura 72. Micrografía y Espectro Raman en el punto 1A del Disco sin recubrimiento	121
Figura 73. Pérdida de masa de los pines en las distintas combinaciones superficiales	129
Figura 74. Pérdida de masa de los discos en las distintas combinaciones superficiales	131

Figura 75. Pérdida de masa de los pines en función de la combinación superficial y la fuerza aplicada	136
Figura 76. Pérdida de masa de los discos en función de la combinación superficial y la fuerza aplicada	139
Figura 77. Comportamiento del modelo de regresión múltiple	142
Figura 78. Calculo de la superficie de respuesta en el software Minitab	143
Figura 79. Comportamiento de la superficie de respuesta	144

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Formulación matemática que rigen el modelo del experimento unifactorial completamente aleatorio	162
Anexo B. Formulación matemática que rigen el modelo del experimento factorial	166
Anexo C. Ficha técnica de los materiales utilizados para la fabricación de las probetas.....	171
Anexo D. Planos en CAD de las probetas fabricadas.....	173
Anexo E. Norma ASTM G99.....	175
Anexo F. Formulación matemática para el análisis del ensayo tribológico por medio del tribómetro <i>PIN ON DISK</i>	180
Anexo G. Tabla de resultados del ensayo tribológico por medio del tribómetro <i>PIN ON DISK</i>	182
Anexo H. Espectroscopía de Emisión Óptica (OES).....	183
Anexo I. Certificado de ponencia	185

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DEL DESGASTE DEL MATERIAL UTILIZADO EN LA FABRICACIÓN DE LAS CAMISAS DE LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA MODIFICADO SUPERFICIALMENTE CON NITRURO DE TITANIO (TiN) MEDIANTE EL ANÁLISIS DE LA VARIANZA ANOVA*

AUTOR: Karen Tatiana Ortega Bermudez
Victor Julian Salazar Chaparro**

PALABRAS CLAVES: Pulverización por magnetrón de alta potencia, Nitruro de titanio, Pin sobre disco, Espectroscopía RAMAN, Microscopía electrónica de barrido, Espectroscopía de energía dispersa.

DESCRIPCIÓN:

El desgaste ocasionado por el contacto entre los anillos del pistón y la camisa es un fenómeno que contribuye en la pérdida por fricción que se presenta en un motor de combustión interna. Por tal motivo, diversas empresas o institutos de investigación se encuentran estudiando la influencia del desgaste en la eficiencia de un motor térmico y proponiendo soluciones alternativas que incrementen la vida útil en servicio de las superficies de contacto. De acuerdo con lo anterior, en el presente trabajo de investigación se depositó, mediante la pulverización por magnetrón de alta potencia (HIPIMS), nitruro de titanio (TiN) en el material utilizado en la fabricación de las camisas y los anillos del pistón de un motor de combustión interna. El experimento se realizó en un tribómetro de configuración perno sobre disco (pin on disk) y los parámetros de evaluación superficial junto con las dimensiones de las probetas, se establecieron según la norma ASTM G-99. La morfología y la variación porcentual en composición de los elementos presentes en la superficie de las probetas con y sin recubrimiento de TiN fueron analizadas mediante las técnicas de Espectroscopía RAMAN, Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDS).

Los resultados obtenidos en las pruebas tribológicas de configuración pin sobre disco y el análisis estadístico de varianza Anova revelan un incremento en las propiedades tribológicas, especialmente en la resistencia al desgaste de las probetas (pines y discos) modificadas superficialmente con nitruro de titanio (TiN) en una atmosfera de nitrógeno por medio de la técnica "magnetron sputtering de alta potencia (HIPIMS)".

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Isnardo González Jaimes (Director). Ely Dannier V. Niño (Codirector).

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF THE WEAR OF THE MATERIAL USED IN THE MANUFACTURE OF THE SURFACE-MODIFIED INTERNAL COMBUSTION ENGINE CYLINDER LINER WITH TITANIUM NITRIDE (TiN) THROUGH ANOVA VARIATION ANOVA*

AUTHOR: Karen Tatiana Ortega Bermudez
Victor Julian Salazar Chaparro**

KEYWORDS: High Power Magnetron Spray, Titanium Nitride, Pin on disk, RAMAN Spectroscopy, Scanning Electron Microscopy, Energy Dispersive Spectroscopy

DESCRIPTION:

The wear caused by the contact between cylinder liner and piston ring is a phenomenon that contributes to the frictional losses in an internal combustion engine. For this reason, several companies or research institutes are studying the influence of wear on the efficiency of a thermal engine and they are proposing solutions that increase the service life of the contact surfaces. According to the above, titanium nitride (TiN) was deposited in the material used in the manufacture of cylinder liner and piston rings of internal combustion engine by means of high power magnetron (HIPIMS). The experiment was carried out in a pin-on-disc tribometer and the surface evaluation parameters along with the dimensions of the specimens were established according to ASTM G-99. The morphology and percentage variation in the composition of the surface elements of the TiN coated and uncoated samples were characterized by using the techniques of RAMAN Spectroscopy, Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Spectroscopy Dispersive (EDS).

The results obtained in the pin-on-disk tribological tests and the Anova variance statistical analysis show an increase in the surface tribological properties, especially in the wear resistance of the titanium nitride (TiN) in a nitrogen atmosphere by means of the "high power magnetron sputtering (HIPIMS)" technique.

* Degree Project.

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. Mechanical Engineering School. Isnardo González Jaimes (Director). Ely Dannier V. Niño (Codirector).

INTRODUCCIÓN

Los efectos de desgaste presentados en la cámara de combustión de un motor provocado por el contacto entre los anillos del pistón y la camisa, conlleva a realizar correcciones o cambios de alguno de los elementos y en los casos más extremos, cambio completo del conjunto (incluido pistón). En la industria de transporte automotriz donde el uso del sistema pistón camisa es elevado, el desgaste en esta zona es muy frecuente. Por tal motivo, afecta principalmente a la camisa y anillos (por el contacto directo), donde los costos por mantenimiento son muy elevados.

Estudios recientes demuestran que una solución a este problema es el uso de recubrimientos de nitruro de titanio (TiN), obtenidos por deposición física de vapor (PVD), debido a su alta dureza, resistencia al desgaste y estabilidad química. Estos recubrimientos han tenido una gran aceptación en la industria metalmeccánica y automotriz, por tal razón en los últimos años se han venido investigando técnicas con el fin de mejorar las propiedades de las películas depositadas, desde la pulverización por magnetron DC (dcMC) y arco catódico (AIP), hasta la pulverización de magnetron de alta potencia (HIPIMS), una técnica reciente y beneficiosa para depositar las películas de nitruro de titanio (TiN). De acuerdo con lo anterior, se propuso efectuar un experimento donde se estudió la modificación en materiales utilizados en la fabricación de las camisas de los motores de combustión interna, con el propósito de aumentar la vida útil en servicio, utilizando la técnica HIPIMS para la modificación superficial del material de la camisa, para luego evaluar el desgaste en una maquina tribológica de configuración perno sobre disco (*pin on disk*).

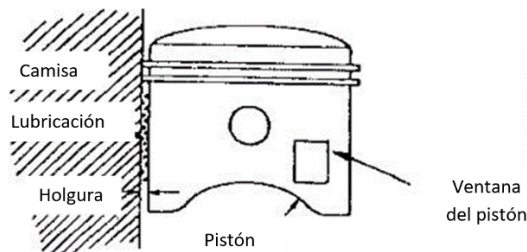
El desarrollo de este proyecto de investigación se llevó a cabo en la escuela de ingeniería mecánica y en el Parque Tecnológico Guatiguará de la Universidad

Industrial de Santander, en el laboratorio de tribología de la universidad nacional de Colombia sede Medellín y en los laboratorios del grupo de investigación Nano4Energy (N4E) ubicados en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII-UPM) en la ciudad de Madrid (España).

1. PROBLEMA DEL DESGASTE EN CAMISAS DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

El motor es uno de los componentes más importantes de un vehículo, el cual está constituido de muchos elementos que deben trabajar en conjunto para que funcione óptimamente. Algunas veces, el motor falla debido a los componentes internos desgastados o por causas externas. Una de las zonas más afectadas por el desgaste, está ubicada en la cámara de combustión donde las camisas que al estar en contacto permanente con los anillos del pistón les genera una reducción de la vida útil en servicio (ver Figura 1). Cuando la camisa se desgasta, se evidencia pérdida de potencia (producto de la baja compresión en el cilindro) y un aumento en el consumo de aceite (producido por el lubricante que se filtra en la cámara de combustión), afectando el rendimiento del motor.

Figura 1. Contacto entre los anillos de pistón y camisa



Fuente: Stroke Motorcycle Mechanics. Disponible en: <http://curso-mecanica-motos.f1cf.com.br/es/motorcycle-06.html>.

La empresa *Cummins Engine Company* sugiere por su experiencia, que la pérdida por fricción en un motor de combustión interna producida por el conjunto, pistón-segmentos- camisa, equivale aproximadamente al 50 % de la fricción total generada

en el motor, datos que también corrobora la literatura reciente^{1,2,3,4,5}. La reducción del coeficiente de fricción en el conjunto juega un papel crítico en el consumo de combustible, el desgaste de los materiales^{6,7} y la optimización de la eficiencia del motor⁸, ya que, cualquier reducción de la fricción en un motor supone una ganancia en la eficiencia de este^{9,10}, y un aumento proporcional a la magnitud absoluta de la potencia¹¹. Sin embargo, medir el desgaste en términos de potencia es un experimento complicado; Richardson comparó la potencia producida por el motor con la potencia perdida por fricción y demostró que esa pérdida de energía por fricción representa solo el 15 %, un porcentaje pequeño que dificulta la medición por este medio¹².

El desgaste en un motor de combustión interna ha estimulado a diversos investigadores y empresas a invertir recursos y tiempo con el fin de desarrollar

¹ MORITANI, H.; TOKORO, H.; TOHYAMA, M.; MORI, H. et al. Challenge to the Diesel Engine Lubrication with Fuel. En: SAE Technical Paper 2007-01-1978. p. 1587-1588.

² TAYLOR, R. et al. Lubrication, Tribology & Motorsport. En: SAE Technical Paper 2002-01-3355. p. 1-16.

³ KOCH, F.; GEIGER, U.; HERMSEN, F. PIFFO - Piston Friction Force Measurements During Engine Operation. En: SAE Technical Paper 960306, 1996

⁴ TING, L. et al. A Review of Present information on Piston Ring Tribology. En: SAE Technical Paper 852355, 1985.

⁵ ROSÉN, C. et al. Liner surface improvements for low friction piston ring packs. En: Surface Topography: Metrology and Properties. 2014. Vol. 2. p. 14009.

⁶ RUDAS, J.; GÓMEZ, L. y TORO, A. Modelamiento del proceso de desgaste de un tribómetro pin-disco: Flash temperature y mecanismos de disipación. En: ITECKNE. 2013 vol. 10. p. 199–208

⁷ VILLAR, G. y REY, C. Diseño y construcción de una máquina Pin sobre Disco (Pin on Disk), Para realizar ensayos de desgaste. Trabajo de grado Ingenieros Mecánicos. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad Fisicomecánicas. Programa de Ingeniería Mecánica, 2009. p. 32-48.

⁸ LIN, J.; WEI, R.; BITSIS, D. y LEE, P. Development and evaluation of low friction TiSiCN nanocomposite coatings for piston ring applications. En: Surface and Coatings Technology. 2016. Vol. 298. p. 121-131.

⁹ CHO, S. y YUN, J. The friction force of piston assembly in an IDI diesel engine. En: International Journal of Vehicle Design. 1998. Vol.19. p. 50-64.

¹⁰ GOTO, T.; AOYAMA, S.; NAGUMO, S.; NAKAJIMA, Y. y ONODA, M. et al. Measurement of Piston and Piston Ring Assembly Friction Force. En: SAE Technical Paper 851671. 1985.

¹¹ URAS, H. y PATTERSON, D. Measurement of Piston and Ring Assembly Friction Instantaneous IMEP Method. En: SAE International 830416. 1983.

¹² RICHARDSON, D. Review of Power Cylinder Friction for Diesel Engines. En: J. Eng. Gas Turbines Power. 2000. Vol.122. p. 506-519.

métodos de reducción, a partir del estudio tribológico de los componentes. La mayoría de estos análisis han sido desarrollados en laboratorios simulados (por el elevado costo de las pruebas reales) que han logrado coincidir con datos experimentales, tanto cualitativa como cuantitativamente¹³, arrojando errores por debajo del 5%. En la actualidad existen diversos métodos para medir el desgaste entre un par tribológico, uno de los más usados y confiables es el tribómetro de configuración pin sobre disco (*Pin On Disk*), que ha sido utilizado para diversos estudios del par tribológico presente en el conjunto camisa-anillos de pistón (C-AP)^{14,15}.

Desde el año 1785, se conoce que Charles Agustin Coulomb, estudio la influencia de un gran número de variables sobre la fricción como: la naturaleza de los materiales involucrados, la extensión del área de contacto, la presión normal y la duración en que las superficies se mantienen en contacto¹⁶. Hoy en día, se estudian los efectos de estas variables en el conjunto C-AP, siendo quizás los componentes más complejos del motor desde el punto de vista de la tribología: están sometidos a variaciones fuertes y rápidas de lubricación, carga, velocidad y temperatura convirtiéndose en parámetros (incluyendo la rugosidad) de entrada para diferentes

¹³ CHAUDHARI, T. y SUTARIA, B. Investigation of friction characteristics in segmented piston ring liner assembly of IC engine. En: Perspectives in Science. Sep. 2016. Vol.8. p. 599-602.

¹⁴ EAKURI, Y.; SOEJIMA, M.; KITAHARA, T.; MAEDA, T.; XU, S. y FUJISAKI, K. Experimental studies on friction and scuffing resistance of ceramics for cylinder liner and piston ring. En: JSME. 1991. Vol.34. p. 271-277.

¹⁵ ZHANG, Y.; ZHANG, Z.; WU, T y XIE, Y. Effects of surface texturing on the tribological behavior of piston rings under lubricated conditions. En: Industrial Lubrication and Tribology. 2016. Vol.68. p. 158-169.

¹⁶ OSPINA, L. y ZAPATA, S. Ensamble de un banco de pruebas de fricción a un motor de combustión interna mono-cilíndrico. Trabajo de grado Tecnólogo Mecánico. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnología. Escuela de Tecnología Mecánica. 2015. p. 13-30.

investigaciones realizadas^{17,18,19,20}. Los estudios han arrojado resultados interesantes sobre el efecto de cada uno de los parámetros:

- Las altas presiones aumentan la carga y la temperatura lo que reduce la viscosidad y el espesor de la película de aceite, aumentando, la fricción y el desgaste²¹, por ende, es necesario prestar especial atención a este parámetro, sobre todo cuando se utilizan materiales con un menor factor de fricción, además, de considerar que es una tendencia que la presión de combustión aumentará²².
- Los lubricantes desempeñan un papel importante para reducir la fricción; Ting Observó un aumento del desgaste en los anillos del pistón cuando se utilizaba aceite de baja viscosidad²³.
- La fuerza de fricción disminuye gradualmente con el aumento de las velocidades²⁴.
- La rugosidad superficial es importante independientemente de las propiedades del material.

En la literatura, el aumento del rendimiento tribológico en el conjunto C-AP se suele buscar mediante la optimización de las características metalúrgicas de los

¹⁷ MARTYR, A. y PLINT, M. Engine Testing Theory and Practice. Butterworth Heinemann. Tercera edición. 2007. p. 354-368.

¹⁸ BLAU, Peter. The significance and use of the friction coefficient. En: Tribology International. 2001. Vol.34. p. 585-591.

¹⁹ JOHANSSON, S.; NILSSON, P.; OHLSSON, R. y ROSÉN, B. Experimental friction evaluation of cylinder liner/piston ring contact. En: Wear. June 2011. Vol.271. p. 625-633.

²⁰ ZABALA, B.; IGARTUA, A. et al. Friction and wear of a piston ring/cylinder liner at the top dead centre: Experimental study and modelling. En: Tribology International. 2017. Vol.106. p. 23-33.

²¹ BLAU, J. A Review of sub-Scale Test Methods to evaluate the Friction and Wear of Ring and Liner Materials for Spark- and Compression Ignition Engines. En: OAK Ridge National Laboratory. 2001.

²² HUTCHINGS, I. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials (Metallurgy & Materials Science). Butterworth. 1992.

²³ TING, L. A Review of Present information on Piston Ring Tribology. SAE International. 1985.

²⁴ NOORMAN, M.; ASSANIS, D. et al. Overview of Techniques for Measuring Friction Using Bench Tests and Fired Engines. En: SAE Internationa. 2000.

materiales usados^{25,26}, la topografía superficial^{27,28,29}, la composición del lubricante y el régimen de lubricación^{30,31,32}, mediante aditivos anti-desgaste³³, así como la modificación superficial^{34,35}.

La zona más crítica para el desgaste intensivo se encuentra en el punto muerto superior (TDC)³⁶ y principalmente en el anillo de compresión superior³⁷, debido a la combinación de varios factores: la aceleración y la deceleración alternadas hasta la parada completa, las altas temperaturas y la disminución de la capa de lubricante³⁸. Una solución a este problema es el uso de recubrimientos con TiN-Ti, obtenidos por

²⁵ CERRO, E.; LÓPEZ, L. y MARCO, R. La Macrografía como Método de Análisis y Prevención de Roturas en Servicio. Caso Práctico: Camisas de Cilindro. En: Grup. Investig. TEMATMA "Tecnología Mater. y Medio Ambient. 2013. p. 1-8.

²⁶ LIU, P.; YUAN, C. y GUO, Z. Effects of large process structure of cylinder liner on friction of cylinder liner-piston ring. En: Prognostics and System Health Management conference. 2011. p. 1-6.

²⁷ PROFITO, F.; TOMANIK, E. y ZACHARIADIS, D. Effect of cylinder liner wear on the mixed lubrication regime of TLOCs. En: Tribology International. 2016. Vol.93. Part B. p. 723-732.

²⁸ ZAVOS, A. y NIKOLAKOPOULOS, P. Simulation of piston ring tribology with surface texturing for internal combustion engines. En: Lubrication Science. 2015. Vol.27. p. 151-176.

²⁹ ETSION, I. y SHER, E. Improving fuel efficiency with laser surface textured piston rings. En: Tribology International. 2009. Vol.42. p. 542-547.

³⁰ MORRIS, N.; RAHMANI, N.; RAHNEJAT, H. et al. Tribology of piston compression ring conjunction under transient thermal mixed regime of lubrication. En: Tribology International. 2013. Vol.59. p. 248-258.

³¹ NEVSHUPA, R.; CONTE, M. et al. Analysis of tribochemical decomposition of two imidazolium ionic liquids on Ti-6Al-4V through Mechanically Stimulated Gas Emission Spectrometry. En: Tribology International. 2016. Vol.102. p. 19-27.

³² TUNG, S. y TSEREGOUNIS, S. An Investigation of Tribological Characteristics of Energy-Conserving Engine Oils Using a Reciprocating Bench Test. En: SAE International. 2000.

³³ HAQUE, T.; MORINA, A. y VEVILLE, A. Influence of friction modifier and antiwear additives on the tribological performance of a non-hydrogenated DLC coating. En: Surface and Coatings Technology. 2010. Vol.204. p. 4001-4011.

³⁴ IGARTUA, A. et al. Biolubricants and triboreactive materials for automotive applications. En: Tribology International. 2009. Vol.42. p. 561-568.

³⁵ ERDEMIR, A. Review of engineered tribological interfaces for improved boundary lubrication. En: Tribology International. 2005. Vol.38. p. 249-256.

³⁶ CARMO, P. y RIBEIRO, B. New advances in vehicular technology and automotive engineering. En: InTech. 2012.

³⁷ MUFTI, R. y PRIEST, M. Experimental Evaluation of Piston-Assembly Friction Under Motored and Fired Conditions in a Gasoline Engine. En: Journal of Tribology. 2004. Vol.127. p. 826-836.

³⁸ FERRARESE, A. et al. Piston Ring Tribological Challenges on the Next Generation of Flex-fuel Engines. En: SAE Int. J. Engines. 2010. Vol.3. p. 85-91.

deposición física de vapor (PVD)^{39,40}, debido a su alta dureza, resistencia al desgaste y estabilidad química. Este recubrimiento ha tenido una gran aceptación los últimos años en la industria para ser aplicado en herramientas de corte, matrices etc, con el fin de aumentar su vida útil y elevar su rendimiento⁴¹. Siendo este un recubrimiento de buenos atributos, desde el año 1980 se han venido desarrollando técnicas con el fin de preparar y mejorar este revestimiento, desde la pulverización por magnetron de DC (dcMS) y el arco catódico (AIP), hasta la pulverización de magnetron de alta potencia (HIPIMS), una técnica reciente y beneficiosa para depositar las películas de TiN^{42,43,44}.

La pulverización por magnetron de impulso de alta potencia (HIPIMS), es un método único de deposición física en fase de vapor, el cual se introdujo a finales de los noventa y ha sido el centro de atención en los últimos años, ya que brinda diversas formas de deposición energética de película (deposición de iones y deposición de plasma de arco catódico)⁴⁵; para los óxidos metálicos como el TiO elimina por completo la histéresis⁴⁶ por su capacidad de lograr plasma extremadamente denso

³⁹ LAKSHMINARAYANAN, P. y NAYAK, N. Tribological Tests to Simulate Wear on Piston Rings. En: Critical Component Wear in Heavy Duty Engines, John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd. 2011. Vol.11. p. 167-195.

⁴⁰ LIMA, L. et al. Numerical analysis of the influence of film thickness and properties on the stress state of thin film-coated piston rings under contact loads. En: Surface and Coating Technology. 2013. Vol.215. p. 327-333.

⁴¹ ZHENYU, W. et al. Influence of Substrate Negative Bias on Structure and Properties of TiN Coatings Prepared by Hybrid HIPIMS Method. En: Journal of Materials Science and Technology. 2015. Vol.31. p. 37-42.

⁴² MAYRHOFER, P.; KUNC, F.; MUSIL, J. y MITTERER, C. A comparative study on reactive and non-reactive unbalanced magnetron sputter deposition of TiN coatings. En: Thin Solid Films. 2002. Vol.415. p. 151-159.

⁴³ MATSUE, T.; HANABUSA, T. y IKEUCHI, Y. Dependence to processing conditions of structure in TiN films deposited by arc ion plating. En: Vacuum. 2004. Vol.74. p. 647-651.

⁴⁴ KOUZNETSOV, V. et al. A novel pulsed magnetron sputter technique utilizing very high target power densities. En: Surface and Coatings Technology. 1999. Vol.122. p. 290-293.

⁴⁵ ANDERS, A. A review comparing cathodic arcs and high power impulse magnetron sputtering (HiPIMS). En: Surface and Coatings Technology. 2014. Vol.257. p. 308-325.

⁴⁶ AIEMPANAKIT, M. Reactive High Power Impulse Magnetron Sputtering of Metal Oxides. En: Linköping Stud. Sci. Technol. 2013. p. 13-15.

con alta ionización y altas densidades de corriente iónica de pico pulsado⁴⁷. La descarga HIPIMS es un tipo de resplandor de plasma de alta corriente, caracterizada por una alta tensión de combustión, una densidad de corriente elevada y su distribución homogénea sobre la superficie a tratar⁴⁸. Varios investigadores han concentrado su estudio en el comportamiento característico de corriente/voltaje y se encontró que para la descarga de corriente HiPIMS, se presentan dos fases durante el tiempo de impulsos; la fase inicial depende de la presión de operación y está dominada por iones de gas, mientras que la segunda depende de la potencia y de los materiales a implantar.

Aun, cuando la pulverización por magnetron de impulso de alta potencia es un método reciente, se han desarrollado un gran número de investigaciones, ejemplo:

En marzo del 2013 se llevó a cabo un proyecto de pulverización por magnetron de impulso de alta potencia (HiPIMS), utilizando una probeta de titanio en una atmosfera de Ar/O₂, donde se observó una disminución significativa de la histéresis del material pulsando frecuencias muy bajas⁴⁹. En este mismo año, Q. Luo, S. Yang y K.E. Cooke realizaron un proceso hibrido que combina magnetron alimentado por HiPIMS y DC, con el fin de recubrir acero de herramienta M42 endurecido y acero inoxidable AISI 316L con TiN. Este proceso, demostró su ventaja en la deposición de este recubrimiento revelando una estructura más fina, dureza más alta y menor tensión superficial⁵⁰. Este proceso hibrido también fue utilizado en el 2016 para recubrir AlTi y Cr con AlTiCrN, donde se observó que al variar el contenido de Cr se

⁴⁷ DE LOS ARCOS, T. et al. Description of HiPIMS plasma regimes in terms of composition, spoke formation and deposition rate. En: Plasma Sources Sci. Technol. 2014. Vol.23. p. 10.

⁴⁸ EHIASARIAN, A. High-power impulse magnetron sputtering and its applications. En: Pure Appl. Chem. 2010. Vol.82. p. 1247-1248.

⁴⁹ SURPI, A. et al. HiPIMS deposition of TiOx in an industrial-scale apparatus: Effects of target size and deposition geometry on hysteresis. En: Surf. Coatings Technol. 2013. Vol.235. p. 714-719.

⁵⁰ LUO, Q.; YANG, S. y COOKE, H. Hybrid HIPIMS and DC magnetron sputtering deposition of TiN coatings: Deposition rate, structure and tribological properties. En: Surf. Coatings Technol. 2013. Vol.236. p. 13-21.

puede obtener una mejora en la resistencia al desgaste de los revestimientos⁵¹. Un estudio realizado por Robert Hallman, sobre el recubrimiento de nitruro de titanio (TiN) en implantes médicos de aleación CoCr, utilizando la técnica magnetrón sputtering de alta potencia, revelo que el recubrimiento HIPIMS genera una disminución del coeficiente de fricción y aumento en la resistencia a la corrosión en el material de los implantes⁵². En noviembre de 2016, se desarrolló un método de pulverización por magnetrón de alta potencia (HiPIMS) para recubrir una superficie de aleación de Ti-48Al-2Cr-2Nb con TiAlN. Las microestructuras de las muestras se compararon antes y después de realizar las pruebas usando varias técnicas (microscopía, XRD y XPS), a su vez se estudió la adhesión del sustrato intermetálico y sus propiedades tribológicas. Este estudio reveló que la película de TiAlN provee un notable aumento en la resistencia a la oxidación y además proporciona buenas propiedades de adherencia incluso después de choques térmicos repetidos⁵³. En febrero de 2014, se realizó un estudio para aumentar la vida útil de herramientas, depositando películas de TiAlN sobre probetas de acero de alta velocidad pulidos a espejo (HSS), utilizando la técnica HiPIMS. Los resultados indican que las películas de TiAlN proveen una micro estructura altamente densa con una superficie fina y lisa, una dureza relativamente alta y elevada resistencia al desgaste⁵⁴.

⁵¹ ZHOU, H. et al. AlTiCrN coatings deposited by hybrid HIPIMS/DC magnetron co-sputtering. En: Vacuum. 2017. Vol.136. p. 129-136.

⁵² HALLMAN, R. A Study of TiN Coatings on Medical Implants Deposited by HiPIMS. En: Luleå Univ. Technol. Dep. Eng. Sci. Math. 2011. p. 92.

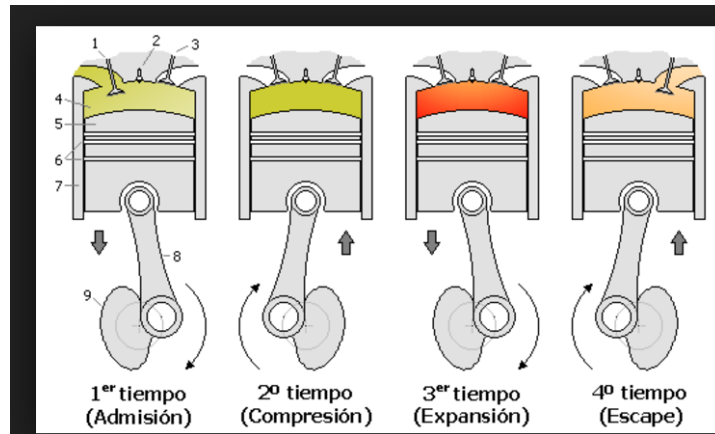
⁵³ BADINI, C. et al. Thermal Shock and Oxidation Behavior of HiPIMS TiAlN Coatings Grown on Ti-48Al-2Cr-2Nb Intermetallic Allo. En: Jordi Sort. 2016. p. 1-20.

⁵⁴ SHIMIZU, T. et al. HIPIMS deposition of TiAlN films on inner wall of micro-dies and its applicability in micro-sheet metal forming. En: Surf. Coatings Technol. 2014. Vol.250. p. 44-51.

1.1 DESGASTE EN LOS CILINDROS DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

El desgaste que se presenta en los cilindros de combustión interna es producido por las altas temperaturas y presiones de la combustión además del movimiento alternativo del pistón y sus aros. La referencia bibliográfica indica que el desgaste ocasionado en la camisa ocurre principalmente por el anillo de compresión, en el punto muerto superior⁵⁵. En este punto se da inicio a la carrera de expansión del pistón y se presentan las presiones y temperaturas máximas en el proceso de combustión, las presiones fuerzan los aros contra las paredes del cilindro y las altas temperaturas hacen que la capa de lubricante protectora sea débil y casi incapaz de cumplir su función limitando la lubricación existente⁵⁶.

Figura 2. Tiempos del pistón



Fuente: BAER, Adrián. Motor de explosión de cuatro tiempos. Espaciocoche. Disponible en: <http://espaciocoche.com/motor-de-explosion-de-4-tiempos/>

⁵⁵ RODRÍGUEZ, D. Evaluación teórica del incremento del rendimiento del motor McCULLOCH MC-92 con la utilización de recubrimientos cerámicos en la cámara de combustión. Trabajo de grado Ingeniero Aeronáutico. Bogotá. Universidad de San Buenaventura. Facultad de ingeniería. Programa de Ingeniería Aeronáutica. 2007. p. 24-65.

⁵⁶ RAMÍREZ, J. y BASANTES, J. Elaboración de material didáctico en un motor de combustión interna de 4 tiempos en corte con caja de cambios. Tesis Licenciado en Electromecánica Automotriz. Quito. Universidad San Francisco de Quito. Colegio de Ciencias e Ingeniería. 2013. p. 8-68.

1.2 TIPOS DE DESGASTES SUPERFICIALES DE LAS CAMISAS

Los tipos de desgastes, más frecuentes, que se generan en la superficie de las camisas de los motores de combustión interna mientras se encuentran en operación son los siguientes:

1.2.1 Desgaste de conicidad La temperatura y presiones que se presentan en el proceso de combustión interna no son constantes, a medida que el pistón descienda en la carrera de expansión estas magnitudes descienden ocasionando un desgaste irregular en la camisa produciendo un desgaste de conicidad (figura 3), ya que, este fenómeno es función de la presión de contacto que se produce entre los sólidos.

Figura 3. Desgaste cónico de un cilindro de motor

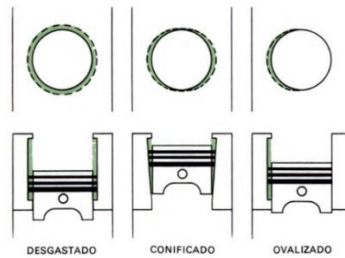


Fuente: CROUSE, William. Mecánica del automóvil II. 3 edición. P. 594.

1.2.2 Desgaste Ovalizado. Es cuando el cilindro tiende a ovalizarse ligeramente como consecuencia del empuje lateral ejercido por el pistón. El empuje lateral es consecuencia del movimiento oscilante de la biela a un lado y otro de la vertical (ver Figura4).

1.2.3 Desgaste Homogéneo Es el provocado por los anillos del pistón. Este tipo de desgaste puede ser aceptado hasta un límite de 0.008” o según especificaciones del fabricante (ver Figura4).

Figura 4. Cilindro con desgaste, cónico, ovalado y homogéneo



Fuente: CROUSE, William. Mecánica del automóvil II. 3 edición. p. 596.

1.3 OBJETIVO GENERAL

Aportar conocimientos para el cumplimiento de la misión de la Universidad Industrial de Santander, la cual forma profesionales de alta calidad que participan activamente en procesos de cambio que generen progreso en la comunidad, desarrollando una investigación que consiste en evaluar el desgaste que presenta el material (fundición gris) de las camisas de los motores de combustión interna modificados superficialmente con nitruro de titanio (TiN) mediante el análisis de la metodología ANOVA, con el propósito de proporcionar resultados que contribuyan a mejorar las competencias de la industria y la comunidad académica.

1.4 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Evaluar el desgaste superficial de probetas no modificadas y modificadas superficialmente, mediante el ensayo de caracterización tribológica de perno sobre disco (pin-on-disk).

- Evaluar la hipótesis, mediante el análisis de varianza (ANOVA), de que al aplicar un tratamiento superficial en el material de las camisas (fundición gris), su resistencia al desgaste aumenta. De acuerdo con este objetivo, se diseñarán dos tipos de experimentos descritos a continuación:

- Experimento unifactorial completamente aleatorizado: Experimento que consiste en definir los factores directos e indirectos que intervienen en la modificación superficial seleccionada en la presente investigación. A continuación, se muestran los tipos de variables involucradas en el experimento:

Variables independientes o factores: Modificación superficial (probetas modificadas y no modificadas superficialmente).

Variables dependientes: Pérdida de masa en (g).

- Experimento factorial: Experimento que consiste en definir los factores directos e indirectos que intervienen en el proceso de modificación superficial propuesto en el presente proyecto de investigación. A continuación, se muestran los tipos de variables involucradas en el experimento:

Variables independientes o factores:

Factor A: modificación superficial (probetas modificadas y no modificadas superficialmente).

Factor B: fuerza aplicada en el ensayo de caracterización tribológica Pin on Disk.

Variable dependiente: Pérdida de masa en (g).

- Realizar el análisis experimental del desgaste en las probetas (modificadas y no modificadas con nitruro de titanio TiN) utilizando una máquina tribológica de configuración perno sobre disco, la cual simula el desgaste presentado en las camisas de los motores de combustión interna.

- Establecer los parámetros de evaluación superficial según la norma ASTM G-99 teniendo en cuenta la aproximación de condiciones reales de funcionamiento y la capacidad de la maquina a utilizar.

1.5 JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

Los efectos de desgaste presentados en la cámara de combustión de un motor provocado por el contacto entre los anillos del pistón y la camisa, conlleva a realizar correcciones o cambios de alguno de los elementos y en los casos más extremos, cambio completo del conjunto (incluido pistón). En la industria de transporte automotriz donde el uso del sistema pistón camisa es elevado, el desgaste en esta zona es muy frecuente. Por tal motivo, afecta principalmente a la camisa y anillos (por el contacto directo), donde los costos por mantenimiento son muy elevados. De acuerdo con lo anterior, se propone efectuar un experimento donde se estudia la modificación en materiales utilizados en la fabricación de las camisas de los motores de combustión interna, con el propósito de aumentar la vida útil en servicio.

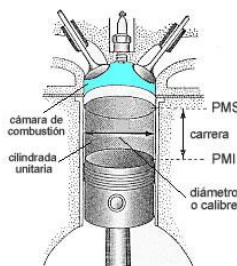
En esta investigación se propone utilizar la técnica HIPIMS depositando una película de TiN en el material de la camisa y luego evaluar el desgaste mediante el análisis experimental utilizando una máquina tribológica de configuración perno-sobre-disco (Pin-on-Disk) puesto que este sistema es muy versátil, sencillo y económico de usar en condiciones controladas de laboratorio. El desarrollo de este proyecto de investigación se llevará a cabo en las escuelas de Ingeniería Mecánica y Física de la Universidad Industrial de Santander con el objeto de tener información sobre cuál de los diferentes tipos de tratamiento que se aplicarán a los materiales de las camisas, genera mejores resultados a partir de dos tipos de experimentos, el unifactorial completamente aleatorio y la factorial.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 CÁMARA DE COMBUSTIÓN

El ciclo Otto es el ciclo termodinámico ideal que se aplica a los motores de combustión interna y se caracteriza porque todo el calor se aporta a volumen constante⁵⁷. En un motor de combustión interna, el pistón se encuentra ubicado dentro del cilindro, cuyas paredes le restringen el movimiento lateral permitiendo solo un desplazamiento lineal alternativo entre el punto muerto superior (PMS) y el punto muerto inferior (PMI)⁵⁸; a dicho desplazamiento se le denomina carrera. En el recorrido ascendente del pistón, la mezcla aire-combustible es comprimida y posteriormente, por medio de la chispa generada por la bujía se produce la ignición de la mezcla⁵⁹. Tanto la mezcla como la combustión deben realizarse en un tiempo mínimo lo más cercano posible al punto muerto superior (PMS).

Figura 5. Cámara de combustión



Fuente: Elaboración de material didáctico en un motor de combustión interna de 4 tiempos en corte con caja de cambios, Universidad San Francisco de Quito. Disponible en: <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/2760/1/108830.pdf>

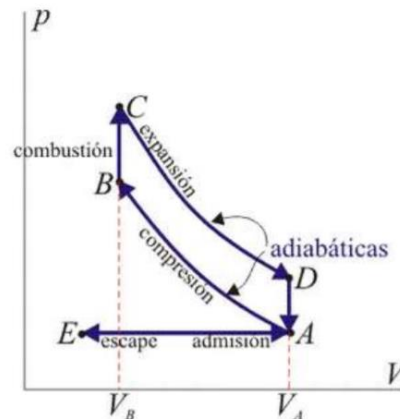
⁵⁷ BARROS, H. y MORAN, D. Reparación de un motor de combustión interna 1.3 fire. Tesis de grado Tecnólogo en Mecánica Automotriz. Guayaquil. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Programa de Tecnología Macénica. 2014. p. 14-24.

⁵⁸ AGUILAR, M.; GODOY, A. y GÓMEZ, N. Cámaras de combustión y sistemas de distribución de la carga. Cátedra de Máquinas Térmicas I. Provincia de corrientes. Argentina. Universidad del Nordeste. Facultad de Ingeniería. Especialidad Electromecánica. 2001. p. 4-20.

⁵⁹ MecanicaFacil. Disponible en: <http://www.mecanicafacil.info/Piston.html>.

Durante la ignición los conjuntos mecánicos del motor toman la energía química del combustible y la transforman en energía mecánica, la cual permite el desplazamiento del vehículo. La figura 6 muestra los cuatro procesos del ciclo Otto.

Figura 6. Ciclo Otto



Fuente: Reparación de un motor de combustión interna 1.3 fire, Escuela superior politécnica del litoral. Disponible en: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/29503/1/Tesina%20de%20Graduacion%20-%20PROTMEC.pdf>

- Admisión (E-A). El pistón desciende con la válvula de admisión abierta, aumentando la cantidad de mezcla (aire-combustible) en la cámara. Al estar la válvula abierta la presión en la cámara es igual a la exterior, por lo tanto, es una expansión isobárica.
- Compresión (A-B). El pistón asciende comprimiendo la mezcla mientras las válvulas se encuentran cerradas (compresión adiabática).
- Combustión (B-C). El pistón se encuentra en el PMS, la bujía produce la chispa que inicia la combustión a volumen prácticamente constante (ya que la combustión sucede en muy corto tiempo y el pistón no ha tenido tiempo de bajar).
- Expansión (C-D). Debido a la combustión se produce un aumento drástico en la presión y la temperatura dentro de la cámara, lo que empuja al pistón hacia

abajo, realizando trabajo sobre él. Este es un proceso adiabático ya que, las válvulas permanecen cerradas.

- Escape (D-A). Se abre la válvula de escape y el gas sale al exterior a una temperatura mayor que la inicial, siendo sustituido por la misma cantidad de aire frío.

2.2 PRINCIPALES COMPONENTES DE UNA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

2.2.1 Cilindro o camisa Las camisas son cilindros huecos, cuyas superficies de deslizamiento internas están expuestas a elevados grados de fricción por el pistón o bien por los anillos y a altas temperaturas que aparecen localmente. Por otra parte, la camisa es la encargada de asegurar que las altas temperaturas del escape no dañen los componentes internos del motor. Existen dos tipos de camisas (secas y húmedas):

- **Camisas secas:** Estas camisas se montan en un cilindro previamente maquinado en el material del bloque del motor. El refrigerante no entra en contacto con la camisa, ya que, su superficie externa va pegada a la superficie interna del cilindro.
- **Camisas húmedas:** Son aquellas que una vez montadas en el bloque del motor entran en contacto con el refrigerante del sistema de enfriamiento, por ello es necesario un sello en la parte superior que evite ingresar al líquido dentro del cilindro y un sello inferior para que el líquido no llegue al cárter.

Figura 7. Camisa seca y camisa húmeda



Fuente: INGENIERO MARINO, Las camisas y su disposición en el bloque motor. Disponible en: <http://ingenieromarino.com/16-las-camisas-y-su-disposicion-en-el-bloque-motor/>

2.2.2 Pistón El pistón es uno de los elementos básicos de un motor de combustión interna. Debe cumplir con tres funciones básicas:

- Cerrar y obturar la cámara de combustión con respecto al cárter o caja del cigüeñal.
- Recibir las fuerzas causadas por la combustión a través de la biela y transmitirla al cigüeñal como fuerza de torsión.
- Transmitir el calor producido por los gases de la combustión hacia las paredes de la camisa para que sean enfriadas por el refrigerante.

El pistón está fabricado en una aleación de aluminio, utilizando alta tecnología para lograr una máxima precisión en cuanto a medidas y lograr la resistencia adecuada para soportar el desgaste causado por la temperatura y la fricción⁶⁰.

⁶⁰ Tipos de aros de pistón y sus funciones. En: Actualidad motor. 2009. Disponible en: <https://www.actualidadmotor.com/tipos-de-aros-del-piston-y-sus-funciones/>

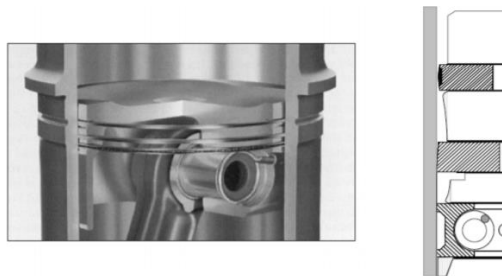
Figura 8. Pistón



Fuente: FERNANDEZ, Carlos. Sistemas y tecnología de motores Diesel. Disponible en: <https://es.slideshare.net/EdgarVargasMedina/exposicion-motores-diesel>.

2.2.3 Anillos del pistón Los anillos del pistón son sellos dinámicos que mantienen la presión de combustión y proveen control sobre la capa de aceite⁶¹. Usualmente un pistón cuenta con tres ranuras para ensamblar los aros, dos de ellas estas dispuestas para los anillos de compresión y la última para el anillo rascador de aceite.

Figura 9. Disposición del paquete de anillos



Fuente: PEDRERO, José. Efecto del recubrimiento por triboadhesión del DLC y bisulfuro de molibdeno en el desempeño y desgaste de anillos de motor de combustión interna. Disponible en: <http://documents.mx/documents/efecto-del-recubrimiento-por-triboadhesion-del-dlc-y-bisulfuro-de-molibdeno.html>

⁶¹ BAYER, Raymond. Engineering design for wear. 2004. 2nd edición. p. 45-127.

El propósito primario de los anillos es evitar que las elevadas presiones de los gases se escapen de la cámara de combustión, pues esto generaría grandes pérdidas de energía. Otra de sus funciones es transferir a las paredes del cilindro o camisa parte del calor liberado por el pistón y otorgarle un cierto grado de amortiguación. En un motor de combustión interna actual, los anillos del pistón deben cumplir con los siguientes requisitos:

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

2.3 DESGASTE

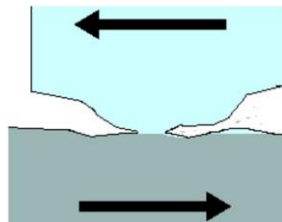
La pérdida progresiva del material en un sólido producto del movimiento relativo entre superficies o sustancias se puede definir como desgaste⁶². En ingeniería se reconoce que el 80 - 90 % de las piezas que se sustituyen es debido al desgaste y que las pérdidas anuales causada por este fenómeno en los Países desarrollados está en el rango de 0.5 - 1 % del producto neto nacional⁶³, la tribología definida como la ciencia que estudia los fenómenos de interacción entre dos superficies en contacto, explotada de una manera óptima, puede evitar estas pérdidas anuales,

⁶² ÁLVAREZ, E. TRIBOLOGÍA: Fricción, Desgaste y Lubricación. Santa Clara. Cuba. Universidad Central de las Villas. Facultad de Ingeniería Mecánica. Departamento de Energía. 1999. p. 1-15.

⁶³ DURSUNKAYA, D. et al. Experimental and Numerical Investigation of Inter-Ring Gas Pressures and Blowby in a Diesel Engine. En: SAE International. 1993.

evitando excesivos gastos de materiales y lubricantes, costosos trabajos de reparación y grandes periodos de tiempo improductivo⁶⁴ que se presenta en la industria automotriz, sector de estudio en el proyecto.

Figura 10. Desgaste



Fuente: Tipos de desgaste. Información Técnica. Disponible en: http://www.metalsprayperu.com/web/informacion_tecnica/tipo_desgaste2.html

2.3.1 Evolución histórica de la tribología El estudio de la tribología se ha desarrollado a lo largo de varios hechos históricos, según la literatura sus inicios en el mesozoico con la formación de petróleo, evolucionando a través de las diferentes épocas, desde la edad de hierro, bronce y media, donde aparecen los primeros mecanismos anti-desgastantes y se empieza a utilizar aceites minerales, vegetales y grasas de origen animal. En el renacimiento se acogieron los estudios realizados por Leonardo de Vinci, y tras la revolución industrial surgieron las leyes sobre la fricción que aún siguen vigentes. Gracias a la primera y segunda guerra mundial se constituyeron las diferentes normas como el ASME y se desarrollan teorías sobre la lubricación. Pero no es hasta el año 1966 donde se reconoce la tribología como ciencia.

2.3.2 Dinámica del grupo anillo-camisa Como se mencionó, el desgaste que se produce en la camisa de un motor de combustión interna es afectado principalmente entre el contacto existente con el anillo de compresión, por tal motivo, la dinámica analizada en este proyecto se desarrollará en base a este supuesto. Las ecuaciones

⁶⁴ CROUSE, William. Mecánica del automóvil. Marcombo. 1993. 3ra edición. p. 38-60.

planteadas son simplificadas bajo las siguientes suposiciones que nos permiten tener una aproximación teórica de la dinámica presentada en el conjunto.

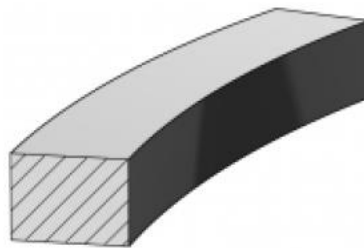
- La fuerza de empuje lateral es la mayor causa de fricción en un motor de combustión interna, esta fuerza es transmitida a la pared del cilindro, produciendo un desgaste notable en la pared, especialmente cerca de la posición del punto muerto superior del aro de compresión.
- Las fuerzas hidrodinámicas y fuerzas de amortiguación del aceite que trabajan en el anillo-camisa no se van a tener presente, ya que, en el experimento a realizar no se utilizará ningún tipo de lubricante, asumiendo que la película de lubricación es mínima y casi inútil en el punto muerto superior.
- La presión en el cilindro se simulará utilizando la primera ley de la termodinámica.
- La presión de contacto sobre la pared del cilindro se consigue por la fuerza del resorte inherente del anillo en conjunción con el gas producto de la combustión que agregan una presión detrás del anillo⁶⁵.
- La presión de los gases en la primera ranura, detrás del anillo de compresión, cuando el pistón se encuentra en el P.M.S, es cercana a la presión en el cilindro en la cámara de combustión.
- La presión de contacto de los anillos de compresión debido a su tensión inherente será comprendida entre 0,12 y 0,25 Nmm⁻² para anillos conformes a la norma DIN / ISO (sección 1.2.3).
- El movimiento primario del anillo del pistón se define por el movimiento del pistón.
- No se tendrá en cuenta el movimiento de los anillos del pistón en la ranura producto de las fuerzas axiales que actúan sobre el anillo. Las fuerzas axiales están compuestas por la presión del gas por encima y por debajo del anillo, las

⁶⁵ MITTLER, R.; MIERBACH, A. y RICHARDSON, D. Understanding the Fundamentals of Piston Ring Axial Motion and Twist and the Effects on Blow-By. En: Proceedings of the ASME Internal Combustion Engine Division 2009 Spring Technical Conference. 2009. p. 721-735.

fuerzas de masa (inercia) y las fuerzas de fricción. Estas fuerzas cambian su dirección durante el ciclo. Como resultado, el anillo de pistón se mueve desde un lado de la ranura a la otra durante el ciclo

- El anillo de pistón más básico tiene forma rectangular (ver figura 11). Este anillo realiza las funciones de sellado necesarias en condiciones de funcionamiento normales y por su simplicidad se utiliza para todos los cálculos de esta tesis de pregrado.

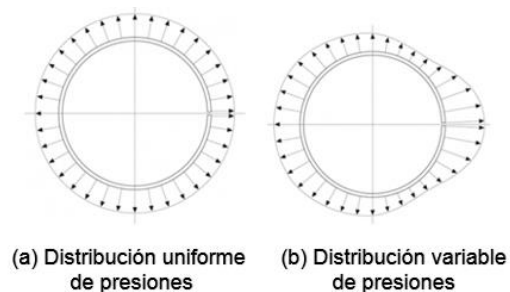
Figura 11. Perfil de anillo de pistón



Fuente: DLUDOS, Jozef. Computational modelling of piston ring dynamics. Brno. Tesis de maestría. Universidad Tecnológica de Brno. Facultad de Ingeniería Mecánica. 2014. p. 23.

- La distribución de presión radial es no uniforme, pero se asumirá una distribución de presión constante para simplificar los cálculos

Figura 12. Distribución de presiones en los anillos de pistón

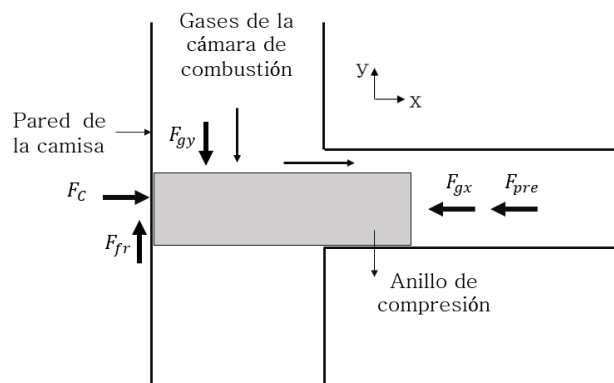


Fuente: DLUDOS, Jozef. Computational modelling of piston ring dynamics. Brno. Tesis de maestría. Universidad Tecnológica de Brno. Facultad de Ingeniería Mecánica. 2014. p. 26.

- Se asumirá que la pared del cilindro tiene una forma redonda perfecta, puesto que, debido a la tolerancia de mecanizado o las cargas de montaje y trabajo se producen desviaciones de la forma circular y si el anillo no puede seguir estas deformaciones, se producirá una falta de contacto localizada⁶⁶.
- Las temperaturas máximas de los gases en la cámara de combustión están en el intervalo entre 2000 y 2500 °C de acuerdo con diferentes tipos de motores⁶⁷, estas temperaturas no se tendrán en cuenta por la dificultad que representa simularlas en el laboratorio.
- No se tienen en cuenta la posibilidad de torsión del segmento.
- La información de la presión relacionada con la ciudad de Bucaramanga fue adquirida de estudios realizados por el IDEAM⁶⁸.

Luego de concretar las suposiciones a tener en cuenta, se establece el esquema de las fuerzas unitarias que actúan sobre entre el anillo de compresión y la camisa de un motor de combustión interna.

Figura 13. Esquema de fuerzas en un anillo de pistón



⁶⁶ DLUGOŠ, J. Computational Modelling of Piston Ring Dynamics in 3D. En: Journal of Middle European Construction and Design of Cars. 2004. Vol.12. p. 1-7.

⁶⁷ Rauscher, J. Vozidlové motory. En: VUT FSI Brno. 2004.

⁶⁸ IDEAM. Pronósticos y alertas. 2017. Disponible en: <http://www.pronosticosyalertas.gov.co/pronosticos>.

Los conjuntos de ecuaciones típicas tienen la siguiente forma:

Dirección radial

$$\sum F_r = F_c - F_{gx} - F_{pre} \quad (1)$$

Dirección axial

$$\sum F_a = F_{fri} - F_{gy} - \frac{M(g + a_p)}{C_i} = 0 \quad (2)$$

Donde; F_r : Fuerza radial, F_c : Fuerza de contacto (normal) entre el anillo y la pared del cilindro, F_{gx} : Fuerza de los gases de combustión detrás del segmento, F_{pre} : Fuerza de pretensión del anillo, F_a : Fuerza axial, F_{fri} : Fuerza de fricción, F_{gi} : Fuerza del gas en y, M : Masa del anillo, g : Fuerza de gravedad, a_p : Aceleración del pistón, C_i : Circunferencia.

conocer la presión que se produce en el proceso de combustión es esencial para poder resolver las ecuaciones planteadas, este parámetro, junto con la temperatura son los factores principales en cada uno de los tiempos del ciclo Otto. En este trabajo se aplicará la teoría termodinámica para encontrar dichos valores.

Fuerza de los gases de combustión:

$$F_g = A_c P \quad (3)$$

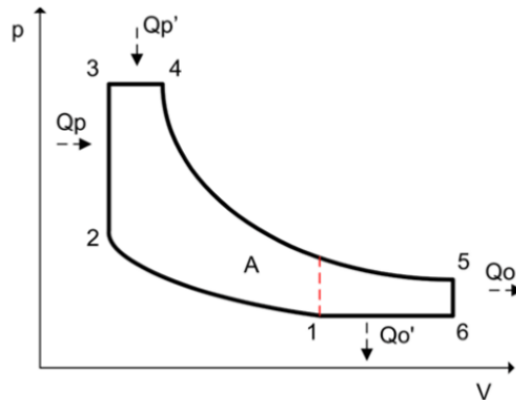
El valor de A_c corresponde al área de contacto entre el segmento y la pared del cilindro y el valor P corresponde a la presión absoluta en la cámara de combustión dada por la siguiente ecuación.

$$P = (P_i - P') + P_{atm} \quad (4)$$

Donde: P_{atm} : Presión atmosférica promedio de la ciudad de Bucaramanga, Colombia, P' : La presión en el punto muerto superior, P_i : La presión instantánea de los gases de combustión.

La presión junto con la temperatura varía en cada una de las fases del ciclo Otto, estos parámetros se determinan mediante la metodología de diseño de motores de combustión interna^{69,70}. El comportamiento ideal de la presión de los gases con respecto a la variación del volumen se ilustra en la figura 14.

Figura 14. Presión de admisión para motores de dos tiempos



La presión de admisión se calcula con la siguiente ecuación

$$P_a = 1.05pk \quad (5)$$

Donde: P_a : Presión de alimentación, pk : Presión en la entrada, igual a la presión atmosférica por no haber sobrealimentación, pk : 960msnm, 90.6 Kpa (presión atmosférica en la ciudad de Bucaramanga)

⁶⁹ CASANOVA, J. y AGUIRRE, V. Banco de pruebas para medida de fricción en pistones. En: Rev. Iberoam. Ing. Mecánica. 2005. Vol.9. p. 79-94.

⁷⁰ PORTILLA, Luis. Influencia de la modificación superficial con iones de titanio y nitrógeno en materiales utilizados en la fabricación de pistones de motocicleta. Proyecto de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2017. p. 22-25.

$$P_a = 1.05 \times 90.6 [KPa] \quad (6)$$

$$P_a = 95130 [Pa]$$

La presión de compresión al final del ciclo se calcula con la siguiente ecuación:

$$P_C = P_a \epsilon^{n1} \quad (7)$$

Donde: P_a : Es la presión de admisión calculada, ϵ : 8 es la relación de compresión, $n1$: 1.36, es el exponente politrópico medio de compresión.

$$P_C = 1.608 [Mpa] \quad (8)$$

La presión máxima de combustión en el ciclo Otto está dada por:

$$P_{max} = \left(\frac{u_0 + \gamma_r}{1 + \gamma_r} \right) \times \frac{T_{max}}{T_c} P_C \quad (9)$$

Donde: u_0 : 1.08 es el coeficiente teórico de la variación molecular, γ_r : 0.06, Valor adimensional del coeficiente de gases residuales en un motor de combustión interna de 4T, T_{max} : Temperatura máxima de combustión, T_c : Valor de la temperatura al final de la compresión.

se puede medir la energía de los productos luego de la explosión dentro del volumen de combustión para proseguir a buscar la temperatura máxima de combustión, Jovaj⁷¹ utiliza los siguientes datos.

$$U_Z = 68600 \frac{KJ}{Kmol} \quad (10)$$

$$T_z = T_{max} = 2615K = 2341,85^\circ C \quad (11)$$

⁷¹ JÓVAJ, M. S. Motores de automóvil. Editorial MIR. 1982. p. 157.

Temperatura en el ciclo de compresión: este valor se determina a través de la siguiente expresión matemática:

$$T_c = T_a \epsilon^{(n_1-1)} \quad (12)$$

Donde: n_1 : 1.36, es el exponente politrópico medio de compresión, T_a : Temperatura de admisión.

Jovaj propone la siguiente metodología para calcular la temperatura de admisión:

$$T_a = \frac{T_0 + \Delta T + \varphi \gamma_r T_r}{1 + \gamma_r} \quad (13)$$

Donde: T_a : Temperatura de alimentación, $22^\circ\text{C} = 295,15\text{K}$, $\Delta T \approx 20$, $\varphi:1$, se desprecia la relación de los calores específicos entre la carga fresca y los gases residuales⁷². T_r : 800K , promedio del rango de valor para motores de gasolina.

Los Valores de presiones obtenidos se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Valores de presión

Presiones	[Mpa]
Pa	0.951 3
Pc	16.08
Pmax	62.4

2.4 NITRURO DE TITANIO

Al incorporan átomos de nitrógeno en un recubrimiento de titanio aumenta la densidad del producto en solo un 25%, pero su aumento general en la fuerza es

⁷² PORTILLA, Luis. Influencia de la modificación superficial con iones de titanio y nitrógeno en materiales utilizados en la fabricación de pistones de motocicleta. Proyecto de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2017. p. 22-25.

cinco veces mayor que el del titanio. El compuesto resultante es extremadamente duro, con una dureza Vickers superior a 2500. Este tipo de recubrimientos proporciona una superficie más dura y un coeficiente menor de fricción, lo que significa que produce un incremento de la dureza, la resistencia a la corrosión y al desgaste.

2.5 MÉTODO DE RECUBRIMIENTO

Una de las partes más importantes de este proyecto está relacionada con el proceso de recubrimiento de las probetas, el cual se realiza por medio de la técnica “pulverización por magnetron de alta potencia (HIPIMS)”. HIPIMS es una técnica relativamente joven de deposición física de vapor (PVD) que combina la pulverización de magnetron con la tecnología de potencia pulsada; su objetivo es lograr la ionización de los átomos de la pulverización catódica con el fin de obtener iones disponibles para el grabado sustrato (pretratamiento) y/o de asistencia para el proceso de crecimiento de la película⁷³.

2.5.1 Pulverización catódica (sputtering) La pulverización catódica (sputtering), es una técnica de deposición por pulverización física, basada en el bombardeo de un material (blanco de sputtering) con iones producidos en una descarga eléctrica en forma de plasma⁷⁴. En este proceso se arrancan átomos de la superficie del blanco para ser depositados superficialmente en el sustrato^{75,76}. En la actualidad,

⁷³ Plasma Applications Group. Berkeley Lab. Disponible en: <http://pag.lbl.gov/Research-Topics/high-power-impulse-magnetron-sputtering>.

⁷⁴ CELSO, E. Sistemas Magnéticos Artificiales obtenidos mediante Pulverización Catódica: Películas Delgadas Amorfas de TbFe y Multicapas de Ni/Co. Trabajo de grado Doctor en ciencias Físicas. Madrid. Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Físicas. Departamento de Físicas de Materiales. 1995. p. 13-38.

⁷⁵ CARL, C. Nanocomposite W-C:H Diamond-like carbon coatings. En: Strondl. C. G. C. 2007. p. 130.

⁷⁶ MUÑOZ, A. Análisis estructural, superficial y tribológico de recubrimientos de nitruro de cromo (CrN) sintetizado por magnetron sputtering reactivo DC. Tesis para optar al grado de Magister en

este método es uno de los más avanzados y con mejores características en la deposición de películas de diversos materiales por su buena reproducibilidad de las tipologías de los depósitos, bajo costo, versatilidad para evaporar gran variedad de materiales (metales, aislantes tipo cerámicos, materiales de alto punto de fusión, etc.), buena adherencia de la película depositada y fácil control en la velocidad de deposición y erosión del blanco^{77,78}.

En la descarga se utiliza un gas inerte de elevada masa para aumentar la transferencia del momento cinético a los átomos del blanco (por razones de precio, en la mayoría de las aplicaciones el gas utilizado es argón, con masa atómica = 40). En este proceso se presentan pérdidas debido a las colisiones de las especies cargadas con las paredes de la cámara de vacío y en los electrodos, para compensar estas pérdidas, el bombardeo de los iones produce la emisión de electrones secundarios acelerados hacia el plasma, donde tienen la suficiente energía para producir nuevos iones mediante procesos de ionización en cascada por impacto con los átomos del gas, generando una descarga auto-sostenida⁷⁹.

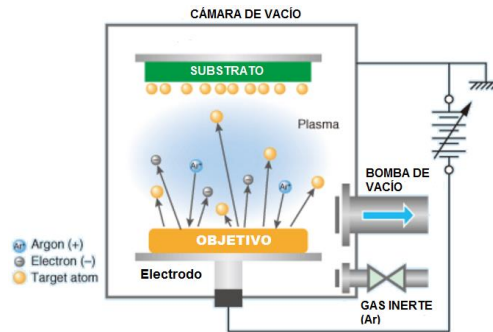
Ciencias-Físicas. Manizales. Universidad nacional de colombia Sede manizales. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Laboratorio de Física del Plasma. 2011. p. 21-32.

⁷⁷ SÁNCHEZ, J. Deposición de capas constituyentes de estructuras multicapa con funciones controlables eléctricamente. Universidad de Zaragoza. Departamento de Física Aplicada. 2006. p. 8-32.

⁷⁸ PEDROCHE, G. Fabricación y caracterización de wolframio nanoestructurado como material de primera pared en reactores de fusión nuclear. Trabajo de grado en Ingeniería de la Energía. Escuela técnica superior de Ingenieros Industriales. Departamento de Ingeniería Nuclear. 2014. P. 59-103

⁷⁹ MONTOYA, J. Producción y caracterización de películas delgadas de $YBaCo_4O_{7+\delta}$ por medio de pulverización catódica (sputtering) a presiones altas de oxígeno. Trabajo presentado como requisito parcial para optar al título de Magíster en Ingeniería – Ingeniería de Materiales y Procesos. Medellín. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Facultad de minas. 2010. p. 20-26.

Figura 15. Pulverización catódica (sputtering)



Fuente: Monitoring & control of thin film deposition process sputter deposition equipment. Disponible en: http://www.m-system.co.jp/newsletter/182/clip_contents.html

2.5.1.1 Proceso de colisión Se pueden tener dos fenómenos en la colisión con una interacción directa; de baja energía y de alta energía. En ambos casos, se altera el estado de vibración de los átomos que se encuentran en las proximidades de la superficie, produciendo cierta disipación de energía en forma de calor, motivo por lo que es importante tener control en la temperatura. En la interacción directa de baja energía la partícula incidente golpea dos átomos de la superficie simultáneamente, o con una cierta inclinación a un átomo transfiriendo una componente lateral de momento a un átomo vecino. Y en la interacción de mayor energía se provoca la salida de los átomos mediante un efecto de "reflexión"⁸⁰.

2.5.1.2 Consideraciones energéticas Aún no se tiene certeza de la influencia de la elevada energía de las partículas desprendidas sobre la nucleación y crecimiento de las partículas, puesto que es muy complicado separar la influencia de los electrones de alta energía de los átomos desprendidos por bombardeo, ya que, ambas varían de manera similar con la variación del voltaje del cátodo⁷⁹. Sin embargo, las colisiones en cascada permiten la expulsión de átomos de la

⁸⁰ MONTOYA, J. Producción y caracterización de películas delgadas de YBaCo4O7+ δ por medio de pulverización catódica (sputtering) a presiones altas de oxígeno. Trabajo presentado como requisito parcial para optar al título de Magíster en Ingeniería – Ingeniería de Materiales y Procesos. Medellín. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Facultad de minas. 2010. p. 20-26.

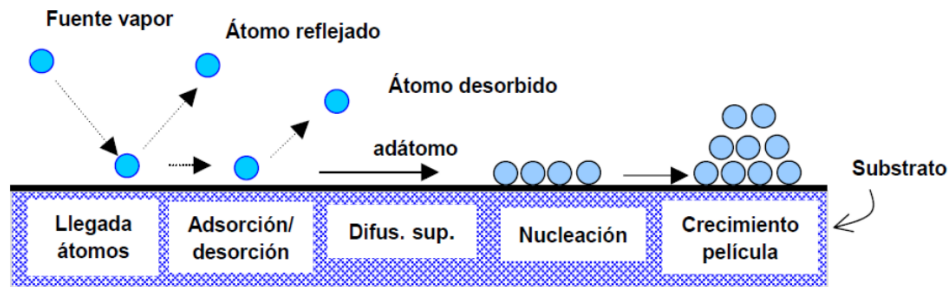
superficie, ya que la energía con la que llegan los iones al blanco es muy superior a la energía de enlace de los átomos en la superficie⁷⁹. El rendimiento de sputtering depende de la energía y la masa de las partículas de bombardeo y del blanco, además de otros factores tales como el estado de la superficie (topografía), el ángulo de llegada, etc.

Los átomos evaporados llegan al sustrato con una pérdida significativa de su energía inicial, esto debido a que la trayectoria de las partículas pulverizadas no es rectilínea gracias a las presiones de trabajo, así que, los átomos evaporados pueden alcanzar al sustrato desde cualquier dirección después de sufrir una serie de colisiones en la atmósfera de sputtering.

2.5.1.3 Proceso de depósito. Las películas delgadas crecidas por pulverización catódica se diferencian de las que son crecidas por otros métodos, dado que los parámetros (gas de descarga, presión, temperatura del sustrato, distancia cátodo-ánodo, etc.) tienen gran influencia y caracterizan las propiedades de las películas depositadas por “sputtering”⁸¹. Asumiendo una serie de idealidades (superficie ideal, gas de átomos ideal, imposibilidad de daño sobre la superficie e imposibilidad de reacción química en la superficie), se tienen las siguientes etapas en el proceso global del crecimiento de la película de recubrimiento:

⁸¹ MONTOYA, J. Producción y caracterización de películas delgadas de $\text{YBaCo}_4\text{O}_{7+\delta}$ por medio de pulverización catódica (sputtering) a presiones altas de oxígeno. Trabajo presentado como requisito parcial para optar al título de Magíster en Ingeniería – Ingeniería de Materiales y Procesos. Medellín. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Facultad de minas. 2010. p. 20-26.

Figura 16. Etapas del crecimiento de capas



Fuente: Fabricación y caracterización de wolframio nano-estructurado como material de primera pared en reactores de fusión nuclear. p. 17.

- Llegada de átomos a la superficie: Cuando llegan los átomos evaporados a la superficie que se va implantar ceden parte de su energía cinética, aumentando el estado de vibración de los átomos de esa superficie, fenómeno que se manifiesta en forma de calor.
- Adsorción/Desorción: Cuanto más alto es el valor de la energía de adsorción y más bajo es la energía de vibración de la red, menor es la frecuencia de desorción. Los átomos que se han "acomodado" sobre la superficie, vibrarán inicialmente con una frecuencia propia, próxima a la frecuencia de vibración de la red. Dentro de estos átomos, los que tengan mayor energía de vibración pueden acabar desorbiéndose (desorción) de la superficie⁸².
- Difusión superficial: Los átomos absorbidos no tendrán una posición fija sobre la superficie, ellos pueden moverse según la diferencia de energías de adsorción y difusión. Para que un átomo con bastante energía no se desorbe necesita encontrar una posición donde la energía de enlace sea más elevada, estas posiciones suelen ser defectos de las superficies, escalones, etc. La longitud de difusión depende directamente de la energía de difusión, así pues, un ordenamiento cristalino requiere de una energía de difusión alta para que los

⁸² PEDROCHE, G. Fabricación y caracterización de wolframio nanoestructurado como material de primera pared en reactores de fusión nuclear. Trabajo de grado en Ingeniería de la Energía. Escuela técnica superior de Ingenieros Industriales. Departamento de Ingeniería Nuclear. 2014. p. 59-103.

átomos puedan difundirse a distancias grandes y un ordenamiento amorfo se produce con una energía de difusión más pequeña.

- **Nucleación:** Al quedar la partícula (átomo) enlazada con la superficie, se iniciará un "núcleo de crecimiento". Los factores que controlan la creación de los núcleos son la naturaleza y el estado de la superficie, al igual que las energías de adsorción de los átomos a la superficie y de cohesión o enlace entre ellos. Dependiendo de los parámetros que intervengan en el proceso, los núcleos de crecimiento pueden ser átomos individuales o pequeñas agrupaciones de átomos.
- **Crecimiento de la película:** Una vez que se forme una capa continua del material depositado sobre el substrato, los átomos que van llegando se incorporan a la superficie mediante procesos de difusión superficial y de absorción⁸³. Pero es necesario decir, que también pueden ocurrir otros procesos cuando se utilizan temperaturas muy altas.

2.5.1.4 Parámetros de influencia En el proceso de pulverización, las características (composición, microestructura, morfología y propiedades de las películas) de las muestras están ligadas a un gran número de parámetros. A continuación, se presentan los principales parámetros controlables y sus posibles mecanismos de control:

- **Voltaje del cátodo:** se debe buscar un valor de voltaje óptimo, ya que, si este aumenta, también lo hará la ionización del gas y las partículas pulverizadas tendrán una energía inicial mayor, generando una mayor densidad de partículas

⁸³ MONTOYA, J. Producción y caracterización de películas delgadas de YBaCo₄O_{7+δ} por medio de pulverización catódica (sputtering) a presiones altas de oxígeno. Trabajo presentado como requisito parcial para optar al título de Magíster en Ingeniería – Ingeniería de Materiales y Procesos. Medellín. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Facultad de minas. 2010. p. 20-26.

y con ello más colisiones, que provocan una menor tasa de depósito y disminución en la energía de llegada de los átomos a la superficie⁸⁴.

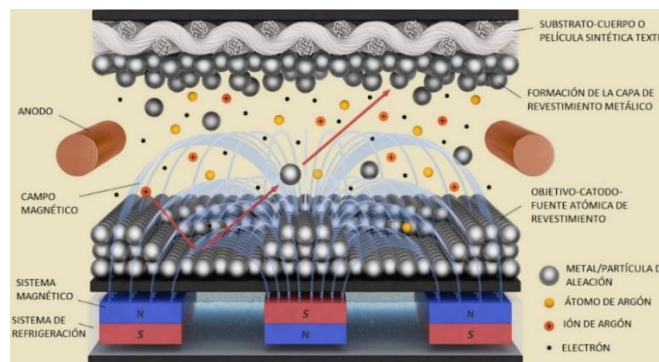
- Corriente de descarga del plasma: como en el caso anterior, el aumento de la corriente no implica un aumento de la tasa de depósito, pues cuanto mayor sea la corriente mayor será la ionización y con esto aumentara la tasa de pulverización.
- Presión de trabajo del gas: en este caso también se hace necesario encontrar un valor optimo en la presión, de lo contrario la densidad atómica aumentara y con ello, un número mayor de colisiones que disminuyen la energía de llegada de los átomos a la superficie.
- Gas de trabajo: es un factor que condiciona el rendimiento de la pulverización y la energía con la que salen las partículas arrancadas del blanco.
- Distancia entre el blanco y el sustrato: la tasa de depósito se ve muy influenciada por este parámetro, pues a una mayor distancia se pueden incrementar las colisiones entre las partículas disminuyendo la energía de llegada de estas a la superficie.
- Temperatura: Algunas características de la película están influenciadas significativamente por la temperatura que puede aumentar por la incidencia de los átomos pulverizados sobre la superficie, así como electrones y átomos del gas de trabajo al liberar su energía.
- Estado de la superficie: La adherencia de la película en el sustrato se ve afectada por la presencia de impurezas y rugosidades. Es por ello que se debe realizar un vacío en la cámara de depósito para evitar la presencia de componentes gaseosos en el aire que puedan entrar en contacto con el gas de sputtering (gas de trabajo más los átomos pulverizados) y/o la superficie del sustrato. Por otro lado, la superficie puede ser modificada limpiando los sustratos con el fin de remover la suciedad superficial.

⁸⁴ SÁNCHEZ, J. Deposición de capas constituyentes de estructuras multicapa con funciones controlables eléctricamente. Universidad de Zaragoza. Departamento de Física Aplicada. 2006. p. 8-32.

- **Ángulo de depósito:** El tipo de orientación del depósito dependerá de la orientación entre la normal del sustrato y el magnetrón.
- **Tiempo de crecimiento:** Según la tasa de depósito, el tiempo de crecimiento determina el espesor de las películas. Mayores espesores implican generalmente, mayor acumulación de defectos cristalográficos y, por lo tanto, mayores tensiones internas. Todos estos parámetros son intrínsecos de cada sistema de depósito. Es decir, no se pueden extrapolar unas condiciones de depósito particulares a otro sistema esperando obtener películas con las mismas propiedades.

2.5.2 Sputtering magnetrón En la técnica de magnetrón sputtering se colocan una serie de imanes por debajo del blanco o cátodo. La presencia de un campo magnético afecta la trayectoria de las partículas cargadas produciendo un giro de ellas alrededor de las líneas del campo, el campo magnético aplicado está básicamente concentrado en la vecindad del blanco y produce una fuerza sobre los electrones que los mantiene en trayectorias helicoidales cerca al blanco, además de un aumento en la rapidez y la eficiencia de la ionización de los átomos del gas noble, aumentando la densidad del plasma en las proximidades de la superficie del cátodo y confinando el plasma en esta región.

Figura 17. Sputtering Magnetron



Fuente: Farotex. Technology, A briej of how magnetron sputtering Works. Disponible en: <http://farotex.com/technology.html>

2.5.3 Sputtering Magnetrón HIPIMS La potencia máxima que se puede aplicar en un magnetrón viene limitada por la capacidad de disipación de energía del blanco sin llegar a su punto de fusión. Sin embargo, en ocasiones resulta útil poder aplicar potencias mayores, y el carácter pulsado del HIPIMS permite sortear esta limitación.

HIPIMS utiliza una gran fuente de alimentación pulsada con el fin de aumentar la ionización del material pulverizado⁸⁵, la potencia llega al magnetrón en pulsos separados por largos periodos de apagado. La relación entre el tiempo que el plasma está encendido y el que está apagado se denomina ciclo de carga (*duty cycle*), la duración de los pulsos permite que la potencia que se entrega en el encendido sea más elevada, permitiendo que las partículas pulverizadas alcancen energías iniciales altas para ionizarse dando lugar a un plasma con una mayor proporción de iones metálicos en relación con los neutros.

⁸⁵ HAUZER, T. C. Magnetron sputtering-HIPIMS. IHI Group. Disponible en: <http://www.hauzertechnocoating.com/en/plasma-coating-explained/magnetron-sputtering/>.

3. METODOLOGÍA

3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El desarrollo del estado del arte y el marco teórico se llevó a cabo por medio de la búsqueda, compilación y posterior selección de artículos científicos y tecnológicos, trabajos de investigación, revistas, normas técnicas y libros relacionados con los motores de combustión interna, la cámara de combustión y el desgaste presente en sus componentes, las ventajas y desventajas del nitruro de titanio (TiN) en los procesos de modificación superficial, el sputtering magnetrón (HIPIMS) y sus efectos en las propiedades mecánicas de los materiales, entre otros.

3.2 DISEÑO DEL EXPERIMENTO

El experimento se diseñó por medio de la técnica análisis de la varianza (ANOVA), es un método flexible que permite construir modelos estadísticos para el análisis de los datos experimentales cuyo valor ha sido encontrado en diversas circunstancias. En este caso el experimento se divide en dos partes (experimento factorial y unifactorial) los cuales serán explicados más adelante.

ANOVA se basa en una serie de supuestos, unos más plausibles que otros, acerca de las variables aleatorias^{86,87}. Es evidente que cuantos más factores se introduzcan

⁸⁶ DAMON, W. et al. Experimental design, ANOVA, and regression. En: New York, NY (EUA). Harper Row. 1987. P. 508.

⁸⁷ RUPERT, G y MILLER, J. Beyond ANOVA basics of applied statistics. Chapman & Hall/CRC Texts in Statistical Science. 1997.

menos cantidad de variación residual (error) quedará por explicar^{88,89}, aunque cierta cantidad de error siempre va a estar presente en los experimentos. Los supuestos son los siguientes:

- El valor esperado de cada variable aleatoria residual es cero. Esto significa que la variación de los valores esperados se debe a los parámetros y/o variables aleatorias.
- Las variables aleatorias residuales son mutuamente independientes. Significa que entre las observaciones no existe nexo alguno que no sea explicado por los factores controlados⁹⁰.
- Todas las variables aleatorias residuales tienen la misma desviación típica. Es llamado el supuesto de homocedasticidad o de igualdad de varianzas. Significa que todas las poblaciones muestreadas poseen la misma varianza.

3.2.1 Experimento unifactorial El análisis de varianza (ANOVA) de un factor está diseñado para comparar varios grupos en una variable cuantitativa. Esta prueba es una generalización del contraste de igualdad de medidas para dos muestras independientes⁹¹. En el experimento unifactorial existen dos contrastes para comparar medidas: los contrastes a priori y las pruebas post hoc. Los contrastes a priori se plantean antes de realizar el experimento y las pruebas post hoc se realizan después de ejecutar el experimento.

En este caso las variables involucradas son:

- **Variabes independientes o factores:** combinación superficial (probetas modificadas y no modificadas superficialmente)

⁸⁸ TAMAYO, I. Análisis de varianza con SPSS 8.0. Disponible en: http://www.ugr.es/~imartin/TEMA5_ANOVA.pdf.

⁸⁹ Estadística aplicada. prácticas con SPSS. Disponible en: [http://www.ugr.es/~metcuant/asignaturas/docencia/estadistica aplicada/SPSS/SPSS_T2.pdf](http://www.ugr.es/~metcuant/asignaturas/docencia/estadistica%20aplicada/SPSS/SPSS_T2.pdf).

⁹⁰ HOPKINS, K.; HOPKINS, B. y GLASS, G. Estadística básica para las ciencias sociales y del comportamiento. En: Prentice-Hall Hispanoamericana. 1997. p. 271-285

⁹¹ BAKIEVA, J.; GONZÁLEZ, J. y JORNET, J. SPSS: ANOVA de un Factor. Grupo de Investigación Educativa Universidad de Valencia. Disponible en: https://www.uv.es/innomide/spss/SPSS/SPSS_0702b.pdf.

- **Variables dependientes:** Pérdida de masa en (g).

Tabla 2. Parámetros del experimento unifactorial

Combinación superficial (Recubrimiento con nitruro de titanio (TiN))	Pérdida de masa (g)		
Pin sin recubrir-Disco sin recubrir			
Pin recubierto-Disco sin recubrir			
Pin sin recubrir-Disco recubierto			
Pin recubierto-Disco recubierto			

- **Planteamiento de la hipótesis**

Se requiere realizar un experimento unifactorial completamente aleatorio, con el fin de comparar la pérdida de masa de las probetas (pines y discos) modificadas y no modificadas superficialmente con nitruro de titanio (TiN) mediante la técnica HIPIMS, al ser sometidas a ensayos tribológicos de configuración pin sobre disco, teniendo como variable controlada la combinación superficial. A continuación, se establecen las hipótesis para el experimento unifactorial completamente aleatorio con el fin de observar la varianza o invariancia de los resultados obtenidos en las pruebas de desgaste realizadas a las probetas recubiertas y no recubiertas con TiN, con el objetivo de aprobar o no dichas hipótesis.

- **Hipótesis del experimento unifactorial completamente aleatorio**

H_0 : Con un grado de significancia de $\alpha = 0,05$, todas las combinaciones superficiales arrojan el mismo valor de pérdida de masa de las probetas.

H_1 : Con un grado de significancia de $\alpha = 0,05$, por lo menos una de las combinaciones superficiales arroja un valor diferente en la pérdida de masa de las probetas.

Las formulaciones matemáticas que rigen el modelo del experimento unifactorial completamente aleatorio se describen en el anexo A.

3.2.2 Experimento factorial Los modelos factoriales de análisis de varianza (factorial = más de un factor) sirven para evaluar el efecto individual y conjunto de dos o más factores (variables independientes categóricas) sobre una variable dependiente cuantitativa⁹². Utilizar más de un factor en un mismo diseño posee la ventaja de estudiar el efecto de la interacción entre los factores. En un modelo de dos factores los modelos de interés son tres: los dos efectos principales (uno por cada factor) y el efecto de interacción entre ambos factores. En un modelo de tres factores, los efectos de interés son siete: los tres efectos principales, los tres efectos de las interacciones dobles (uno por cada interacción entre cada dos factores) y el efecto de interacción triple (entre los tres factores).

En un análisis ANOVA factorial existe una hipótesis nula por cada factor y por cada posible combinación de factores:

- La hipótesis nula referida a un factor afirma que las medias de las poblaciones definidas por los niveles del factor son iguales.
- La hipótesis referida al efecto de la interacción afirma que el efecto es nulo.

En este análisis, para cada efecto existe una hipótesis y para cada hipótesis un estadístico F que permite contrastarla. A continuación, se muestran los tipos de variables involucradas en el experimento:

➤ **Variables independientes o factores:**

Factor A: combinación superficial (probetas modificadas y no modificadas superficialmente).

⁹² Análisis de varianza factorial el procedimiento modelo lineal general: univariante. Capítulo 15. Disponible en: http://pendientedemigracion.ucm.es/info/socivmyt/paginas/D_departamento/materiales/analisis_datos/Multivariable/15anova2_SPSS.pdf.

Factor B: fuerza aplicada en el ensayo de caracterización tribológica *Pin on Disk*.

➤ **Variable dependiente:**

Pérdida de masa en (g)

Tabla 3. Parámetros del experimento Factorial

Combinación superficial (Recubrimiento con nitruro de titanio (TiN))	Pérdida de masa (g)					
	Fuerza aplicada (10N)			Fuerza aplicada (15N)		
Pin sin recubrir-Disco sin recubrir						
Pin recubierto-Disco sin recubrir						
Pin sin recubrir-Disco recubierto						
Pin recubierto-Disco recubierto						

➤ **Planteamiento de hipótesis**

Se requiere realizar un experimento factorial, con el fin de comparar la pérdida de masa de las probetas (pines y discos) modificadas y no modificadas superficialmente con nitruro de titanio (TiN) mediante la técnica HIPIMS, al ser sometidas a ensayos tribológicos de configuración pin sobre disco, manteniendo variables controladas, como la combinación superficial y la fuerza normal aplicada.

A continuación, se establecen las hipótesis para el experimento unifactorial completamente aleatorio con el fin de observar la varianza o invariancia de los resultados obtenidos en las pruebas de desgaste realizadas a las probetas recubiertas y no recubiertas con TiN, con el objetivo de aprobar o no dichas hipótesis.

➤ **Hipótesis del experimento factorial**

Factor A

H_0 : Con un grado de significancia de $\alpha = 0,05$, todas las combinaciones superficiales arrojan el mismo valor de pérdida de masa de las probetas.

H_1 : Con un grado de significancia de $\alpha = 0,05$, por lo menos una de las combinaciones superficiales arroja un valor diferente en la pérdida de masa de las probetas.

Factor B

H_0 : Con un grado de significancia de $\alpha = 0,05$, todas las fuerzas normalmente aplicadas arrojan el mismo valor de pérdida de masa de las probetas.

H_1 : Con un grado de significancia de $\alpha = 0,05$, por lo menos una de las fuerzas normalmente aplicadas arroja un valor diferente en la pérdida de masa de las probetas.

Interacción

H_0 : Con un grado de significancia de $\alpha = 0,05$, no hay interacción entre los factores.

H_1 : Con un grado de significancia de $\alpha = 0,05$, existe interacción entre los factores
Las formulaciones matemáticas que rigen el modelo del experimento factorial se describen en el anexo B.

3.2.3 Regresión lineal múltiple (ajuste de modelo) La regresión lineal múltiple trata de ajustar modelos lineales o linealizables entre una variable dependiente y

más de una variable independiente. Las técnicas de regresión lineal múltiple parten de (n+1) variables cuantitativas, siendo Y la variable de respuesta y (X1, X2, ..., Xn) las variables explicativas. Se trata de extender a las “n” variables las técnicas de regresión lineal simple. En esta línea, la variable Y se puede expresar mediante una función lineal de las variables (X1, X2, ..., Xn).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \quad (14)$$

A continuación, se presenta el modelo estadístico.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (15)$$

Forma matricial

$$\begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & X_{11} & \dots & X_{n1} \\ 1 & X_{12} & \dots & X_{n2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & X_{1n} & \dots & X_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_N \end{pmatrix} \quad (16)$$

Los cálculos necesarios para encontrar la ecuación de regresión lineal múltiple se harán con el apoyo del software minitab.

3.2.4 Superficie de respuesta La Metodología de Superficies de Respuesta (RSM) es un conjunto de técnicas matemáticas utilizadas en el tratamiento de problemas en los que una respuesta de interés está influida por varios factores de carácter

cuantitativo⁹³. El propósito inicial de estas técnicas es diseñar un experimento que proporcione valores razonables de la variable respuesta y, a continuación, determinar el modelo matemático que mejor se ajusta a los datos obtenidos⁹⁴. El objetivo final es establecer los valores de los factores que optimizan el valor de la variable respuesta. La siguiente ecuación representa el modelo estadístico.

$$y = \beta_0 + X_1\beta_1 + X_2\beta_2 + \dots + X_1^2\beta_n + X_1X_2\beta_m + \dots + X_n^t X_m^t \quad (17)$$

Donde el valor de respuesta Y depende de los niveles X1, X2, ... Xn de n factores, con esto estamos diciendo que existe una función matemática cuyo valor para una combinación dada de los niveles de los factores corresponde a Y, esto es Y= f(X1, X2, ... Xn) y $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots \beta_n$ son los coeficientes de regresión a estimar.

3.3 PREPARACIÓN DE PROBETAS

En el desarrollo de esta investigación, se va a estudiar el desgaste ocasionado por el contacto entre los anillos y la camisa de un motor de combustión interna, por medio del ensayo pin on disk. Se necesito fabricar pines y Discos para el ensayo propuesto, a continuación, se describe la elaboración de las probetas.

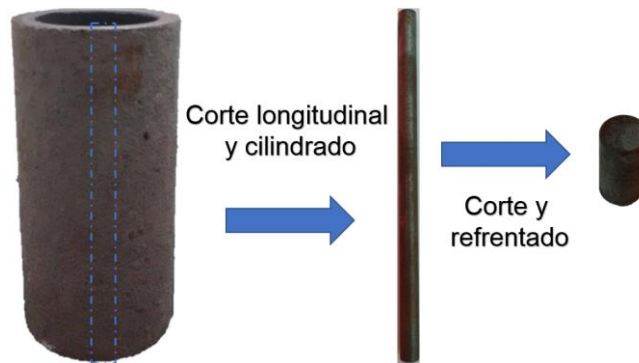
En la fabricación de los pines se procede a realizar una serie de cortes longitudinales a una camisa de un motor de combustión interna fabricada en fundición gris (suministrada por la empresa Lavco, ver la ficha técnica del material

⁹³ DEL ÁNGEL, María. Et al. Aplicación de metodología de superficie de respuesta para la degradación de naranja de metilo con tio2 sol-gel sulfatado. En: Rev. Int. Contam. Ambie. 2015. Vol.31. p. 99-106.

⁹⁴ ESPADA, Humberto. Diseño experimental superficie de respuesta. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Facultad de Ciencias Jurídicas y Empresariales. Escuela Académico Profesional de Ingeniería Comercial. p. 4.

en el Anexo C), obteniendo barras de 8 mm de diámetro, posteriormente fueron cortadas y refrentadas en secciones de 15 mm de alto.

Figura 18 .Fabricación de pines



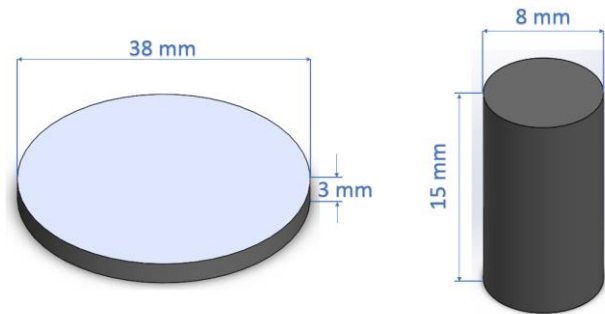
Dada la necesidad de fabricar probetas en forma de disco, se procedió a cortar y refrentar una barra de fundición gris (ver ficha técnica en el Anexo C) en discos de 38 mm de diámetro y 3 mm de alto.

Figura 19. Fabricación de pines



En la figura 20 se presenta el diseño asistido por computador (CAD) del pin y el disco. Los planos se reportan en el Anexo D.

Figura 20. Diseño en CAD de las probetas (pin y disco)



3.3.1 Preparación metalográfica La preparación superficial de cada probeta se realizó con papel abrasivo de carburo de silicio hasta un tamaño de grano No. 240 (ver figura 21).

Figura 21. Preparación superficial de sustratos



3.3.2 Limpieza por ultrasonido Los sustratos son sometidos a un baño ultrasónico en acetona durante 15 min, con el fin de menguar las grasas e impurezas presentes en las probetas.

Figura 22. Limpiador ultrasónico. Fisherbrand 15050



3.4 PROCESO DE RECUBRIMIENTO

Las probetas (pines y discos) son modificadas superficialmente con nitruro de titanio (TiN) en las instalaciones del laboratorio de la empresa Nano4Energy ubicado en el Instituto de Fusión Nuclear de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), en la ciudad de Madrid, España.

El proceso de recubrimiento se llevó a cabo sobre 19 discos y 17 pines fabricados en fundición gris y depositados en modo estático. Se utilizó un equipo con dos magnetrones rectangulares fabricados por *Gecoa Ltda* y un blanco de titanio de $400 \times 100 \text{ mm}^2$. Este sistema está equipado con un *Speedflo™* encargado de controlar los procesos reactivos, a su vez cuenta con un espectrómetro óptico y un electrodo flotante, los cuales permiten la caracterización del plasma. La potencia promedio fue de 4kW, con un tiempo de pulso de 52us y frecuencia de 800Hz. El pico de corriente y voltaje se encontraba en el rango de 350A y 860V respectivamente. El proceso de deposición del recubrimiento de nitruro de titanio (TiN) en la superficie de los cupones inició con la limpieza superficial, por bombardeo iónico, con gas de argón (Ar) en un voltaje bias (voltaje de polarización)

de -600V durante 30min; el flujo de Ar se mantuvo constante a 100sccm. Posteriormente, se depositó durante 15min una película de titanio (Ti) y finalmente, variando el flujo de nitrógeno (N), con el control de retroalimentación, entre 8 y 10sccm se depositó el recubrimiento de TiN en la superficie de los sustratos durante 70min.

La película de Ti se realizó con el propósito de garantizar una buena adherencia entre la superficie del sustrato y el revestimiento. La presión de la cámara de vacío durante el proceso de deposición se mantuvo en aproximadamente $5,1 \cdot 10^{-3}$ mbar.

La deposición de Ti en la superficie de los insertos se realizó con las siguientes condiciones: potencia promedio de 4kW, tiempo de pulso de 250us y frecuencia de 150Hz, corriente de 218A y voltaje de 700V. La fabricación de los revestimientos en la superficie de los sustratos se realiza iniciando con una limpieza por bombardeo iónico con gas de argón, en un voltaje bias (voltaje de polarización) de -600V durante 15min, manteniendo un flujo constante de 150sccm, adicionalmente se realiza una limpieza con Ti durante 5min. Posteriormente, se depositó una película de Ti durante 15min y luego el recubrimiento de TiN se deposita en la superficie de los sustratos durante 60min variando el flujo de N₂ entre 7 y 9sccm. La presión de la cámara de vacío durante el proceso de deposición se mantuvo en aproximadamente $5,1 \cdot 10^{-3}$ mbar.

3.4.1 Partes del reactor usado en proceso de recubrimiento El dispositivo utilizado en la obtención de los recubrimientos mediante la técnica “Pulverización por magnetrón de impulso de alta potencia (HIPIMS)” está conformado por los siguientes módulos:

3.4.1.1 Cámara de vacío Es un recinto cilíndrico de un metro de diámetro y un metro de altura. Además, cuenta con una ventanilla lateral que permite ver el interior de la cámara durante el proceso de recubrimiento.

Figura 23. Cámara de vacío



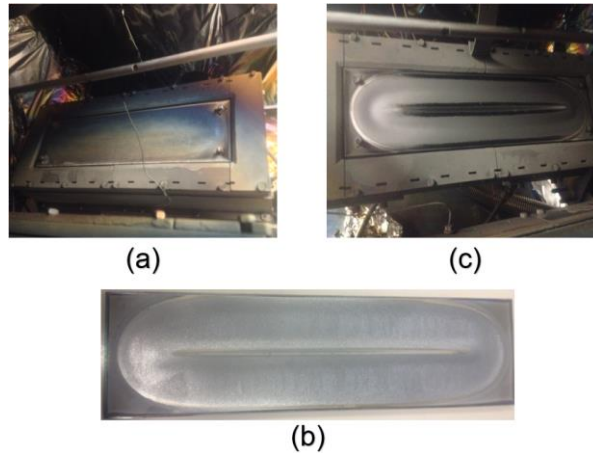
El interior de la cámara (ver figura 24) se encuentra recubierto con papel aluminio con el fin de evitar la presencia de suciedad que pueda ocasionar fallas al material de la cámara.

Figura 24. Interior de la cámara de vacío



En la figura 25 se visualiza el montaje del magnetrón y del blanco (material a depositar) ubicados en unos arreglos rectangulares de $40 \times 10 \text{ cm}^2$, los cuales se encuentran ubicados en el interior de la cámara.

Figura 25. Conjunto: (a) magnetrón, (b) blanco y (c) montaje



Los magnetrones son los encargados de confinar el plasma, además, sirven como soporte de los blancos del material a depositar. Se utilizó un porta-sustrato en el cual se montan las superficies dispuestas para el crecimiento de la película. El montaje de los magnetrones puede moverse con el fin de variar los factores geométricos del proceso de recubrimiento del recubrimiento. Por medio de la variación de la altura, se puede controlar la distancia del sustrato al blanco. La cámara de vacío consta de acoples que permiten la conexión de las líneas de gases y agua para la refrigeración de los magnetrones, fuentes de alimentación y de las vías y una salida hacia el sistema de vacío.

3.4.1.2 Sistema de refrigeración En el sistema de refrigeración el fluido utilizado es agua y debe usarse durante el proceso de crecimiento del recubrimiento, de no ser así, las elevadas temperaturas podrían ocasionar un daño irreparable en los imanes, donde la única solución para continuar con el proceso es el cambio del magnetrón.

Figura 26. Vista posterior de la cámara, conexiones de las líneas de gases y refrigeración

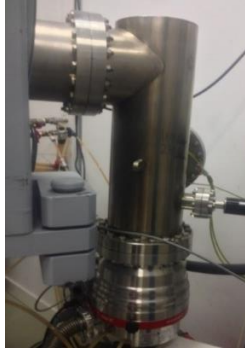


3.4.1.3 Sistema de bombeo El alto vacío, es una de las condiciones esenciales del proceso de sputtering. Las presiones de fondo de vacío pueden alcanzar los 10^{-6} bares, pero pueden llegar alrededor de 10^{-2} y 10^{-3} bares luego de introducir una atmósfera de argón y/o hidrocarburos. Para alcanzar estas condiciones es indispensable el uso de dos bombas. Una bomba rotaria (ver figura 27) es la encargada de bajar la presión ambiente hasta 10 mbar, habiendo alcanzado esta presión, puede ponerse en funcionamiento una turbo-bomba (ver figura 28) que puede alcanzar un delta de presión de 10^{-6} mbar; esta bomba debe ser refrigerada con agua hasta el rango de 10^{-4} mbar, con el objeto de evitar un sobrecalentamiento.

Figura 27. Bomba rotatoria



Figura 28. Turbo-bomba

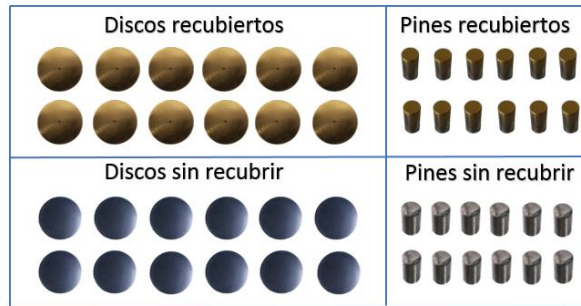


3.5 CARACTERIZACIÓN SUPERFICIAL

El presente trabajo de investigación consistió en evaluar la influencia del recubrimiento de nitruro de titanio (TiN) por medio de la técnica HIPIMS, en el material utilizado en la fabricación de los anillos de pistón y la camisa de un motor de combustión interna, mediante el ensayo pin sobre disco y técnicas de análisis instrumental. Las probetas fueron sometidas a ensayos tribológicos, espectroscopía de emisión óptica análisis elemental de absorción atómica por chispa de arco (OES), espectroscopía Raman, microscopia electrónica de barrido (SEM), espectroscopía de energía dispersa (EDS) y a ensayos de difracción de rayos X.

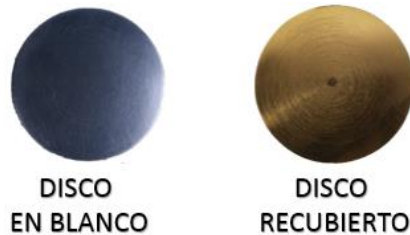
En la figura 29 se muestra un inventario de pines y discos (recubiertos y sin recubrir), que serán utilizados en los ensayos de caracterización superficial.

Figura 29. Inventario de probetas



3.5.1 Inspección visual En toda evaluación superficial es importante realizar con anterioridad una inspección visual con el objeto de evidenciar cambios en la geometría, color, dimensiones, uniformidad superficial, entre otros.

Figura 30. Tonalidad superficial de las probetas



En la figura 30, se evidencia un cambio en el color de las superficies de las probetas recubiertas respecto a las no recubiertas. La superficie del sustrato recubierto presenta una tonalidad dorada uniforme mientras que la superficie del sustrato no recubierto consta de una superficie gris plateada uniforme, no se aprecia ningún tipo de discontinuidad superficial o variación en la geometría.

3.5.2 Espectroscopía de emisión óptica Las probetas fueron sometidas al análisis elemental de absorción atómica por chispa de arco. El análisis se llevó a cabo en el espectrómetro de emisión óptica Q4 Tasman basado en CCD con tecnología vanguardista destinado al análisis de metales, ubicado en el laboratorio de espectroscopía del Parque Tecnológico Guatiguará UIS (ver figura 31).

Figura 31. Espectrómetro de emisión óptica Q4 Tasman



La espectroscopía de emisión analiza las longitudes de onda de los fotones emitidos por los átomos o moléculas durante su transición desde un estado excitado a un estado de inferior energía. Cada elemento emite un conjunto característico de longitudes de onda discretas en función de su estructura electrónica. Mediante la observación de estas longitudes de onda puede determinarse la composición elemental de la muestra⁹⁵.

3.5.3 Espectroscopía Raman Es una técnica no-destructiva que no requiere preparación especial, utilizada para la identificación de la mayoría de los materiales, orgánicos y/o inorgánicos, proporcionando información química y estructural de la muestra, basada en el espectro de la luz dispersada inelásticamente al hacer incidir una fuente de rayos laser de radiación monocromática sobre el material a analizar, el fenómeno inelástico experimenta pequeños cambios de frecuencia que son propios del material analizado (en otras palabras, la dispersión de luz debido a su interacción con la materia) y son completamente independientes de la frecuencia de luz incidente⁹⁶.

⁹⁵ PEREZ, G. Espectrometría de emisión. ESPECTROMETRIA.COM. 2007. Disponible en: http://www.espectrometria.com/espectrometra_de_emisin.

⁹⁶ Espectroscopía Raman. Pontificia Universidad Católica de Chile. Instituto de Física. Centro Avanzado de Microscopía para la caracterización de materiales de interés industrial usando radiación láser. Disponible en: <http://fisica.uc.cl/espectroscopia-raman.html#>.

Las superficies recubiertas y no recubiertas fueron analizadas mediante esta técnica en el equipo de marca HORIBA de referencia LabRAM HR Evolution del laboratorio de Espectroscopía de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Las condiciones de operación se presentan en la tabla 4.

Figura 32. Espectroscopio Raman HORIBA LabRAM HR

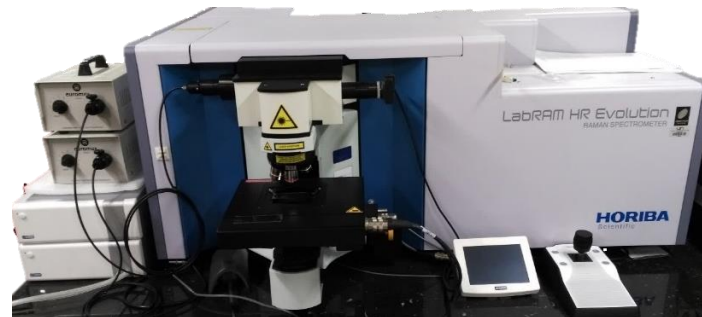
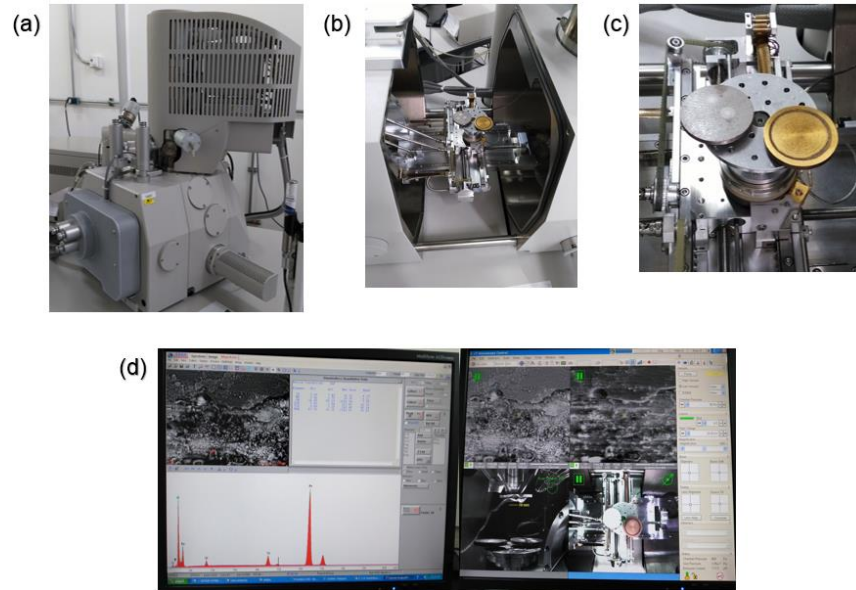


Tabla 4. Condiciones de Trabajo utilizadas en la ESPECTROSCOPIA RAMAN.

ESPECTROSCOPIA RAMAN	
Condiciones	Valor
Longitud de onda de Laser	532nm
Rendija de Difracción	600 gr/mm
Objetivo	50X
Tiempo de Adquisición	10
Acumulación	5
Aumento	100%

3.5.4 Análisis superficial La superficie de las probetas fue analizada mediante microscopia electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía de energía dispersa de rayos x por medio de un microscopio electrónico de barrido marca FEI, referencia QUANTA FEG 650 (ESEM) ubicado en el Laboratorio de Microscopia del Parque Tecnológico Guatiguará UIS (ver figura 33).

Figura 33. Microscopio electrónico de barrido QUANTA FEG 650. Equipo en general (a), cámara de vacío (b), soporte para el montaje de los objetivos (c) e interfaz de adquisición de datos (d)



La microscopía electrónica de barrido sustituye el haz de luz por uno de electrones con el fin de formar una imagen ampliada de la superficie de un objeto; el haz de electrones impacta la probeta permitiendo observar y analizar los defectos en la superficie (grietas, discontinuidades, porosidad y demás irregularidades superficiales) modificada y no modificada con nitruro de titanio (TiN) y la espectroscopía proporciona información acerca de la composición química de las partículas ya que cuando la muestra es irradiada con un haz de electrones se generan rayos X que pueden ser detectados y de esta forma identificar y cuantificar los diferentes elementos presentes en el material.

3.6 ENSAYO PIN ON DISK

Los ensayos pin sobre disco fueron realizados, de acuerdo con los parámetros estipulados por la norma ASTM G99 (ver Anexo E), 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 (pines y discos) fueron pesadas en la balanza de alta sensibilidad marca SARTORIUS referencia CP225D con legibilidad de 0.00001g (ver figura 34), para luego ser sometidas a las pruebas de pin sobre disco.

Figura 34. Balanza SARTORIUS referencia CP225D



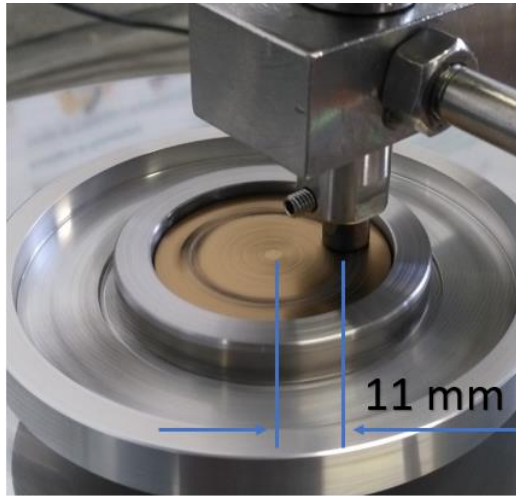
La máquina utilizada para el ensayo de desgaste está compuesta por: Tablero de control, interfaz de adquisición de datos en Labview, celda de carga, tablero de la celda de carga, rotor, porta disco, porta pin, brazo de porta pines, discos de carga y contra peso.

Figura 35. Partes del tribómetro pin sobre disco



Las probetas (pines y discos) fueron sujetadas por su respectivo porta sustrato y enfrentadas cara a cara perpendicularmente con un radio al centro de 11 mm aproximadamente como se muestra en la figura 36.

Figura 36. Posicionamiento de las probetas en el tribómetro *pin on disk*



Posteriormente, se equilibró el brazo del porta pin ajustando su contrapeso, se ubicaron las cargas de 10 y 15N, aplicadas entre el pin y el disco, se ajustó la celda de carga, se programaron los valores de 165 rpm y 15 min de velocidad y tiempo respectivamente como parámetros fijos para todos los ensayos y finalmente se desmontaron los sustratos para ser limpiados y pesados. A cada probeta, se le asigno un nombre (ver tabla 5) con el fin de hacer control y procesamiento de datos durante los ensayos.

Tabla 5. Peso de las probetas antes de la prueba de desgaste

Probetas pesadas antes del ensayo			
Discos	Masa (g)	Pines	Masa (g)
1A	26,03797	1A	5,3904
1B	26,521	1B	5,388
2A	26,9263	2A	5,30072
2B	26,2329	2B	5,37573
3A	26,3314	3A	5,32487

Probetas pesadas antes del ensayo			
Discos	Masa (g)	Pines	Masa (g)
3B	26,33701	3B	5,2563
4A	26,36023	4A	5,42851
4B	26,97123	4B	5,4183
5A	26,61645	5A	5,31614
5B	26,39878	5B	5,32425
6A	26,39848	6A	5,20134
6B	26,68216	6B	5,35441
7A	27,00241	7A	5,24463
7B	26,41692	8A	5,32218
8A	26,53755	10A	5,31466
8B	26,628	10B	5,3591
9A	26,76039		
10A	26,42442		

En la prueba, los parámetros que se pueden manipular son la velocidad, tiempo, fuerza, par tribológico, lubricación entre otros. En este proyecto, la fuerza y el par tribológico son los parámetros que se variaron. En total se empleó 4 pares tribológicos diferentes (ver tabla 6), y dos fuerzas 10N y 15N (ver tabla 7) para cada par tribológico. Se realizaron 3 pruebas para el mismo par tribológico y la misma fuerza.

Tabla 6. Pares tribológicos usados en el proyecto

Par Tribológico	Combinación superficial	
	Disco	Pin
1	Recubierto	Sin Recubir
2	Recubierto	Sin Recubir
3	Sin Recubir	Recubierto
4	Sin Recubir	Sin Recubir

Tabla 7. Valor de las fuerzas usadas en el proyecto

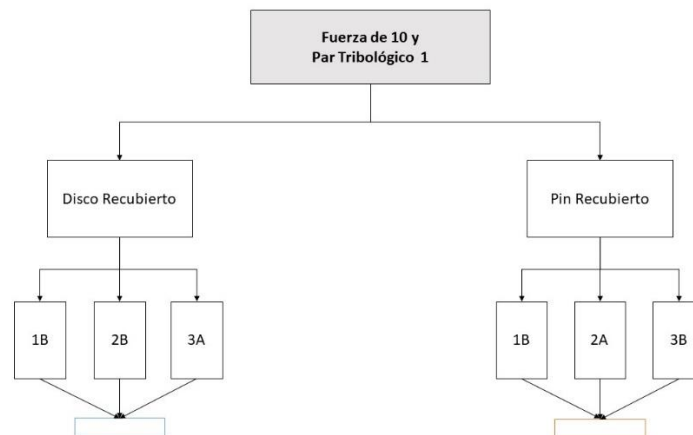
Par Tribológico	Combinación superficial		10N	15N
	Disco	Pin		
1	Recubierto	Sin Recubir		
2	Recubierto	Sin Recubir		
3	Sin Recubir	Recubierto		
4	Sin Recubir	Sin Recubir		

Tabla 8. Pruebas realizadas para el mismo par tribológico y la misma fuerza

Par Tribológico	Combinación superficial		10N			15N		
	Disco	Pin						
1	Recubierto	Sin Recubir						
2	Recubierto	Sin Recubir						
3	Sin Recubir	Recubierto						
4	Sin Recubir	Sin Recubir						

Como se muestra en las tablas 6, 7, 8 para cada par tribológico fue necesario utilizar dos probetas, un pin y un disco, por ende, en total se realizaron 24 pruebas y se utilizó 48 probetas (24 pines y 24 discos), en otras palabras, por cada experimento se necesitó 6 probetas (3 pines y 3 discos). En la figura 37 se puede observar el ejemplo del uso de probetas en la primera combinación del experimento realizado.

Figura 37. Número de probetas usadas por experimento



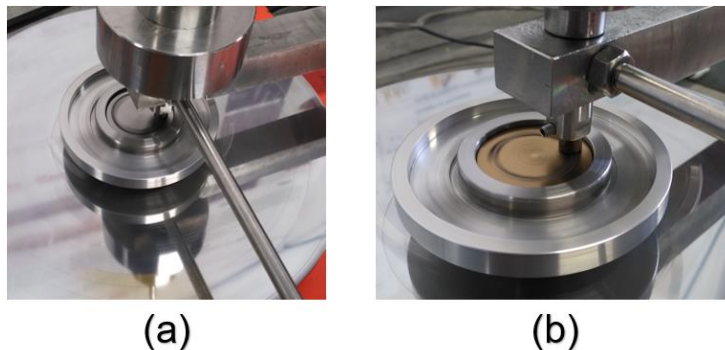
Tras realizar la fase experimental se obtuvo los datos de coeficientes de fricción y la masa de cada una de las probetas antes y después del experimento. Estos datos se utilizaron en la formulación matemática descrita en el Anexo F, con la finalidad de organizar la información para su posterior análisis.

4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1 PIN ON DISK

En la figura 38 se muestra el proceso de desgaste de las probetas recubiertas y no recubiertas con nitruro de titanio (TiN), al ser sometidas al ensayo pin sobre disco, donde se evidencia un desprendimiento de material, debido al contacto del par tribológico pin-disco. Este material fue eliminado por medio de una limpieza en ultrasonido con agua destilada durante 5 minutos.

Figura 38. Ensayo pin sobre disco: (a) disco blanco y (b) disco recubierto



En el Anexo G se presentan los parámetros establecidos (velocidad angular, tiempo, fuerza normal y tipo de superficie) y los resultados obtenidos de pérdida de masa, densidad, volumen perdido, distancia recorrida, tasa de desgaste y resistencia al desgaste obtenidos en las pruebas pin sobre disco.

Para simplificar el análisis se realizó el promedio de los datos de los dos tipos de probetas utilizadas por experimento (ver tabla 9). De esta manera en vez de analizar los resultados de 3 pines y 3 discos por experimento se estudió un solo resultado del pin y del disco (promedio) en cada combinación. En la tabla 9 se observa que al

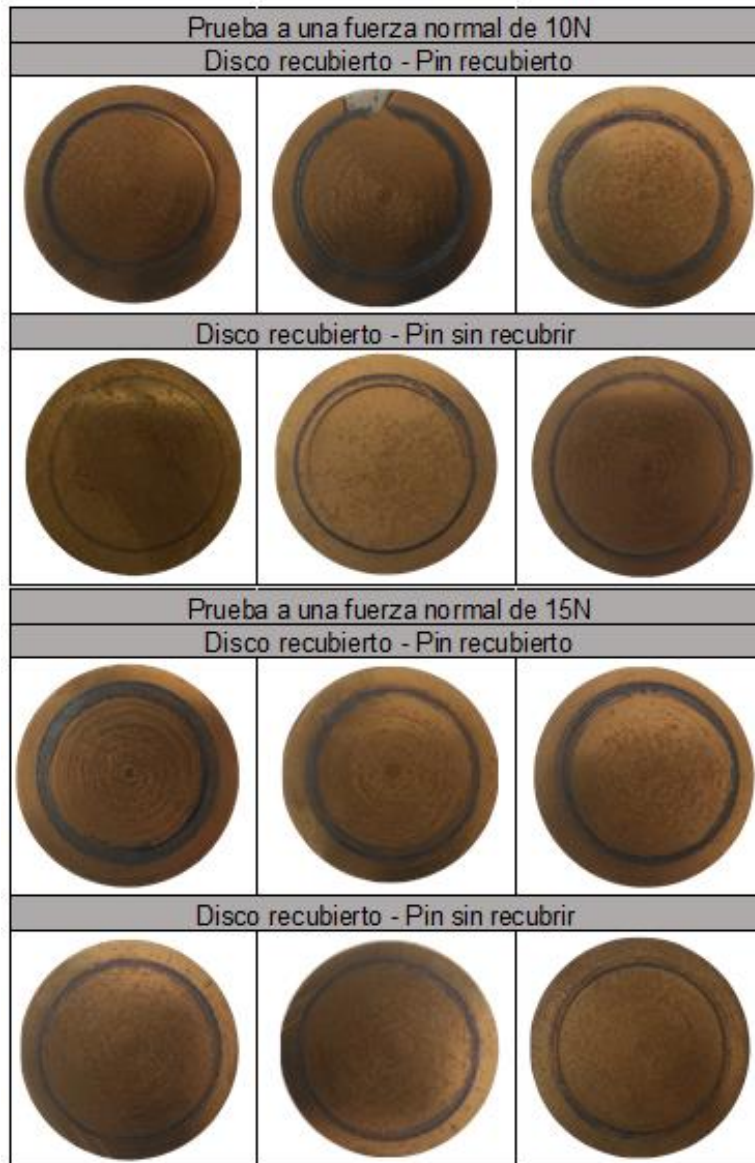
exponer a las pruebas de desgaste las dos superficies recubiertas, se presenta una disminución en la resistencia al desgaste por parte de las probetas con relación a las pruebas en que se encuentra una superficie recubierta y la otra sin recubrir, e incluso cuando las dos superficies carecen de recubrimiento.

Tabla 9. Datos promedios del experimento pin sobre disco

Fuerza (N)	Probeta	Superficie	Pérdida de masa (g)	Tasa de desgaste (mm ³ /m)	Resistencia al desgaste (m/mm ³)
10	Disco	Recubierta	0,00200667	0,001516128	776,757103
	Pin	Recubierta	0,00103333	0,000859729	1603,77277
	Disco	Recubierta	3E-05	2,25634E-05	74507,37
	Pin	Sin Recubrir	0,00031333	0,000258417	7019,95827
	Disco	Sin Recubrir	0,00064333	0,000483186	5367,66784
	Pin	Recubierta	0,00015333	0,000126755	12050,4939
	Disco	Sin Recubrir	9,3333E-05	7,02343E-05	21961,7559
	Pin	Sin Recubrir	0,000183	0,000151248	6737,98981
15	Disco	Recubierta	0,00456333	0,003398051	351,715477
	Pin	Recubierta	0,00184	0,001500594	690,724863
	Disco	Recubierta	0,00118	0,000888901	7988,19494
	Pin	Sin Recubrir	0,00060667	0,0004983	2418,6999
	Disco	Sin Recubrir	0,00033333	0,000249882	4253,73954
	Pin	Recubierta	7,2333E-05	5,97282E-05	72968,9858
	Disco	Sin Recubrir	0,00236333	0,00178355	726,770429
	Pin	Sin Recubrir	0,00033	0,000270862	3967,55151

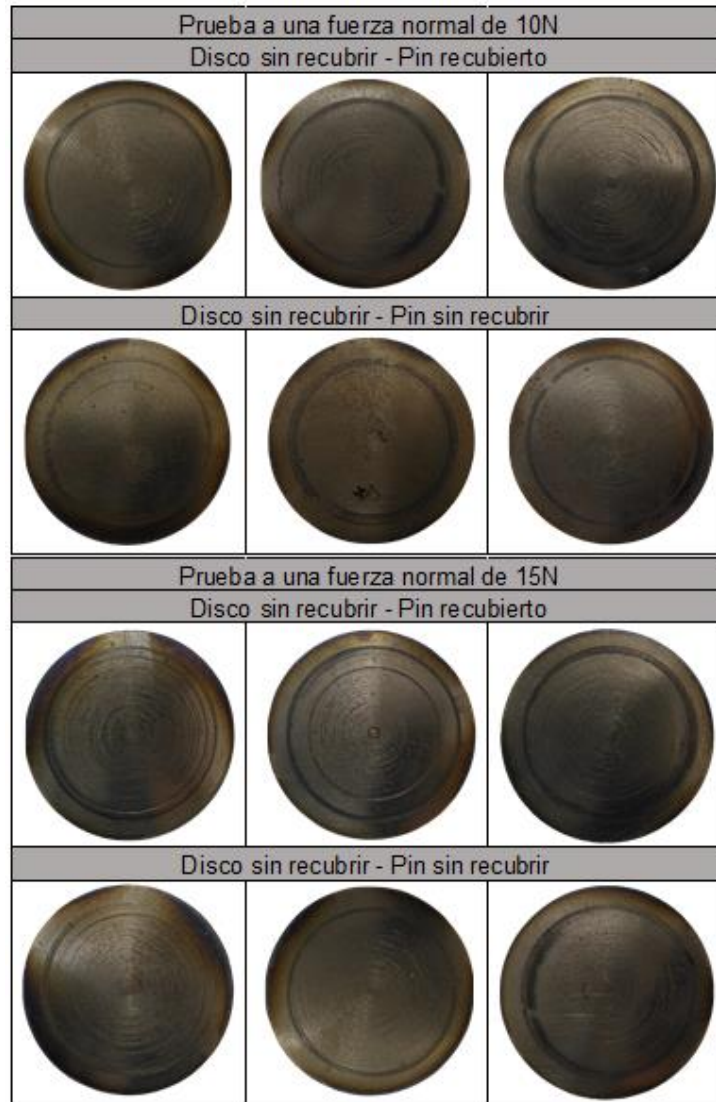
Además de los resultados cuantitativos mostrados, se capturo el estado final de la superficie de cada disco y de cada pin. En la figura 39 y 40. se presentan los surcos generados en todos los discos. Se puede observar que el surco más pronunciado se produce en las pruebas donde las probetas (pin y disco) se encuentran recubiertas (Figura 39), siendo esta irregularidad más notoria en las pruebas a una fuerza normal de 15N. Esta observación se evidencia en la tabla de resultados descrita anteriormente.

Figura 39. Superficie de los discos recubiertos después del ensayo de desgaste



En la figura 40 se muestran las imágenes de la superficie en cada uno de los discos sin recubrir después del ensayo de pin sobre disco realizados a diferente fuerza normal aplicada.

Figura 40. Superficie de los discos sin recubrir después del ensayo de desgaste



El estado final e inicial de las superficies de los pines en el ensayo de desgaste son presentados en la figura 41 y 42. En la figura 41 se evidencia un mayor desprendimiento de material del recubrimiento en las pruebas donde las probetas (pin y disco) se encuentran recubiertas, con relación a los ensayos en que el disco se encuentra recubierto y el pin sin recubrir; siendo esta alteración más notoria en las pruebas a una fuerza normal de 15N.

Figura 41. Superficie de los pines recubiertos después del ensayo de desgaste

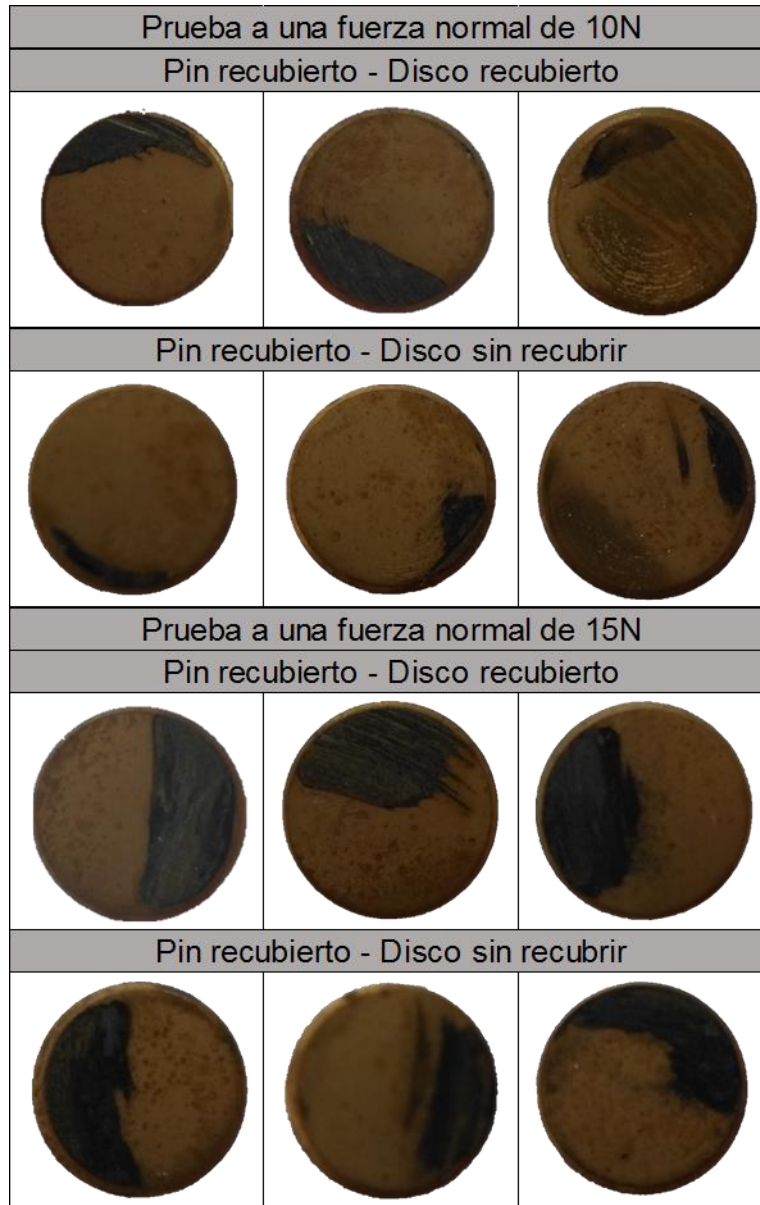


Figura 42. Superficie de los pines sin recubrimiento después del ensayo de desgaste



Por medio del análisis visual se puede observar con claridad que la combinación donde se presenta mayor desprendimiento del material es el sistema Disco-pin recubierto, con base a la teoría estudiada, el fenómeno se da por la afinidad química entre los dos materiales produciendo un desgaste mayor por adhesión, supuesto que orienta a pensar que en la praxis se trata de hacerle un revestimiento a los anillos o a las camisas con el fin de evitar este inconveniente. Además, en todos los casos se observó, que la superficie mayormente desgastada se efectuó a una fuerza

de 15N comprobando la relación directa entre fuerza y desgaste existente, ya demostrada experimental y teóricamente. Estudiar que sucede en las otras combinaciones se vuelve subjetivo al utilizar sola la inspección visual, por tal motivo, se prosiguió a enumerar en orden ascendente (para cada experimento) la pérdida de masa de cada tipo de probeta (ver tabla 10).

Tabla 10. Pérdida de masa para cada tipo de probeta

Sistema		10 N		15 N	
Disco	Pin	Disco	Pin	Disco	Pin
Recubierto	Recubierto	4	4	4	4
Recubierto	Sin Recubrir	1	2	1	3
Sin Recubrir	Recubierto	3	1	2	1
Sin Recubrir	Sin Recubrir	2	3	3	2

El numero 4 representa la mayor pérdida de masa y el numero 1 la menor. En la tabla 10 además de evidenciarse, como en las observaciones realizadas visualmente, que para cada experimento la mayor pérdida de masa en las probetas se presenta cuando se usa la combinación disco y pin recubierto, se puede inferir que la menor pérdida de masa se da cuando uno de los dos materiales está recubierto, por ende, la aplicación del recubrimiento TiN realizada, mejora las propiedades tribológicas del material de la camisa, ya que, aumenta significativamente la resistencia al desgaste (si se analiza disco y pin por separado). Al comparar la tasa de desgaste que se produce, en la combinación de referencia (disco y pin sin recubrimiento) con las combinaciones cuando se le aplica el recubrimiento a una de las probetas, se obtiene que a 10N, en el caso del disco, la tasa de desgaste disminuye 3,11 veces y en el caso del pin 1,2. A 15 N, en el disco la tasa de desgaste es 2,006 veces menor y en pin el 4,53 veces aproximadamente. Estas mejoras se pueden analizar también de forma visual en las figuras 39, 40, 41 y 42.

En la siguiente tabla se muestra el promedio del coeficiente de fricción por experimento, y se aprecia que el menor coeficiente fricción cuando se trabaja con

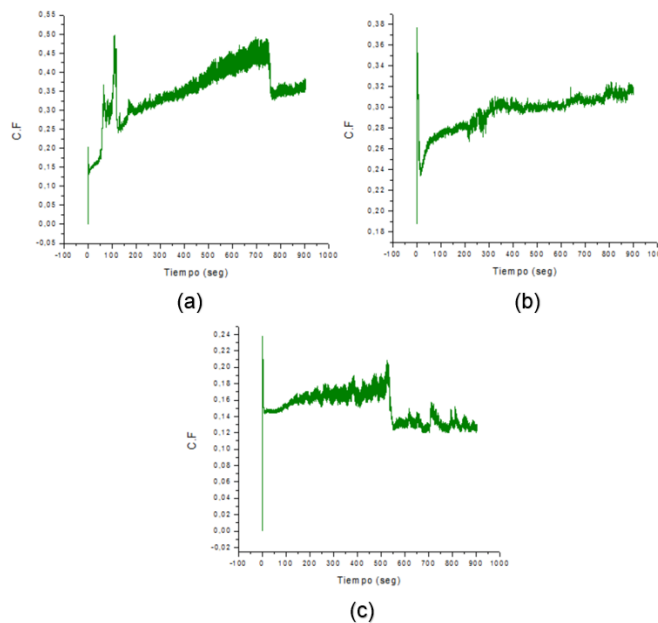
10N o 15N es cuando una de las probetas esta recubierta y la otra no, verificando el análisis desarrollado con las imágenes y la tabla 10 de resultados.

Tabla 11. Promedio del coeficiente de fricción por experimento

Modificación superficial		Fuerza (N)	Promedio
Disco	Pin		
Recubierto	Recubierto	10	0,25993889
Recubierto	Sin Recubrir	10	0,20316106
Sin Recubrir	Recubierto	10	0,25305449
Sin Recubrir	Sin Recubrir	10	0,22295119
Recubierto	Recubierto	15	0,27605294
Recubierto	Sin Recubrir	15	0,22430174
Sin Recubrir	Recubierto	15	0,2470305
Sin Recubrir	Sin Recubrir	15	0,22841503

A continuación, se presentan las gráficas de los coeficientes de fricción experimentales para los ensayos correspondientes a una fuerza normal de 10 N.

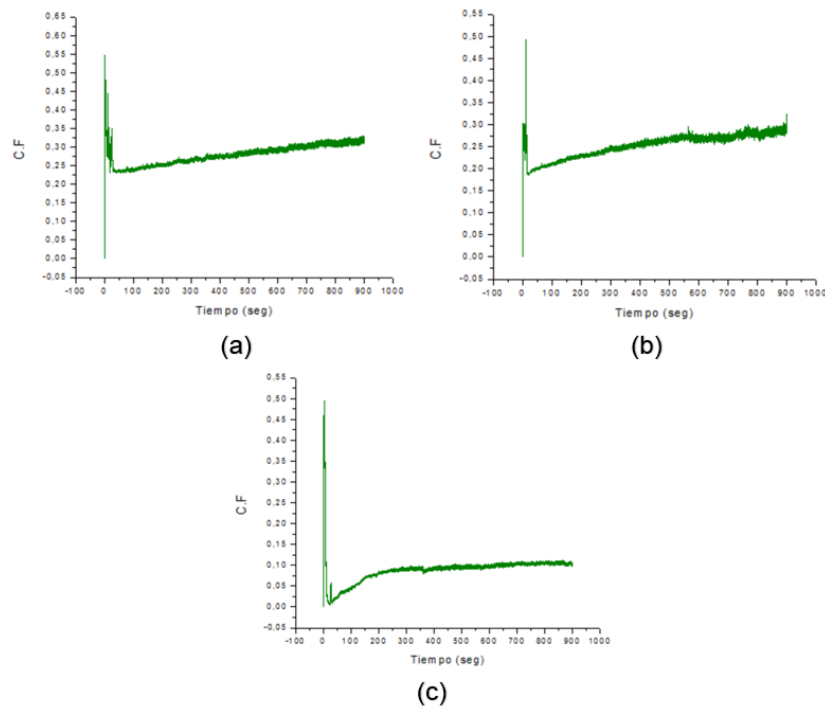
Figura 43. Coeficiente de fricción en disco y pin recubiertos: (a) disco 1B-pin 1B, (b) disco 2B-pin 2A, (c) disco 3A-pin 3B



El cálculo del coeficiente de fricción promedio (CF_{prom}) se realiza por medio del programa computacional Excel, el cual arroja los valores del (CF_{prom}) de los datos obtenidos en las pruebas de pin sobre disco. Los valores del coeficiente de fricción promedio para cada inciso de la figura 43 son los siguientes: (a) 0,348857671, (b) 0,295784404 y (c) 0,150582021.

En principio se esperarían valores del (CF_{prom}) similares, ya que, las pruebas se llevaron a cabo bajo los mismos parámetros y las superficies expuestas en los ensayos fueron recubiertas bajo las mismas condiciones, por tal motivo, estas variaciones muy seguramente son atribuidas a un mal mecanizado de los pines, ocasionando que el contacto entre las superficies de las probetas no sea el apropiado para garantizar que la fuerza sea aplicada en dirección normal.

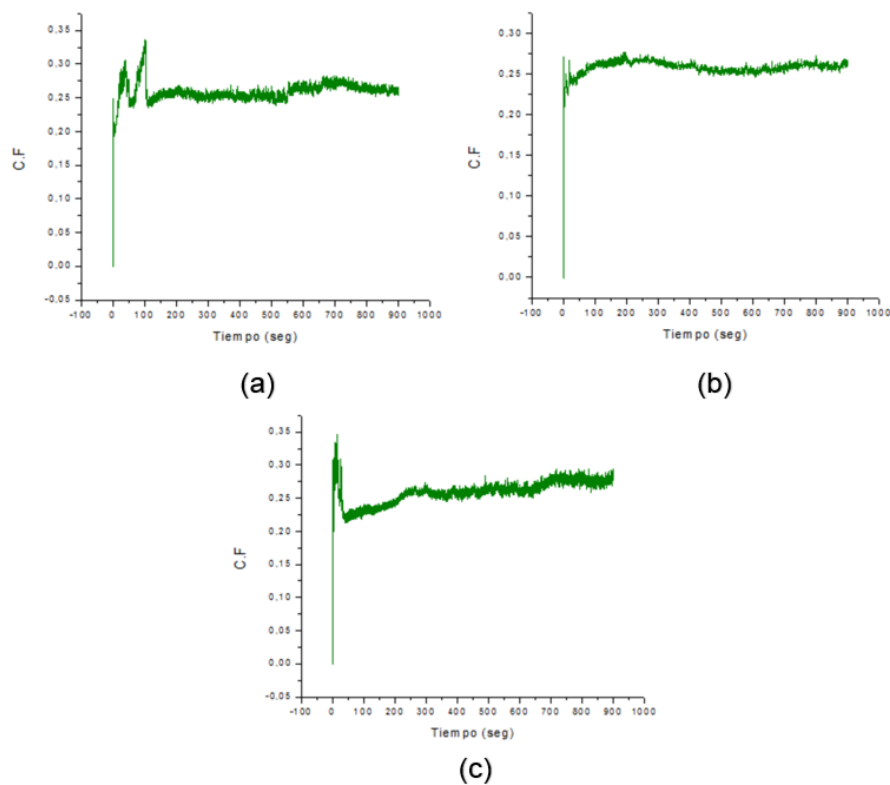
Figura 44. Coeficiente de fricción en disco recubierto-pin sin recubrir: (a) disco 3B-pin 10B, (b) disco 9A-pin 10A, (c) disco 5A-pin 1B



Los valores del coeficiente de fricción promedio para cada inciso de la figura 44 son los siguientes: (a) 0,280096115, (b) 0,253103976 y (c) 0,088571036.

Al trabajar con el disco recubierto y el pin sin recubrir, se observa una disminución en el coeficiente fricción con relación al ensayo de las dos superficies recubiertas.

Figura 45. Coeficiente de fricción en disco sin recubrir-pin recubierto: (a) disco 10A-pin 5B, (b) disco 1B-pin 5A, (c) disco 3A-pin 6B



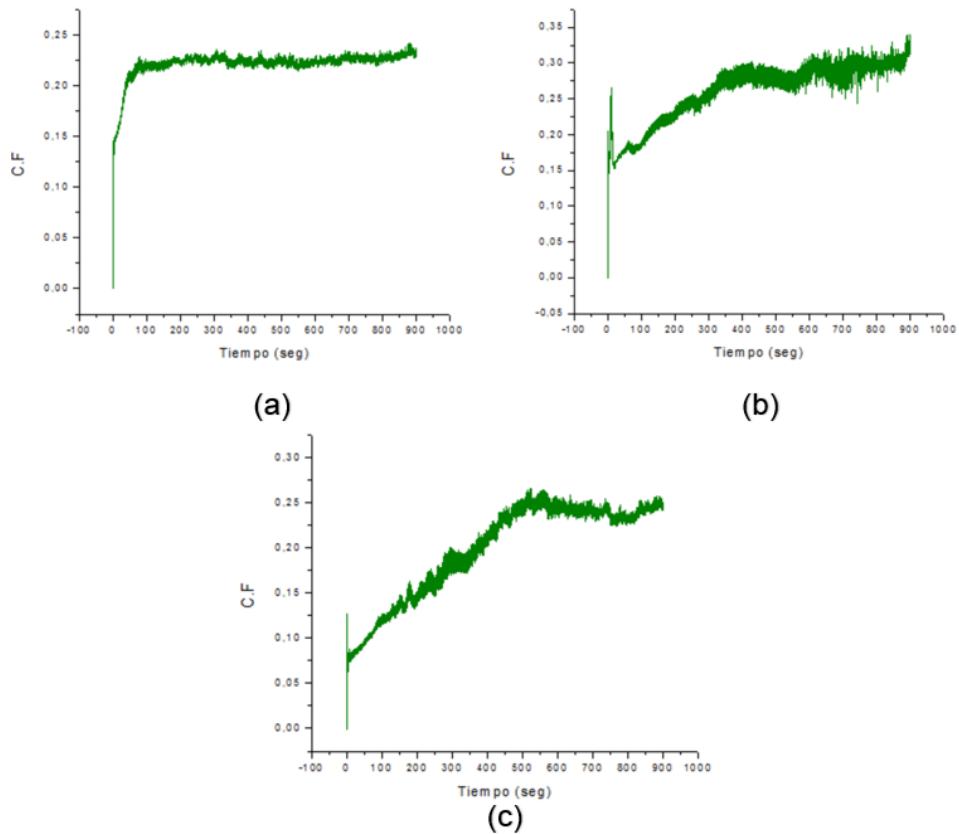
Los valores del coeficiente de fricción promedio para cada inciso de la figura 45 son los siguientes: (a) 0,25893, (b) 0,25799 y (c) 0,25939.

En la figura 45 se muestran las gráficas del coeficiente de fricción contra el tiempo de los ensayos de desgaste, a los cuales se sometieron discos sin recubrir contra pines recubiertos superficialmente con nitruro de titanio. Estas graficas revelan una

disminución en el coeficiente de fricción entre el par tribológico analizado, con relación a las pruebas en que las dos superficies están modificadas superficialmente.

Los valores del coeficiente de fricción promedio para cada inciso de la figura 46 son los siguientes: (a) 0,2215, (b) 0,26184 y (c) 0,19869.

Figura 46. Coeficiente de fricción en disco sin recubrir-pin sin recubrir: (a) disco 10A-pin 10B, (b) disco 5A-pin 10A, (c) disco 5B-pin 5B



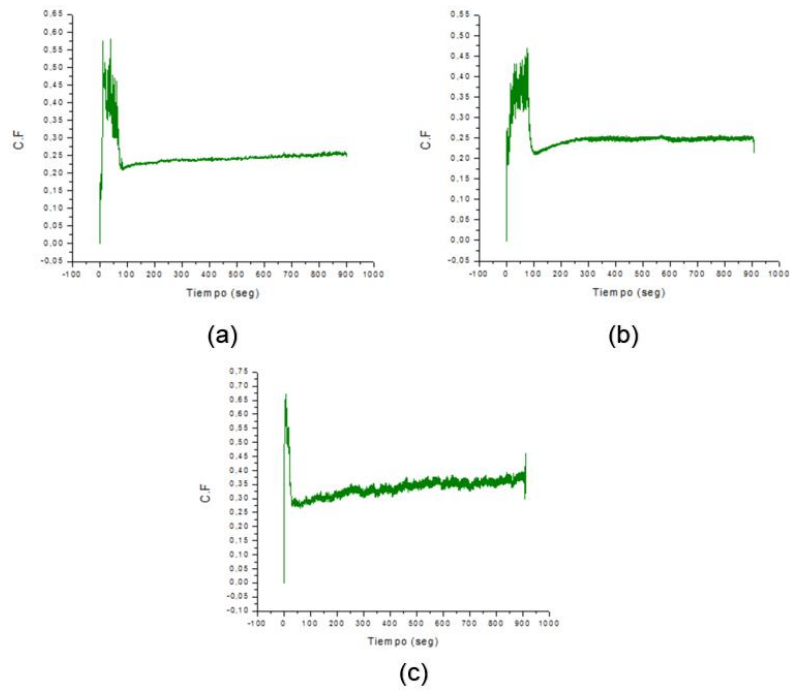
En las figuras 47, 48, 49, 50 se publican las gráficas del coeficiente de fricción contra el tiempo de los diferentes pares tribológicos expuestos a ensayos de desgaste a fuerza normal aplicada de 15N, donde se evidencia un aumento en los coeficientes de fricción con respecto a las pruebas realizadas a 10N. A su vez se detecta una

mayor variación entre los datos de los tres ensayos de cada combinación superficial, posiblemente la diversificación entre los datos se debe a un aumento en el desprendimiento de material particulado, ocasionando un desgaste abrasivo en el par tribológico.

Los valores del coeficiente de fricción promedio para cada inciso de la figura 47 son los siguientes: (a) 0,25037915, (b) 0,2533634 y (c) 0,34097511.

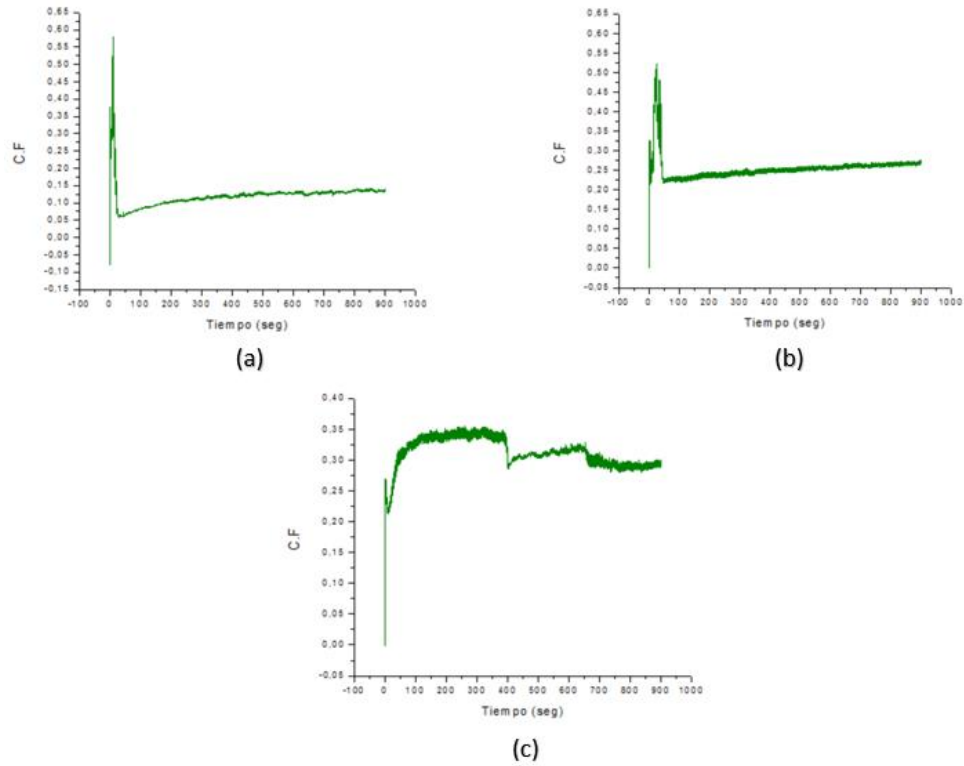
En la figura 47 se evidencia una estabilidad en aproximadamente 200 segundos del coeficiente de fricción de las probetas recubiertas sometidas a pruebas de 15N, al ser comparadas con las pruebas a 10N (ver figura 44) cuyas graficas no presentan estabilidad alguna dejando al descubierto picos y variaciones indeseables en este tipo de pruebas. Es muy probable que esta diferencia en las estabilidades esté ligada al mecanizado de las probetas (pines y discos), ocasionando que el contacto entre las superficies de dichos sustratos no sea el apropiado para el óptimo desarrollo de estas pruebas.

Figura 47. Coeficiente de fricción en disco y pin recubiertos: (a) disco 2A-pin 2B, (b) disco 4A-pin 4B, (c) disco 4B-pin 4A



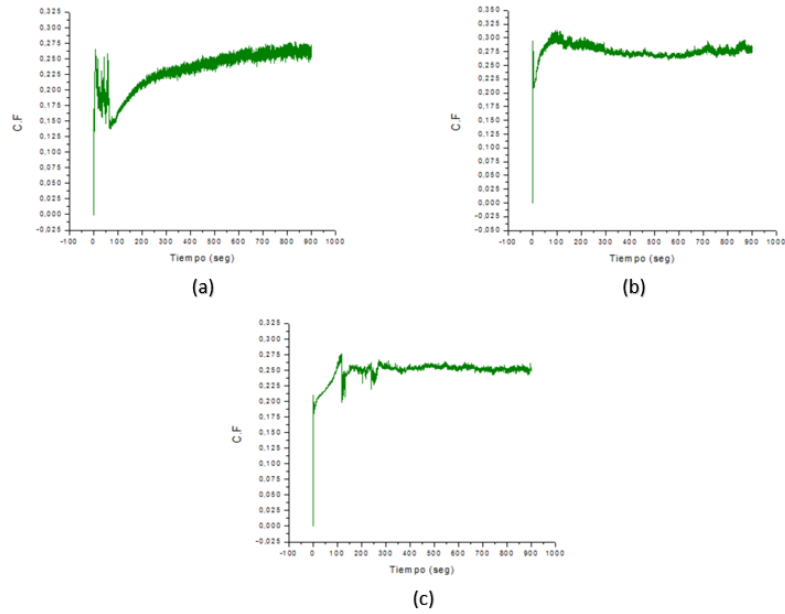
Los valores del coeficiente de fricción promedio para cada inciso de la figura 48 son los siguientes: (a) 0,11961051, (b) 0,25415282 y (c) 0,31259061.

Figura 48. Coeficiente de fricción en disco recubierto-pin sin recubrir: (a) disco 5B-pin 1A, (b) disco 6A-pin 2B, (c) disco 6B-pin 2A



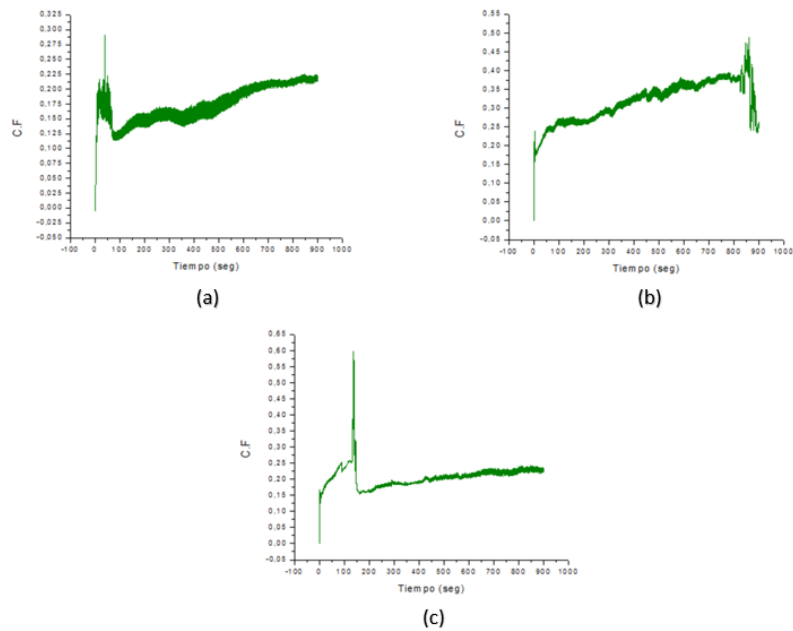
Los valores del coeficiente de fricción promedio para cada inciso de la figura 49 son los siguientes: (a) 0,23161693, (b) 0,27589229 y (c) 0,24843675.

Figura 49. Coeficiente de fricción en disco sin recubrir-pin recubierto: (a) disco 3B-pin 6B, (b) disco 4A-pin 7A, (c) disco 4B-pin 8B



Los valores del coeficiente de fricción promedio para cada inciso de la figura 50 son los siguientes: (a) 0,17480369, (b) 0,3167258 y (c) 0,20742317.

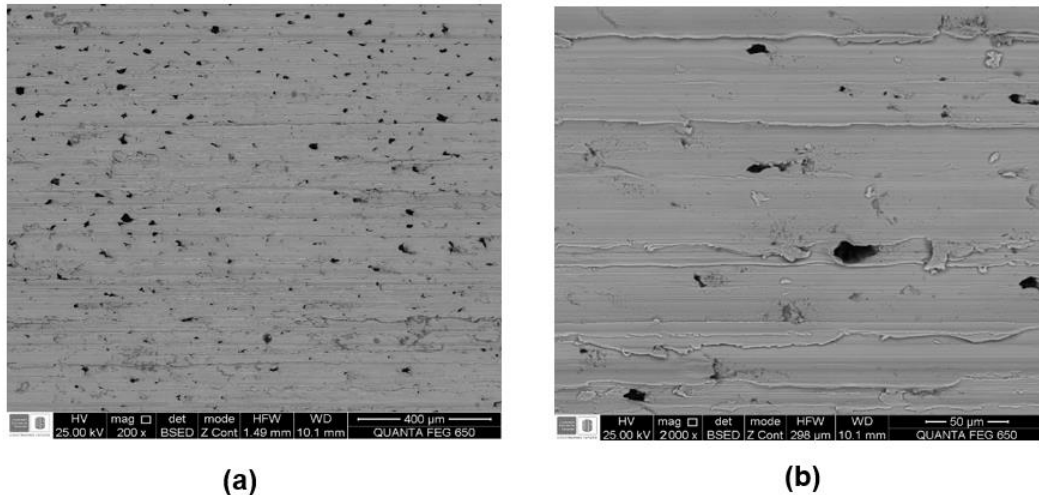
Figura 50. Coeficiente de fricción en disco sin recubrir-pin sin recubrir: (a) disco 6B-pin 5A, (b) disco 9A-pin 4B, (c) disco 1A-pin 6B



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

En las figuras 51, 53, 56, 59, 62, se presentan las micrografías superficiales obtenidas por SEM de las probetas (pines y discos) recubiertas y no recubiertas superficialmente con nitruro de titanio (TiN). Conjuntamente se reporta el análisis composicional de la superficie de los sustratos y los espectros adquiridos por EDS en las tablas 12-20 y las figuras 52, 54, 55, 57, 58, 60, 61, 63, 64, respectivamente.

Figura 51. Micrografías SEM en disco sin recubrir. Magnificación de 200X (a) y 2000X (b).



En la figura 51 (a) y (b) se aprecia la superficie del disco sin recubrir, donde se observan algunas irregularidades debido a la preparación metalográfica 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 un tamaño de grano No. 240.

En la figura 52 se muestra el espectro de composición de los elementos presentes en la superficie del disco sin recubrir y en la tabla 12 los valores en porcentaje de masa (Wt%) y porcentaje atómico (At%) adquiridos por EDS. Como es de esperarse, en la superficie de los sustratos se identifica un alto contenido de hierro.

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

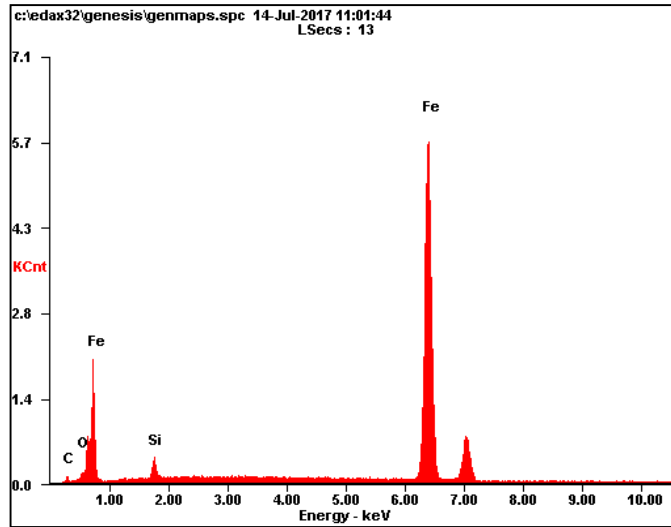
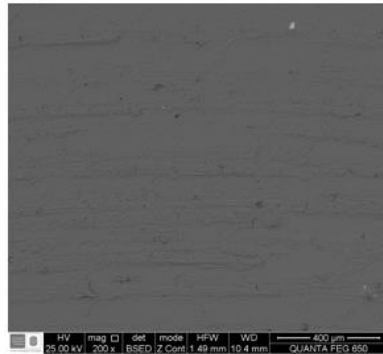


Tabla 12. Composición elemental EDS en la superficie del disco sin recubrir

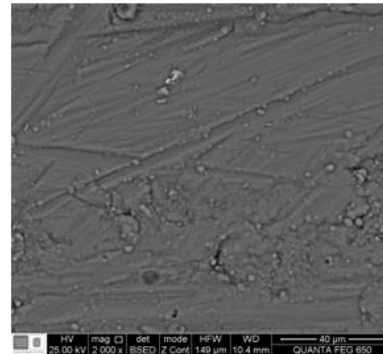
ELEMENTO	Wt%	At%
CK	03.89	14.87
OK	01.65	04.74
SiK	03.35	05.47
Fek	91.11	74.92
Matriz	Corrección	ZAF

En la figura 53 se presentan las micrografías, a diferentes aumentos, de la superficie recubierta con nitruro de titanio del sustrato. Las irregularidades presentes en la superficie no desgastada de las micrografías (a) y (b) 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 deposición del recubrimiento. Las micrografías (c) y (d) 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 15N.

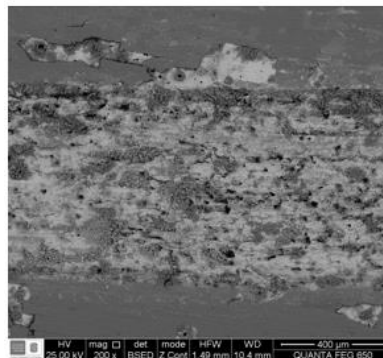
Figura 53. Micrografías SEM en disco recubierto. Superficie sin desgaste a una magnificación de 200X (a) y 2000X (b). Superficie desgastada a una magnificación de 200X (c) y 2000X (d).



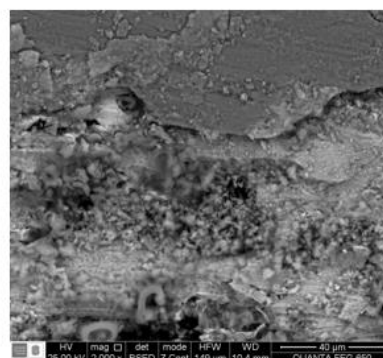
(a)



(b)



(c)



(d)

El espectro de composición y los porcentajes de elementos detectados en un área de la superficie del disco modificado con nitruro de titanio (antes de ser sometida a la prueba de desgaste a 15N) se muestran en la figura 54 y en la tabla 13 respectivamente. El análisis EDS identificó un porcentaje considerable de titanio y nitrógeno en la superficie de las probetas sin desgastar, comprobando que las superficies de los discos fueron modificadas con estas especies en una atmosfera de nitrógeno.

Figura 54. Espectro de composición EDS en la superficie recubierta sin desgaste del disco

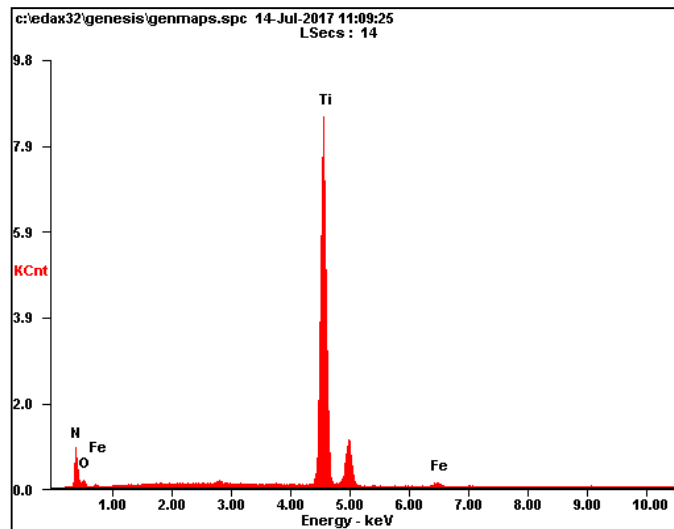


Tabla 13. Composición elemental EDS en la superficie recubierta sin desgaste del disco

ELEMENTO	Wt%	At%
NK	12.52	29.38
OK	07.87	16.16
TiK	77.86	53.43
Fek	01.75	01.03
Matriz	Corrección	ZAF

Los espectros de composición y elementos presentes en la superficie desgastada del disco recubierto durante los ensayos de pin sobre disco con fuerza normal aplicada de 15N son presentados en la figura 55 y tabla 14. El análisis EDS reporta la presencia de titanio y nitrógeno en la superficie desgastada, lo cual indica que, posterior al ensayo de desgaste el recubrimiento no fue eliminado por completo.

Figura 55. Espectro de composición EDS en la superficie recubierta y desgastada del disco

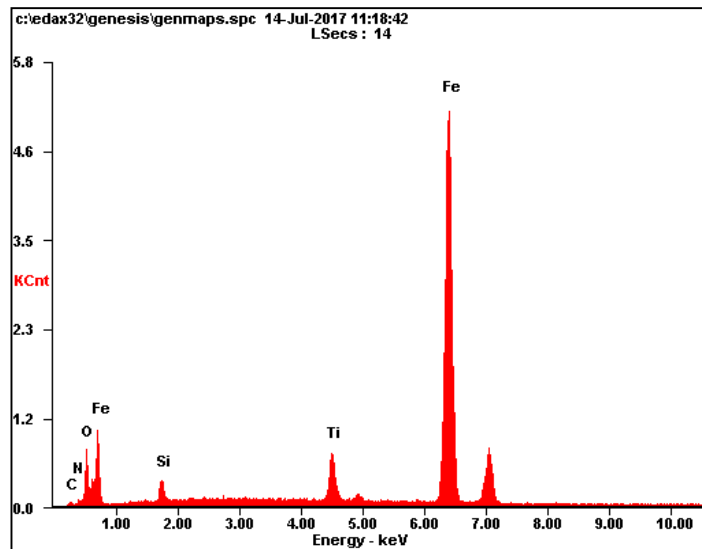


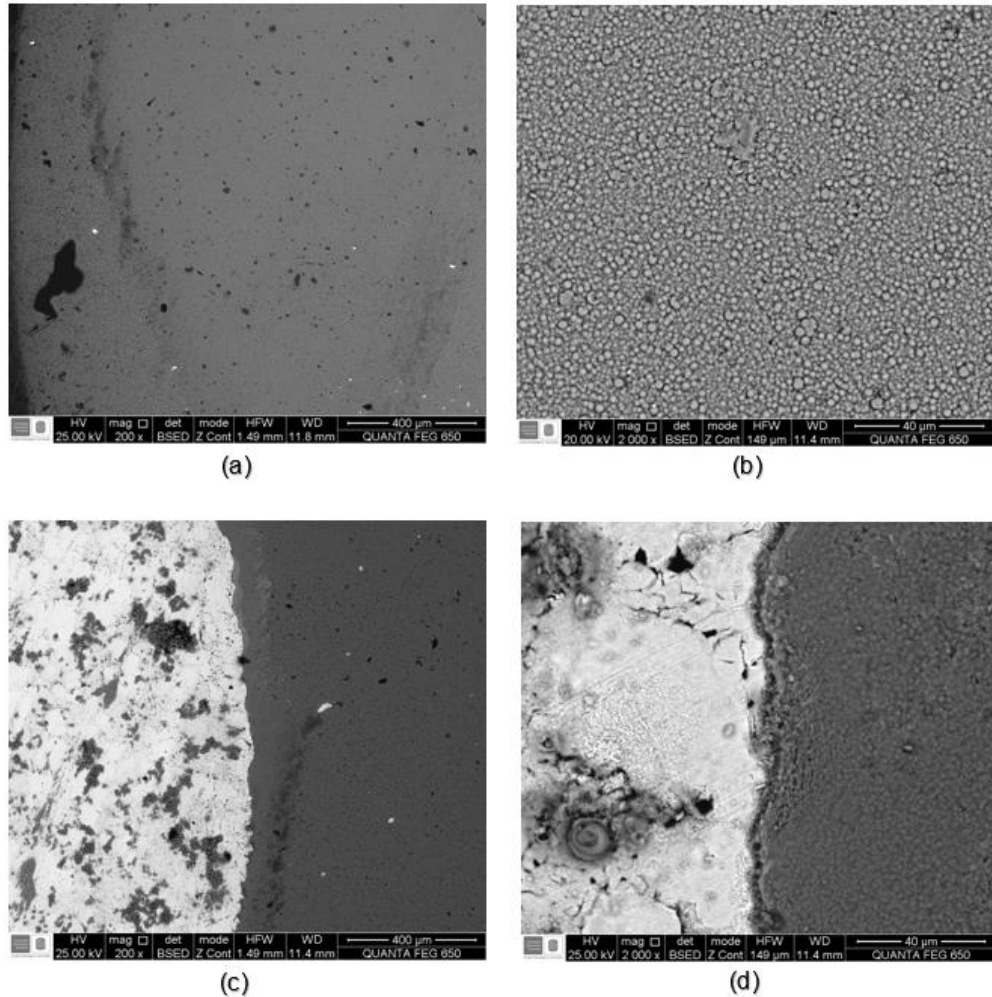
Tabla 14. Composición elemental EDS en la superficie recubierta y desgastada del disco

ELEMENTO	Wt%	At%
CK	01.53	05.31
NK	01.68	05.00
OK	08.17	21.24
SiK	02.44	03.61
TiK	05.14	04.47
Fek	81.04	60.37
Matriz	Corrección	ZAF

Las micrografías obtenidas a diferentes aumentos, sobre el área de la superficie del pin modificado con nitruro de titanio (antes de ser sometida a la prueba de desgaste a 15N) se presentan en la figura 57. Las irregularidades observadas en las micrografías (a) y (b) de la superficie no desgastada corresponden a la formación de micro gotas durante la deposición del recubrimiento y algunas impurezas adheridas a la superficie del pin. Las micrografías (c) y (d) pertenecen a la superficie desgastada donde se evidencia la frontera entra la sección desgastada y la

recubierta, generada por el contacto con el disco en el ensayo de desgaste a una fuerza normal aplicada de 15N

Figura 56. Micrografías SEM en pin recubierto. Superficie sin desgaste a una magnificación de 200X (a) y 2000X (b). Superficie desgastada a una magnificación de 200X (c) y 2000X (d).



El espectro de composición y los porcentajes de elementos detectados en un área de la superficie del pin modificada con nitruro de titanio (antes de ser sometida a la prueba de desgaste a 15N) se muestran en la figura 57 y en la tabla 15 respectivamente. El análisis EDS identificó un porcentaje considerable de titanio y

nitrógeno en la superficie de las probetas sin desgastar, comprobando que las superficies de los pines fueron modificadas con estas especies en una atmosfera de nitrógeno.

Figura 57. Espectro de composición EDS en la superficie recubierta sin desgaste del pin

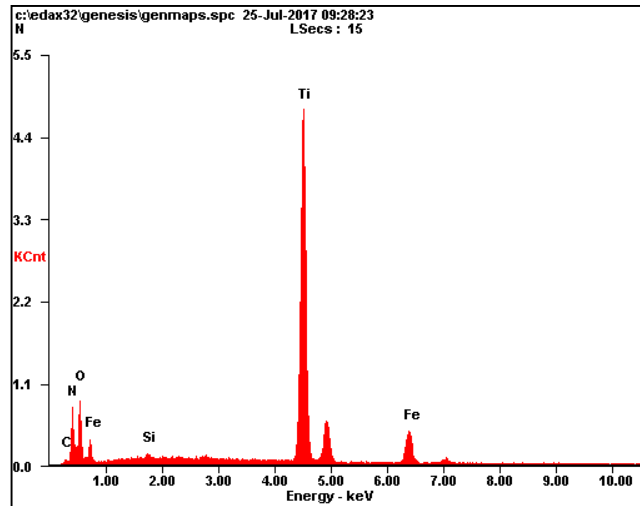


Tabla 15. Composición elemental EDS en la superficie recubierta sin desgaste del pin

ELEMENTO	Wt%	At%
CK	00.99	02.35
NK	08.71	17.79
OK	22.40	40.05
SiK	00.48	00.49
TiK	56.52	33.74
Fek	10.90	05.58
Matriz	Corrección	ZAF

La presencia de hierro en el análisis EDS de la superficie recubierta (ver figura 57 y tabla 15), se debe a que el haz de electrones incidente en la superficie de la muestra tiene una penetración de 2-3 μ m aproximadamente.

El espectro de composición y los porcentajes de los elementos identificados por EDS en la superficie desgastada del pin durante el ensayo de pin sobre disco con fuerza normal aplicada de 15N son presentados en la figura 58 y tabla 16. El análisis EDS reporta una disminución considerable de titanio y nitrógeno.

Figura 58. Espectro de composición EDS en la superficie recubierta y desgastada del pin

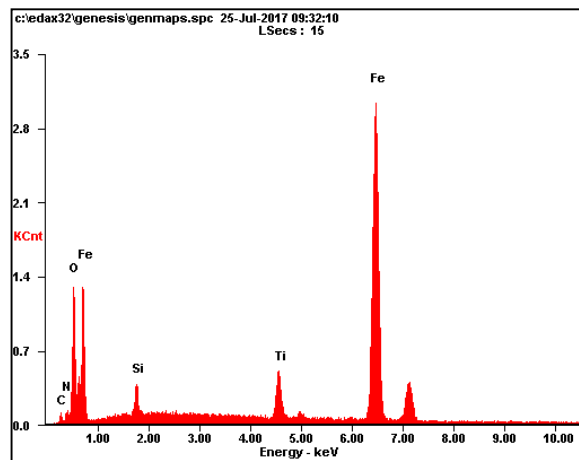


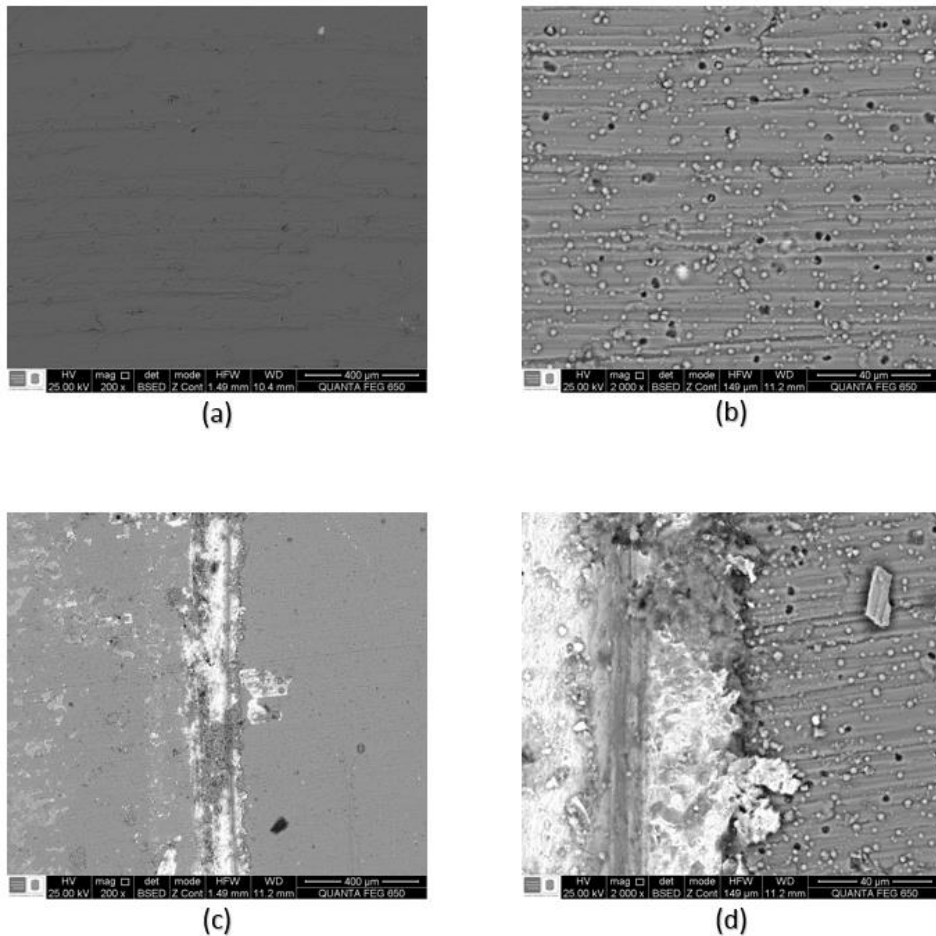
Tabla 16. Composición elemental EDS en la superficie recubierta y desgastada del pin

ELEMENTO	Wt%	At%
CK	02.17	06.84
NK	02.25	06.08
OK	12.05	28.48
SiK	02.21	02.97
TiK	05.21	04.11
Fek	76.11	51.52
Matriz	Corrección	ZAF

Las micrografías a diferentes aumentos adquiridas sobre el área de la superficie del disco modificado superficialmente con nitruro de titanio (antes de ser sometida a la prueba de desgaste a 10N) se presentan en la figura 59. Las irregularidades observadas en las micrografías (a) y (b), de la superficie no desgastada

corresponden a las trazas generadas en la preparación metalográfica, la formación de micro gotas durante el proceso de recubrimiento y algunas impurezas adheridas a la superficie del disco. Las micrografías (c) y (d) pertenecen a la superficie desgastada donde se evidencia claramente la irregularidad del surco generado por el contacto con el pin en el ensayo de desgaste con fuerza normal aplicada de 10N.

Figura 59. Micrografías SEM en disco recubierto. Superficie sin desgaste a una magnificación de 200X (a) y 2000X (b). Superficie desgastada a una magnificación de 200X (c) y 2000X (d).



En la figura 60 y en la tabla 17 se muestra el espectro de composición y los porcentajes de elementos detectados en un área de la superficie del disco

modificada con nitruro de titanio (antes de ser sometida a la prueba de desgaste a 10N) respectivamente. El análisis EDS identificó un porcentaje considerable de titanio y nitrógeno en la superficie de las probetas sin desgastar, comprobando que las superficies de los pines fueron modificadas con estas especies en una atmosfera de nitrógeno. La presencia de hierro es producto de la infiltración del haz de electrones en la superficie del objetivo.

Figura 60. Espectro de composición EDS en la superficie recubierta sin desgaste del disco

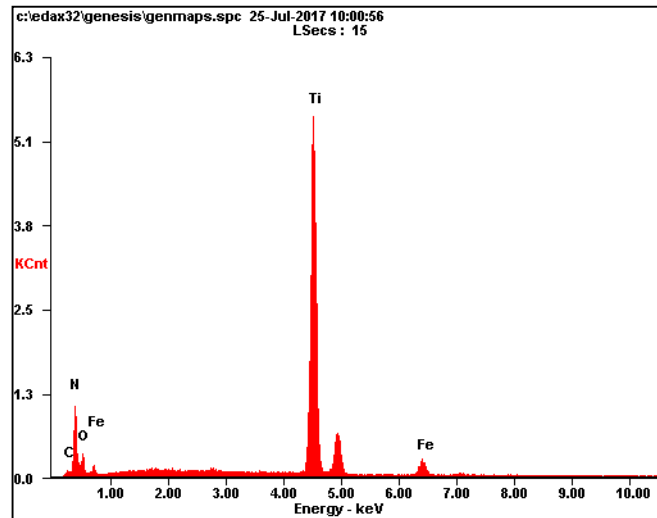


Tabla 17. Composición elemental EDS en la superficie recubierta sin desgaste del disco

ELEMENTO	Wt%	At%
CK	01.42	03.54
NK	13.33	28.56
OK	12.06	22.61
TiK	66.88	41.90
Fek	06.31	03.39
Matriz	Corrección	ZAF

Los espectros de composición y elementos presentes en la superficie desgastada del disco durante los ensayos de pin sobre disco con fuerza normal aplicada de 10N son presentados en la figura 61 y tabla 18. Cómo 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.

Figura 61. Espectro de composición EDS en la superficie recubierta y desgastada del disco

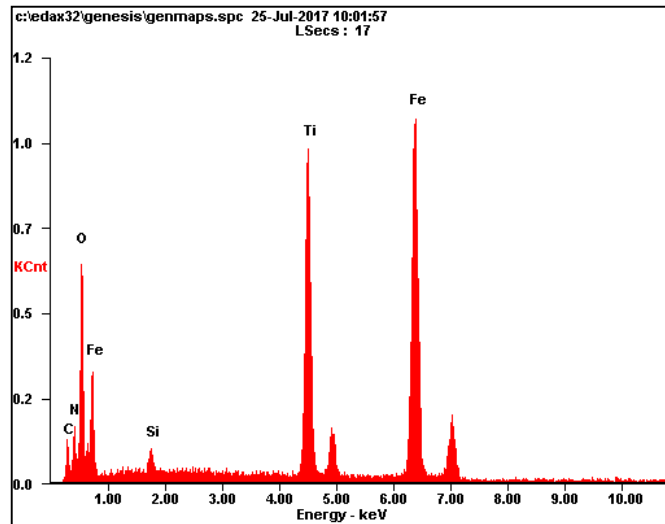
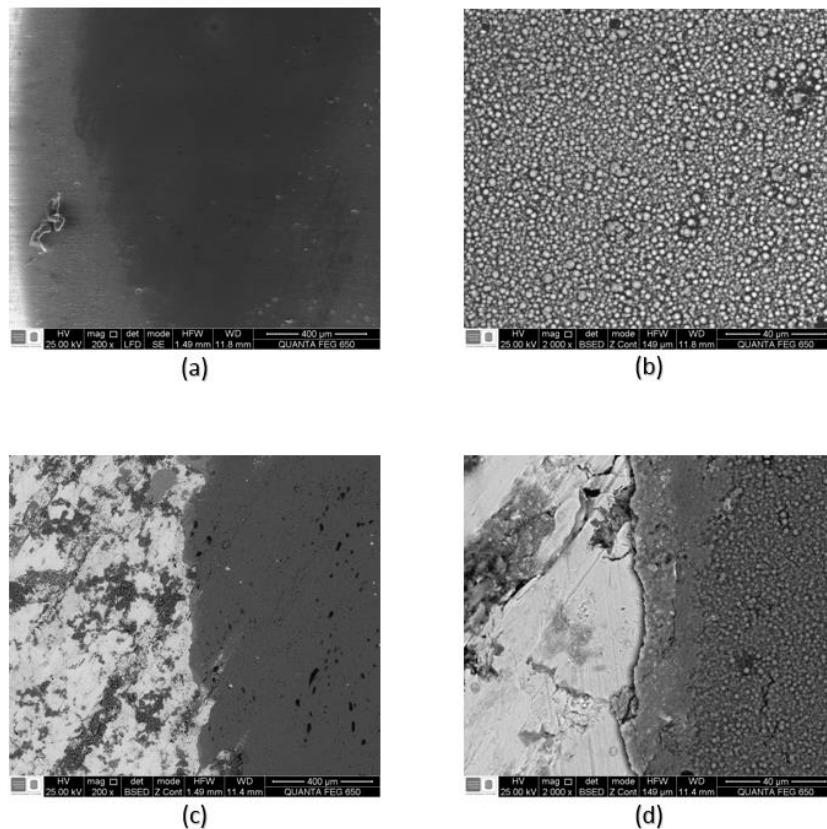


Tabla 18. Composición elemental EDS en la superficie recubierta y desgastada del disco

ELEMENTO	Wt%	At%
CK	04.18	10.72
NK	05.36	11.80
OK	18.23	35.14
SiK	00.90	00.99
TiK	21.41	13.78
Fek	49.91	27.56
Matriz	Corrección	ZAF

En la figura 62 se muestran las micrografías a diferentes aumentos obtenidas sobre el área de la superficie del pin recubierto con nitruro de titanio (antes de ser sometida a la prueba de desgaste a 10N). Las irregularidades observadas en las micrografías (a) y (b), de la superficie no desgastada corresponden a las trazas generadas en la preparación metalográfica, la formación de micro gotas durante el proceso de recubrimiento y algunas impurezas adheridas a la superficie del disco. Las micrografías (c) y (d) pertenecen a la superficie desgastada donde se evidencia claramente la irregularidad de la frontera entre la superficie desgastada y sin desgastar, generada por el contacto con el pin en el ensayo pin sobre disco con fuerza normal aplicada de 10N.

Figura 62. Micrografías SEM en pin recubierto. Superficie sin desgaste a una magnificación de 200X (a) y 2000X (b). Superficie desgastada a una magnificación de 200X (c) y 2000X (d).



En la figura 63 y en la tabla 19 se muestra el espectro de composición y los porcentajes de elementos detectados en un área de la superficie modificada con nitruro de titanio respectivamente.

Figura 63. Espectro de composición EDS en la superficie recubierta sin desgaste del pin

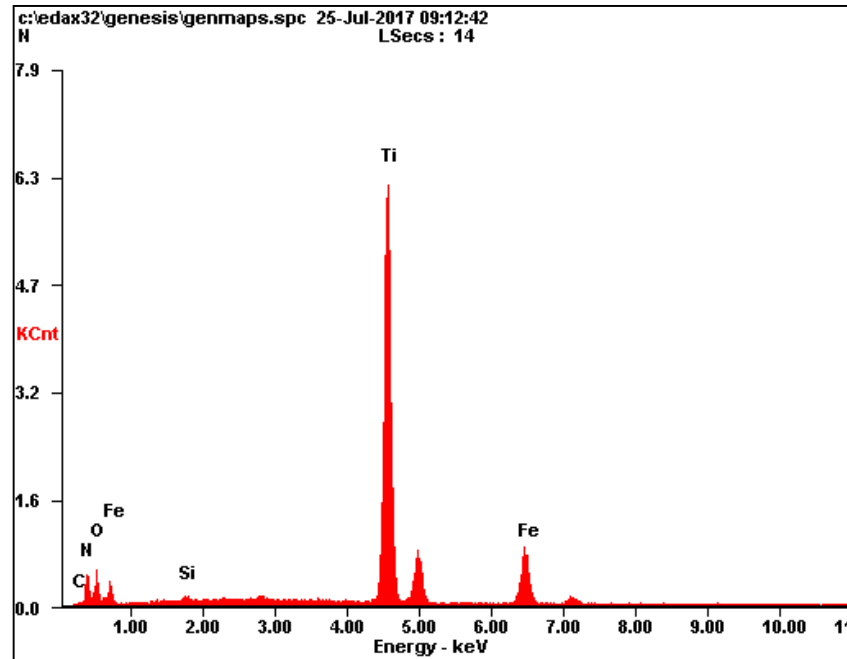


Tabla 19. Composición elemental EDS en la superficie recubierta sin desgaste del pin

ELEMTO	Wt%	At%
CK	01.04	02.65
NK	07.84	17.04
OK	18.50	35.21
SiK	00.56	00.61
TiK	57.47	36.53
Fek	14.59	07.96
Matriz	Corrección	ZAF

Los espectros de composición y elementos presentes en la superficie desgastada del pin durante los ensayos de desgaste con fuerza normal aplicada de 10N son presentados en la figura 64 y tabla 20. Como se puede apreciar, los elementos de titanio y nitrógeno no fueron removidos totalmente de la superficie, presentando una disminución mínima, dejando al descubierto el material base del objetivo.

Figura 64. Espectro de composición EDS en la superficie recubierta y desgastada del pin

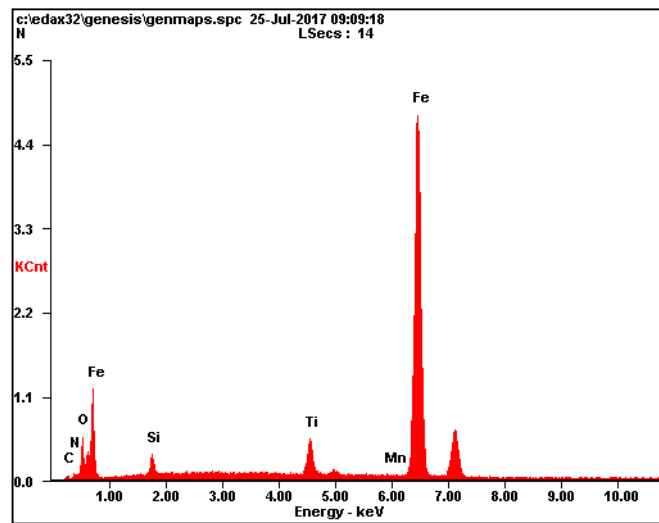


Tabla 20. Composición elemental EDS en la superficie recubierta y desgastada del pin

ELEMENTO	Wt%	At%
CK	02.07	07.27
NK	01.94	05.83
OK	06.43	16.95
SiK	02.34	03.52
TiK	04.25	03.74
MnK	00.28	00.21
Fek	82.70	62.48
Matriz	Corrección	ZAF

4.3 ANÁLISIS POR ESPECTROSCOPÍA RAMAN (ER).

La Espectroscopía Raman fue realizada con el objetivo de identificar y verificar el espectro de enlaces moleculares que componen el material utilizado. En este proyecto de grado la técnica fue aplicada en 3 probetas diferentes; disco de fundición gris recubierto con TiN, disco de fundición gris sin recubrimiento y pin de fundición gris recubierto con TiN.

4.3.1 Disco recubierto con TiN Los espectros del disco recubierto se adquirieron en 3 puntos distintos de su superficie, como se indica en las imágenes microscópicas de la figura 65-67. En las 3 imágenes se puede observar la conservación de una primera banda de frecuencia ($220-320\text{ cm}^{-1}$) y una segunda centrada en 550 cm^{-1} que corresponden a modos ópticos⁹⁷, la primera banda corresponde a las vibraciones de los iones metálicos de Ti referentes a fonones longitudinales LA ($170-250\text{ cm}^{-1}$) y transversales TA ($250-345\text{ cm}^{-1}$) y la segunda banda corresponde a los nodos longitudinales y transversales (LO-TO) que se encuentran en el rango de 500 cm^{-1} correspondientes a las vibraciones de los iones no metálicos del N, corroborando los resultados obtenidos en diferentes análisis del espectro Raman sobre superficies recubiertas con TiN^{98,99}. Además, las bandas encontradas, según la base de datos de espectroscopía Raman denominada Rruff¹⁰⁰ son óxidos de titanio representadas en forma de Brookita, Geikielita.

⁹⁷ BOLÍVAR, F.; BEJARANO, G. y GÓMEZ, M. influencia de los recubrimientos dúplex sobre las propiedades mecánicas y resistencia al desgaste del acero aisi 4140 bonificado. En: Revista EIA . scieloco. 2013. p. 151-160.

⁹⁸ CHENG, Y. et al. Substrate bias dependence of Raman spectra for TiN films deposited by filtered cathodic vacuum arc. En: J. Appl. Phys. 2002. Vol.92. No.4. p. 1845-1849.

⁹⁹ DE SOUSA, R. et al. Thin Tin and Tio2 Film Deposition in Glass Samples by Cathodic Cage. En: Materials Research. 2015. Vol.18. scielso. p. 347-352.

¹⁰⁰ Database of Raman spectroscopy, X-ray diffraction and chemistry of minerals. En línea. Rruff.info. Retrieved 30 January 2017. Disponible en: <http://rruff.info/>.

Figura 65. Micrografía y Espectro Raman en el punto 1A del Disco Recubierto con TiN

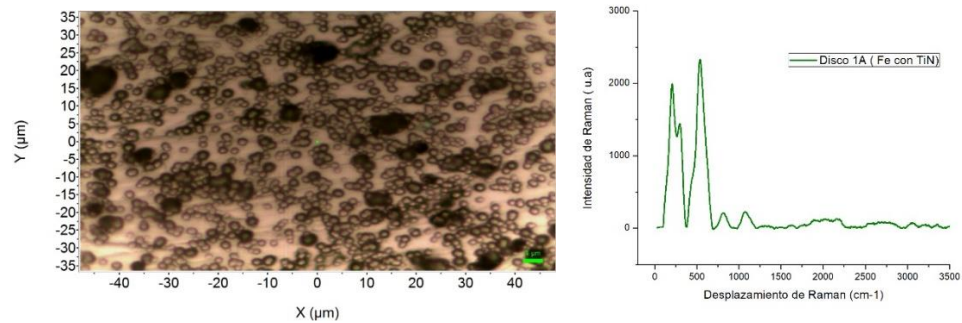


Figura 66. Micrografía y Espectro Raman en el punto 1B del Disco Recubierto con TiN

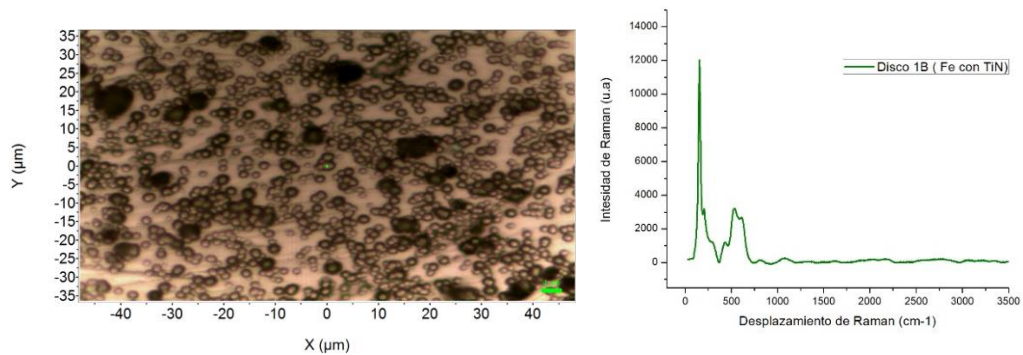
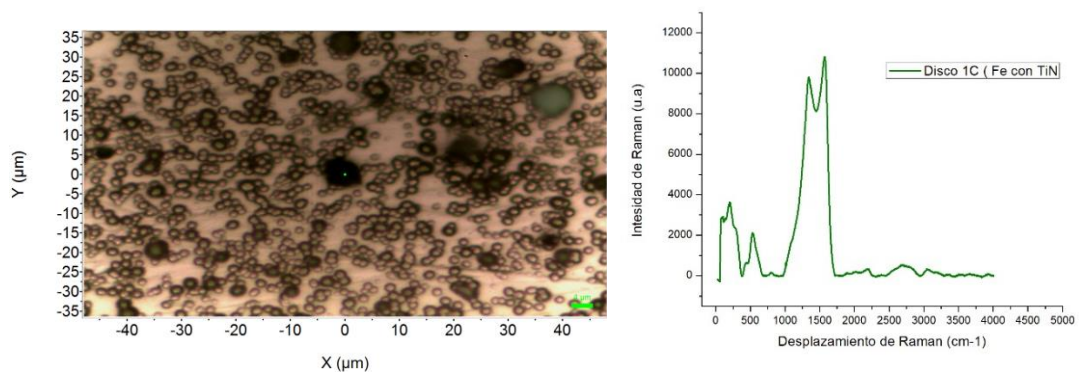
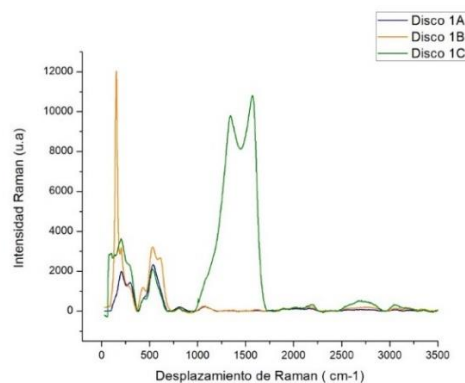


Figura 67. Micrografía y Espectro Raman en el punto 1C del Disco Recubierto con TiN



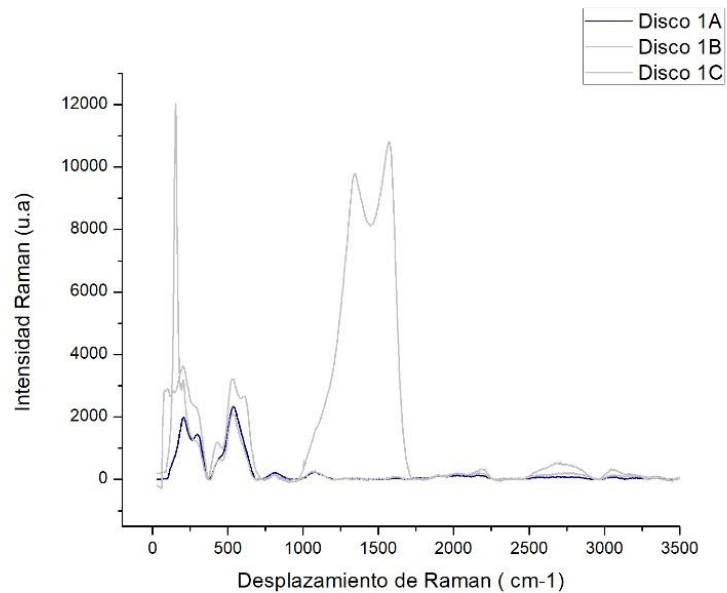
En la figura 68 se representan los 3 puntos superficiales del disco recubierto 1A,1B y 1C, en esta grafica se puede observar con más claridad las dos primeras bandas descritas anteriormente, sin omitir la diferencia entre sus intensidades. Usualmente esta variación de intensidad se debe a cambios de la instrumentación¹⁰¹, pero es importante resaltar, que las tres micrografías de la figura 65-67 exponen 3 puntos visualmente diferentes: retomando lo observado en el SEM, el recubrimiento TiN se puede visualizar como pequeñas partículas con micro espacios entre ellas depositadas en la superficie de la fundición gris, ahora, en la figura 65 el punto analizar es en el micro espacio generado entre las partículas del recubrimiento, en la figura 66 el punto es un representante de lo que mayormente se observa y el punto 3 se encuentra ubicado en una de las partículas con mayor diámetro encontrada en el recubrimiento. Si se analiza la figura 68, el espectro con menor intensidad es 1A (en el micro espacio), el de mayor intensidad es el 1B (el de las partículas más uniformes) y en el punto 1C, la intensidad de la banda comparada con el punto 1B, disminuye notoriamente, pero aparece una nueva banda casi de la misma intensidad que la primera del punto comparado, que corresponde a *Rutilo* uno de los representantes principales de los óxidos de titanio.

Figura 68. Espectro Raman en los puntos 1A -1B-1C del Disco Recubierto con TiN



¹⁰¹ GONZÁLEZ, J. Identificación automática de Espectros Raman de pigmentos mediante Análisis por Componentes Principales. Proyecto de grado. Cataluña. Universidad Politécnica de Catalunya. 2011. p. 59-111.

Figura 69. Espectro Raman en los puntos 1A -1B-1C del Disco Recubierto con TiN, resaltando el espectro con menor intensidad en 2 primeras bandas.



4.3.2 Pin Recubierto con TiN La conservación de las bandas que anteriormente se había mencionado siguen siendo patrón en el pin figura 70. Razón por la que se puede inferir que la técnica Raman logra identificar el recubrimiento de TiN en esta probeta también, además en la figura 71 se representan el espectro Raman del pin y del disco recubierto observando valores de intensidad y frecuencia muy similares permitiendo deducir que, si el recubrimiento general fue el mismo en las dos probetas, el recubrimiento de todas las probetas utilizadas también es TiN.

Figura 70. Micrografía y Espectro Raman en el punto 1A del Pin Recubierto con TiN

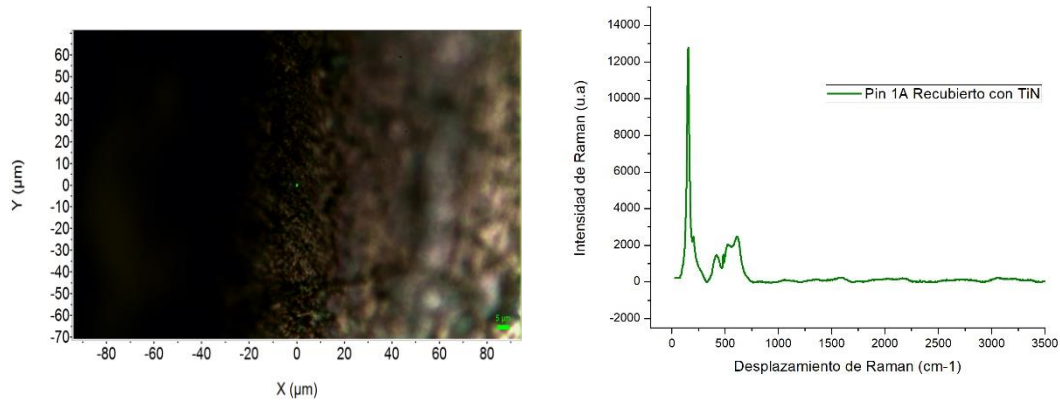
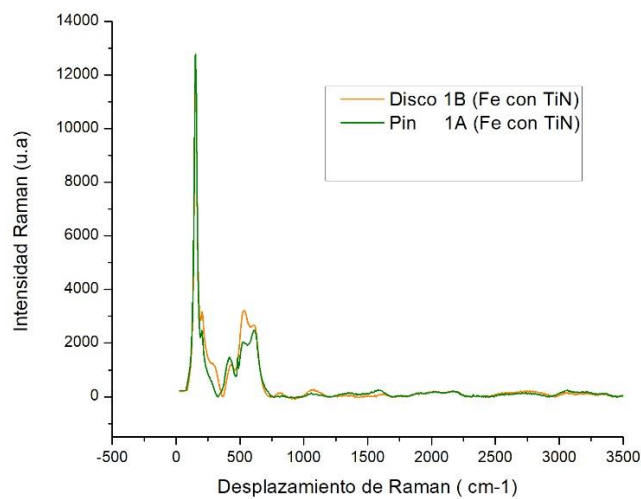


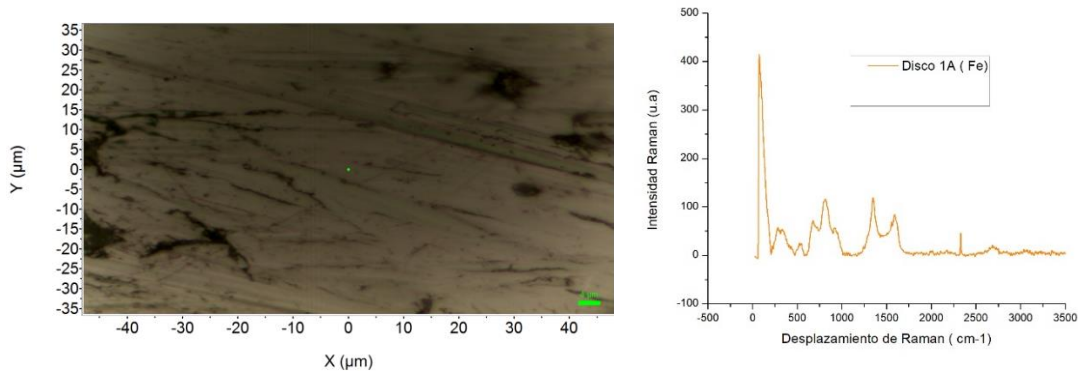
Figura 71. Espectro Raman en el punto 1A del Pin y el punto 1B del Disco Recubierto con TiN



4.3.3 Disco sin Recubrimiento. El espectro mostrado de la figura 72 corresponde a un disco de fundición gris sin ningún tipo de modificación superficial, se identificaron picos en 220 cm-1 asociado a las bandas de vibración de Lepidocrocita, bandas de la Goetita (287cm-1), de la magnetita (1285 cm-1) y de la hematita (285 cm-1), estos modos vibracionales representan los óxidos comunes de la fundición,

y la asignación se realizó de acuerdo a la base de datos de espectroscopía Raman denominada Rruff¹⁰² y los resultados de otros estudios^{103,104}.

Figura 72. Micrografía y Espectro Raman en el punto 1A del Disco sin recubrimiento



4.4 ESPECTROSCOPIA DE EMISIÓN ÓPTICA (OES)

La técnica de espectrometría óptica fue realizada con el fin de obtener un análisis elemental para saber la composición porcentual de los elementos del material de la camisa de un motor de combustión interna suministrado por la Industria Lavco para la fabricación de las probetas. La composición química otorgada por la empresa es mostrada en el Anexo D.

En la tabla 21 se puede observar que los elementos encontrados corresponden a los esperados en una fundición gris (ver Anexo H). Adicionalmente se realizó la

¹⁰² Database of Raman spectroscopy, X-ray diffraction and chemistry of minerals. En línea. Rruff.info. Retrieved 30 January 2017. Disponible en: <http://rruff.info/>.

¹⁰³ MELO, Catalina. Evaluación del uso de la técnica de espectroscopía de reflectancia sobre superficies de fundición de hierro gris para mediciones de corrosión. Tesis de maestría para optar el título de Magíster en Ingeniería- Materiales y Procesos. Bogotá. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Mecánica y mecatrónica. 2016. p. 46-49.

¹⁰⁴ DE FARIA, D. L. A.; SILVA, V. y OLIVEIRA, M. T. Raman Microspectroscopy of Some Iron Oxides and Oxyhydroxides. En: Journal of raman spectroscopy. 1997. p. 873-878.

misma prueba para las probetas recubiertas con TiN, pero no fue identificado el recubrimiento (Ver Anexo H), la primera acción que se efectuó fue realizar por segunda vez el experimento para descartar errores humanos, pero los resultados fueron los mismos. Para verificar la presencia de TiN se optó por realizar la prueba de espectroscopía Raman y espectroscopía de energía dispersiva (EDS), obteniendo los resultados esperados. Entonces, la hipótesis planteada para el resultado de la técnica OES, se basa en el principio de la técnica y el tipo de recubrimiento realizado. La espectroscopía de emisión óptica es una absorción atómica por chispa de arco que se realiza en la composición interna del material, se necesita penetrar un láser dentro del material a analizar para excitar los átomos y tener como respuesta una longitud de ondas específicas de la excitación producida, como es una prueba que se hace al interior del material, posiblemente, por razones que no están al alcance de conocer en este proyecto, el láser utilizado penetra a una profundidad más alta que la profundidad del recubrimiento hecho, ocasionando que los átomos de la superficie no sean excitados, sin poder identificar las longitudes producidas por el TiN.

Tabla 21. Composición química elemental por espectroscopía de emisión óptica

Elemento	%
C	5.4
Mn	0.126
S	0.15
Cu	0.39
Si	2.92
P	0.131
Cr	0.053
Fe	90.56
Mo	0.01
Ni	0.039
Al	0.005
Co	0.0067
N	0.856
Nb	0.0078
Pb	0.068
Sb	0.1
Sn	0.016
Ta	0.03
Ti	0.015

5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA MEDICIÓN DEL DESGASTE DE LAS PROBETAS

En esta sección se analizarán los resultados obtenidos en las pruebas de desgaste por medio de la herramienta estadística “análisis de la varianza (ANOVA)”.

5.1 EXPERIMENTO UNIFACTORIAL COMPLETAMENTE ALEATORIO

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de desgaste para las diferentes combinaciones de superficies expuestas al ensayo de pin sobre disco en el cual se trabajó bajo una fuerza normal aplicada de 10N. En este experimento, se analizará la pérdida de masa del pin y del disco por separado, con el fin de obtener un análisis más detallado de cada probeta. En este caso las variables involucradas son:

- **Variables independientes o factores:** Modificación superficial (probetas modificadas y no modificadas superficialmente).
- **Variables dependientes:** Pérdida de masa en (g).
- **Hipótesis del experimento unifactorial completamente aleatorio**

H_0 : Con un grado de significancia de $\alpha = 0,05$, todas las modificaciones superficiales arrojan el mismo valor de pérdida de masa de las probetas.

H_1 : Con un grado de significancia de $\alpha = 0,05$, por lo menos una de las modificaciones superficiales arroja un valor diferente en la pérdida de masa de las probetas.

5.1.1 Análisis estadístico para la medición del desgaste de los pines En el Anexo A se establecieron las ecuaciones utilizadas en el análisis estadístico de la pérdida de masa de las probetas. En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de desgaste.

Tabla 22. Datos de la masa perdida en los pines

Combinación de Superficies	Pérdida de masa [g]				
	Numero de Observaciones				Total
	1	2	3	Promedio	
Pin. Sr -- Disco. Sr	0,0002	2,00E-04	0,000149	0,000183	0,000549
Pin. Cr -- Disco. Sr	5,00E-05	0,00023	0,00018	0,0001533	0,00046
Pin. Sr -- Disco. Cr	5,00E-04	3,60E-04	8,00E-05	0,0003133	0,00094
Pin. Cr -- Disco. Cr	0,00042	0,00167	0,00101	0,0010333	0,0031
					0,0050

Las combinaciones presentes en la tabla 22 representan el tipo de superficies de las probetas expuestas al ensayo de desgaste, por ejemplo: Pin sin recubrimiento- Disco con recubrimiento (Pin. Sr—Disco. Cr).

Tabla 23. Número de tratamientos y replicas por tratamiento (Pines)

A	4
N	3
N	12
SSTotal	0,000002437
SSComb. Sup.	0,000001545
SSError	0,000000893

Donde a es el número de tratamientos y n son las réplicas de cada tratamiento. En la siguiente tabla se encuentra el análisis de varianza ANOVA, que nos permite calcular el F0 con el fin de compararlo con F.T de la tabla con una significancia de $\alpha=0.05$.

Tabla 24. Análisis del experimento completamente aleatorio (Pines)

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	F0	F.T.
Combinación Superficial	0,0000015445	3	0,000000515	4,614577521	4,07
Error	0,0000008925	8	1,11567E-07		
Total	0,0000024370	11			

A continuación, se muestra cómo obtener el valor (F.T) de la tabla ANOVA en la cual se entra en las filas con el grado de libertad del denominador (valor del error) y en las columnas con el grado de libertad del numerador (combinación superficial), para luego ser comparado con el valor de F0.

Tabla 25. Selección del factor F.T

v ₂	Degrees of freedom for the numerator (v ₁)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15			
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	245.9			
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43			
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70			
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86			
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62			
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94			
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51			
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22			
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01			
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85			
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72			
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62			
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53			
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46			
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40			
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35			
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31			
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27			
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23			
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20			
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18			
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15			
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13			

Si $F_0 < F.T$ entonces se admite la hipótesis H_0 lo cual indicaría que el recubrimiento superficial no tendría ningún efecto en el aumento de la resistencia al desgaste de las probetas; en caso contrario, si $F_0 > F.T$ H_0 se anula y se acepta la hipótesis H_1 . Como el valor de F_0 es mayor que el de $F.T$ se admite la hipótesis H_1 y se procede a realizar un análisis Duncan con el fin de buscar la mejor o la peor combinación superficial del par tribológico analizado

5.1.2 Análisis estadístico para la medición del desgaste de los discos En la siguiente tabla se observan los promedios y la suma de los totales de las observaciones del experimento completamente aleatorio.

Tabla 26. Datos de la masa perdida en los discos

Combinación de Superficies	Pérdida de masa [g]				
	Numero de Observaciones				Total
	1	2	3	Promedio	
Pin. Sr -- Disco. Sr	0,00012	3,00E-05	0,00013	9,333E-05	0,00028
Pin. Cr -- Disco. Sr	0,00012	0,00149	0,00032	0,0006433	0,00193
Pin. Sr -- Disco. Cr	6,00E-05	1,00E-05	2,00E-05	0,00003	0,00009
Pin. Cr -- Disco. Cr	0,0015	0,00324	0,00128	0,0020067	0,00602
					0,0083

Tabla 27. Número de tratamientos y replicas por tratamiento (Discos)

a	4
n	3
N	12
SSTotal	0,000010991
SSComb. Sup.	0,000007582
SSError	0,000003409

El factor (F.T) en este caso es el mismo al hallado en el experimento unifactorial de los pines ya que los grados de libertad coinciden en los dos ensayos.

Tabla 28. Análisis del experimento completamente aleatorio (Discos)

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	F0	F.T.
Combinación Superficial	0,0000075821	3	0,000002527	5,9317	4,07
Error	0,0000034086	8	4,26075E-07		
Total	0,0000109907	11			

Como el valor de F_0 es mayor que el de $F.T$ se admite la hipótesis H_1 y se procede a realizar un análisis Duncan con el fin de buscar la mejor o la peor combinación superficial del par tribológico analizado.

5.1.3 Análisis Duncan

Pines: En análisis de varianza indica una varianza significativa en los factores analizados, por tal motivo es necesario realizar comparaciones entre los mismos con el fin de encontrar diferencias específicas.

Tabla 29. Valores Duncan de tablas y el error (Pines)

Duncan. T	Error Duncan
3,47	0,00019284
3,39	
3,26	

A continuación, se muestra cómo obtener los valores (Duncan.T) de la tabla Duncan en la cual se entra en las filas con el grado de libertad del error y en las columnas con el grado de libertad de la combinación superficial.

Tabla 30. Tabla Duncan

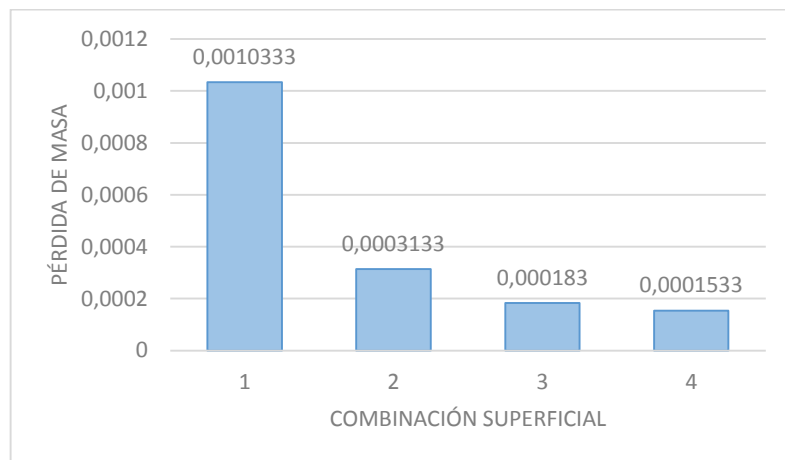
f^a	2	3	4	5
1	18.0	18.0	18.0	18.0
2	6.09	6.09	6.09	6.09
3	4.50	4.50	4.50	4.50
4	3.93	4.01	4.02	4.02
5	3.64	3.74	3.79	3.83
6	3.46	3.58	3.64	3.68
7	3.35	3.47	3.54	3.58
8	3.26	3.39	3.47	3.52
9	3.20	3.34	3.41	3.47

En la siguiente tabla se muestra el análisis Duncan, en la cual se organizan de mayor a menor los promedios de la pérdida de masa de los pines con el fin de realizar comparaciones por pares.

Tabla 31. Análisis Duncan (Pines)

Combinación de superficies	Medias (promedio)	Comp.	Diferencias de medias	Duncan tablas	Duncan Ajustado
1. Pin. Cr -- Disco. Cr	0,001033333	"1-4"	0,00088	3,47	0,00066917
2. Pin. Sr -- Disco. Cr	0,000313333	"1-3"	0,000850333	3,39	0,000653742
3. Pin. Sr -- Disco. Sr	0,000183	"1-2"	0,00077	3,26	0,000628672
4. Pin. Cr -- Disco. Sr	0,000153333	"2-4"	0,00016	3,39	0,000653742
		"2-3"	0,000130333	3,26	0,000628672
		"3-4"	2,96667E-05	3,26	0,000628672

Figura 73. Pérdida de masa de los pines en las distintas combinaciones superficiales



Al comparar las diferencias de medias con el valor del Duncan ajustado (ver tabla 31), se observa que las comparaciones en las que interviene la primera combinación superficial (pin. Cr-disco. Cr), el valor de la diferencia de medias es mayor al valor del Duncan ajustado, por lo que se puede concluir que, al recubrir las dos superficies en contacto, se genera un mayor desgaste en las probetas sometidas al ensayo pin sobre disco.

En la figura 73 se encuentra que la combinación superficial pin recubierto-disco sin recubrir, aumenta la resistencia al desgaste de los pines recubiertos con nitruro de titanio (TiN) en una atmosfera de nitrógeno mediante la técnica HIPIMS, debido a la diferencia en la dureza superficial de las probetas.

Discos: Al igual que el ensayo con los pines, en el experimento unifactorial realizado a los discos presenta una gran varianza en los factores analizados, por ende, se requiere realizar un análisis Duncan con el fin de encontrar diferencias específicas entre los factores.

Tabla 32. Valores Duncan de tablas y el error (Discos)

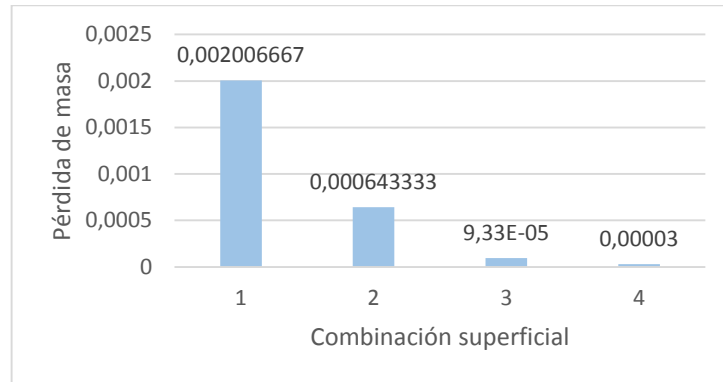
Duncan tablas	Error Duncan
3,47	0,0003769
3,39	
3,26	

En la siguiente tabla se muestra el análisis Duncan, en la cual se organizan de mayor a menor los promedios de la pérdida de masa de los pines con el fin de realizar comparaciones por pares.

Tabla 33. Análisis Duncan (Discos)

Combinación de superficies	Medias (promedio)	Comp.	Diferencias de medias	Duncan tablas	Duncan Ajustado
1. Pin. Cr -- Disco. Cr	0,002006667	"1-4"	0,001976667	3,47	0,001307711
2. Pin. Cr -- Disco. Sr	0,000643333	"1-3"	0,001913333	3,39	0,001277562
3. Pin. Sr -- Disco. Sr	9,33333E-05	"1-2"	0,001363333	3,26	0,00122857
4. Pin. Sr -- Disco. Cr	0,00003	"2-4"	0,000613333	3,39	0,001277562
		"2-3"	0,00055	3,26	0,00122857
		"3-4"	6,33333E-05	3,26	0,00122857

Figura 74. Pérdida de masa de los discos en las distintas combinaciones superficiales



Al comparar las diferencias de medias con el valor del Duncan ajustado (ver tabla 33), se observa que al recubrir la superficie de las probetas (pines y discos) con nitruro de titanio mediante la técnica HIPIMS y posteriormente someterlas a los ensayos tribológicos, se evidencia una gran pérdida de masa en los discos. De acuerdo con lo anterior, se puede concluir que para disminuir el desgaste en los discos recubiertos con nitruro de titanio se deben poner en contacto con pines sin recubrimiento, con el fin de tener una diferencia en la dureza superficial de las probetas.

5.2 EXPERIMENTO FACTORIAL

A continuación, se analizan los resultados obtenidos en las pruebas de desgaste para las diferentes combinaciones de superficies expuestas al ensayo de pin sobre disco el cual se trabajó bajo dos magnitudes fuerza normal aplicada de 10 y 15N. En este experimento, se analizará la pérdida de masa del pin y del disco por separado, con el fin de obtener un análisis más detallado de cada probeta. A continuación, se muestran los tipos de variables involucradas en el experimento:

➤ **Variables independientes o factores:**

Factor A: modificación superficial (probetas modificadas y no modificadas superficialmente).

Factor B: fuerza aplicada en el ensayo de caracterización tribológica *Pin on Disk*.

➤ **Variable dependiente:**

Pérdida de masa en (g).

➤ **Hipótesis del experimento factorial**

Factor A

H_0 : Con un grado de significancia de $\alpha = 0,05$, todas las modificaciones superficiales arrojan el mismo valor de pérdida de masa de las probetas.

H_1 : Con un grado de significancia de $\alpha = 0,05$, por lo menos una de las modificaciones superficiales arroja un valor diferente en la pérdida de masa de las probetas.

Factor B

H_0 : Con un grado de significancia de $\alpha = 0,05$, todas las fuerzas normalmente aplicadas arrojan el mismo valor de pérdida de masa de las probetas.

H_1 : Con un grado de significancia de $\alpha = 0,05$, por lo menos una de las fuerzas normalmente aplicadas arroja un valor diferente en la pérdida de masa de las probetas.

Interacción

H_0 : Con un grado de significancia de $\alpha = 0,05$, no hay interacción entre los factores.

H_1 : Con un grado de significancia de $\alpha = 0,05$, existe interacción entre los factores.

5.2.1 Análisis estadístico para la medición del desgaste de los pines En la siguiente tabla se muestran los datos recolectados en las pruebas tribológicas, con el fin de realizar el análisis estadístico.

Tabla 34. Datos de pérdida de masa en los pines

Pérdida de masa [g]									
Combinación de Superficies	Fuerza Aplicada [N]								Σ TOTAL
	10				15				
				Total				Total	
Pin. Sr -- Disco. Sr	0,0002	2,00E-04	0,000149	0,000549	0,00031	0,00045	0,00023	0,00099	0,001539
Pin. Cr -- Disco. Sr	5,00E-05	0,00023	0,00018	0,00046	0,00018	3,00E-05	7,00E-06	0,000217	0,000677
Pin. Sr -- Disco. Cr	5,00E-04	3,60E-04	8,00E-05	0,00094	0,0006	0,00091	3,10E-04	0,00182	0,00276
Pin. Cr -- Disco. Cr	0,00042	0,00167	0,00101	0,0031	0,00209	0,00204	0,00139	0,00552	0,00862
				0,005049				0,008547	0,0136

Los promedios y los errores de los datos de pérdida de masa tabulados se muestran en las tablas 35, 36 respectivamente.

Tabla 35. Promedios

Promedios	
10	15
0,000183	0,00033
0,000153	7,23E-05
0,000313	0,000607
0,001033	0,00184

Tabla 36. Errores

Errores					
10			15		
0,000017	1,70E-05	-3,4E-05	-0,00002	0,00012	-0,0001
-0,0001	7,67E-05	2,67E-05	0,000108	-4,2E-05	-6,5E-05
0,000187	4,67E-05	-0,00023	-6,7E-06	0,000303	-0,0003
-0,00061	0,000637	-2,3E-05	0,00025	0,0002	-0,00045

Tabla 37. Número de tratamientos y replicas por tratamiento

a	4
b	2
n	3

Donde a son los niveles del factor A, b son los niveles del factor B y n es el número de réplicas.

En la siguiente tabla se encuentra el análisis de varianza ANOVA, que nos permite calcular los valores de F0 con el fin de compararlos con los F.T de la tabla con una significancia de $\alpha=0.05$.

Tabla 38. Análisis del experimento factorial

Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	F0.	F.T.
Combinación Sup.	0,00000642	3	0,0000021	24,1218	3,24
Fuerza Aplicada	0,00000051	1	0,0000005	5,7444	4,49
Interacción	0,00000064	3	0,0000002	2,3945	3,24
Error	0,00000142	16	8,87533E-08		
Total	0,00000899	23			

A continuación, se muestra cómo obtener los valores (F.T) de la tabla ANOVA en la cual se entra en las filas con el grado de libertad del denominador (valor del error) y en las columnas con el grado de libertad del numerador (Combinación Superficial, fuerza aplicada e interacción), para luego ser comparado con el valor de F0.

Tabla 39. Obtención de los factores F.T.

$v_2 \backslash v_1$	Degrees of freedom for the numerator (v_1)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15			
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	245.9			
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43			
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70			
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86			
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62			
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94			
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51			
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22			
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01			
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85			
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72			
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62			
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53			
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46			
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40			
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35			
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31			
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27			
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23			
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20			
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18			
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15			
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13			

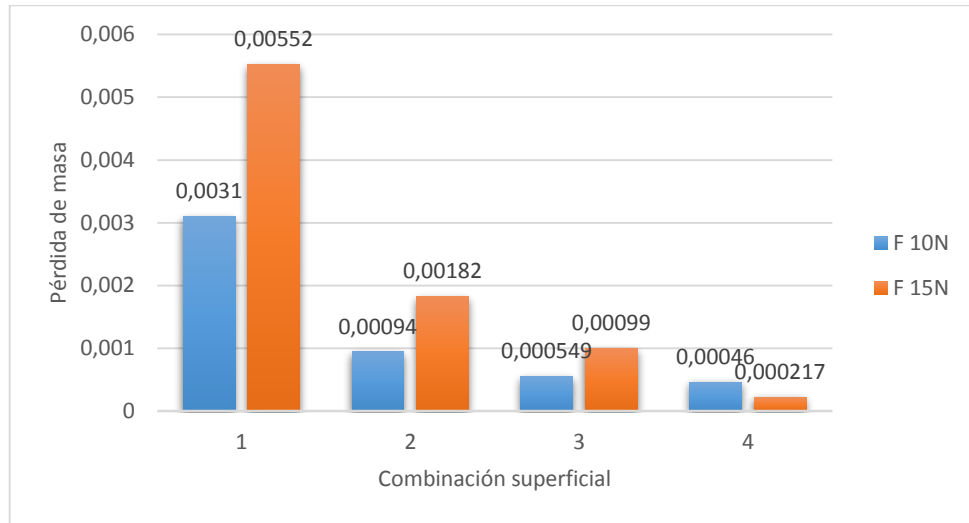
En la tabla 39 se observa que los factores F0 de la combinación Superficial y la fuerza aplicada son mayores al valor estadístico de las tablas (F.T), lo cual indica que la hipótesis nula, H0, se rechaza y se acepta la hipótesis H1 en estos dos factores independientes y la interacción entre ellos. En el caso de la interacción el valor F0 es menor al valor estadístico de las tablas (F.T), lo cual indica que la hipótesis nula, H0, es aceptada para este valor independiente.

En la tabla 40 se especifica el tipo de combinación superficial representada por la numeración en el eje X de la figura 75.

Tabla 40. Especificación de la combinación superficial

Núm. Eje X	Combinación superficial
1	Pin Cr-Disco Cr
2	Pin Sr-Disco Cr
3	Pin Sr-Disco Sr
4	Pin Cr-Disco Sr

Figura 75. Pérdida de masa de los pines en función de la combinación superficial y la fuerza aplicada



En la figura 76 se encuentra la representación gráfica de la pérdida de masa de las probetas (pines) recubiertas con nitruro de titanio (TiN) en una atmosfera de nitrógeno.

5.2.2 Análisis estadístico para la medición del desgaste de los discos En la siguiente tabla se muestran los datos recolectados en las pruebas tribológicas, con el fin de realizar el análisis estadístico.

Tabla 41. Datos de pérdida de masa en los discos

Pérdida de masa [g]									
Combinación de Superficies	Fuerza Aplicada [N]								Σ TOTAL
	10				15				
				Total				Total	
Pin. Sr -- Disco. Sr	0,00012	3,00E-05	0,00013	0,00028	0,0011	0,00218	0,00381	0,00709	0,00737
Pin. Cr -- Disco. Sr	0,00012	0,00149	0,00032	0,00193	0,0003	0,00045	0,0003	0,001	0,00293
Pin. Sr -- Disco. Cr	6,00E-05	1,00E-05	2,00E-05	0,00009	0,0014	0,00213	6,00E-05	0,00354	0,00363
Pin. Cr -- Disco. Cr	0,0015	0,00324	0,00128	0,00602	0,006	0,00533	0,00233	0,01369	0,01971
				0,00832				0,02532	0,0336

Los promedios y los errores de los datos de pérdida de masa tabulados se muestran en las tablas 42, 43 respectivamente.

Tabla 42. Promedios

Promedios	
10	15
9,33E-05	0,002363
0,000643	0,000333
0,00003	0,00118
0,002007	0,004563

Tabla 43. Errores

Errores					
10			15		
2,6667E-05	-6,33E-05	3,66667E-05	-0,0012633	-0,0001833	0,00144667
-0,0005233	0,00084667	-0,000323333	-8,333E-05	0,00011667	-3,333E-05
0,00003	-0,00002	-0,00001	0,00017	0,00095	-0,00112
-0,0005067	0,00123333	-0,000726667	0,00146667	0,00076667	-0,0022333

Tabla 44. Numero de tratamientos y replicas por tratamiento

A	4
B	2
N	3

Donde a son los niveles del factor A, b son los niveles del factor B y n es el número de réplicas.

En la siguiente tabla se encuentra el análisis de varianza ANOVA, que permite calcular los valores de F0 con el fin de compararlos con los F.T de la tabla con una significancia de $\alpha=0.05$. Los factores F.T corresponden a los anteriormente calculados en el experimento de los pines, puesto que no se presenta varianza alguna en los grados de libertad.

Tabla 45. Análisis del experimento factorial

Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	F ₀ .	F.T.
Combinación Sup.	0,00003028	3	0,0000101	94,618	3,24
Fuerza Aplicada	0,00001204	1	0,0000120	112,900	4,49
Interacción	0,00000762	3	0,0000025	23,816	3,24
Error	0,00001707	16	1.07E-01		
Total	0,00006700	23			

En la tabla 45 se observa que los factores F₀ de la combinación Superficial y la fuerza aplicada son mayores al valor estadístico de las tablas (F.T), lo cual indica que la hipótesis nula, H₀, se rechaza y se acepta la hipótesis H₁ en estos dos factores independientes y la interacción entre ellos. En el caso de la interacción el valor F₀ es menor al valor estadístico de las tablas (F.T), lo cual indica que la hipótesis nula, H₀, es aceptada para este valor independiente.

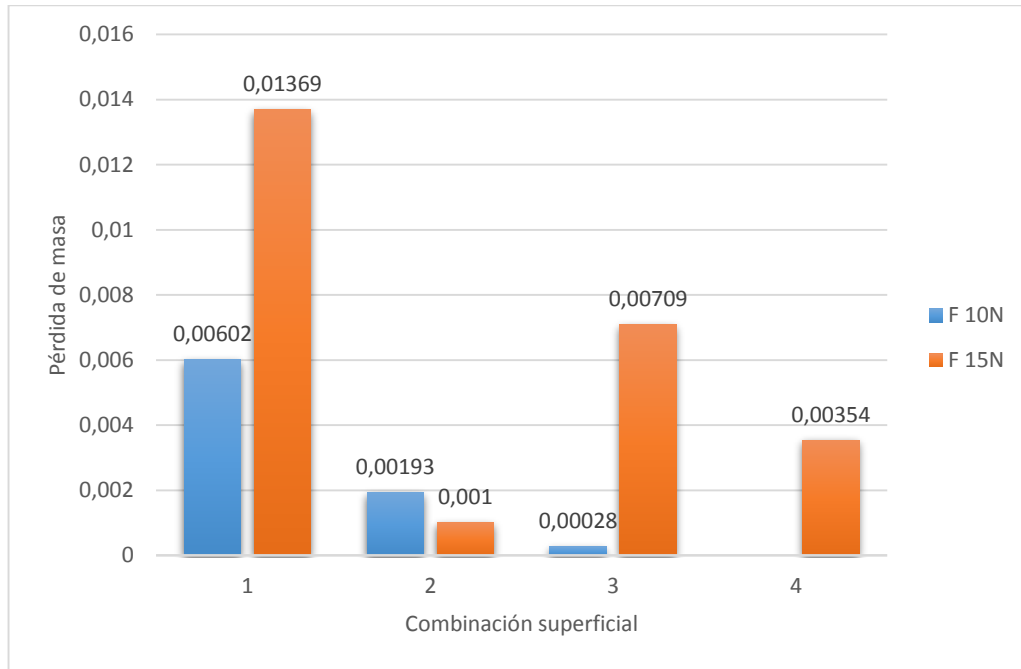
En la tabla 46 se especifica el tipo de combinación superficial representada por la numeración en el eje X de la figura 76.

Tabla 46. Especificación de la combinación superficial

Núm. Eje X	Combinación superficial
1	Pin Cr-Disco Cr
2	Pin Cr-Disco Sr
3	Pin Sr-Disco Sr
4	Pin Sr-Disco Cr

En la figura 76 se encuentra la representación gráfica de la pérdida de masa de los discos recubiertos con nitrato de titanio (TiN) en una atmosfera de nitrógeno, en la cual se aprecia una disminución de aproximadamente el 100% entre las combinaciones superficiales 1 y 4, a una fuerza normal aplicada de 10N.

Figura 76. Pérdida de masa de los discos en función de la combinación superficial y la fuerza aplicada



5.3 REGRESIÓN MÚLTIPLE

Por medio de la ecuación 18 se ajusta un modelo lineal múltiple, de acuerdo con los datos obtenidos de coeficiente de fricción de las probetas modificadas y no modificadas superficialmente con (TiN) mediante la técnica HIPIMS, al ser sometidas a la prueba tribológica de pin sobre disco.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 \quad (18)$$

Donde Y (variable independiente) corresponde al coeficiente de fricción y X1, X2 (variables dependientes) conciernen a la combinación superficial y fuerza normal aplicada, respectivamente. La especificación de la combinación superficial se muestra en la tabla 47.

Tabla 47. Datos experimentales para el modelo de regresión

	X1	X2	Y
Observaciones	Comb. Superficial	Fuerza aplicada	Coefficiente de fricción
1	1	10	0,3421915
1	1	15	0,24562278
1	1	10	2,90E-01
1	1	15	0,2485527
1	1	10	0,14771898
1	1	15	0,3344968
1	2	10	2,54E-01
1	2	15	0,22721922
1	2	10	0,25093882
1	2	15	2,71E-01
1	2	10	0,25446159
1	2	15	2,44E-01
1	3	10	2,17E-01
1	3	15	0,17148207
1	3	10	2,57E-01
1	3	15	0,31070886
1	3	10	1,95E-01
1	3	15	2,03E-01
1	4	10	0,2747781
1	4	15	0,11733741
1	4	10	0,24801642
1	4	15	0,24932442
1	4	10	0,08688717
1	4	15	0,3066606

A continuación, se presenta la forma matricial, la cual se introduce en el software minitab para realizar el cálculo de la ecuación de regresión múltiple.

Tabla 48. Forma matricial

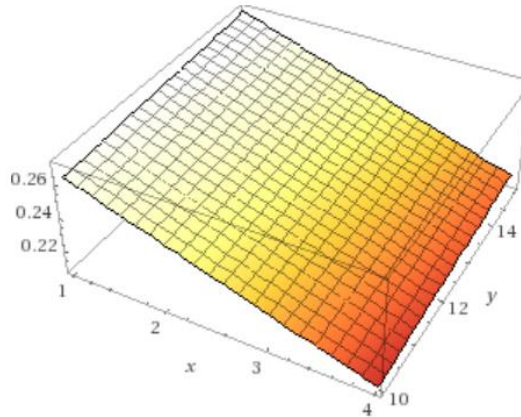
$$Y = \begin{pmatrix} 0,3421915 \\ 0,24562278 \\ 2,90E-01 \\ 0,2485527 \\ 0,14771898 \\ 0,3344968 \\ 2,54E-01 \\ 0,22721922 \\ 0,25093882 \\ 2,71E-01 \\ 0,25446159 \\ 2,44E-01 \\ 2,17E-01 \\ 0,17148207 \\ 2,57E-01 \\ 0,31070886 \\ 1,95E-01 \\ 2,03E-01 \\ 0,2747781 \\ 0,11733741 \\ 0,24801642 \\ 0,24932442 \\ 0,08688717 \\ 0,3066606 \end{pmatrix} \quad X = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 10 \\ 1 & 1 & 15 \\ 1 & 1 & 10 \\ 1 & 1 & 15 \\ 1 & 1 & 10 \\ 1 & 1 & 15 \\ 1 & 2 & 10 \\ 1 & 2 & 15 \\ 1 & 2 & 10 \\ 1 & 2 & 15 \\ 1 & 2 & 10 \\ 1 & 2 & 15 \\ 1 & 3 & 10 \\ 1 & 3 & 15 \\ 1 & 3 & 10 \\ 1 & 3 & 15 \\ 1 & 3 & 10 \\ 1 & 3 & 15 \\ 1 & 4 & 10 \\ 1 & 4 & 15 \\ 1 & 4 & 10 \\ 1 & 4 & 15 \\ 1 & 4 & 10 \\ 1 & 4 & 15 \end{pmatrix}$$

Donde la combinación superficial (pin sr-disco sr, pin cr-disco sr, pin sr-disco cr, pin cr-disco cr) está representada por los números 1, 2, 3, 4, respectivamente.

Por consiguiente, el modelo de regresión múltiple es:

$$C.F = 0,2632 - (0,0187 * \text{Combinación superficial}) + (0,00185 * \text{Fuerza aplicada}) \quad (19)$$

Figura 77. Comportamiento del modelo de regresión múltiple



Los valores de la estimación del coeficiente de fricción mediante la ecuación 19 y los errores de ajuste con el experimento, son presentados en la siguiente tabla.

Tabla 49. Datos modelo de regresión experimental

Comb. Superficial	Fuerza aplicada	Promedio experimental	Predicción	% Error
1	10	0,260023552	0,26293	-1,1177632
1	15	0,276224094	0,27218	1,46406273
2	10	0,253136913	0,24416	3,54626786
2	15	0,24718366	0,25341	-2,5189125
3	10	0,22302381	0,22539	-1,0609585
3	15	0,22855665	0,23464	-2,6616377
4	10	0,20322723	0,20662	-1,6694466
4	15	0,22444081	0,21587	3,81873956

5.4 SUPERFICIE DE RESPUESTA

El propósito inicial de estas técnicas es diseñar un experimento que proporcione valores razonables de la variable respuesta (coeficiente de fricción) y a continuación, determinar el modelo matemático que mejor se ajusta a los datos

obtenidos. El objetivo final es establecer los valores de los factores que optimizan el valor de la variable respuesta por medio de la ecuación 20.

$$y = \beta_0 + X_1\beta_1 + X_2\beta_2 + \dots + X_1^2\beta_n + X_1X_2\beta_m + \dots + X_n^tX_m^t \quad (20)$$

El modelo que más se ajusta al experimento se haya por medio del software minitab (ver figura 78), en la cual se muestra que la interacción entre los factores es significativa, donde $p=0,001 < \alpha=0,05$. Al ser significativa la interacción, se acepta el modelo de superficie de respuesta en este experimento.

Figura 78. Calculo de la superficie de respuesta en el software Minitab

Análisis de Varianza

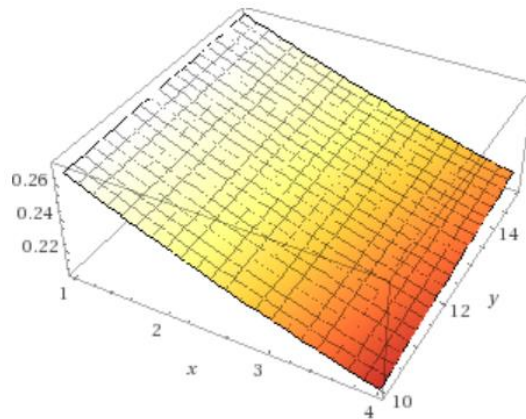
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	4	0,009569	0,002392	4,73	0,008
Lineal	2	0,001607	0,000804	1,59	0,230
X1	1	0,001501	0,001501	2,96	0,101
X2	1	0,000107	0,000107	0,21	0,652
Cuadrado	1	0,000009	0,000009	0,02	0,894
X1*X1	1	0,000009	0,000009	0,02	0,894
Interacción de 2 factores	1	0,007952	0,007952	15,71	0,001
X1*X2	1	0,007952	0,007952	15,71	0,001
Error	19	0,009618	0,000506		
Falta de ajuste	3	0,003515	0,001172	3,07	0,058
Error puro	16	0,006103	0,000381		
Total	23	0,019187			

En consecuencia, la ecuación de superficie de respuesta es la siguiente:

$$C.F = 0,287 - (0,0329 * C.superficial) + (0,0005 * F.aplicada) - (0,0015 * C.superficial^2) - (0,00053 * C.superficial * F.aplicada) \quad (21)$$

En la siguiente figura se puede apreciar el comportamiento de la superficie de respuesta, correspondiente a la estimación del coeficiente de fricción en función de la combinación superficial y la fuerza aplicada de las probetas modificadas superficialmente con TiN por medio de la técnica HIPIMS.

Figura 79. Comportamiento de la superficie de respuesta



Los valores de la estimación del coeficiente de fricción mediante la ecuación 21 y los errores de ajuste con el experimento, son presentados en la siguiente tabla.

Tabla 50. Datos superficie de respuesta

Comb. Superficial	Fuerza aplicada	Promedio experimental	Predicción	% Error
1	10	0,260023552	0,2659	-2,2599675
1	15	0,276224094	0,27105	1,87315086
2	10	0,253136913	0,2428	4,08352653
2	15	0,24718366	0,2506	-1,3821059
3	10	0,22302381	0,2227	0,14519078
3	15	0,22855665	0,23315	-2,0097206
4	10	0,20322723	0,2056	-1,1675453
4	15	0,22444081	0,2187	2,55782805

6. CONCLUSIONES

Se logró aportar conocimiento para el cumplimiento de la misión de la Universidad Industrial de Santander, desarrollando una investigación que consistió en evaluar el desgaste que presenta el material (fundición gris) de una camisa de un motor de combustión interna modificados superficialmente con nitruro de titanio (TiN) proporcionando información contribuirá a mejorar las competencias de la industria y la comunidad académica.

Se pudieron establecer los parámetros de la caracterización del desgaste según la norma ASTM G-99, utilizando una variación de fuerza de 10N y 15N a una velocidad de 165 rpm durante 15 minutos por experimento. Donde se tuvo en cuenta la aproximación de condiciones reales de funcionamiento y la capacidad de la máquina que se utilizó.

Se logró evaluar el desgaste superficial de probetas no modificadas y modificadas superficialmente, mediante el ensayo de caracterización tribológica de pin sobre disco (pin-on-disk) y tras realizar el estudio, se obtuvieron resultados cualitativos y cuantitativos para cada una de las probetas concluyendo que la menor pérdida de masa se produjo en las combinaciones en donde uno de los dos materiales estuvo recubierto, mostrando una mejora significativa en las propiedades tribológicas al ser comparados con la combinación de referencia (Disco y pin sin recubrimiento). En los discos la tasa de desgaste disminuyó en promedio 2.2 veces y en pin 3.3 veces aproximadamente, observando igualmente una disminución en el coeficiente de fricción en estas combinaciones. Resultados que permiten inferir que la aplicación del recubrimiento TiN por medio de la técnica de pulverización por magnetron de impulso de alta potencia (HIPIMS) realizada en el material de la camisa de un motor

de combustión interna, bajo los parámetros definidos en el proyecto, mejoran significativamente las propiedades tribológicas del material en cuestión.

Tras el experimento se pudo observar que el mayor desprendimiento del material ocurre cuando se tienen el disco y pin recubierto, evidenciando en base a la teoría estudiada, que este fenómeno se da por la afinidad química entre los dos materiales produciendo un desgaste mayor por adhesión, supuesto que sugiere deducir el por qué, en la praxis se trata de hacer un revestimiento a los anillos o a las camisas, pero no a ambos, para evitar este inconveniente.

Se observó, que la superficie mayormente desgastada se efectuó a una fuerza de 15N comprobando la relación directa entre fuerza y desgaste existente, ya demostrada experimental y teóricamente por otros autores.

Mediante el estudio superficial utilizando la espectroscopía Raman se reportó un cambio en la composición superficial y enlaces moleculares de la camisa de un motor de combustión interna recubierta con TiN utilizando la técnica de pulverización por magnetron de impulso de alta potencia (HIPIMS), donde se pudo observar, la conservación de 2 bandas de frecuencia, la primera ($220-320\text{ cm}^{-1}$) referente a los fonones longitudinales LA ($170-250\text{ cm}^{-1}$) y transversales TA ($250-345\text{ cm}^{-1}$) que corresponde a las vibraciones de los iones metálicos de Ti y una segunda centrada en 550 cm^{-1} con nodos longitudinales y transversales (LO-TO) propia de las vibraciones de los iones no metálicos del N. Corroborando los resultados obtenidos en diferentes estudios del espectro Raman sobre superficies recubiertas con TiN.

Por medio del análisis de espectroscopía de energía dispersiva EDS y la técnica de espectrometría óptica OES, se analizó la composición del material de la camisa de un motor de combustión interna con y sin recubrimiento de TiN utilizando la técnica de pulverización por magnetron de impulso de alta potencia (HIPIMS),

obteniendo resultados coherentes en cuanto a la composición esperada, para la fundición gris; se observa un alto grado de Fe, además de otros elementos pertenecientes al material adquirido como el C, Si, S, Mn, Cu, P, Cr entre otros. En las superficies recubiertas sin desgastarse se identificó una concentración alta en porcentaje de titanio y nitrógeno, demostrando que las superficies de las probetas fueron modificadas con estas especies en una atmosfera de nitrógeno. Después de realizadas las pruebas, se reportó en las probetas la presencia de titanio y nitrógeno indicando que el recubrimiento no fue eliminado por completo.

El análisis estadístico de varianza ANOVA determinó que existen diferencias significativas entre los discos con y sin modificación superficial, donde se comprobó que el modelo restringido (superficies modificadas con TiN) presenta el mejor comportamiento de resistencia al desgaste. Se infiere que al recubrir el material de una camisa de motor de combustión interna con nitruro de titanio (TiN) en una atmosfera de nitrógeno mediante la técnica HIPIMS, mejora las condiciones tribológicas de la superficie. Por medio del análisis Duncan y teniendo en cuenta que éste nos da información sobre cual combinación superficial es la mejor o la peor (en nuestro caso nos arrojó la peor combinación superficial), se puede evidenciar que, al recubrir las dos superficies en contacto, se genera un mayor desgaste en las probetas a causa de la afinidad química mencionada anteriormente. De acuerdo con lo anterior, se puede concluir que para disminuir el desgaste en los discos recubiertos con nitruro de titanio se deben poner en contacto con pines sin recubrimiento, con el fin de tener una diferencia en la dureza superficial de las probetas.

Las técnicas matemáticas y estadísticas (regresión lineal múltiple y superficie de respuesta) demostraron ser un método efectivo para estimar los coeficientes de fricción presentes en el par tribológico analizado en cada uno de los experimentos, utilizando factores influyentes en el desgaste de las probetas modificadas superficialmente con TiN por medio de la técnica HIPIMS como lo son: la combinación superficial y la fuerza aplicada, generando errores de hasta un 4% en

cada una de las técnicas. En caso de querer disminuir este porcentaje de error es necesario adicionar a los factores anteriormente mencionados la lubricación, la temperatura, la presión de funcionamiento, entre otros.

7. RECOMENDACIONES

Implementar en Colombia un sistema de modificación superficial de deposición física de vapor (PVD) por medio de la técnica magnetrón sputtering de alta potencia (HIPIMS), el cual permita ampliar y fortalecer el desarrollo tecnológico del país.

Analizar la influencia del recubrimiento de nitruro de titanio (TiN) en una atmosfera de nitrógeno de las camisas de motor de combustión interna, utilizando la técnica magnetrón sputtering de alta potencia (HIPIMS) mediante un banco de pruebas dinamométrico.

Teniendo en cuenta que durante el ensayo tribológico de configuración pin sobre disco se presentaron inconvenientes con la aplicación de la fuerza, se recomienda garantizar un mecanizado uniforme en las probetas, para obtener superficies perfectamente paralelas y lisas, con el fin de proveer un desgaste homogéneo.

Utilizar diferentes tipos y métodos de aplicación de recubrimientos en el mismo material para evaluar el comportamiento tribológico.

Utilizar la lubricación como parámetro a variar porque influencia directamente en el desgaste presentado en las camisas de un motor de combustión interna y estudiar el cambio de rugosidad que se presenta en los experimentos ya que, es un factor que ayuda a entender en gran medida el comportamiento tribológico de las superficies en contacto.

BIBLIOGRAFÍA

AGUILAR, M.; GODOY, A. y GÓMEZ, N. Cámaras de combustión y sistemas de distribución de la carga. Cátedra de Máquinas Térmicas I. Provincia de corrientes. Argentina. Universidad del Nordeste. Facultad de Ingeniería. Especialidad Electromecánica. 2001. p. 4.

AIEMPANAKIT, M. Reactive High Power Impulse Magnetron Sputtering of Metal Oxides. En: Linköping Stud. Sci. Technol. 2013. p. 13-15.

Análisis de varianza factorial el procedimiento modelo lineal general: univariante. Capítulo 15. Disponible en: http://pendientedemigracion.ucm.es/info/socivmyt/paginas/D_departamento/materiales/analisis_datosyMultivariable/15anova2_SPSS.pdf.

ANDERS, A. A review comparing cathodic arcs and high power impulse magnetron sputtering (HiPIMS). En: Surface and Coatings Technology. 2014. Vol.257. p. 308-325.

BADINI, C. et al. Thermal Shock and Oxidation Behavior of HiPIMS TiAlN Coatings Grown on Ti-48Al-2Cr-2Nb Intermetallic Allo. En: Jordi Sort. 2016. p. 1-20.

BAKIEVA, J.; GONZÁLEZ, J. y JORNET, J. SPSS: ANOVA de un Factor. Grupo de Investigación Educativa Universidad de Valencia. Disponible en: https://www.uv.es/innomide/spss/SPSS/SPSS_0702b.pdf.

BARROS, H. y MORAN, D. Reparación de un motor de combustión interna 1.3 fire. Tesis de grado Tecnólogo en Mecánica Automotriz. Guayaquil. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Programa de Tecnología Macénica. 2014. p. 14-24.

BAYER, Raymond. Engineering design for wear. 2004. 2nd edición. p. 45-127.

BLAU, J. A Review of sub-Scale Test Methods to evaluate the Friction and Wear of Ring and Liner Materials for Spark- and Compression Ignition Engines. En: OAK Ridge National Laboratory. 2001.

BLAU, Peter. The significance and use of the friction coefficient. En: Tribology International. 2001. Vol.34. p. 585-591.

BOLÍVAR, F.; BEJARANO, G. y GÓMEZ, M. influencia de los recubrimientos dúplex sobre las propiedades mecánicas y resistencia al desgaste del acero aisi 4140 bonificado. En: Revista EIA . scieloco. 2013. p. 151-160.

CARL, C. Nanocomposite W-C:H Diamond-like carbon coatings. En: Strondl. C. G. C. 2007. p. 130.

CARMO, P. y RIBEIRO, B. New advances in vehicular technology and automotive engineering. En: InTech. 2012.

CASANOVA, J. y AGUIRRE, V. Banco de pruebas para medida de fricción en pistones. En: Rev. Iberoam. Ing. Mecánica. 2005. Vol.9. p. 79-94.

CELSO, E. Sistemas Magnéticos Artificiales obtenidos mediante Pulverización Catódica: Películas Delgadas Amorfas de TbFe y Multicapas de Ni/Co. Trabajo de grado Doctor en ciencias Físicas. Madrid. Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Fí. p. 13-38.

CERRO, E.; LÓPEZ, L. y MARCO, R. La Macrografía como Método de Análisis y Prevención de Roturas en Servicio. Caso Práctico: Camisas de Cilindro. En: Grup. Investig. TEMATMA "Tecnología Mater. y Medio Ambient. 2013. p. 1-8.

CHENG, Y. et al. Substrate bias dependence of Raman spectra for TiN films deposited by filtered cathodic vacuum arc. En: J. Appl. Phys. 2002. Vol.92. No.4. p. 1845-1849.

CHO, S. y YUN, J. The friction force of piston assembly in an IDI diesel engine. En: International Journal of Vehicle Design. 1998. Vol.19. p. 50-64.

CROUSE, William. Mecánica del automovil. Marcombo. 1993. 3ra Edición. p. 38-60.

DAMON, W. et al. Experimental design, ANOVA, and regression. En: New York, NY (EUA). Harper Row. 1987. p. 508.

Database of Raman spectroscopy, X-ray diffraction and chemistry of minerals. En línea. Rruff.info. Retrieved 30 January 2017. Disponible en: <http://rruff.info/>.

DE FARIA, D. L. A.; SILVA, V. y OLIVEIRA, M. T. Raman Microspectroscopy of Some Iron Oxides and Oxyhydroxides. En: Journal of raman spectroscopy. 1997. p. 873-878.

DE LOS ARCOS, T. et al. Description of HiPIMS plasma regimes in terms of composition, spoke formation and deposition rate. En: Plasma Sources Sci. Technol. 2014. Vol.23. p. 10.

DE SOUSA, R. et al. Thin Tin and Tio₂ Film Deposition in Glass Samples by Cathodic Cage. En: Materials Research. 2015. Vol.18. scielso. p. 347-352.

DLUGOŠ, J. Computational Modelling of Piston Ring Dynamics in 3D. En: Journal of Middle European Construction and Design of Cars. 2004. Vol.12. p. 1-7.

DURSUNKAYA, D. et al. Experimental and Numerical Investigation of Inter-Ring Gas Pressures and Blowby in a Diesel Engine. En: SAE International. 1993.

EAKURI, Y.; SOEJIMA, M.; KITAHARA, T.; MAEDA, T.; XU, S. y FUJISAKI, K. Experimental studies on friction and scuffing resistance of ceramics for cylinder liner and piston ring. En: JSME. 1991. Vol.34. p. 271-277.

EHIASARIAN, A. High-power impulse magnetron sputtering and its applications. En: Pure Appl. Chem. 2010. Vol.82. p. 1247-1248.

ERDEMIR, A. Review of engineered tribological interfaces for improved boundary lubrication. En: Tribology International. 2005. Vol.38. p. 249-256.

Espectroscopía Raman. Pontificia Universidad Católica de Chile. Instituto de Física. Centro Avanzado de Microscopía para la caracterización de materiales de interés industrial usando radiación láser. Disponible en: <http://fisica.uc.cl/espectroscopia-raman>.

ESTADÍSTICA APLICADA. PRÁCTICAS CON SPSS. Disponible en: http://www.ugr.es/~metcuant/asignaturas/docencia/estadisticaaplicada/SPSS/SPSS_T2.pdf.

ESTADÍSTICA APLICADA. PRÁCTICAS CON SPSS. Disponible en: http://www.ugr.es/~metcuant/asignaturas/docencia/estadisticaaplicada/SPSS/SPSS_T2.pdf.

ETSION, I. y SHER, E. Improving fuel efficiency with laser surface textured piston rings. En: Tribology International. 2009. Vol.42. p. 542-547.

FERRARESE, A. et al. Piston Ring Tribological Challenges on the Next Generation of Flex-fuel Engines. En: SAE Int. J. Engines. 2010. Vol.3. p. 85-91.

GONZÁLEZ, J. Identificación automática de Espectros Raman de pigmentos mediante Análisis por Componentes Principales. Proyecto de grado. Cataluña. Universidad Politécnica de Catalunya. 2011. p. 59-111.

GOTO, T.; AOYAMA, S.; NAGUMO, S.; NAKAJIMA, Y. y ONODA, M. et al. Measurement of Piston and Piston Ring Assembly Friction Force. En: SAE Technical Paper 851671. 1985.

HALLMAN, R. A Study of TiN Coatings on Medical Implants Deposited by HiPIMS. En: Luleå Univ. Technol. Dep. Eng. Sci. Math. 2011. p. 92.

HAQUE, T.; MORINA, A. y VEVILLE, A. Influence of friction modifier and antiwear additives on the tribological performance of a non-hydrogenated DLC coating. En: Surface and Coatings Technology. 2010. Vol.204. p. 4001-4011.

HAUZER, T. C. Magnetron sputtering-HIPIMS. IHI Group. Disponible en: <http://www.hauzertechnocoating.com/en/plasma-coating-explained/magnetron-sputtering/>.

HUTCHINGS, I. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials (Metallurgy & Materials Science). Butterworth. 1992.

IDEAM. Pronosticos y alertas. 2017. Disponible en: <http://www.pronosticosyalertas.gov.co/pronosticos>.

IGARTUA, A. et al. Biolubricants and triboreactive materials for automotive applications. En: Tribology International. 2009. Vol.42. p. 561-568.

JOHANSSON, S.; NILSSON, P.; OHLSSON, R. y ROSÉN, B. Experimental friction evaluation of cylinder liner/piston ring contact. En: *Wear*. June 2011. Vol.271. p. 625-633.

KOCH, F.; GEIGER, U.; HERMSEN, F. PIFFO - Piston Friction Force Measurements During Engine Operation. En: SAE Technical Paper 960306, 1996.

KOUZNETSOV, V. et al. A novel pulsed magnetron sputter technique utilizing very high target power densities. En: *Surface and Coatings Technology*. 1999. Vol.122. p. 290-293.

LAKSHMINARAYANAN, P. y NAYAK, N. Tribological Tests to Simulate Wear on Piston Rings. En: *Critical Component Wear in Heavy Duty Engines*, John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd. 2011. Vol.11. p. 167-195.

LIMA, L. et al. Numerical analysis of the influence of film thickness and properties on the stress state of thin film-coated piston rings under contact loads. En: *Surface and Coating Technology*. 2013. Vol.215. p. 327-333.

LIN, J.; WEI, R.; BITSIS, D. y LEE, P. Development and evaluation of low friction TiSiCN nanocomposite coatings for piston ring applications. En: *Surface and Coatings Technology*. 2016. Vol. 298. p. 121-131.

LIU, P.; YUAN, C. y GUO, Z. Effects of large process structure of cylinder liner on friction of cylinder liner-piston ring. En: *Prognostics and System Health Management conference*. 2011. p. 1-6.

LUO, Q.; YANG, S. y COOKE, H. Hybrid HIPIMS and DC magnetron sputtering deposition of TiN coatings: Deposition rate, structure and tribological properties. En: *Surf. Coatings Technol.* 2013. Vol.236. p. 13-21.

MARTYR, A. y PLINT, M. Engine Testing Theory and Practice. Butterwoorth Heinemann. Tercera edición. 2007. p. 354-368.

MATSUE, T.; HANABUSA, T. y IKEUCHI, Y. Dependence to processing conditions of structure in TiN films deposited by arc ion plating. En: Vacuum. 2004. Vol.74. p. 647-651.

MAYRHOFER, P.; KUNC, F.; MUSIL, J. y MITTERER, C. A comparative study on reactive and non-reactive unbalanced magnetron sputter deposition of TiN coatings. En: Thin Solid Films. 2002. Vol.415. p. 151-159.

MecanicaFacil. Disponible en: <http://www.mecanicafacil.info/Piston.html>.

MELO, Catalina. Evaluación del uso de la técnica de espectroscopía de reflectancia sobre superficies de fundición de hierro gris para mediciones de corrosión. Tesis de maestría para optar el título de Magíster en Ingeniería- Materiales y Procesos. Bogotá. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Mecánica y mecatrónica. 2016. p. 46-49.

MITTLER, R.; MIERBACH, A. y RICHARDSON, D. Understanding the Fundamentals of Piston Ring Axial Motion and Twist and the Effects on Blow-By. En: Proceedings of the ASME Internal Combustion Engine Division 2009 Spring Technical Conference. 2009. p. 721-735.

MONTOYA, J. Producción y caracterización de películas delgadas de $\text{YBaCo}_4\text{O}_{7+\delta}$ por medio de pulverización catódica (sputtering) a presiones altas de oxígeno. Trabajo optar al título de Magíster en Ingeniería –Ingeniería de Materiales y Procesos. Medellín. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Facultad de minas. 2010. p. 20-26.

MORITANI, H.; TOKORO, H.; TOHYAMA, M.; MORI, H. et al. Challenge to the Diesel Engine Lubrication with Fuel. En: SAE Technical Paper 2007-01-1978. p. 1587-1588.

MORRIS, N.; RAHMANI, N.; RAHNEJAT, H. et al. Tribology of piston compression ring conjunction under transient thermal mixed regime of lubrication. En: Tribology International. 2013. Vol.59. p. 248-258.

MUFTI, R. y PRIEST, M. Experimental Evaluation of Piston-Assembly Friction Under Motored and Fired Conditions in a Gasoline Engine. En: Journal of Tribology. 2004. Vol.127. p. 826-836.

MUÑOZ, A. Análisis estructural, superficial y tribológico de recubrimientos de nitruro de cromo (CrN) sintetizado por magnetrón sputtering reactivo DC. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias-Físicas. Manizales. Universidad nacional de colombia. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Laboratorio de Física del Plasma. 2011. p. 21-32.

NEVSHUPA, R.; CONTE, M. et al. Analysis of tribochemical decomposition of two imidazolium ionic liquids on Ti-6Al-4V through Mechanically Stimulated Gas Emission Spectrometry. En: Tribology International. 2016. Vol.102. p. 19-27.

NOORMAN, M.; ASSANIS, D. et al. Overview of Techniques for Measuring Friction Using Bench Tests and Fired Engines. En: SAE Internationa. 2000.

OSPINA, L. y ZAPATA, S. Ensamble de un banco de pruebas de fricción a un motor de combustión interna mono-cilíndrico. Trabajo de grado Tecnólogo Mecánico. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnología. Escuela de Tecnología Mecánica. 2015. p. 13-30.

PEDROCHE, G. Fabricación y caracterización de wolframio nanoestructurado como material de primera pared en reactores de fusión nuclear. Trabajo de grado en Ingeniería de la Energía. Escuela técnica superior de Ingenieros Industriales. Departamento de Ingeniería Nuclear. 2014. p. 59-103.

PEREZ, G. Espectrometría de emisión. ESPECTROMETRIA.COM. 2007. Disponible en: http://www.espectrometria.com/espectrometra_de_emisin. [En línea] Plasma Applications Group. Berkeley Lab. Disponible en: <http://pag.lbl.gov/Research-Topics/high-power-impulse-magnetron-sputtering>.

PORTILLA, Luis. Influencia de la modificación superficial con iones de titanio y nitrógeno en materiales utilizados en la fabricación de pistones de motocicleta. Proyecto de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2017. p. 22-25.

PROFITO, F.; TOMANIK, E. y ZACHARIADIS, D. Effect of cylinder liner wear on the mixed lubrication regime of TLOCs. En: Tribology International. 2016. Vol.93. Part B. p. 723-732.

RAMÍREZ, J. y BASANTES, J. Elaboración de material didáctico en un motor de combustión interna de 4 tiempos en corte con caja de cambios. Tesis Licenciado en Electromecánica Automotriz. Quito. Universidad San Francisco de Quito. Colegio de Ciencias e Ingeniería. 2013. p. 8-68.

Rauscher, J. Vozidlové motory. En: VUT FSI Brno. 2004.

RICHARDSON, D. Review of Power Cylinder Friction for Diesel Engines. En: J. Eng. Gas Turbines Power. 2000. Vol.122. p. 506-519.

RODRÍGUEZ, D. Evaluación teórica del incremento del rendimiento del motor McCULLOCH MC-92 con la utilización de recubrimientos cerámicos en la cámara de combustión. Trabajo de grado Ingeniero Aeronáutico. Bogotá. Universidad de San Buenaventura. Facultad de ingeniería. Programa de Ingeniería Aeronáutica. 2007. p. 24-65.

ROSÉN, C. et al. Liner surface improvements for low friction piston ring packs. En: Surface Topography: Metrology and Properties. 2014. Vol. 2. p. 14009.

RUDAS, J.; GÓMEZ, L. y TORO, A. Modelamiento del proceso de desgaste de un tribómetro pin-disco: Flash temperature y mecanismos de disipación. En: ITECKNE. 2013 vol. 10. p. 199–208.

RUPERT, G y MILLER, J. Beyond ANOVA basics of applied statistics. Chapman & Hall/CRC Texts in Statistical Science. 1997.

SÁNCHEZ, J. Deposición de capas constituyentes de estructuras multicapa con funciones controlables eléctricamente. Universidad de Zaragoza. Departamento de Física Aplicada. 2006. p. 8-32.

SÁNCHEZ, J. Deposición de capas constituyentes de estructuras multicapa con funciones controlables eléctricamente. Universidad de Zaragoza. Departamento de Física Aplicada. 2006. p. 8-32.

SHIMIZU, T. et al. HIPIMS deposition of TiAlN films on inner wall of micro-dies and its applicability in micro-sheet metal forming. En: Surf. Coatings Technol. 2014. Vol.250. p. 44-51.

SURPI, A. et al. HiPIMS deposition of TiOx in an industrial-scale apparatus: Effects of target size and deposition geometry on hysteresis. En: Surf. Coatings Technol. 2013. Vol.235. p. 714-719.

TAMAYO, I. ANÁLISIS DE VARIANZA CON SPSS 8.0. Disponible en: http://www.ugr.es/~imartin/TEMA5_ANOVA.pdf.

TAYLOR, R. et al. Lubrication, Tribology & Motorsport. En: SAE Technical Paper 2002-01-3355. p. 1-16.

TING, L. et al. A Review of Present information on Piston Ring Tribology. En: SAE Technical Paper 852355, 1985.

Tipos de aros de pistón y sus funciones. En: Actualidad motor. 2009. Disponible en: <https://www.actualidadmotor.com/tipos-de-aros-del-piston-y-sus-funciones/>.

TUNG, S. y TSEREGOUNIS, S. An Investigation of Tribological Characteristics of Energy-Conserving Engine Oils Using a Reciprocating Bench Test. En: SAE International. 2000.

URAS, H. y PATTERSON, D. Measurement of Piston and Ring Assembly Friction Instantaneous IMEP Method. En: SAE International 830416. 1983.

VILLAR, G. y REY, C. Diseño y construcción de una máquina Pin sobre Disco (Pin on Disk), Para realizar ensayos de desgaste. Trabajo de grado Ingenieros Mecánicos. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad Fisicomecánicas. Programa de Ingeniería Mecánica, 2009. p. 32-48.

ZABALA, B.; IGARTUA, A. et al. Friction and wear of a piston ring/cylinder liner at the top dead centre: Experimental study and modelling. En: Tribology International. 2017. Vol.106. p. 23-33.

ZAVOS, A. y NIKOLAKOPOULOS, P. Simulation of piston ring tribology with surface texturing for internal combustion engines. En: Lubrication Science. 2015. Vol.27. p. 151-176.

ZHANG, Y.; ZHANG, Z.; WU, T y XIE, Y. Effects of surface texturing on the tribological behavior of piston rings under lubricated conditions. En: Industrial Lubrication and Tribology. 2016. Vol.68. p. 158-169.

ZHENYU, W. et al. Influence of Substrate Negative Bias on Structure and Properties of TiN Coatings Prepared by Hybrid HIPIMS Method. En: Journal of Materials Science and Technology. 2015. Vol.31. p. 37-42.

ZHOU, H. et al. AlTiCrN coatings deposited by hybrid HIPIMS/DC magnetron co-sputtering. En: Vacuum. 2017. Vol.136. p. 129-136.

ANEXOS

Anexo A. Formulación matemática que rigen el modelo del experimento unifactorial completamente aleatorio

Suponiendo que se tienen a diferentes niveles de un factor particular (tratamiento) que se quieren comparar. La respuesta para cada uno de los a tratamientos es una variable aleatoria. En la tabla 51 se representa el arreglo típico de un experimento unifactorial completamente aleatorio.

Tabla 51. Arreglo de un experimento completamente aleatorio

Tratamiento	Observaciones				Totales	Promedios
1	y11	y12	...	y1n	y1.	$\bar{y}_1.$
2	y21	y22	...	y2n	y2.	$\bar{y}_2.$
.
.
.
a	ya1	ya2	...	Yan	ya.	$\bar{y}_a.$
					y..	$\bar{y}..$

En la ecuación 22 se representa la sumatoria de las observaciones de cada tratamiento de la tabla 51.

$$y_i. = \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad (22)$$

Donde $i = 1, 2, \dots, a$

En la ecuación 23 es el resultado de la fracción entre la sumatoria de las observaciones de cada tratamiento y el número de factores.

$$\bar{y}_i = \frac{y_{i.}}{n} \quad (23)$$

La siguiente ecuación es la suma de los totales de cada tratamiento

$$y_{..} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad (24)$$

El cociente entre la suma de los totales de cada tratamiento y el número de observaciones realizadas se representa en la ecuación 25.

$$\bar{y}_{..} = \frac{y_{..}}{N} \quad (25)$$

$$N = a \cdot n \quad (26)$$

Donde N es el número total de observaciones, a es el número de tratamientos y n es el número de réplicas de cada tratamiento.

En la siguiente ecuación se describe el modelo estadístico o modelo de efectos

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad (27)$$

Donde y_{ij} es una variable aleatoria que denota la observación ij-ésima, μ es la media global y es un parámetro común en los tratamientos, τ_i es el efecto de tratamiento i-ésimo y ε_{ij} es un componente de error aleatorio.

En la siguiente ecuación se muestra la sumatoria de cuadrados de los 12 valores tabulados en la tabla 2 menos el cociente entre la suma de los totales al cuadrado y el número total de observaciones.

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{N} \quad (28)$$

En esta ecuación se tiene la sumatoria de cuadrados de los totales de cada tratamiento, multiplicada por la fracción 1/n y a todo se le resta el cociente entre la suma de totales al cuadrado y el número total de observaciones.

$$SS_{TRATAMIENTOS} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a y_{i.}^2 - \frac{y_{..}^2}{N} \quad (29)$$

La ecuación que se tiene a continuación es la diferencia entre los valores antes calculados.

$$SS_E = SS_T - SS_{TRATAMIENTOS} \quad (30)$$

La siguiente ecuación representa el cociente entre la suma de cuadrados de los tratamientos y los grados de libertad del tratamiento (a-1).

$$MS_{TRATAMIENTOS} = \frac{SS_{TRATAMIENTOS}}{a - 1} \quad (31)$$

Y en la siguiente ecuación se encuentra la relación entre la suma de cuadrados del error y los grados de libertad del error (N-a).

$$MS_E = \frac{SS_E}{N - a} \quad (32)$$

En la siguiente tabla se representa la disposición de datos en un análisis de varianza, con el fin de calcular el parámetro F_0 y compararlo con un factor de tablas (F_t) que sale de las tablas estadísticas ANOVA con una significancia de $\alpha = 0.05$, con el objetivo de aprobar o no la hipótesis.

Tabla 52. Análisis de varianza para modelo unifactorial y efectos fijos

Fuente de variación	de	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F0
Entre tratamientos	los	SSTRATAMIENTOS	a-1	MSTRATAMIENTOS	$F_0 = \frac{MS_{TRATAMIENTOS}}{MS_E}$
Error (dentro de los tratamientos)		SSE	N-a	MSE	
Total		SST	N-1		

Anexo B. Formulación matemática que rigen el modelo del experimento factorial

En un diseño experimental factorial, los ensayos se realizan para todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores. Teniendo dos factores fijos (A y B) se toman específicamente los a niveles del factor A y los b niveles del factor B, el experimento contiene n repeticiones y cada repetición contiene todas las combinaciones ab. En la tabla 53 se representa el arreglo general de un diseño factorial.

Tabla 53. Arreglo de un experimento factorial

		Factor B				Totales	Promedios
		1	2	...	b		
Factor A	1	y ₁₁₁ , y ₁₁₂ , ..., y _{11n}	y ₁₂₁ , y ₁₂₂ , ..., y _{12n}	...	y _{1b1} , y _{1b2} , ..., y _{1bn}	y _{1..}	$\bar{y}_{1..}$
	2	y ₂₁₁ , y ₂₁₂ , ..., y _{21n}	y ₂₂₁ , y ₂₂₂ , ..., y _{22n}	...	y _{2b1} , y _{2b2} , ..., y _{2bn}	y _{2..}	$\bar{y}_{2..}$

	A	y _{a11} , y _{a12} , ..., y _{a1n}	y _{a21} , y _{a22} , ..., y _{a2n}	...	y _{ab1} , y _{ab2} , ..., y _{abn}	y _{a..}	$\bar{y}_{a..}$
Promedios totales		y ₁ $\bar{y}_{1.}$	y _{2.} $\bar{y}_{2.}$...	y _{b.} $\bar{y}_{b.}$	y _{..}	$\bar{y}_{..}$

El arreglo general de un diseño factorial se lleva a cabo aplicando cada una de las siguientes ecuaciones. En la siguiente ecuación se observa el total de cada una de las observaciones bajo el nivel i-ésimo del factor A.

$$y_{i..} = \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad i = 1, 2, \dots, a \quad (33)$$

El cociente (promedio en el nivel i del factor A) entre la suma total y el número de observaciones que se encuentra en cada fila se representa en la siguiente ecuación.

$$\bar{y}_{i..} = \frac{y_{i..}}{bn} \quad (34)$$

En la siguiente ecuación se observa el total de cada una de las observaciones bajo el nivel i -ésimo del factor B.

$$y_{j..} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad j = 1, 2, \dots, b \quad (35)$$

El promedio entre el nivel j del factor B se observa en la siguiente ecuación.

$$\bar{y}_{j..} = \frac{y_{j..}}{an} \quad (36)$$

La ecuación 37 arroja el total de la celda ij -ésima (el total de las observaciones de cada nivel de los factores).

$$y_{ij} = \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad (37)$$

Al igual que el experimento unifactorial, para el experimento factorial existe una ecuación que describe el modelo estadístico y se muestra a continuación.

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (38)$$

Dónde los parámetros τ_i , β_j , $(\tau\beta)_{ij}$ y ε_{ijk} son variables aleatorias y μ es el efecto promedio global. Específicamente, τ_i es el efecto del nivel i -ésimo de las filas, β_j es el efecto del nivel j -ésimo de las columnas, $(\tau\beta)_{ij}$ es el efecto de la interacción entre los dos parámetros antes mencionados y ε_{ijk} es un componente de error aleatorio.

En la siguiente ecuación se muestra la sumatoria de cuadrados de los 12 valores tabulados en la tabla 3 menos el cociente entre la suma de los totales al cuadrado y el producto entre n y el número de niveles de cada factor.

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (39)$$

En esta ecuación se tiene la sumatoria de cuadrados de los totales de cada nivel del factor A, multiplicada por la fracción $1/bn$ y a todo se le resta el cociente entre la suma de los totales al cuadrado y el producto entre n y el número de niveles de cada factor.

$$SS_A = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a y_{i...}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (40)$$

En la siguiente ecuación se tiene la sumatoria de cuadrados de los totales de cada nivel del factor B, multiplicada por la fracción $1/an$ y a todo se le resta el cociente entre la suma de los totales al cuadrado y el producto entre n y el número de niveles de cada factor.

$$SS_B = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b y_{j...}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (41)$$

La ecuación 42 se muestra la suma de los cuadrados de los subtotales.

$$SS_{subtotales} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (42)$$

La ecuación que se tiene a continuación es la diferencia entre la suma de cuadrados subtotales y la suma de cuadrados de cada factor.

$$SS_{AB} = SS_{subtotales} - SS_A - SS_B \quad (43)$$

Por último, se tiene la ecuación de la suma de cuadrados del error que es la diferencia entre la suma de cuadrados totales, la suma de cuadrados de las interacciones y la suma de cuadrados de cada factor.

$$SS_E = SS_T - SS_{AB} - SS_A - SS_B \quad (44)$$

En la siguiente tabla se representa la disposición de datos en un análisis de varianza, con el fin de calcular el parámetro F_0 de cada factor y compararlo con un factor de tablas (Ft) que sale de las tablas estadísticas ANOVA con una significancia de $\alpha = 0.05$, con el objetivo de aprobar o no la hipótesis.

Tabla 54. Análisis de varianza para modelo factorial de dos factores

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F0
Tratamiento A	SSA	a-1	$MS_A = \frac{SS_A}{a-1}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
Tratamiento B	SSB	b-1	$MS_B = \frac{SS_B}{b-1}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
Interacción	SSAB	(a-1)(b-1)	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Error	SSE	ab(n-1)	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n-1)}$	
Total	SST	abn-1		

Anexo C. Ficha técnica de los materiales utilizados para la fabricación de las probetas.



FICHA TÉCNICA : FUNDICIÓN DE HIERRO GRIS CENTRIFUGADA

APLICACIÓN

Es utilizado para la fabricación de camisas de cilindro y asientos de válvula para motores de combustión interna, y para la fabricación de camisas para cilindros compresores reciprocantes, bombas y otros componentes industriales.

IDENTIFICACIÓN DE LAS COLADAS

Se maneja una codificación de cuatro dígitos, así por ejemplo para la colada 8014:

El primer dígito	Es el año de fabricación del producto. Ejemplo: 2008.
Los tres últimos dígitos	Son el número de colada del año. Ejemplo: La colada de Febrero 18 puede ser la colada número 014 del año.

REFERENCIAS TÉCNICAS

Nos basamos por lo establecido en las normas: ICONTEC-NTC1448 y ASTM A48, que describen las principales características de composición y propiedades físico-mecánicas de este tipo de material.

COMPOSICIÓN QUÍMICA

Elemento	C	Si	S	P	Mn	Cr	Cu	Ni	Mo
Mínimo	3,00	1,80	0,08		0,40		0,25		
Máximo	3,60	2,80	0,12	0,15	1,20	0,30	0,35	0,25	0,25

PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS

Resistencia a la Tracción	35,000 - 40,000 libras por pulgada cuadrada
Dureza [†]	245 - 285 HB
Microestructura	
Grafito	Laminar de tipo A y B. No hay presencia de grafito tipo E.
Tamaño	Las láminas de grafito están dentro de los tamaños 4 a 8.
Matriz	La matriz es perlítica en un 97%.
Ferrita	Máximo 2% de Ferrita libre
Esteadita	Mínima presencia de esteadita, uniformemente distribuida

[†] Para material Highper , Dureza entre 260 – 290 HB



Esta información está actualizada a Noviembre de 2.008 y anula cualquier información anterior al respecto.

DIRECCIÓN DE CALIDAD

INDUSTRIAS LAVCO LTDA.

www.lavco.com.co

Km. 4 Autopista Floridablanca Piedecuesta, Bucaramanga - Colombia

PBX: (57-7)6381921 - (57-7)6395139 Fax: (57-7)6384993

E-mail: info@lavco.com.co



Certificado

CERTIFICADO DE CALIDAD

№.: 10012

Cliente.....: 400109 - INSUMOS METALURGICOS LTDA.
Ciudad.....: MEDELLIN - EX
Factura Comercial: * 10004356
Codigo Tupy.....: 710200604
Fecha de Fusión...: 04.01.2016
Fecha.....: 16.03.2016
Cantidad: 5
Descripción: REDONDO 27,6 X 1880 MM FC200
Clase.....: CLASS 35 ASTM A 48

RESULTADOS

1 - COMPOSICIÓN QUÍMICA (%)

C	-	3,5000	-	3,7000	SI	-	2,5100	-	2,7000
Mn	-	0,5000	-	0,5000	P	-	0,0750	-	0,0810
S	-	0,1200	-	0,1200	Cr	-	0,1000	-	0,1000
Cu	-	0,1000	-	0,1000					

2 - DUREZA BRINELL (HB)

Periferia	Nucleo
182 - 219	201 - 226

3 - MICROESTRUCTURA

MAIRIZ Ferrita.....: 20 (%)
Perlita.....: 80 (%)
Carburos.....: 0 (%)

GRAFITO Forma.....: VII
Tipo.....: A-D
Tamaño.....: 7-8

4 - ENSAYOS MECANICOS

Resistencia a la tracción: 236 MPa

Obs.: Los cuerpos de prueba para la Analisis de Metalografia y Ensayos Mecánicos son sacados de la barra en la seccion medio rayo.

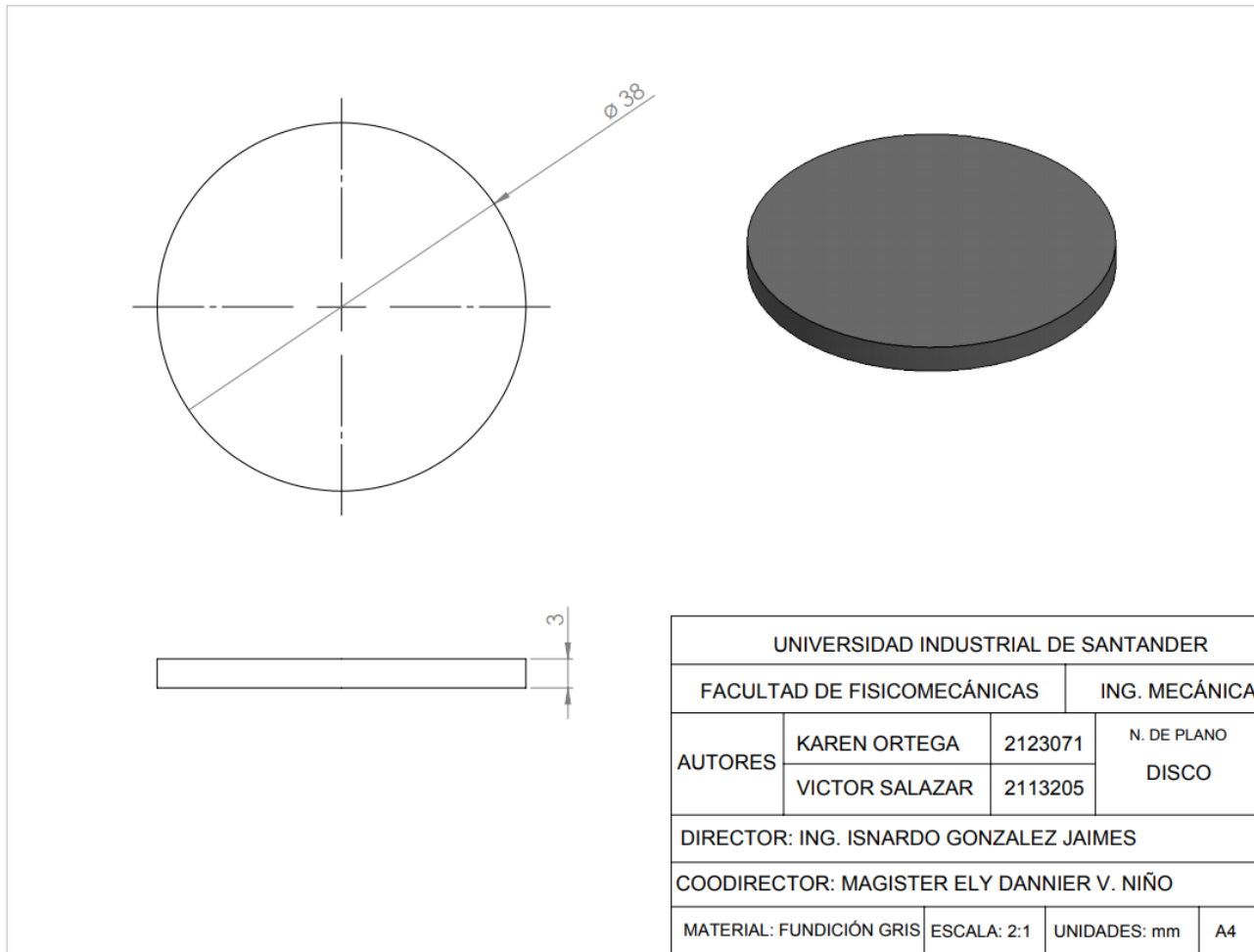
5 - CONTROL DIMENSIONAL (mm)

27,5 - 27,9

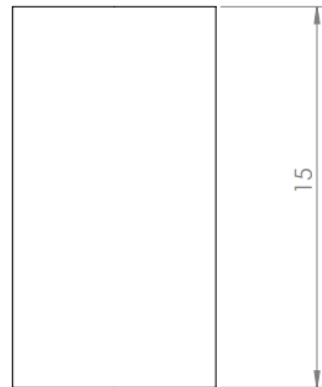
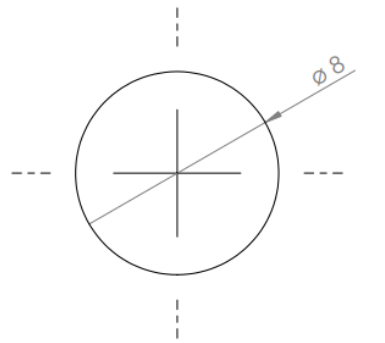
Ingeniería Productos, Procesos y Calidad

APROBADA POR INGENIERA WATZLIVA KILBASA

Anexo D. Planos en CAD de las probetas fabricadas



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER			
FACULTAD DE FISICOMECAÑICAS			ING. MECANICA
AUTORES	KAREN ORTEGA	2123071	N. DE PLANO DISCO
	VICTOR SALAZAR	2113205	
DIRECTOR: ING. ISNARDO GONZALEZ JAIMES			
COODIRECTOR: MAGISTER ELY DANNIER V. NIÑO			
MATERIAL: FUNDICIÓN GRIS	ESCALA: 2:1	UNIDADES: mm	A4



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER			
FACULTAD DE FISICOMECÁNICAS		ING. MECÁNICA	
AUTORES	KAREN ORTEGA	2123071	N. DE PLANO PINE
	VICTOR SALAZAR	2113205	
DIRECTOR: ING. ISNARDO GONZALEZ JAIMES			
COORDIRECTOR: MAGISTER ELY DANNIER V. NIÑO			
MATERIAL: FUNDICIÓN GRIS	ESCALA: 2:1	UNIDADES: mm	A4

Anexo E. Norma ASTM G99



Designation: G 99 – 95a (Reapproved 2000)^{ε1}

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.

^{ε1} 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 _a (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	martensitic with minor carbides and austenite	838 ± 21	0.100	0.010
Steel disc (100 Cr6) (AISI 52 100) ^C Diameter 40 mm	← <0.030 P ← <0.030 S	martensitic with minor carbides and austenite	852 ± 14	0.952	0.113
Alumina ball, diameter = 10 mm ^D	← 95 % Al ₂ O ₃ (with addi- tives of TiO ₂ ,	equi-granular alpha alumina with very minor secondary phases	1610 ± 101 (HV 0.2)	1.369	0.123
Alumina disc, diameter = 40.6 mm ^D	← MgO and ZnO)		1599 ± 144 (HV 0.2)	0.968	0.041

^A Measured by stylus profilometry. R_p 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.

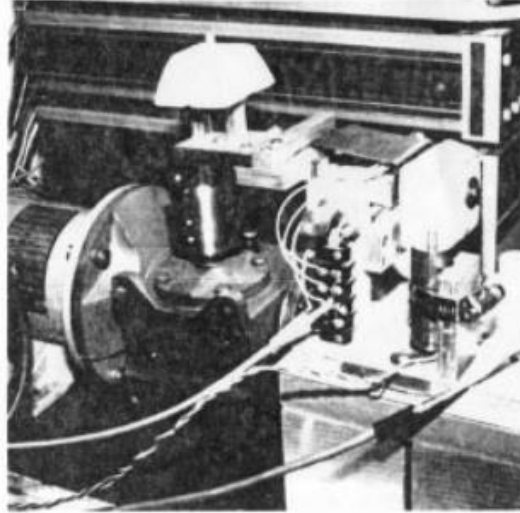
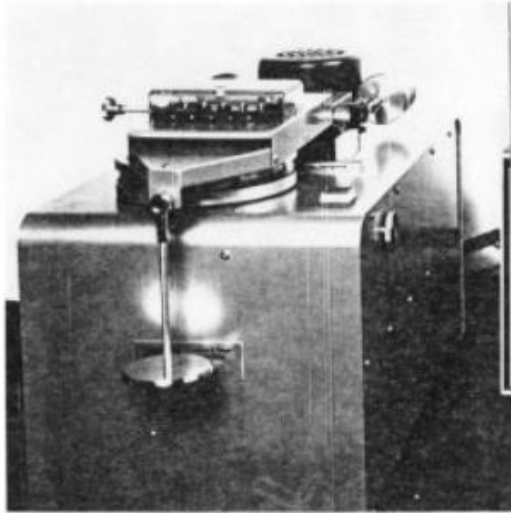
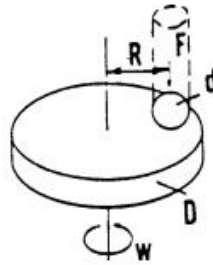
4. Significance and Use

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 w 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 ($\pm 1\%$ 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 (±1°) 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 (±1°) 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:

$$\begin{aligned} \text{pin (spherical end) volume loss, mm}^3 & \quad (1) \\ &= \frac{\pi (\text{wear scar diameter, mm})^4}{64 (\text{sphere radius, mm})} \end{aligned}$$

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.

$$\begin{aligned} \text{disk volume loss, mm}^3 & \quad (2) \\ &= \frac{\pi (\text{wear track radius, mm})(\text{track width, mm})^3}{6 (\text{sphere radius, mm})} \end{aligned}$$

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.

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

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

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 2.8 ×. 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.

⁶ Additional data are available at ASTM Headquarters.

APPENDIX

(Nonmandatory Information)

X1. EQUATIONS

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

X1.1.1 A spherical ended pin:

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

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:

$$\text{disk volume loss} = 2\pi R [r^2 \sin^{-1}(d/2r) - (d/4)(4r^2 - d^2)^{1/2}] \tag{X1.2}$$

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.

Anexo F. Formulación matemática para el análisis del ensayo tribológico por medio del tribómetro *PIN ON DISK*.

El valor de la densidad del material fue obtenido mediante la ecuación 45.

$$\rho = \frac{m}{V} \left(\frac{g}{mm^3} \right) \quad (45)$$

Dónde: m es la masa de la probeta seleccionada y V es el volumen que se calcula con la siguiente ecuación:

$$V = \frac{\pi}{4} * D^2 * H \quad (46)$$

Dónde: $D_{disco} = 38\text{mm}$, diámetro del disco, $H_{disco} = 3\text{mm}$, altura del disco, $D_{pin} = 8\text{mm}$, diámetro del pin, $H_{pin} = 15\text{mm}$, altura del pin.

La distancia recorrida se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$D_R = (2 * \pi * l * n * t) / 1000(m) \quad (47)$$

Dónde: $l = 11 \text{ mm}$, es el radio 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 pérdida de masa se calculó por medio de la siguiente ecuación:

$$m_p = m_i - m_f \quad (48)$$

El volumen perdido de cada muestra se calculó con la siguiente ecuación:

$$V_p = \frac{m_p}{\rho} \text{ (mm}^3\text{)} \quad (49)$$

Dónde: m_p es la masa perdida de cada una de las muestras y ρ es la densidad de pin o disco, lo que corresponda.

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

$$T_D = \frac{V_p}{D_R} \left(\frac{\text{mm}^3}{\text{m}} \right) \quad (50)$$

La resistencia al desgaste se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$R_D = \frac{1}{T_D} \left(\frac{\text{m}}{\text{mm}^3} \right) \quad (51)$$

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 un valor de la fuerza tangencial (fuerza de fricción) por cada fracción de segundo, por ende, el valor del cociente entre la fuerza normal y la fuerza tangencial corresponde al coeficiente de fricción.

$$C_f = \frac{F_T}{F_N} \quad (52)$$

Anexo G. Tabla de resultados del ensayo tribológico por medio del tribómetro PIN ON DISK.

Tabla 55. Parámetros y resultados obtenidos en las pruebas pin sobre disco

Velocidad angular (RPM)	Tiempo de ensayo (min)	Fuerza normal (N)	Probeta	Referencia	Superficie	Masa de la muestra antes del ensayo (g)	Masa de la muestra después del ensayo (g)	Pérdida de masa (g)	Volumen (mm ³)	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)
165	15	10	Disco	1B	Recubierta	26,521	26,5195	0,0015	3402,3448	0,00779492	0,192433063	171,05972	0,00112495	888,931025
165	15	10	Pin	1B	Recubierta	5,388	5,38758	0,00042	753,98224	0,00714606	0,058773671	171,05972	0,00034359	2910,48214
165	15	10	Disco	2B	Recubierta	26,2329	26,22966	0,00324	3402,3448	0,00771024	0,420220307	171,05972	0,00245657	407,071522
165	15	10	Pin	2A	Recubierta	5,30072	5,29905	0,00167	753,98224	0,0070303	0,237543265	171,05972	0,00138866	720,12027
165	15	10	Disco	3A	Recubierta	26,3314	26,33012	0,00128	3402,3448	0,00773919	0,165391943	171,05972	0,00096687	1034,26876
165	15	10	Pin	3B	Recubierta	5,2563	5,25529	0,00101	753,98224	0,00697138	0,144877967	171,05972	0,00084694	1180,7159
165	15	10	Disco	3B	Recubierta	26,33701	26,33695	6E-05	3402,3448	0,00774084	0,007751096	171,05972	4,5312E-05	22069,1012
165	15	10	Pin	10B	S.Recubrir	5,3591	5,3586	0,0005	753,98224	0,00710773	0,070345976	171,05972	0,00041124	2431,69163
165	15	10	Disco	9A	Recubierta	26,76039	26,76038	1E-05	3402,3448	0,00786528	0,001271411	171,05972	7,4326E-06	134543,235
165	15	10	Pin	10A	S.Recubrir	5,31466	5,3143	0,00036	753,98224	0,00704879	0,051072619	171,05972	0,00029857	3349,34302
165	15	10	Disco	5A	Recubierta	26,61645	26,61643	2E-05	3402,3448	0,00782297	0,002556573	171,05972	1,4945E-05	66909,7739
165	15	10	Pin	1B	S.Recubrir	5,38758	5,3875	8E-05	753,98224	0,0071455	0,01195858	171,05972	6,545E-05	15278,8402
165	15	10	Disco	10A	S.Recubrir	26,42442	26,4243	0,00012	3402,3448	0,00776653	0,015450912	171,05972	9,0325E-05	11071,1732
165	15	10	Pin	5B	Recubierta	5,32425	5,3242	5E-05	753,98224	0,00706151	0,007080643	171,05972	4,1393E-05	24158,7844
165	15	10	Disco	1B	S.Recubrir	26,5195	26,51801	0,00149	3402,3448	0,00779448	0,191160988	171,05972	0,00111751	894,846391
165	15	10	Pin	5A	Recubierta	5,31614	5,31591	0,00023	753,98224	0,00705075	0,032620645	171,05972	0,0001907	5243,90984
165	15	10	Disco	3A	S.Recubrir	26,33082	26,3305	0,00032	3402,3448	0,00773902	0,041348896	171,05972	0,00024172	4136,98392
165	15	10	Pin	6B	Recubierta	5,35441	5,35423	0,00018	753,98224	0,00710151	0,025346733	171,05972	0,00014817	6748,7876
165	15	10	Disco	10A	S.Recubrir	26,4243	26,42418	0,00012	3402,3448	0,0077665	0,015450982	171,05972	9,0325E-05	11071,1229
165	15	10	Pin	10B	S.Recubrir	5,3586	5,3584	0,0002	753,98224	0,00710706	0,028141016	171,05972	0,00016451	6078,66188
165	15	10	Disco	5A	S.Recubrir	26,61603	26,616	3E-05	3402,3448	0,00782285	0,00383492	171,05972	2,2419E-05	44605,8121
165	15	10	Pin	10A	S.Recubrir	5,3143	5,3141	0,0002	753,98224	0,00704831	0,028375599	171,05972	0,00016588	6028,40906
165	15	10	Disco	5B	S.Recubrir	26,39543	26,3953	0,00013	3402,3448	0,00775801	0,016756872	171,05972	9,7959E-05	10208,3327
165	15	10	Pin	5B	S.Recubrir	5,324051	5,324051	0,000149	753,98224	0,00706144	0,021100513	171,05972	0,00012335	8106,89849
165	15	15	Disco	2A	Recubierta	26,9263	26,92027	0,00603	3402,3448	0,00791404	0,76193682	171,05972	0,00445422	224,506436
165	15	15	Pin	2B	Recubierta	5,37573	5,37364	0,00209	753,98224	0,00712978	0,293136537	171,05972	0,00171365	583,549638
165	15	15	Disco	4A	Recubierta	26,36023	26,3549	0,00533	3402,3448	0,00774767	0,687949157	171,05972	0,00402169	248,651689
165	15	15	Pin	4B	Recubierta	5,4183	5,41626	0,00204	753,98224	0,00718624	0,283875711	171,05972	0,00165951	602,586673
165	15	15	Disco	4B	Recubierta	26,97123	26,9689	0,00233	3402,3448	0,00792725	0,29392295	171,05972	0,00171825	581,988307
165	15	15	Pin	4A	Recubierta	5,42851	5,42712	0,00139	753,98224	0,00719979	0,193061321	171,05972	0,00112862	886,038278
165	15	15	Disco	5B	Recubierta	26,39878	26,39743	0,00135	3402,3448	0,007759	0,173991584	171,05972	0,00101714	983,149394
165	15	15	Pin	1A	S.Recubrir	5,3904	5,3898	0,0006	753,98224	0,00714924	0,083925004	171,05972	0,00049062	2038,245
165	15	15	Disco	6A	Recubierta	26,39848	26,39635	0,00213	3402,3448	0,00775891	0,274523174	171,05972	0,00160484	623,115774
165	15	15	Pin	2B	S.Recubrir	5,37364	5,37273	0,00091	753,98224	0,00712701	0,127683253	171,05972	0,00074643	1339,71931
165	15	15	Disco	6B	Recubierta	26,68216	26,6821	6E-05	3402,3448	0,00784229	0,007650831	171,05972	4,4726E-05	22358,3197
165	15	15	Pin	2A	S.Recubrir	5,29905	5,29874	0,00031	753,98224	0,00702808	0,044108754	171,05972	0,00025786	3878,13538
165	15	15	Disco	3B	S.Recubrir	26,33695	26,3367	0,00025	3402,3448	0,00774082	0,032296307	171,05972	0,0001888	5296,57222
165	15	15	Pin	6B	Recubierta	5,35441	5,35423	0,00018	753,98224	0,00710151	0,025346733	171,05972	0,00014817	6748,7876
165	15	15	Disco	4A	S.Recubrir	26,3549	26,35445	0,00045	3402,3448	0,0077461	0,058093758	171,05972	0,00033961	2944,54561
165	15	15	Pin	7A	Recubierta	5,24463	5,2446	3E-05	753,98224	0,00695591	0,004312881	171,05972	2,5213E-05	39662,5144
165	15	15	Disco	4B	S.Recubrir	26,97118	26,97088	0,0003	3402,3448	0,00792723	0,037844227	171,05972	0,00022123	4520,1008
165	15	15	Pin	8A	Recubierta	5,32218	5,322173	7E-06	753,98224	0,00705876	0,000991676	171,05972	5,7972E-06	172495,655
165	15	15	Disco	6B	S.Recubrir	26,6821	26,681	0,0011	3402,3448	0,00784227	0,140265546	171,05972	0,00081998	1219,54197
165	15	15	Pin	5A	S.Recubrir	5,31591	5,3156	0,00031	753,98224	0,00705044	0,043968858	171,05972	0,00025704	3890,47446
165	15	15	Disco	9A	S.Recubrir	26,76038	26,7582	0,00218	3402,3448	0,00786528	0,277167655	171,05972	0,0016203	617,170572
165	15	15	Pin	4B	S.Recubrir	5,41626	5,41581	0,00045	753,98224	0,00718354	0,062643227	171,05972	0,00036621	2730,69775
165	15	15	Disco	1A	S.Recubrir	26,03797	26,03416	0,00381	3402,3448	0,00765295	0,49784733	171,05972	0,00291037	343,598749
165	15	15	Pin	6B	S.Recubrir	5,35423	5,354	0,00023	753,98224	0,00710127	0,032388581	171,05972	0,00018934	5281,48231

Anexo H. Espectroscopía de Emisión Óptica (OES)

Resultados del análisis OES en la Fundición Gris

9/28/2017 3:05:55 PM

RESULTADOS DE ANALISIS

Sample Identification										
SampleNo	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	>5.400	2.857	0.140	0.144	<0.150	0.070	<0.010	0.049	0.046	<0.0050
2.	>5.400	2.923	0.121	0.126	<0.150	0.046	<0.010	0.031	0.034	<0.0050
3.	>5.400	2.979	0.116	0.122	<0.150	0.043	<0.010	0.037	0.037	<0.0050
Ø	~5.400	2.920	0.126	0.131	<0.150	0.053	<0.010	0.039	0.039	<0.0050
σ		0.061	0.013	0.012		0.015		0.0092	0.0062	
υ		2.089	10.32	9.160		28.30		23.59	15.90	

	As	B	Bi	Ca	Co	Mg	N	Nb	Pb	Sb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.022	0.0069	<0.010	<0.0	0.010	>0.144	~1.027	0.0100	0.066	0.086
2.	0.023	0.0083	<0.010	<0.0	<0.0050	~0.135	0.461	0.0067	0.064	0.103
3.	0.029	0.0092	<0.010	<0.0	<0.0050	0.115	>1.080	0.0067	0.073	0.112
Ø	0.025	0.0081	<0.010	0.0	0.0067	~0.131	0.856	0.0078	0.068	0.100
σ	0.0038	0.0012			0.0029	0.015	0.343	0.0019	0.0047	0.013
υ	15.20	14.81			43.28	11.45	40.07	24.36	6.912	13.00

	Sn	Ta	Ti	V	W	Zn	Zr	Se	Fe
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.013	<0.030	0.020	0.0099	0.026	0.021	<0.0020	<0.0050	90.54
2.	0.016	<0.030	0.014	0.0071	<0.010	0.0036	<0.0020	0.0056	90.61
3.	0.018	<0.030	0.011	0.0071	<0.010	0.0043	<0.0020	0.013	90.54
Ø	0.016	<0.030	0.015	0.0080	0.015	0.0096	<0.0020	0.0079	90.56
σ	0.0025		0.0046	0.0016	0.0092	0.0099		0.0045	0.041
υ	15.63		30.67	20.00	61.33	103.13		56.96	0.045



Resultados del análisis OES Recubrimiento TiN

9/28/2017 3:11:36 PM

RESULTADOS DE ANALISIS

Sample Identification										
SampleNo										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	>5.400	>7.200	0.117	0.041	<0.150	0.077	0.188	0.085	0.121	<0.0050
2.	>5.400	>7.200	0.118	0.052	<0.150	0.080	0.196	0.090	0.100	<0.0050
3.	>5.400	>7.200	0.115	0.047	<0.150	0.075	0.174	0.092	0.108	<0.0050
Ø	~5.400	~7.200	0.117	0.047	<0.150	0.077	0.186	0.089	0.110	<0.0050
σ			0.0016	0.0055		0.0025	0.011	0.0036	0.011	
ν			1.368	11.70		3.247	5.914	4.045	10.00	
	As	B	Bi	Ca	Co	Mg	N	Nb	Pb	Sb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.0052	0.0087	>0.144	<0.0	0.150	0.084	>1.080	1.311	>0.300	0.052
2.	0.0047	0.0093	>0.144	<0.0	0.161	0.091	>1.080	1.431	>0.300	0.058
3.	0.0078	0.0098	>0.144	<0.0	0.146	0.094	>1.080	1.351	>0.300	0.059
Ø	0.0059	0.0093	~0.144	0.0	0.152	0.090	~1.080	1.364	~0.300	0.056
σ	0.0017	0.00055			0.0078	0.0051		0.061		0.0038
ν	28.81	5.914			5.132	5.667		4.472		6.786
	Sn	Ta	Ti	V	W	Zn	Zr	Se	Fe	
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
1.	0.019	<0.030	<0.0010	1.801	0.087	0.0036	0.0054	<0.0050	82.35	
2.	0.018	<0.030	<0.0010	1.967	0.094	0.0050	0.0053	<0.0050	82.02	
3.	0.018	<0.030	<0.0010	1.816	0.092	0.0043	0.0044	<0.0050	82.29	
Ø	0.018	<0.030	<0.0010	1.861	0.091	0.0043	0.0050	<0.0050	82.22	
σ	0.00071			0.092	0.0036	0.00070	0.00055		0.176	
ν	3.944			4.944	3.956	16.28	11.00		0.214	

Anexo I. Certificado de ponencia



CERTIFICATION

The chairman of Fourth International Meeting for Researchers in Materials and Plasma Technology (4th IMRMPT) certifies that:


V J Salazar Chaparro, K T Ortega Bermúdez, H A Estupiñan Duran, I González Jaimes, I Fernández and E D V-Niño

They presented the work entitled:

Modification with titanium nitride (TiN) in the surface of the material used in the internal combustion engines manufacturing

Conference held 23 to 26 May 2017 in Santa Marta, Colombia.

For its constancy it is signed in Santa Marta 26 May 2017.



HAROLD PAREDES GUTIÉRREZ
Chairman
4th IMRMPT Conference

Fourth International Meeting for Researchers in Materials & Plasma Technology (4th IMRMPT)
imrmpt@gmail.com