



**IMPLEMENTACIÓN DE UN TRIBÓMETRO AUTOMATIZADO
RUEDA DE CAUCHO ARENA SECA / ARENA HÚMEDA PARA LA
EVALUACIÓN DEL DESGASTE ABRASIVO EN MATERIALES**

ALFONSO RODRÍGUEZ-PEÑA
OSCAR FABIÁN HIGUERA-COBOS
ROBIN JOSTIN PICO-MONTES
OMER YADITH SOTELO-HURTADO
CARLOS MAURICIO MORENO-TÉLLEZ

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
2023



Implementación de un tribómetro automatizado rueda de caucho arena seca / arena húmeda para la evaluación del desgaste abrasivo en materiales / Implementation of an automated dry sand/wet sand rubber wheel tribometer for the evaluation of abrasive wear in materials / Rodríguez-Peña, Alfonso; Higuera-Cobos, Oscar Fabián; Pico-Montes, Robin Jostin; Sotelo-Hurtado, Omer Yadith; Moreno-Téllez, Carlos Mauricio. Tunja: Editorial UPTC, 2023. 156 p.

ISBN (impreso) 978-958-660-761-2

ISBN (ePub) 978-958-660-762-9

Incluye referencias bibliográficas

1. Resistencia a la abrasión por vía húmeda. 2. Resistencia a la abrasión por vía seca. 3. Tribología. 4. Norma ASTM G65. 5. Norma ASTM G105. 6. Rediseño.

(Dewey 620.1 /21) (Thema TGMT - Ensayo de materiales)



Uptc[®]

Universidad Pedagógica y
Tecnológica de Colombia



Primera Edición, 2023

100 ejemplares (impresos)

Implementación de un tribómetro automatizado
rueda de caucho arena seca/arena húmeda para la
evaluación del desgaste abrasivo en materiales
Implementation of an automated dry sand/wet
sand rubber wheel tribometer for the evaluation of
abrasive wear in materials

ISBN (impreso) 978-958-660-761-2

ISBN (ePub) 978-958-660-762-9

Colección Investigación UPTC N.º 273

Proceso de arbitraje doble ciego

Recepción: octubre 2022

Aprobación: febrero de 2023

© Alfonso Rodríguez-Peña, 2023

© Oscar Fabián Higuera-Cobos, 2023

© Robin Jostin Pico-Montes, 2023

© Omer Yadith Sotelo-Hurtado, 2023

© Carlos Mauricio Moreno-Téllez, 2023

© Universidad Pedagógica y Tecnológica de
Colombia, 2023

Editorial UPTC

Edificio Administrativo – Piso 4

La Colina, Bloque 7, Casa 5

Avenida Central del Norte 39-115, Tunja, Boyacá

comite.editorial@uptc.edu.co

www.uptc.edu.co

Rector, UPTC

Enrique Vera López

Comité Editorial

Dr. Carlos Mauricio Moreno Téllez

Dr. Jorge Andrés Sarmiento Rojas

Dra. Yolima Bolívar Suárez

Mg. Pilar Jovanna Holguín Tovar

Dra. Nelsy Rocío González Gutiérrez

Dra. Ruth Maribel Forero Castro

Dr. Óscar Pulido Cortés

Mg. Edgar Nelson López López

Editor en Jefe

Ph. D. Witton Becerra Mayorga

Coordinadora Editorial

Mg. Andrea María Numpaque Acosta

Corrección de Estilo

Mg. Andrea María Numpaque Acosta

Diseño Portada e Impresión

Editorial JOTAMAR S.A.S.

Calle 57 No. 3 - 39.

Tunja - Boyacá - Colombia.



Libro financiado en cooperación entre la Vicerrectoría de Investigación y Extensión - Dirección de Investigaciones de la UPTC y la Vicerrectoría de Investigaciones, Extensión y Proyección Social de la Universidad del Atlántico. Se permite la reproducción parcial o total, con la autorización expresa de los titulares del derecho de autor. Este libro es registrado en Depósito Legal, según lo establecido en la Ley 44 de 1993, el Decreto 460 de 16 de marzo de 1995, el Decreto 2150 de 1995 y el Decreto 358 de 2000.

Impreso y hecho en Colombia - Printed and made in Colombia

Los Grupos de Investigación que participaron en esta investigación fueron: CONFORMAT-PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA-FACULTAD DE INGENIERÍA-UNIVERSIDAD DEL ATLÁNTICO Y GRUPO DE INTEGRIDAD Y EVALUACIÓN DE MATERIALES (GIEM)-ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA DE LA UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA-UPTC

Citar este libro / Cite this book

Rodríguez-Peña, A. Higuera-Cobos, O. Pico-Montes, R. Sotelo-Hurtado, O. Moreno-Téllez, C. (2023). *Implementación de un tribómetro automatizado rueda de caucho arena seca/arena húmeda para la evaluación del desgaste abrasivo en materiales*. Editorial UPTC.

doi: doi: <https://doi.org/10.19053/9789586607612>

RESUMEN

Este trabajo abarca el rediseño realizado a la máquina para la evaluación de la resistencia a la abrasión por vía seca regida por la norma ASTM G65, perteneciente a la Universidad del Atlántico; esta máquina se modificó para implementar la evaluación de la resistencia a la abrasión por vía húmeda, según los lineamientos establecidos por la norma ASTM G105, asimismo, se convirtió en un equipo automatizado por medio de un PLC. La metodología empleada, consistió, en primera instancia, en la realización de pruebas experimentales al equipo antiguo (Norma ASTM G65), con las cuales se detectaron fallas en su diseño y se identificaron las mejoras necesarias para la implementación de la norma ASTM G105, se determinaron los elementos principales para instalar el control del proceso de forma automatizada. Luego, se realizó un diseño conceptual que permitió seleccionar la mejor opción para la fabricación de la estructura, posteriormente, se realizaron simulaciones en el software SolidWorks, con el fin de verificar los elementos críticos de la máquina, sus cargas permisibles, validar las deformaciones, y conocer el factor de seguridad. Del mismo modo, se hicieron los cálculos para determinar el tamaño y forma adecuada de las tolvas y del contenedor de la prueba para resistencia por abrasión húmeda. De esta manera, se seleccionaron los elementos necesarios para la construcción del equipo, aunque algunos de estos elementos fueron diseñados con una variedad de formas y tamaños, los cuales no se encontraron en el mercado, por ende, fue necesaria su fabricación mediante diferentes procesos de manufactura. Al mismo tiempo, se realizó un estudio para la selección de los elementos de control y su puesta a punto, mediante ensayos basados en las normas ASTM G65 y ASTM G105. La máquina desarrollada permite realizar pruebas automatizadas para la evaluación de la abrasión por vía seca y húmeda.

Palabras clave: Resistencia a la abrasión por vía húmeda; Resistencia a la abrasión por vía seca; Tribología; Norma ASTM G65; Norma ASTM G105; Rediseño.

ABSTRACT

This work covers the redesign of the machine for the evaluation of dry abrasion resistance according to the ASTM G65 standard, from the Universidad del Atlántico; this machine was modified to implement the evaluation of wet abrasion resistance, according to the guidelines established by the ASTM G105 standard, and it was also converted into an automated equipment by means of a PLC. The methodology employed consisted in the first instance in conducting experimental tests to the old equipment (ASTM G65 standard), with which design flaws were detected and the necessary improvements for the implementation of ASTM G105 were identified, and the main elements to install the automated process control were also determined. Then a conceptual design was carried out to select the best option for the manufacture of the structure, based on that, simulations were performed in the SolidWorks software, in order to verify the critical elements of the machine, its permissible loads, validate the deformations, and know the safety factor; then calculations were made to determine the size and shape of the hoppers and the container for the wet abrasion resistance test. In this way, the necessary elements for the construction of the equipment were selected, although some of these elements were designed with a variety of shapes and sizes, which were not found in the market, therefore, it was necessary to manufacture them through different manufacturing processes. In addition, a study was carried out for the selection of the control elements and their fine-tuning, through tests based on ASTM G65 and ASTM G105 standards. The machine developed allows automated tests for the evaluation of dry and wet abrasion.

Keywords: Wet abrasion resistance; dry abrasion resistance; tribology; ASTM G65 Standard; ASTM G105 Standard; redesign.

AUTORES



**ALFONSO
RODRÍGUEZ-PEÑA**

Ingeniero Mecánico de la Universidad Tecnológica de Bolívar, M.Sc. en Ingeniería Mecánica de la Universidad del Norte. Especialista en Gerencia de Producción y Operaciones de Universidad Autónoma del Caribe. Especialista en Gestión Eficiente de Energía de la Universidad del Atlántico. Especialización Técnica en Fabricación de Productos Metalmecánicos con máquinas CNC del SENA. Especialización Técnica en Sistemas Hidráulicos del SENA. Docente Universitario desde 1998 de la Universidad Autónoma del Caribe, Universidad Libre, Politécnico Costa Atlántica. Desde 2015, se desempeña como Docente de Tiempo Completo en la Universidad del Atlántico. Director del Semillero de Diseño y Simulación del Grupo de Investigación CONFORMAT del Programa de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Atlántico. Es autor de la Patente de Invención Nacional Separador quirúrgico autoestático para cirugía de reemplazo total de cadera. Su área de investigación está relacionada con el diseño, simulación y construcción de productos comerciales, mecánicos y médicos.

<https://orcid.org/0000-0002-2928-6044>

E-mail: alfonsorodriguez1@mail.uniatlantico.edu.co



OSCAR FABIÁN HIGUERA-COBOS

Ingeniero Metalúrgico y M.Sc. en Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Industrial de Santander-UIS. Ph. D. en Ciencia e Ingeniería de los Materiales de la Universidad Politécnica de Cataluña, España. Del 2001 al 2004, trabajó como profesor en la UIS. Fue profesor de planta en la Universidad Tecnológica de Pereira (2005-2015). Actualmente, es Investigador Senior (IS), profesor Titular y director del Grupo de Investigación CONFORMAT adscrito al programa de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Atlántico. Autor de 5 libros relacionados con las áreas de materiales y tribología, y cuenta con artículos relacionados con la Ingeniería Metalúrgica y la Ciencia de los Materiales. Sus áreas de investigación están relacionadas con la deformación plástica severa, la electroquímica y el medio ambiente, la metalurgia física, los tratamientos térmicos y los materiales avanzados.

<https://orcid.org/0000-0002-4836-5215>

E-mail: oscarhiguera@mail.uniatlantico.edu.co



**ROBIN JOSTIN
PICO-MONTES**

Robin Jostin Pico-Montes, nació en Barranquilla, Atlántico, Colombia, en 1989. Egresado de la Universidad del Atlántico, en donde obtuvo el título de Ingeniero Mecánico en el año 2022. Desde el año 2020, se ha desempeñado como coordinador de proyectos en el sector de la industria metalmecánica.

<https://orcid.org/0009-0007-8397-4175>

E-mail: rpico@mail.uniatlantico.edu.co



**OMER YADITH
SOTELO-HURTADO**

Egresado del SENA con un tecnólogo en diseño de elementos mecánicos con máquinas y herramientas CNC en el año 2019. Egresado de la Universidad del Atlántico, en donde obtuvo el título de Ingeniero Mecánico en el año 2022. Actualmente, trabaja de manera independiente por pedidos de empresas realizando proyectos de diseño, asistido por computadora mediante el software SolidWorks.

<https://orcid.org/0009-0001-2838-5331>

E-mail: osotelo@mail.uniatlantico.edu.co



CARLOS MAURICIO MORENO-TÉLLEZ

Ingeniero Metalúrgico y M.Sc. en Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Industrial de Santander-UIS; Ph. D. en Ingeniería de los Materiales de la Universidad de Navarra - España. Director del Proyecto de Integridad - Ecopetrol llanos Orientales (2008 a 2010). Desde el 2010 hasta la fecha, docente Titular de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia - UPTC, sede Tunja. Investigador Principal del Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de Materiales - INCITEMA e Investigador Asociado del Grupo de Integridad y Evaluación de Materiales – GIEM. Es autor de un libro relacionado con las áreas de materiales y tribología, así como de diferentes artículos relacionados con la Ingeniería Metalúrgica y la Ciencia de los Materiales. Las principales áreas de investigación del Dr. Moreno, están relacionadas con la modificación superficial de materiales, Integridad y corrosión de materiales, metalurgia física, tratamientos térmicos y materiales avanzados.

<https://orcid.org/0000-0002-2142-6145>

E. mail: carlosmauricio.moreno@uptc.edu.co

CONTENIDO

Prefacio.....	17
1. Marco Referencial.....	19
1.1. Antecedentes.....	19
1.2. Marco Teórico.....	21
1.2.1. Tribología.....	21
1.2.2. Lubricación.....	22
1.2.3. Fricción.....	23
1.2.3.1. Fuerza de rozamiento estática.....	24
1.2.3.2. Fuerza de rozamiento cinemática.....	25
1.2.3.3. Fuerzas de rozamientos en el disco.....	26
1.2.4. Desgaste.....	28
1.2.4.1. Clasificación del desgaste.....	28
1.2.4.1.1. Desgaste abrasivo.....	29
1.2.4.1.2. Desgaste corrosivo.....	32
1.2.4.1.3. Desgaste por fatiga superficial.....	33
1.2.4.1.4. Desgaste por erosión.....	34
1.2.4.1.5. Desgaste adhesivo.....	34
1.2.4.2. Variables que afectan el proceso de desgaste.....	35
1.2.4.2.1. Efecto de la temperatura y la velocidad sobre el desgaste.....	36
1.2.4.2.2. Solubilidad.....	36
1.2.4.2.3. Estructura cristalina.....	37
1.2.5. Métodos para realizar ensayos de desgaste.....	37

1.2.5.1. Norma ASTM G65.....	38
1.2.5.2. Norma ASTM G105.....	40
2. Metodología.....	41
2.1. Rediseño del equipo.....	41
2.1.1. Caracterización del equipo.....	41
2.1.2. Pruebas experimentales preliminares.....	42
2.1.3. Realización de inventario de los elementos del equipo.....	44
2.1.4. Selección de los componentes para la automatización del equipo de desgaste abrasivo.....	44
2.1.5. Realización de un modelo cada del equipo.....	44
2.1.6. Simulaciones.....	44
2.1.7. Realización de los cálculos de diseño.....	46
2.1.8. Selección de materiales.....	46
2.2. Construcción del equipo.....	47
2.2.1. Desarme del equipo.....	47
2.2.2. Compra de materiales y equipos.....	47
2.2.3. Fabricación de los elementos del equipo mediante maquinado.....	47
2.2.4. Ensamble del equipo.....	48
2.3. Programación e implementación del ciclo de automatización del equipo.....	48
2.4. Verificación del funcionamiento del equipo.....	48
2.4.1. Preparación de probetas.....	48
2.4.2. Parámetros de prueba.....	49
2.4.3. Preparación de la máquina.....	49

2.4.4. Ajuste de programación.....	50
2.4.5. Ejecución de las pruebas experimentales.....	51
3. Resultados y análisis.....	53
3.1. Diseño conceptual.....	53
3.1.1. Componentes y materiales.....	54
3.1.1.1. Estructura.....	54
3.1.1.2. Discos de acero para el desgaste.....	56
3.1.1.2.1. Discos para la norma ASTM G65.....	56
3.1.1.2.2. Discos para la norma ASTM G105.....	57
3.1.1.3. Difusor de arena.....	57
3.1.1.4. Agente abrasivo.....	58
3.1.1.5. Porta probetas.....	60
3.2. Cálculos.....	61
3.2.1. Cálculo de la potencia requerida.....	61
3.2.2. Cálculo y diseño de la tolva de arena para la norma ASTM G65.....	64
3.2.3. Cálculo y diseño de la tolva de agua para la norma ASTM G105.....	66
3.2.4. Cálculos de la fuerza del cilindro neumático.....	67
3.3. Simulaciones de los componentes críticos.....	68
3.3.1. Simulación de la estructura.....	68
3.3.2. Simulación del eje.....	73
3.4. Selección de materiales y equipos.....	74
3.4.1. Motor.....	75

3.4.2. Pantalla HMI integrada con PLC.....	76
3.4.3. Variador de velocidad.....	76
3.4.4. Fuente de voltaje.....	77
3.4.5. Sensor de proximidad.....	77
3.4.6. Compresor.....	79
3.4.7. Actuador neumático y válvula.....	79
3.4.8. Cilindro neumático.....	80
3.4.9. Electroválvula.....	82
3.4.10. Unidad de mantenimiento/Filtro.....	82
3.4.11. Convertidor I/P.....	84
3.4.12. Celdas de carga.....	84
3.4.13. Transmisor de peso.....	85
3.4.14. Transmisor de voltaje a corriente.....	87
3.4.15. Ruedas.....	89
3.5. Construcción del equipo.....	89
3.5.1. Materiales y equipos para la construcción del tribómetro.....	89
3.5.2. Elaboración de elementos del equipo por procesos de manufactura.....	90
3.5.2.1. Estructura.....	91
3.5.2.2. Tolvas de arena y agua.....	93
3.5.2.3. Soporte de las tolvas.....	93
3.5.2.4. Puertas.....	93
3.5.2.5. Ventanas.....	93
3.5.2.6. Contenedor G-105.....	94

3.5.2.7. Placa de apoyo para el cilindro.....	94
3.5.2.8. Porta probetas.....	94
3.5.2.9. Eje.....	94
3.5.2.10. Discos de caucho.....	95
3.5.2.11. Boquilla dosificadora.....	95
3.5.3. Ensamble del equipo.....	95
3.5.4. Pintura del equipo.....	96
3.5.5. Instalación de elementos eléctricos.....	96
3.5.6. Instalación de elementos neumáticos.....	97
3.5.7. Costos de la construcción del equipo.....	97
3.6. Verificación del equipo.....	102
3.6.1. Pre-Operación de la máquina.....	102
3.6.1.1. Preparación de las probetas.....	102
3.6.1.2. Parámetros de prueba.....	102
3.6.2. Puesta en marcha del tribómetro.....	103
3.6.2.1. Montaje de los elementos para la norma ASTM G65.....	103
3.6.2.1.1. Montaje de la probeta y elección del procedimiento.....	104
3.6.2.1.2. Medición de flujo de arena.....	104
3.6.2.1.3. Calibración de la fuerza.....	105
3.6.2.1.4. Inicio de la prueba.....	106
3.6.2.1.5. Resultados.....	107
3.6.2.2. Montaje de las piezas para la norma ASTM G105.....	108
3.6.2.2.1. Montaje de la probeta y elección de los ensayos.....	109

3.6.2.2.2. Realización de la mezcla.....	109
3.6.2.2.3. Calibración de la fuerza.....	110
3.6.2.2.4. Inicio de la prueba.....	111
3.6.2.2.5. Resultados.....	113
4. Conclusiones.....	115
5. Bibliografía.....	116
Anexo 1. Vista frontal de los elementos de la máquina.....	121
Anexo 2. Planos de los elementos del tribómetro.....	125
Anexo 3. Cálculos de la altura de la tolva de arena.....	142
Anexo 4. Cálculos de la altura de la tolva de agua.....	145

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Película de lubricante entre dos superficies.....	22
Figura 2. Fuerza de rozamiento estática.....	24
Figura 3. Fuerza de rozamiento cinética.....	25
Figura 4. Diagrama de fuerzas resultantes en un disco.....	26
Figura 5. Clasificación del desgaste.....	29
Figura 6. Ejemplo del desgaste abrasivo.....	30
Figura 7. (a) Representación de abrasión en dos cuerpos (b) Representación de abrasión en tres cuerpos.....	31
Figura 8. (a) Esquema de desgaste de bajo esfuerzo. (b) Esquema de abrasión de alto esfuerzo. (c) Esquema del desgaste por surcos. (d) Esquema de un pulido de un metal con una rueda de pulido.....	32
Figura 9. Ejemplo de desgaste corrosivo.....	33
Figura 10. (a) Desgaste por fatiga superficial en rodamiento (b) Ejemplo de desgaste por fatiga en engranaje.....	33
Figura 11. Ejemplo de desgaste por erosión.....	34
Figura 12. Daño causado por desgaste adhesivo al Acero AISI D1.....	35
Figura 13. (a) Ejemplo de desgaste por adhesión en engranaje (b) Ejemplo de desgaste por adhesión en rodamiento de rodillo cónico.....	35
Figura 14. Tribómetro rueda de caucho y arena seca según norma ASTM G65.....	41
Figura 15. (a) Tribómetro en funcionamiento. (b) Variador de velocidad y contador de vueltas de tribómetro. (c) Brazo y contrapeso del tribómetro rueda de caucho y arena seca. (d) Discos de caucho del tribómetro.....	42
Figura 16. Desarme del tribómetro rueda de caucho y arena seca.....	47

Figura 17. (a) Probeta de acero inoxidable martensítico AISI 403. (b) Probeta de aluminio. (c) Acero AISI 4140.....	49
Figura 18. (a) Montaje completo de los elementos G65. (b) Montaje completo de los elementos G105.....	50
Figura 19. (a) Pantalla de la norma G65. (b) Pantalla de la norma ASTM G105.....	51
Figura 20. Propuestas de diseño.....	55
Figura 21. Vistas de la estructura diseñada.....	56
Figura 22. (a) Plano del disco ASTM G65. (b) Diseño del disco ASTM G65. (c) Plano de disco ASTM G105. (d) Diseño del disco ASTM G105.....	57
Figura 23. (a) Ítem 1: diámetro y forma cónica de la tubería. (b) Ítem 2: platina y boquilla soldada. (c) Representación de la boquilla de arena.....	59
Figura 24. (a) Porta probeta G65. (b) Porta probeta G105.....	61
Figura 25. Esquema de fuerzas.....	62
Figura 26. (a) Dimensiones de la tolva. (b) Diseño final de la tolva de arena.....	65
Figura 27. Contenedor de la mezcla de la norma ASTM G105.....	66
Figura 28. (a) Dimensiones de la tolva. (b) Diseño final tolva de agua.....	67
Figura 29. Simulación de la estructura.....	69
Figura 30. Fuerzas resultantes.....	70
Figura 31. (a) Simulación del Mallado de la estructura. (b) Fuerzas resultantes en la estructura. (c) Desplazamientos resultantes en la estructura. (d) Deformación unitaria equivalente en la estructura. (e) Factor de seguridad en la estructura. (f) Estudio de pandeo en la estructura.....	73

Figura 32. Elementos del circuito eléctrico. (a) Motor trifásico. (b) Pantalla HMI integrada con PLC. (c) Variador de velocidad. (d) Fuente de voltaje. (e) Sensor de proximidad.....	78
Figura 33. Elementos neumáticos. (a) Compresor neumático. (b) Actuador neumático y válvula. (c) Cilindro neumático. (d) Electroválvula. (e) Unidad de mantenimiento. (f) Convertidor I/P.....	83
Figura 34. Celda de carga.....	85
Figura 35. Transmisor de celda de carga.....	86
Figura 36. Conexión de las celdas de carga y el transmisor de peso.....	87
Figura 37. Transmisor de corriente.....	87
Figura 38. Conexión electrónica completa.....	88
Figura 39. Ruedas del tribómetro.....	89
Figura 40. (a) Fabricación de la estructura metálica (b) Fabricación de las tolvas (c) Instalación de soportes en las tolvas (d) Instalación de puertas. (e) ventanas. (f) contenedor de mezcla. (g) Placa de apoyo para el cilindro neumático. (h) Porta probetas. (i) Eje conector. (j) Medición de dureza a disco. (k) Boquilla instalada en el equipo.....	92
Figura 41. Ensamble del equipo.....	95
Figura 42. Estructura en el proceso de aplicación de pintura.....	96
Figura 43. Conexión eléctrica del tribómetro.....	97
Figura 44. Instalación de los elementos neumáticos.....	98
Figura 45. Vista final del tribómetro automatizado.....	101
Figura 46. (a) Rueda de caucho de 228.6mm (b) Porta probetas para ASTM G65. (c) Montaje completo de los elementos.....	103
Figura 47. (a) Elección de procedimiento B. (b) Puesta de probeta.....	104
Figura 48. (a) Pantalla de flujo de arena. (b) Recolección del abrasivo.....	105

Figura 49. (a) Pantalla de calibración de la fuerza. (b) Probeta sobre el disco estático.....	105
Figura 50. Punto de calibración de la fuerza de 130 N.....	106
Figura 51. (a) Pantalla del proceso en ejecución. (b) Proceso de desgaste G-65.....	107
Figura 52. Elección de procedimiento E para el aluminio.....	107
Figura 53. (a) Acero inoxidable martensítico ASIS 403 (b) Aluminio.....	108
Figura 54. (a) Disco de caucho de 177.8 mm. (b) Portaprobetas ASTM G105. (c) contenedor de mezcla (d) Montaje completo.....	108
Figura 55. (a) Puesta de la probeta. (b) Elección del ensayo 1.....	109
Figura 56. (a) Pantalla de mezcla. (b) Mezcla en el contenedor.....	110
Figura 57. (a) Pantalla de calibración de la fuerza. (b) Probeta sobre el disco estático.....	110
Figura 58. Punto de calibración de la fuerza de 222 N.....	111
Figura 59. (a) Pantalla del ensayo 1 en ejecución. (b) Proceso de desgaste G105.....	112
Figura 60. (a) Pantalla del ensayo 3 en ejecución. (b) Disco shore A60. (c) Pantalla del ensayo 4 en ejecución. (d) Disco shore A70.....	112
Figura 61. Probeta de Acero 4140.....	113

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Lista de pruebas para el estudio del desgaste	38
Tabla 2. Lista de procedimiento de la norma ASTM G65.....	39
Tabla 3. Lista de chequeo del tribómetro arena seca y rueda de caucho.....	44
Tabla 4. Lista de elementos del sistema de control.....	45
Tabla 5. Material, norma de desgaste y dimensiones de las probetas.....	48
Tabla 6. Parámetros de prueba.....	49
Tabla 7. Criterios para la selección de la estructura.....	54
Tabla 8. Agentes abrasivos por norma	59
Tabla 9. Tamaño de tamices necesarios para conseguir arena AFS 50/70 [4].....	60
Tabla 10. Propiedades del material de la estructura.....	69
Tabla 11. Fuerzas ejercidas sobre la estructura.....	70
Tabla 12. Propiedades del eje (AISI 4130).....	73
Tabla 13. Fuerzas ejercidas sobre el eje.....	74
Tabla 14. Características de motor trifásico	75
Tabla 15. Características de la pantalla HMI integrada con PLC.....	76
Tabla 16. Característica del variador de velocidad	77
Tabla 17. Características de la fuente de voltaje.....	77
Tabla 18. Características de sensor de proximidad.....	78
Tabla 19. Características del compresor neumático.....	79
Tabla 20. Característica del actuador neumático	79

Tabla 21. Valores del aire abierto y cerrado de los actuadores.....	80
Tabla 22. Característica del cilindro neumático.....	81
Tabla 23. Característica de la electroválvula.....	82
Tabla 24. Característica de la unidad de mantenimiento.....	82
Tabla 25. Características del convertidor I/P.....	84
Tabla 26. Características de la celda de carga.....	85
Tabla 27. Especificaciones del transmisor.....	86
Tabla 28. Especificaciones del transmisor.....	88
Tabla 29. Características de las ruedas.....	89
Tabla 30. Herramientas para la fabricación del tribómetro.....	90
Tabla 31. Consumibles usados para la fabricación del tribómetro.....	90
Tabla 32. Costos de la construcción del equipo.....	98
Tabla 33. Norma de desgaste y dimensiones de las probetas.....	102
Tabla 34. Parámetros de prueba.....	103
Tabla 35. Medición de flujo de arena.....	104
Tabla 36. Calibración de la fuerza.....	106
Tabla 37. Calibración de la fuerza.....	111



PREFACIO

Actualmente, la ingeniería y ciencia de los materiales se enfoca en mejorar el rendimiento y el desempeño operativo de los componentes mecánicos que sufren variadas fallas en sus superficies, debido a diferentes mecanismos de desgaste (por ejemplo, desgaste adhesivo, desgaste abrasivo, etc.) reduciendo su vida útil [1]. El desgaste abrasivo se presenta cuando partículas duras interactúan entre dos superficies más blandas, estas partículas abrasivas, pueden ser las propias asperezas de la superficie o bien el mismo producto del desgaste de las mismas; que tienden a cortar o remover material de la superficie, lo que crea escombros o causa una severa deformación plástica (superficial y subsuperficial), la manera en la que se deforma o remueve de su superficie se denomina *mecanismo de desgaste*, el cual puede ser por micro arado, micro fatiga, micro corte o micro agrietamiento [2].

El fallo de los elementos mecánicos sometidos a rozamiento y su posterior desgaste, provoca pérdidas de energía considerables y una vida útil más corta. Por esa razón, debe existir una forma de estudiar el comportamiento del desgaste de los materiales [3], para que los datos obtenidos se puedan implementar en planes de mantenimiento. De este modo, el desgaste comienza a convertirse en un tema importante para estudiar y comprender; ideas simples sobre cómo prevenirlo o combatirlo, comienzan a surgir en la mente de los diseñadores y en los textos de diseño. Sin embargo, esto no es suficiente para mantener la competitividad de los productos, ya que, los diseñadores deben estar abiertos a los problemas y utilizar métodos de diseño apoyados en programas informáticos y trabajo interdisciplinario [4]. La necesidad de reducir los costos de fabricación de maquinaria y el desarrollo tecnológico, ha llevado a la identificación de requerimientos de estudios tribológicos para subsanar estas carencias [5]. Las industrias ansiosas por seguir siendo eficientes en un mercado globalmente competitivo ven la necesidad de mejorar los procesos y evaluar su contribución. En este sentido, consideran que, aumentar la vida útil de los elementos de las máquinas es una opción de mejora que puede identificar el deterioro superficial de los materiales [6].

