



UNIVERSITAT DE BARCELONA

U

B

DEPARTAMENT DE FÍSICA APLICADA I ÒPTICA

Martí i Franquès, 1, 08028 Barcelona

**CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES  
TRIBOLÓGICAS DE LOS RECUBRIMIENTOS  
DUROS**

**Maryory Astrid Gómez Botero**

Memoria presentada para optar al grado de Doctora

Barcelona, Diciembre de 2005





**U**  
UNIVERSITAT DE BARCELONA



DEPARTAMENT DE FÍSICA APLICADA I ÒPTICA  
Martí i Franquès, 1, 08028 Barcelona

**CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES  
TRIBOLÓGICAS DE LOS RECUBRIMIENTOS  
DUROS**

**Maryory Astrid Gómez Botero**

**Programa de doctorado:** Tècniques Instrumentals de la Física i la Ciència de Materials

**Bienio:** 2002-2004

**Director:** Joan Esteve Pujol

Memoria presentada para optar al grado de Doctora

Barcelona, Diciembre de 2005



A José William,  
Quién ha sido manantial de ternura y fortaleza  
durante estos años de mi vida

A aquellos seres tan amados a quienes debo mi ser,  
Mi familia



Este trabajo se ha realizado en el *Laboratori de Materials en Capa Fina* del Departament de Física Aplicada i Òptica de la Universitat de Barcelona bajo la dirección del Dr. Joan Esteve Pujol, gracias a una beca para la realización de estudios de tercer ciclo de la Universitat de Barcelona.



## **AGRADECIMIENTOS**

Durante estos cuatro años que he vivido en Barcelona, he aprendido a querer esta ciudad como mi segunda tierra y a la Universitat de Barcelona como institución que me acogió y me brindó la oportunidad de realizar el doctorado.

De forma muy especial quiero agradecer al Departamento de Física Aplicada y Óptica por haber asumido la responsabilidad de mi formación doctoral. A todo el personal del departamento, quienes de una u otra forma han contribuido con esta causa y merecen mi gratitud. Quiero expresar mis agradecimientos a las siguientes personas que estuvieron directamente implicadas en la realización de este trabajo:

Al Dr. José Luis Morenza Gil, Director del Laboratorio de Materiales en Capa Fina, por haberme aceptado en el doctorado y en su grupo durante el período de suficiencia investigadora. También quiero agradecer a los demás miembros del Grupo por los conocimientos compartidos durante dicho período.

A mi director, el Dr. Joan Esteve Pujol, por el respeto, la amistad y excelente trato que he recibido de su parte durante la realización de esta tesis. Su calidad humana y la confianza brindada han hecho más liviana la tarea investigativa.

Quiero expresar mi agradecimiento al Dr. Arturo Lousa Rodríguez, por sus valiosas contribuciones y su esmero para transmitirme sus conocimientos.

Mi profundo agradecimiento para el Dr. Francisco López, técnico de la unidad de SIMS, por su inagotable paciencia e imprescindibles aportes en la mejora del sistema de bola sobre disco, y lo más importante por su amistad.

También quiero expresar mi más sincera gratitud al Dr. Josep Picas, profesor y a Miquel Punset estudiante; ambos del Departamento de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería, de Vilanova i la Geltrú de la Universidad Politécnica de Catalunya por su diligente ayuda con las caracterizaciones tribológicas, durante la etapa de puesta en funcionamiento del sistema de bola sobre disco.

La realización de este trabajo no hubiera sido posible, sin las personas que confiaron y me suministraron materiales para las caracterizaciones tribológicas y mecánicas. Gracias al compañero de doctorado Jordi Romero Mora y su director, no sólo por los recubrimientos sino por la amistad y sus aportes.

Quiero agradecer a la Empresa Tratamientos Térmicos Carreras S. A., por los recubrimientos facilitados, en especial a las personas con las que tuve un contacto directo, Francesc Montalà, Luis Carreras, Sandra y María, con quienes comparto una bonita amistad.

Al personal de los Servicios Científico-Técnicos de la Universidad de Barcelona, al Dr. Tariq Jawhari, al Dr. Joaquim Portillo, al Dr. Jordi Arbiol, al Dr. Josep Bassas, al Dr. Jordi Díaz, al Dr. Ismael Díez, al Dr. Ramón Fontarnau, a Eva Prats, a Ana Domínguez, a Javier García y a Fèlix Mata, a todos ellos les quiero expresar mis agradecimientos por su ayuda y conocimientos transmitidos sobre las diferentes técnicas.

Al personal de las diferentes dependencias administrativas de la Universidad con quienes tuve un trato directo en la gestión del permiso de residencia, de la beca y de calificaciones y certificados, muchas gracias por su diligente ayuda.

También quiero expresar mi aprecio a personas que han pasado por el departamento en estos cuatro años, la Dra. Enikő György, el Dr. Ángel Pérez del Pino, el Dr. Sergei Dolgaev y Judith Camacho; a quienes quiero agradecer la confianza que me han brindado y los momentos de distensión que hemos compartido.

Mi más profunda gratitud y aprecio para todos los profesores del departamento por su respeto, cordialidad y el buen ambiente de trabajo durante estos cuatro años.

Mil gracias al personal administrativo y técnico del departamento Jordi Solá, Sandra Ballester y Francisco Romero por su amabilidad y diligencia para gestionar los trámites y resolver inconvenientes durante mi estadía en el departamento.

Por último quiero expresar el sentimiento de aprecio y amistad que me une a aquellas personas con las que he compartido situaciones de trabajo y de esparcimiento Carles, Albert, Fredy, Marco, Sabine, Dani, Fernando, Marc, Xavi, David, Marta, María, Mónica, Martí, Rafa, Rubén, Carol, Miquel, los Oriols y los Jordis. A todos muchas gracias por haberme dedicado parte de su estimado tiempo, por haberme aceptado, o bien, sobrellevado con mis limitaciones y defectos.

*A todos y a todas los llevo en mi alma*



## **TABLA DE CONTENIDO.**

	Pág.
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	IX
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1. RECUBRIMIENTOS DUROS.....	2
1.1.1. Procesos de depósito CVD y PVD.....	3
1.1.2. Aplicaciones de los recubrimientos duros.....	5
1.1.2.1. Carburos de cromo (CrC).....	6
1.1.2.2. Nitruros de cromo aluminio (CrAlN).....	7
1.2. TRIBOLOGÍA.....	8
1.2.1. Definición.....	8
1.2.2. Fricción.....	11
1.2.2.1. Leyes de la fricción.....	12
1.2.2.2. Mecanismos de fricción en deslizamiento.....	13
1.2.2.3. Caracterización de la fricción en deslizamiento sin lubricación.....	17
1.2.3. Desgaste.....	19
1.2.3.1. Desgaste adhesivo.....	21
1.2.3.2. Desgaste abrasivo.....	22
1.2.3.3. Desgaste por fatiga.....	25
1.2.3.4. Desgaste por impacto.....	25
1.2.3.5. Desgaste químico.....	26
1.2.3.6. Desgaste por cavitación.....	27
1.2.3.7. Desgaste por vibraciones “fretting”.....	28
1.2.4. Fricción y desgaste de metales.....	28
1.2.5. Fricción y desgaste de cerámicos.....	28
1.2.6. Tasa de desgaste.....	29
1.3. PROPIEDADES MECÁNICAS.....	31
1.3.1. Dureza.....	31
1.3.1.1. Definición.....	31
1.3.1.2. Método de rayado para medida de la dureza.....	31

1.3.1.3. Métodos de indentación estática para medida de la dureza.....	32
1.3.1.4. Métodos de indentación dinámica.....	38
1.3.2. Módulo de elasticidad.....	44
1.3.3. Tensiones residuales.....	46
1.3.3.1. Origen de las tensiones residuales.....	46
1.3.3.2. Tensiones residuales en un recubrimiento.....	47
1.3.3.3. Métodos de medida de tensiones en los recubrimientos.....	48
1.3.4. Adhesión.....	51
1.3.4.1. Definición .....	51
1.3.4.2. Origen de las fuerzas de adhesión.....	51
1.3.4.3. Factores que afectan la adhesión.....	52
1.3.4.4. Clasificación de las principales técnicas de medida de adhesión de acuerdo al método empleado para el desprendimiento del recubrimiento.....	54

## **CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES**

<b>TRIBOLÓGICAS.....</b>	<b>63</b>
<b>2.1. SISTEMA EXPERIMENTAL UTILIZADO PARA LAS MEDIDAS DE</b>	
<b>FRICCIÓN Y DESGASTE EN DESLIZAMIENTO SIN LUBRICACIÓN.....</b>	<b>63</b>
2.1.1. Mecánica del sistema de bola sobre disco.....	64
2.1.1.1. Transductor de fuerza tangencial.....	64
2.1.1.2. Posición relativa del transductor, la bola y la huella.....	65
2.1.1.3. Sistema de transmisión de movimiento.....	66
2.1.1.4. Balancín mecánico que sostiene el porta-bolas y la carga.....	69
2.1.2. Electrónica del sistema de bola sobre disco.....	70
2.1.2.1. Sistema de medida de la fuerza tangencial.....	70
2.1.2.2. Circuito que controla el motor.....	71
2.1.2.3. Dispositivo de medida de velocidad.....	71
2.1.3. Informática del sistema de bola sobre disco.....	72
2.1.4. Descripción de las bolas utilizadas en los ensayos.....	76
2.1.4.1. Bolas de alúmina.....	76
2.1.4.2. Bolas de WC-Co.....	77

2.1.4.3. Bolas de acero endurecido.....	78
2.2. MEDIDAS REALIZADAS PARA VERIFICAR EL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE BOLA SOBRE DISCO.....	79
2.3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL DESARROLLADO PARA EFECTUAR LAS MEDIDAS DE FRICCIÓN Y DESGASTE EN DESLIZAMIENTO SIN LUBRICACIÓN.....	85
2.3.1. Procedimiento para realizar las pruebas de fricción.....	85
2.3.1.1. Aspectos a tener en cuenta en la elección de los parámetros a utilizar....	86
2.3.1.2. Pasos para programar un ensayo en el sistema de bola sobre disco.....	87
2.3.2. Procedimiento experimental para evaluar el desgaste en deslizamiento sin lubricación.....	90
2.3.3.1. Medida del volumen de las huellas de desgaste de los recubrimientos...90	
2.3.3.2. Medida del volumen desgastado de las bolas.....	92
2.4. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS EN EL SISTEMA DE BOLA SOBRE DISCO.....	94
2.4.1. Descripción de las condiciones de depósito de los diferentes recubrimientos.....	94
2.4.1.1. Grupo A: recubrimientos de CrC depositados por evaporación por arco catódico.....	94
2.4.1.2. Grupo B: recubrimientos de CrC depositados mediante pulverización catódica magnetrón.....	97
2.4.1.3. Grupo C: recubrimientos constituidos por multicapas de Cr/CrC depositados mediante pulverización catódica magnetrón .....	99
2.4.1.4. Grupo D: recubrimientos de CrAlN depositados por evaporación por arco catódico.....	100
2.4.2 Resultados de fricción y desgaste en deslizamiento sin lubricación.....	102
2.4.2.1. Grupo A: recubrimientos de CrC depositados por evaporación por arco catódico.....	102
2.4.2.2. Grupo B: recubrimientos de CrC depositados mediante pulverización catódica magnetrón.....	118
2.4.2.3. Grupo C: recubrimientos constituidos por multicapas de Cr/CrC depositados mediante pulverización catódica magnetrón.....	128

2.4.2.4. Grupo D: recubrimientos de CrAlN depositados por evaporación por arco catódico.....	152
2.5. PRUEBAS DE DESGASTE ABRASIVO.....	163
2.5.1. Equipo experimental “disco abrasivo”.....	163
2.5.2. Procedimiento experimental desarrollado para realizar las medidas de desgaste abrasivo.....	165
2.5.3. Resultados de las pruebas de desgaste abrasivo.....	168
2.5.3.1. Grupo B: recubrimientos de CrC depositados mediante pulverización catódica magnetrón.....	168
2.5.3.2. Grupo C: recubrimientos constituidos por multicapas de Cr/CrC depositados mediante pulverización catódica magnetrón.....	173
<b>CAPÍTULO 3. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN MECÁNICA.....</b>	<b>179</b>
3.1. SISTEMA EXPERIMENTAL UTILIZADO PARA LAS MEDIDAS DE DUREZA Y MÓDULO DE ELASTICIDAD.....	180
3.1.1. Principio de operación.....	182
3.1.2. Componentes mecánicos.....	184
3.1.2.1. El péndulo.....	184
3.1.2.2. Posicionador motorizado de la muestra.....	184
3.1.3. Componentes electrónicos.....	185
3.1.3.1. Unidad de control principal.....	186
3.1.3.2. Unidad de control de los motores.....	186
3.1.4. Componentes informáticos.....	187
3.1.5. Descripción de los indentadores que utiliza el sistema experimental.....	188
3.1.5.1. Diamante Berkovich .....	188
3.1.5.2. Diamante de punta esférica.....	190
3.1.6. Rutinas de mantenimiento requeridas por el NanoTest 550.....	192
3.1.6.1. Ajuste del balanceo del péndulo.....	192
3.1.6.2. Detección del contacto inicial muestra-indentador.....	194
3.1.6.3. Detección de los niveles de vibración.....	195
3.1.7. Calibraciones requeridas por el NanoTest 550.....	195

3.1.7.1. Calibración de la carga.....	195
3.1.7.2. Calibración de la profundidad de indentación.....	196
3.1.7.3. Calibración de la rigidez del sistema.....	197
3.1.7.4. Calibración de la función de área del diamante.....	198
3.1.7.5. Calibración del transductor de fricción.....	198
3.1.8. Ensayos de nanoindentación dinámica.....	199
3.1.9. Cálculo de la dureza según el método de análisis de Oliver y Pharr.....	200
3.1.10. Procedimiento experimental de las medidas de dureza y módulo de elasticidad.....	205
3.2. RESULTADOS DE LAS MEDIDAS DE DUREZA Y MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LOS RECUBRIMIENTOS DUROS ESTUDIADOS.....	206
3.2.1. Grupo D: recubrimientos de CrAlN depositados por evaporación por arco catódico.....	207
3.2.2. Grupo A: recubrimientos de CrC depositados por evaporación por arco catódico.....	215
3.2.3. Grupo B: recubrimientos de CrC depositados mediante pulverización catódica magnetrón .....	217
3.2.4. Grupo C: recubrimientos constituidos por multicapas de Cr/CrC depositados mediante pulverización catódica magnetrón .....	219
3.3. TENSIONES RESIDUALES DE LOS RECUBRIMIENTOS.....	221
3.3.1. Procedimiento experimental para realizar las medidas de tensiones residuales.....	221
3.3.2. Resultados de las medidas de tensiones residuales.....	222
3.3.2.1. Grupo B: recubrimientos de CrC depositados mediante pulverización catódica magnetrón.....	222
3.3.2.2. Grupo C: recubrimientos constituidos por multicapas de Cr/CrC depositados mediante pulverización catódica magnetrón.....	223
3.4. ADHESION DE LOS RECUBRIMIENTOS AL SUSTRATO.....	223
3.4.1. Procedimiento experimental desarrollado para realizar las pruebas de rayado “Scratch Test” para la medida de la adhesión.....	224
3.4.1.1. Procedimiento de medida con el NanoTest 550.....	224
3.4.1.2. Procedimiento de medida con el equipo manual.....	225

3.4.1.3. Análisis de la traza de rayado.....	226
3.4.2. Resultados de las pruebas de rayado realizadas al Grupo C: recubrimientos constituidos por multicapas de Cr/CrC depositados mediante pulverización catódica magnetrón.....	227
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>237</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>241</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>XIX</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>XXV</b>
<b>ANEXO C.....</b>	<b>XXIX</b>
<b>ANEXO D.....</b>	<b>XXXI</b>
<b>ANEXO E.....</b>	<b>XXXVII</b>