



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

Unidad Zacatenco

***“ESTUDIO NUMÉRICO - EXPERIMENTAL BAJO CONDICIONES
DE FATIGA POR CONTACTO DE LA ALEACIÓN Co-Cr-Mo
ENDURECIDA SUPERFICIALMENTE POR DIFUSIÓN DE BORO”***

Tesis que para obtener el grado de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

Presenta:

ING. DANIEL SANDOVAL JUÁREZ

Directores:

Dr. German Anibal Rodríguez Castro

Dr. Alfonso Meneses Amador

México D.F. Agosto de 2015





Dedicatorias

A mis padres, Isabel C. Juárez y Francisco Sandoval, las personas a las que les debo todo y los responsables de cada uno de mis logros, por ser mi apoyo y guía durante toda la vida.

A mis hermanos Francisco Javier y María Fernanda, mis compañeros de vida y mejores amigos por siempre.

A mi abuelo Francisco y en general a toda mi familia, de quienes siempre he tenido total apoyo.



Agradecimientos

Al Instituto Politécnico Nacional, mi segunda casa durante 10 años.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), la SEPI-ESIME Zacatenco y particularmente al Grupo de Ingeniería de Superficies, por proporcionar los recursos necesarios para desarrollar este trabajo.

A mis asesores:

Dr. German Anibal Rodríguez Castro por la confianza brindada, dedicación y enseñanzas durante este tiempo.

Dr. Alfonso Meneses Amador por sus invaluable consejos, pero sobre todo por su constante motivación para seguir preparándome.

Al Dr. Iván E. Campos Silva por sus atinadas, formativas y profesionales observaciones.

Al Dr. José Martínez Trinidad por su apoyo, comentarios y disponibilidad.

Al Dr. Orlando Susarrey Huerta por sus observaciones y las facilidades para poder desarrollar el presente trabajo.

A mis compañeros y amigos del Grupo de Ingeniería de Superficies.



Tabla de Contenido

| | |
|----------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Glosario de símbolos | IV |
| Lista de Figuras..... | VI |
| Lista de Tablas..... | X |
| Resumen | XII |
| Abstract | XIII |
| Antecedentes | XIV |
| Justificación | XVIII |
| Objetivo general..... | XIX |
| Objetivos particulares | XIX |
| Metodología | XX |
| Borurización de la aleación <i>Co-Cr-Mo</i>..... | 1 |
| 1.1 Introducción..... | 1 |
| 1.2 Endurecimiento superficial..... | 1 |
| 1.3 Proceso de Borurización..... | 3 |
| 1.4 Borurización de aleaciones base cobalto..... | 4 |
| 1.4.1 Aleaciones <i>Co-Cr-Mo</i> | 4 |
| 1.4.2 Crecimiento y composición de la capa en aleaciones base cobalto..... | 5 |
| 1.4.3 Efecto de los elementos aleantes..... | 7 |
| Marco teórico..... | 10 |
| 2.1 Introducción..... | 10 |
| 2.2 Fatiga por contacto..... | 11 |
| 2.3 Contacto mecánico..... | 11 |
| 2.3.1 Modelos de contacto mecánico..... | 12 |
| 2.3.2 Contacto de Hertz..... | 13 |
| 2.3.3 Distribución de la presión de contacto y campo de esfuerzos..... | 14 |
| 2.4 Contacto en sistemas capa/substrato..... | 19 |



Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

| | | |
|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.4.1 | Contacto entre una esfera y un sistema con capa/substrato..... | 20 |
| 2.4.2 | Contacto en sistemas capa/substrato en presencia de deformación plástica. | 22 |
| 2.5 | Efectos dinámicos y cíclicos..... | 24 |
| 2.5.1 | Efectos de inercia..... | 24 |
| 2.5.2 | Acumulación de daño. | 25 |
| 2.5.3 | Endurecimiento por deformación..... | 26 |
| 2.5.4 | Plasticidad cíclica. | 27 |
| Procedimiento experimental..... | | 29 |
| 3.1 | Introducción. | 29 |
| 3.2 | Proceso de borurización..... | 29 |
| 3.3 | Caracterización de las capas..... | 32 |
| 3.3.1 | Metalografía..... | 32 |
| 3.3.2 | Caracterización mecánica por indentación instrumentada..... | 36 |
| 3.4 | Prueba de fatiga por contacto..... | 44 |
| 3.4.1 | Descripción de la prueba. | 45 |
| 3.4.2 | Equipo utilizado. | 46 |
| 3.5 | Metodología experimental para la prueba | 48 |
| 3.5.1 | Condiciones generales | 48 |
| 3.5.2 | Determinación del nivel de daño..... | 49 |
| 3.5.3 | Determinación de las cargas estáticas críticas. | 50 |
| 3.5.4 | Aplicación de cargas cíclicas. | 51 |
| Simulación Numérica de la Prueba de Fatiga por Contacto..... | | 55 |
| 4.1 | Introducción. | 55 |
| 4.2 | Descripción general de la simulación..... | 56 |
| 4.2.1 | Secuencia de pasos. | 57 |
| 4.2.2 | Definición del tipo de análisis. | 58 |
| 4.3 | Modelado Geométrico. | 61 |
| 4.4 | Propiedades mecánicas para la simulación..... | 61 |
| 4.4.1 | Propiedades mecánicas del substrato. | 62 |
| 4.4.2 | Propiedades mecánicas de las capas. | 64 |
| 4.5 | Condiciones de simulación..... | 66 |



Instituto Politécnico Nacional
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

| | |
|--------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.6 Criterio de daño..... | 66 |
| 4.7 Validación del modelo..... | 69 |
| Análisis de Resultados..... | 71 |
| 5.1 Introducción..... | 71 |
| 5.2 Pruebas estáticas..... | 71 |
| 5.3 Pruebas cíclicas..... | 75 |
| 5.4 Daño generado durante la prueba..... | 78 |
| 5.4.1 Microscopia óptica..... | 78 |
| 5.4.2 Análisis por Microscopia Confocal y perfilometría..... | 81 |
| 5.5 Simulación numérica..... | 84 |
| Conclusiones..... | 92 |
| Perspectivas del trabajo..... | 94 |
| Referencias..... | 95 |



Glosario de símbolos

| | |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| a | Radio de contacto |
| <i>Abaqus</i> | Programa de simulación por el método de elementos finitos |
| <i>ASM</i> | Sociedad Americana para los Metales (American Society for Metals) |
| <i>ASTM</i> | Estándares Americanos para Pruebas de Materiales (American Society for Testing Materials) |
| A_c | Área de contacto |
| <i>AC yield</i> | Variable disponible en Abaqus que indica la cedencia de un material (Actively Yielding) |
| B_4C | Carburo de boro |
| <i>CAX4</i> | Elemento axi simétrico de cuatro nodos |
| <i>CoB</i> | Boruro de cobalto |
| Co_2B | Di Boruro de cobalto |
| <i>Co-Cr-Mo</i> | Cobalto Cromo Molibdeno |
| E | Módulo de elasticidad |
| E^* | Módulo de elasticidad reducido |
| F_{c1} | Carga estática crítica para el sistema s_1 |
| F_{c2} | Carga estática crítica para el sistema s_2 |
| F_{c3} | Carga estática crítica para el sistema s_3 |
| F_f | Carga crítica en fatiga |
| h_c | Profundidad de contacto |
| h_e | Profundidad o desplazamiento elástico |
| H | Dureza |
| <i>HV</i> | Dureza Vickers |
| <i>ISE</i> | Efecto del tamaño de indentación (Indentation size effect) |
| K | Coeficiente de resistencia |
| K^t | Matriz de rigidez |
| <i>MCBL</i> | Microscopia Confocal de Barrido Laser |
| n | Coeficiente de endurecimiento por deformación |
| P_m | Presión media |
| P_{mc} | Presión media crítica estática |



Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

| | |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| P_{mf} | Presión media en fatiga |
| P_{mf} / P_{mc} | Sensibilidad a la fatiga |
| R | Radio de la esfera |
| P_{mf} | Presión media en fatiga |
| P_{mf} / P_{mc} | Sensibilidad a la fatiga |
| R | Radio de la esfera |
| $s1$ | Sistema capa/substrato con espesor de capa $5.8\mu\text{m}$, obtenido para condiciones de tratamiento de 3h 850°C |
| $s2$ | Sistema capa/substrato con espesor de capa $11.2\mu\text{m}$, obtenido para condiciones de tratamiento de 1h 950°C |
| $s3$ | Sistema capa/substrato con espesor de capa $27.3\mu\text{m}$, obtenido para condiciones de tratamiento de 5h 950°C |
| SiC | Carburo de silicio |
| Si_3N_4 | Nitruro de silicio |
| t | Espesor de capa |
| XRD | Difracción de rayos X (X Ray diffraction) |
| ϵ_{rep} | Deformación representativa |
| σ_1, σ_2 | Esfuerzos principales en la dirección 1 y 2 |
| σ_{max} | Esfuerzo máximo |
| σ_r | Esfuerzo radial |
| $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ | Componentes de esfuerzos para las direcciones X ,Y, Z |
| σ_Y | Esfuerzo de cedencia |
| τ_{max} | Esfuerzo cortante máximo |
| ν | Relación de Poisson |



Lista de Figuras

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 1.1 Diagrama Co-B. | 6 |
| Fig. 1.2 Estructura cristalina de los boruros de cobalto a) Fase Co B b) Fase Co ₂ B. | 7 |
| Fig. 1.3 Morfología de capas de boruro en cobalto y aleaciones a) Cobalto puro, 1000°C b) Co-4 % WC, 950°C c) Co-8 % WC, 950 °C . Tomada de Zhunkovskii et al. (1973) | 8 |
| Fig. 2.1 Modelos de contacto mecánico (Gladwell 1980) | 13 |
| Fig. 2.2 Contacto entre una esfera y una superficie plana. | 14 |
| Fig. 2.3 Distribución de la presión entre una esfera y una superficie plana. | 16 |
| Fig. 2.4 a) Desplazamiento de la superficie en la zona de contacto b) Esfuerzos en la superficie de la zona de contacto. Considerando una $P_m = 1$ MPa, $R=1$ mm. Fischer A. (2007) | 17 |
| Fig. 2.5 Diagramas de contorno para las magnitudes de esfuerzos por contacto entre una esfera y una superficie plana a) σ_1 b) σ_2 c) σ_3 d) τ_{max} . Fischer A. (2007) | 19 |
| Fig. 2.6 Deformación cedencia y agrietamiento en un sistema capa/substrato durante el contacto. a) Región elasto -plástica b) Región perfectamente plástica c) Fractura del recubrimiento. | 23 |
| Fig. 2.7 Variación del área de contacto conforme se aplican ciclos de carga. | 25 |
| Fig. 2.8 Desarrollo del endurecimiento por deformación. | 26 |
| Fig. 2.9 Comportamiento de los metales bajo cargas cíclicas a) Endurecimiento cíclico b) Emblandecimiento cíclico | 27 |
| Fig. 3.1 Geometría y dimensiones de las probetas. | 31 |
| Fig. 3.2 Esquema del empaquetamiento de las probetas para el tratamiento termoquímico. | 31 |
| Fig. 3.3 Medición de los espesores de capa. | 32 |
| Fig. 3.4 Micrografías de la aleación Co-Cr-Mo Borurada a) 850°C 3 h b) 950°C 1h c) 950°C 5h. | 34 |
| Fig. 3.5 Patrón de difracción para una aleación ASTM - F75 (Co-Cr-Mo) borurada. | 35 |



Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 3.6 a) Vista transversal de la indentación. b) Curva de carga y descarga generada durante las indentaciones. | 36 |
| Fig. 3.7 Geometría y área proyectada de un indentador Berkovich. | 37 |
| Fig. 3.8 Grafico carga-profundidad obtenido a $6\ \mu\text{m}$ (fase CoB) y $10\ \mu\text{m}$ (fase Co2B) desde la superficie de la aleación <i>Co-Cr-Mo</i> borurada. Sistema s2. | 41 |
| Fig. 3.9 Indentaciones Berkovich realizadas a lo largo de la capa de boruros de cobalto empleando 50 mN de carga. Sistema capa substrato a) s1 b) s2 c) s3. | 42 |
| Fig. 3.10 Perfiles de dureza obtenidos por indentación instrumentada bajo una carga de 50 mN en la aleación <i>Co-Cr-Mo</i> borurada. | 43 |
| Fig. 3.11 Comportamiento del módulo de elasticidad obtenido por indentación instrumentada bajo una carga de 50 mN en la aleación <i>Co-Cr-Mo</i> borurada. | 43 |
| Fig. 3.12 Esfera en contacto con un sistema capa/substrato. | 45 |
| Fig. 3.13 Máquina de ensayos universal MTS -858. | 46 |
| Fig. 3.14 Ensamble y montaje de los dispositivos para la prueba de fatiga por contacto a) Dispositivo sujetador de probetas b) Dispositivo para la aplicación de carga. | 47 |
| Fig. 3.15 Simulación numérica de una indentación esférica. Utilizando una carga de 1500 N. | 48 |
| Fig. 3.16 Nivel de daño crítico utilizado, presencia de grietas tipo anillo. | 50 |
| Fig. 3.17 Secuencia en la aplicación de cargas cíclicas. | 52 |
| Fig. 4.1 Contacto entre esfera y una superficie plana. a) Vista isométrica. b) Vista lateral. | 56 |
| Fig. 4.2 Secuencia de pasos para la simulación. a) "Posicionamiento". b) "Carga cíclica". c) "Retiro". | 58 |
| Fig. 4.3 Geometría Axial simétrica para la simulación desarrollada. | 61 |
| Fig. 4.4 Comportamiento de la curva esfuerzo deformación para un material isotrópico. | 62 |
| Fig. 4.5 Curva esfuerzo deformación calculada para la aleación <i>Co-Cr-Mo</i> . | 63 |
| Fig. 4.6 Diferencias entre el endurecimiento isotrópico y el endurecimiento cíclico. | 64 |



Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 4.7 Superficie de falla “Teoría del esfuerzo principal máximo”. | 67 |
| Fig. 4.8 Representación de grietas tipo anillo durante la simulación numérica a) Representación axial simétrica b) Representación en 3 dimensiones c) Vista superior | 68 |
| Fig. 5.1 P_m calculada para las cargas estáticas aplicadas en el sistema capa/substrato s_1 . | 72 |
| Fig. 5.2 P_m calculada para las cargas estáticas aplicadas en el sistema capa/substrato s_2 . | 73 |
| Fig. 5.3 P_m calculada para las cargas estáticas aplicadas en el sistema capa/substrato s_3 . | 73 |
| Fig. 5.4 Daño generado en los 3 sistemas capa/substrato bajo una carga de 1000 N a) s_1 b) s_2 c) s_3 | 74 |
| Fig. 5.5 Diagrama Carga vs Número de ciclos y daño generado en el sistema capa/substrato s_1 . | 75 |
| Fig. 5.6 Diagrama Carga vs Número de ciclos y daño generado en el sistema capa/substrato s_2 . | 76 |
| Fig. 5.7 Diagrama Carga vs Número de ciclos y daño generado en el sistema capa/substrato s_3 . | 76 |
| Fig. 5.8 Evolución de daño en los 3 sistemas capa/substrato bajo las magnitudes de carga cíclicas más críticas. | 79 |
| Fig. 5.9 Fallas presentes en s_3 a) Carga estática de 1500 N b) Carga cíclica de 500 N (100 000 ciclos) | 80 |
| Fig. 5.10 a) Imagen en 3 dimensiones de una huella formada en s_1 b) Cambio en la profundidad residual en función del número de ciclos. Carga aplicada de 800 N. | 81 |
| Fig. 5.11 a) Imagen en 3 dimensiones de una huella formada en s_2 b) Cambio en la profundidad residual en función del número de ciclos. Carga aplicada de 600 N. | 82 |
| Fig. 5.12 a) Imagen en 3 dimensiones de una huella formada en s_3 b) Cambio en la profundidad residual en función del número de ciclos. Carga aplicada de 500 N. | 82 |
| Fig. 5.13 Profundidad de una grieta generada en s_1 . a) Imagen en 3 dimensiones. b) Profundidad aproximadamente igual al espesor total de la capa 5.8 μm . | 83 |
| Fig. 5.14 Profundidad de una grieta generada en s_2 . a) Imagen en 3 dimensiones. b) Profundidad aproximadamente igual al espesor total de la capa 11.2 μm . | 83 |
| Fig. 5.15 Diagrama de contorno para el esfuerzo principal máximo en el sistema s_3 . | 84 |



Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 5.16 Comparación de los diámetros residuales obtenidos experimental y numéricamente en s1. | 85 |
| Fig. 5.17 Comparación de profundidades obtenidas experimental y numéricamente en s1. | 85 |
| Fig. 5.18 Comparación de diámetros residuales obtenidos experimental y numéricamente en s2. | 86 |
| Fig. 5.19 Comparación de profundidades obtenidas experimental y numéricamente en s2. | 86 |
| Fig. 5.20 Comparación de diámetros residuales obtenidos experimental y numéricamente en s3. | 87 |
| Fig. 5.21 Comparación de profundidades obtenidas experimental y numéricamente en s3. | 87 |
| Fig. 5.22 Evolución del campo de esfuerzos con respecto al número de ciclos aplicados en s1, carga 800 N a) Estado inicial b) 1 ciclo de carga c) 30 ciclos de carga d) 750 ciclos de carga. | 89 |
| Fig. 5.23 Evolución del campo de esfuerzos con respecto al número de ciclos aplicados en s2, carga 600 N a) Estado inicial b) 1 ciclo de carga c) 30 ciclos de carga d) 50 ciclos de carga. | 90 |
| Fig. 5.24 Evolución del campo de esfuerzos con respecto al número de ciclos aplicados en s3, carga 500N a) estado inicial b) 1 ciclo de carga c) 90 ciclos de carga d) 120 ciclos de carga. | 91 |



Lista de Tablas

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1.1 Clasificación de los procesos de endurecimiento superficial. | 2 |
| Tabla 1.2 Metales y constitución de las capas de boruro formadas. Dearnley P. and Bell T. (1985). | 4 |
| Tabla 1.3 Porcentaje en peso típico en Aleaciones <i>Co- Cr- Mo</i> . ASM Specialty Handbook. (2000). | 5 |
| Tabla 1.4 Propiedades mecánicas y parámetros cristalinos de los boruros <i>CoB</i> y <i>Co2B</i> . | 9 |
| Tabla 3.1 Composición química de la aleación <i>Co-Cr-Mo</i> (Micro-Melt Bio Dur Carpenter CCM Alloy) Carpenter Technical Data Sheet 2007. | 30 |
| Tabla 3.2 Condiciones propuestas para los tratamientos termoquímicos y su designación en la nomenclatura para este trabajo. | 30 |
| Tabla 3.3 Espesores de capa medidos. | 33 |
| Tabla 3.4 Propiedades mecánicas del substrato y esfera utilizados en la experimentación. | 47 |
| Tabla 3.5 Cargas y número de ciclos aplicados a cada recubrimiento durante la prueba de fatiga por contacto a una frecuencia de 6 Hz. | 53 |
| Tabla 4.1 Pasos para la simulación y tipo de análisis. | 59 |
| Tabla 4.2 Propiedades mecánicas de la aleación <i>Co-Cr-Mo</i> . (Carpenter Technical Data Sheet 2007) | 62 |
| Tabla 4.3 Propiedades mecánicas para las capas <i>Co2B</i> y <i>CoB</i> . | 65 |
| Tabla 4.4 Cargas y número de ciclos simulados para cada recubrimiento. | 66 |
| Tabla 4.5 Comparación de las cargas críticas estáticas obtenidas experimentalmente y simulación. | 69 |
| Tabla 4.6 Comparación de los diámetros de grieta obtenidos experimentalmente y por simulación. | 69 |
| Tabla 4.7 Comparación de las profundidades residuales obtenidas experimentalmente y por simulación numérica. | 70 |
| Tabla 5.1 Cargas estáticas críticas para cada sistema capa/substrato. | 71 |
| Tabla 5.2 Cargas estáticas críticas y presiones medias críticas obtenidas para cada sistema. | 74 |



Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tabla 5.3 Cargas y presiones medias críticas bajo condiciones estáticas y cíclicas para los 3 sistemas

capa/substrato. 77

Tabla 5.4 Número de ciclos aplicados hasta la presencia de la primera grieta tipo anillo. 88



Resumen

En el presente trabajo se estudia el comportamiento bajo condiciones de fatiga por contacto de una aleación *Co-Cr-Mo* endurecida superficialmente por difusión de boro. El endurecimiento de la aleación se realizó por medio del proceso de borurización por empaquetamiento en polvo, para tres condiciones diferentes de tiempo y temperatura de exposición (3h 850°C, 1h 950°C y 5h 950°C), con la finalidad de obtener tres capas con espesores diferentes.

La caracterización de las capas formadas se realizó por medio de microscopía óptica, los resultados mostraron morfología o interfaz planas y espesor total en el rango de 5.8 a 27.3 μm . Para la caracterización mecánica de las capas de boruro se utilizó la técnica de indentación instrumentada, con un indentador tipo Berkovich. Se obtuvo una dureza máxima alrededor de 26 GPa y un módulo de elasticidad de 394 GPa cerca de la superficie para la fase *CoB*.

Las pruebas de fatiga se realizaron en una máquina de ensayos universal servo-hidráulica mediante el impacto repetitivo de una esfera sobre la superficie del sistema capa/substrato. La experimentación consistió en dos partes. En la primera se determinó la carga estática crítica F_c , considerando la aparición de grietas tipo anillo como el criterio de falla. En la segunda parte, se realizaron las pruebas de fatiga a bajo ciclado ($n < 100,000$) aplicando cargas sub-críticas con una frecuencia de 6 Hz para los 3 sistemas.

Mediante microscopía óptica y microscopía confocal se midieron los radios y profundidades de las huellas formadas por las pruebas de fatiga. Los resultados de las pruebas, indican que el sistema capa/substrato con la capa más delgada, presenta mejor resistencia a fatiga, mientras que el comportamiento más frágil lo exhibe el sistema con capa de mayor espesor.

Con la finalidad de comparar con los resultados experimentales se desarrolló una simulación numérica de la prueba de fatiga por contacto utilizando el programa Abaqus 13. Las simulaciones se llevaron a cabo para las cargas cíclicas de mayor magnitud y se limitan a una cantidad de ciclos de aproximadamente 150. Los resultados presentan buenas aproximaciones con respecto a los diámetros de contacto y profundidades residuales medidos experimentalmente.

Debido a la limitada cantidad de trabajos referentes al tema, los resultados obtenidos representan un aporte importante para entender el comportamiento mecánico y tolerancia al daño que presentan este tipo de recubrimientos bajo la aplicación de cargas repetidas.



Abstract

In the present study, the behavior of a borided *Co-Cr-Mo* alloy under contact fatigue conditions was evaluated. The surface hardening was performed by means of the powder-pack boriding process at three different exposure times and temperatures (1h 950°C, 3h 850°C and 5h 950°C), in order to obtain three different boride layer thicknesses.

Optical microscopy was used to characterize the boride layer, the results showed a plane interface and total thicknesses in the range of 5 to 27 μm . The mechanical characterization was carried out using Berkovich instrumented indentation technique. Near the surface, the hardness and Young's modulus values were of 26.8 GPa and 394 GPa, respectively. Fatigue tests were performed on a servo-hydraulic universal testing machine by repetitive impact of a sphere over the surface of a layer/substrate system. The experimental methodology consisted of two parts. In the first, the static critical load F_c was determined, considering the appearance of cracks type ring as the failure criterion. During the second, fatigue tests were conducted in low-cycle ($n < 100,000$) using sub-critical loads with a frequency of 6 Hz in all three coatings formed.

By optical and confocal microscopy, the radii and depths of the prints formed by fatigue tests were measured. The test results indicate that the system with the thinner layer exhibit improved resistance to fatigue, while the fragile behavior is developed by system with the thicker layer.

In order to compare with experimental results, a numerical simulation of the contact fatigue test was developed, using Abaqus 13 software. The simulations were carried out considering the higher cyclic loads and are limited to an approximate amount of 150 cycles. The results showed good approximations with regard to contact diameters and residual depths obtained experimentally.

Due to the limited amount of researches related to this subject, the results of this study represent an important contribution to understand the mechanical behavior and damage tolerance of these coatings under repeated loads.



Antecedentes

Un área fundamental de la ingeniería de superficies es el estudio de los tratamientos termoquímicos que permiten ampliar las aplicaciones de los materiales mediante el mejoramiento de sus propiedades superficiales. Específicamente en México, el grupo de Ingeniería de Superficies del Instituto Politécnico Nacional ha enfocado sus investigaciones en el estudio y desarrollo de esta importante área de la ingeniería, destacando principalmente el tratamiento de borurización.

El tratamiento de borurización ha sido empleado en diversos tipos de aceros y aleaciones no ferrosas obteniendo como resultado un incremento en ciertas propiedades superficiales. Sin embargo, los estudios en este tipo de capas se han limitado en su mayoría a la evaluación de propiedades tribológicas, mecánicas y corrosivas, pocos trabajos han sido orientados a la evaluación del comportamiento en fatiga. El término fatiga por contacto es el que se adopta en este trabajo para hacer referencia a la degradación de materiales bajo la aplicación de cargas cíclicas por contacto. Es necesario aclarar esto debido a que algunos autores asignan diferentes nombres a este fenómeno, por ejemplo: resistencia al contacto dinámico, impacto cíclico o fatiga por impacto.

Hasta el momento, en capas de boro no se tiene algún antecedente relacionado con la estimación del comportamiento bajo condiciones de carga por contacto o fatiga por contacto, mientras que para otros tipos de capas las investigaciones realizadas son limitadas. A continuación se presentan algunas de ellas.

En las últimas décadas se han propuesto diversas pruebas con la finalidad de evaluar la fatiga por contacto en recubrimientos. Sin embargo, la mayoría de ellas carecen de control en las variables y condiciones presentes durante la experimentación. Knotek *et al.* (1992) proponen una técnica para evaluar la fatiga por contacto desarrollando un dispositivo capaz de simular la aplicación de cargas dinámicas, haciendo impactar de manera cíclica y controlada una pequeña esfera sobre una superficie plana formada por el material sustrato y la capa. La metodología aplicada consiste en determinar la carga estática crítica para la cual la capa falla, posteriormente se aplican cargas cíclicas menores en magnitud a la carga estática crítica determinada. Con el fin de verificar la técnica, evalúan el comportamiento de diferentes sistemas capa/sustrato tanto metálicos como cerámicos resultando en todos los casos una mayor cantidad de daño para las condiciones dinámicas en comparación con las condiciones estáticas. La mayoría de los trabajos recientes para el estudio de la fatiga por contacto se



Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

basan en la aplicación de esta técnica, existiendo algunas variantes durante la prueba, siendo la principal de ellas la sustitución del dispositivo desarrollado por Knotek con una máquina de ensayos universal.

Para materiales cerámicos puros, la técnica de Knotek es frecuentemente utilizada para evaluar la resistencia al contacto, (Kim *et al.* 1999), (Jiménez E *et al.* 2005). También se proponen soluciones teóricas para predecir la aparición de grietas basadas en principios de mecánica de la fractura y el comportamiento mecánico frágil, mostrando cierta relación con los resultados experimentales.

Sin embargo, el análisis teórico de la fatiga por contacto se vuelve sumamente complicado debido a la presencia de deformaciones plásticas, propiedades mecánicas diferentes en el sustrato y la capa y a los efectos dinámicos presentes. Por esta razón la mayoría de los trabajos se han encaminado al análisis experimental, sin abundar en las bases teóricas.

Voevodin *et al.* (1995) utilizan la prueba de fatiga por contacto, para caracterizar el comportamiento de recubrimientos por deposición física (PVD) a base de titanio con diferentes composiciones. Al analizar las fallas en las huellas formadas, establecen que durante la prueba se distinguen tres principales zonas de diferente daño, una zona central en la que se presenta falla cohesiva, una zona intermedia en la que se presenta una combinación de fallas cohesiva y adhesiva y finalmente la zona en la cual se desarrollan grietas radiales en el material. Bantle *et al.* (1995) establecen que en capas duras, al aplicar cargas dinámicas, la mayor parte de ésta se transmite a través de la capa hacia el sustrato, deformándolo plásticamente con cada ciclo, a medida que aumenta la deformación plástica se presentan las primeras 2 zonas establecidas por Voevodin, posteriormente la capa comienza a agrietarse debido a su naturaleza frágil, liberando esfuerzos internos. Señala también que el tamaño y pronunciación de las zonas de falla, e incluso el desarrollo de delaminación, depende de la combinación de las propiedades de la capa y el sustrato, siendo la rigidez del sustrato el factor más predominante.

Un aporte interesante al estudio de la evolución del daño durante la prueba de fatiga por contacto es presentado por Tarres *et al.* (2009). En este trabajo se realizaron pruebas de fatiga por contacto utilizando metales duros (WC-Co) como sustrato y recubrimientos PVD de TiN. Basados en el análisis mediante microscopía de la sección transversal de las marcas formadas, establecen que las grietas anillo en la superficie se propagan internamente hacia la interfaz del recubrimiento y sustrato conforme aumenta el número de ciclos y finalmente las grietas continúan creciendo a través del sustrato. Con



Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

base en sus observaciones sugieren que el criterio más adecuado para establecer las condiciones críticas de daño en la prueba de fatiga por contacto es la formación de grietas radiales.

Zhu *et al.* (2006) encontraron que el daño que se presenta durante esta prueba no sólo depende de la magnitud de la carga aplicada, número de ciclos y las propiedades de la capa y sustrato, sino que también afecta en gran medida la velocidad (o la frecuencia) con la que es aplicada la carga. Esto es debido a que mayores velocidades implican una mayor energía cinética que impacta en el material, por lo que introducen el concepto de “ciclos de energía” para indicar las condiciones de falla durante esta prueba, en lugar de reportar cargas críticas y número de ciclos aplicados.

Abordando el problema desde el punto de vista numérico, no se ha encontrado algún antecedente que simule las condiciones dinámicas propias de la prueba, los trabajos encontrados realizan las simulaciones bajo condiciones cuasi estáticas, destacando los mencionados a continuación.

Abdul-Baqi *et al.* (2002) presentan el desarrollo de un modelo cuasi estático con el objeto de simular la aparición de grietas en recubrimientos durante la indentación esférica, capaz de simular tanto las primeras grietas radiales como las que se desarrollan subsecuentemente durante el proceso. El modelo es simplificado aprovechando la simetría axial del problema, considera el material sustrato como perfectamente plástico, el recubrimiento como lineal elástico y el indentador como un sólido rígido. Para la simulación del crecimiento de las grietas se utilizan elementos cohesivos y la energía a la cual se fractura el recubrimiento es estimada también en este trabajo.

Bouzakis *et al.* (1996) desarrollan un modelo numérico cuasi estático que simula la indentación esférica sobre una superficie plana con capa (misma configuración geométrica que una prueba de fatiga por contacto), con el fin de conocer la magnitud de los esfuerzos generados en un solo ciclo de carga y posteriormente en combinación con resultados experimentales construye la curva S-N de la capa. Bouzakis *et al.* (2004) aplican un modelo similar para estimar la iniciación de grietas en el recubrimiento. Cabe señalar que el objetivo de estos trabajos no es simular la prueba de fatiga por contacto, si no únicamente conocer el campo de esfuerzos generado estáticamente para después aproximar otras propiedades de la capa, sin embargo el modelo utilizado es similar al propuesto en el presente trabajo.

De la revisión se puede concluir que desde el punto de vista teórico no se tiene una base bien fundamentada para la fatiga por contacto que considere la estimación de esfuerzos dinámicos, la deformación plástica del sustrato y la interacción entre sustrato y capa. Mientras que desde un



Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

enfoque experimental, aún no se cuenta con una norma o procedimiento estandarizado por algún organismo para poder evaluar la fatiga por contacto. Al no ser una prueba estandarizada, cada estudio utiliza diferentes condiciones, equipos, y cargas, haciendo que los resultados no puedan ser comparables entre ellos. Cada autor utiliza diferentes criterios de falla, generalmente de carácter cualitativo basados en las condiciones de experimentación particulares que utilizan.



Justificación

Las aleaciones *Co-Cr-Mo* son utilizadas en diversos sectores de la industria, destacando la fabricación de prótesis quirúrgicas, la fabricación de válvulas, ejes y anillos de pistón en la industria automotriz; partes de motores aerorreactores, componentes estructurales aeronáuticos y en ciertos componentes de turbinas de gas en la industria de la generación de energía. Por lo general, este tipo de aleaciones se caracterizan por poseer excelente resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión y alta resistencia a la temperatura. A pesar de estas buenas propiedades, muchas veces el ambiente y las condiciones críticas de operación vuelven inevitable el deterioro de la superficie del material con el paso del tiempo. Una solución atractiva y económicamente viable para contrarrestar esto es la aplicación de tratamientos termoquímicos, los cuales modifican las propiedades superficiales de los materiales.

El tratamiento de borurización ha sido empleado en aleaciones base cobalto en investigaciones de ciencia básica, encontrando que ciertas propiedades como la resistencia a la corrosión y la resistencia al desgaste son mejoradas, pero sin tener aún el impacto industrial como en el caso de los aceros borurados. Si en realidad se busca aplicar la borurización en aleaciones de cobalto a nivel industrial y considerando que en muchas aplicaciones de este tipo de aleaciones, el material está sometido a cargas repetidas por contacto, un aspecto importante a evaluar es el comportamiento de la capa en fatiga por contacto.

La fatiga por contacto, frecuentemente ignorada en el proceso de diseño, es la causa de muchas de las fallas de componentes mecánicos y estructuras en ingeniería; se presenta cuando las superficies de dos cuerpos diferentes entran en contacto directo transmitiendo cargas generalmente de naturaleza cíclica o periódica. La presencia de grandes esfuerzos conduce a una gran deformación plástica en las áreas de contacto y en algunos casos a la formación de grietas localizadas.

En capas de boro (tanto por difusión, PVD o PVC) el comportamiento en fatiga por contacto no ha sido estudiado en aleaciones base cobalto ni en algún otro material sustrato, inclusive en aceros. Con un análisis de fatiga por contacto, es posible conocer la evolución del daño en la capa tras la aplicación de varios ciclos de carga, evaluar si la integridad de la capa permanece en condiciones aceptables y de esta manera determinar si la capa es adecuado o no para determinada aplicación en función de los parámetros del proceso.



Objetivo general

Utilizar la configuración esfera-superficie plana (sistema capa/substrato), aplicando cargas estáticas y cíclicas para evaluar numérica y experimentalmente el comportamiento en fatiga por contacto de una aleación *Co-Cr-Mo* endurecida superficialmente por un tratamiento de borurización.

Objetivos particulares

- 1- Endurecer superficialmente las probetas de la aleación *Co-Cr-Mo* mediante un tratamiento termoquímico de borurización a diferentes temperaturas y tiempos, para formar las capas de boruros de cobalto de tres diferentes sistemas (capa/substrato).
- 2- Realizar la caracterización mecánica de las capas CoB y Co_2B mediante la técnica de indentación instrumentada, para obtener las propiedades mecánicas (dureza y módulo de elasticidad) necesarias para desarrollar la simulación numérica.
- 3- Realizar la primera parte de la prueba de fatiga por contacto, aplicando cargas estáticas controladas de diferente magnitud, con el fin de obtener las cargas estáticas críticas F_C de cada uno de los tres sistemas capa/substrato propuestos.
- 4- Realizar la segunda parte de la prueba de fatiga por contacto, aplicando cargas cíclicas controladas de diferente magnitud durante diferentes números de ciclos, para evaluar el comportamiento de los tres sistemas bajo estas condiciones.
- 5- Desarrollar una simulación numérica de la prueba de fatiga por contacto utilizando el programa comercial ABAQUS, basándose en los parámetros y secuencias de carga utilizadas durante la prueba, para comparar los resultados con los obtenidos experimentalmente.
- 6- Comparar el comportamiento en fatiga por contacto de los tres sistemas capa/substrato propuestos, analizando las fallas y evolución del daño generado, con el fin de determinar cuál es el sistema que presenta mejor resistencia a la aplicación de cargas repetidas.



Metodología

La metodología seguida para este trabajo fue la siguiente:

- 1) Preparación y endurecimiento de las probetas de aleación *Co-Cr-Mo* de forma cilíndrica (diámetro 1.9 mm y 0.5 mm de espesor) por medio de un tratamiento termoquímico de difusión de boro. Basados en el estudio de la cinética de crecimiento de las capas de *CoB* y *Co₂B* previamente realizado por el grupo de Ingeniería de superficies del IPN se propusieron tres condiciones para los tratamientos, las cuales fueron: 850°C por 3h, 950°C por 1 h y 950°C durante 5h de exposición.
- 2) Medición de los espesores de las capas formadas durante las distintas condiciones de tratamiento, utilizando un microscopio óptico marca Olympus GX-51 y el programa analizador de imágenes Image Pro-Plus 6.0. Se realizó un total de 40 mediciones para cada fase en 4 diferentes secciones de la probeta.
- 3) La caracterización mecánica de las capas formadas durante la borurización se llevó a cabo mediante indentación instrumentada, realizando un perfil de indentaciones en la sección transversal de las capas, iniciando a una distancia cercana a la superficie y hasta llegar al substrato. Las distancias entre mediciones para cada sistema fueron diferentes y se determinaron considerando las recomendaciones de la norma ISO 14577-1. Para los ensayos se utilizó nanoindentador NHT de la marca CSM Instrument con un indentador tipo Berkovich, las principales condiciones de prueba fueron: Carga máxima de 50 mN, velocidad de aplicación y retiro de carga igual a 100 mN/min y un tiempo de 10 s durante el cual se retuvo la carga máxima.
- 4) Se diseñó y fabricó el dispositivo principal sobre el cual se monta el indentador esférico y cuya función es transmitir la carga, instalado en la unidad de carga de una máquina de ensayos universal servo hidráulica marca MTS. Así como el dispositivo para poder sujetar de manera fija las probetas a la unidad de prueba de la máquina.
- 5) Se establecieron los parámetros experimentales utilizados durante la prueba de fatiga por contacto (Nivel de daño crítico, frecuencia de carga, número de ciclos, etc.), con base en el comportamiento



Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

exhibido por los tres sistemas capa/substrato en pruebas previas realizadas y en las limitaciones del equipo utilizado.

- 6) Definir las cargas estáticas críticas F_C para cada sistema capa/substrato, considerando la aparición de grietas tipo anillo como nivel de daño crítico. Por medio de una máquina de ensayos universal MTS se aplicaron cargas estáticas de 50, 100, 150, 200 hasta 1500 N y mediante microscopia óptica se observó el daño generado. Para cada sistema, la carga aplicada de menor magnitud para la cual se observaron grietas tipo anillo, fue considerada como la carga estática crítica F_C .
- 7) Evaluación de la resistencia a la fatiga por contacto para los tres sistemas capa/substrato. Para cada sistema se aplicaron cargas cíclicas de magnitud menor a la respectiva F_C (carga estática crítica) determinada anteriormente. Las pruebas se realizaron en una máquina de ensayos universal MTS a una frecuencia de 6 Hz por un máximo de 100 000 ciclos. La evolución del daño generado tras cada prueba se realizó mediante microscopia óptica.
- 8) Se realizó una simulación numérica por medio del software Abaqus, para la estimación del comportamiento en fatiga por contacto. El modelo fue validado comparando las superficies agrietadas experimentalmente con los campos de esfuerzos obtenidos por simulación y la posterior aplicación de una teoría de falla adecuada.



Capítulo 1

Borurización de la aleación *Co-Cr-Mo*.

1.1 Introducción.

En este primer capítulo se muestran las generalidades con respecto al tratamiento de borurización. Debido a que en el desarrollo del presente trabajo se utiliza una aleación *Co-Cr-Mo* borurizada, se muestra especial interés en literatura e investigaciones relacionadas con el crecimiento de capas de boruro en cobalto y aleaciones base cobalto.

1.2 Endurecimiento superficial.

El desarrollo tecnológico depende de manera directa del progreso de la ciencia de los materiales. Con nuevas y diversas aplicaciones, los materiales deben poseer las propiedades adecuadas para funcionar en los diferentes ambientes y condiciones a los que están expuestos. En diferentes aplicaciones mecánicas el estado de la superficie de un componente controla su tiempo de vida útil o muchas veces es necesario que el material posea ciertas propiedades superficiales, por ejemplo una alta dureza superficial, mientras que su interior debe presentar buena tenacidad. Dicha combinación de propiedades en primera instancia parecen no ser compatibles en un mismo metal, sin embargo, esto es posible gracias a la aplicación de procesos de endurecimiento superficial. Dichos procesos representan un atractivo y económico método para modificar las propiedades superficiales de un material metálico sin alterar las propiedades internas del mismo.



Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Existen diferentes procesos de endurecimiento superficial, de acuerdo a ciertas características que comparten, la ASM (American Society for Metals) los clasifica como:

a) Métodos que involucran la adición de una nueva capa.

- **Recubrimientos duros:** Se basan en la adición intencional de una capa dura de composición diferente al sustrato, mediante la aplicación de diferentes procesos de naturaleza física o química.

b) Métodos que involucran la modificación de la superficie del material, sin adicionar intencionalmente una nueva capa.

- **Tratamientos termoquímicos o por difusión:** Estos métodos se basan en la difusión a altas temperaturas de átomos no metálicos o metálicos en la superficie, modificando su composición química y microestructura.
- **Métodos de endurecimiento selectivos:** En estos métodos por medio de la aplicación de energía (térmica, eléctrica, etc.) se modifica la microestructura de la superficie del material, sin alterar su composición química. Pueden ser utilizados para endurecer la superficie completa de un componente o una parte de él, por lo que reciben el nombre de métodos selectivos.

En la *Tabla 1.1* se muestra la clasificación anterior, además de diferentes procesos de endurecimiento superficial y de algunos de los procesos con mayor aplicación industrial.

Tabla 1.1 Clasificación de los procesos de endurecimiento superficial. Tomada de ASM Handbook vol. 4.

| Adición de capa | Tratamiento del sustrato | |
|------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Recubrimientos duros | Métodos por difusión | Métodos selectivos |
| - Adición por fusión | - Carburización | - Endurecimiento por flama |
| - Rociado térmico | - Nitruración | - Endurecimiento por inducción |
| -Recubrimiento electroquímico | - Carbonitruración | - Endurecimiento por laser |
| -Deposición física de vapor (PVD) | - Borurización | - Implantación de iones |
| -Deposición química de vapor (CVD) | - Boronitruración | - Carburización, nitruración y borurización selectivos |
| - Mezcla Iónica | - Difusión de Titanio-Carbono | - Uso de arco eléctrico |
| | - Nitrocarburización | |



1.3 Proceso de Borurización.

La borurización es un proceso termoquímico de endurecimiento superficial que puede ser aplicado a una gran variedad de aceros, metales no ferrosos y sus aleaciones. Este proceso puede ser realizado en diferentes medios como son: polvos, sales, medios gaseosos y a base de pasta. En esencia, durante este proceso se expone la superficie del metal a un ambiente rico en boro y a altas temperaturas. Debido a estas condiciones y al tamaño relativamente pequeño de los átomos de boro, estos se difunden en la superficie del metal, colocándose en los espacios intersticiales de la red cristalina, formando boruros metálicos con composición basada en el metal tratado. Como consecuencia de la gran dureza de los boruros formados en la superficie, el metal presenta un aumento en la resistencia al desgaste y la vida útil puede verse significativamente incrementada. También se ha reportado un aumento en la resistencia a la corrosión y erosión de los metales borurizados. (Cataldo *et al.* (2000)).

Las capas formadas durante este proceso pueden ser monofásicas o polifásicas, dependiendo principalmente de las temperaturas, tiempos de exposición y el potencial de boro en contacto con el metal. El crecimiento y constitución de las capas también están en función de la composición química del metal sustrato, teniendo un gran efecto los elementos aleantes y la composición del agente borurante utilizado (Campos *et al.* (2010)).

Si bien la mayor parte de trabajos reportados están enfocados al estudio de la borurización en aceros y sus aplicaciones, éste proceso es también aplicable en aleaciones no ferrosas, destacando principalmente las aleaciones base cobalto, níquel, titanio, así como metales refractarios y carburos cementados.

La presencia de algunos elementos aleantes como: el cromo, vanadio y molibdeno, aumentan la dureza de las capas de boruro formadas en los metales, esto debido a la reacción de los aleantes con el boro, formando nuevos boruros en solución sólida. La adición de elementos aleantes en aleaciones base cobalto, níquel y titanio, retardan el crecimiento de las capas y en algunos casos promueven el desarrollo de una morfología de capa más uniforme. (Matiasovsky *et al.* (1998), Campos *et al.* (2013)).

En la *Tabla 1.2* se muestran algunos metales que han sido borurizados y la composición química de los boruros desarrollados durante el proceso.



Tabla 1.2 Metales y constitución de las capas de boruro formadas. Dearnley P. and Bell T. (1985).

| Substrato | Constitución de las capas | Substrato | Constitución de las capas |
|-----------|--------------------------------|-----------|--------------------------------|
| Fe | FeB | Ti | TiB |
| | Fe ₂ B | | TiB ₂ |
| Co | CoB | Mo | MoB ₂ |
| | Co ₂ B | | Mo ₂ B |
| | Co ₃ B | | Mo ₂ B ₅ |
| Ni | Ni ₄ B ₃ | Nb | NbB ₂ |
| | Ni ₂ B | | NbB ₄ |
| | Ni ₃ B | Ta | TaB ₂ |
| W | Ta ₂ B | | |

1.4 Borurización de aleaciones base cobalto.

La borurización en aleaciones base cobalto ha sido reportada en trabajos de investigación básica, pero sin tener hasta este momento el alcance y aplicación industrial con la que cuentan los aceros borurizados. Sin embargo, considerando las diversas aplicaciones de estas aleaciones en diferentes áreas de la ingeniería y la actual tendencia a sustituir las aleaciones ferrosas, es positivo pensar en una mayor aplicación de la borurización en aleaciones base cobalto. Los trabajos publicados referentes a la borurización en aleaciones de cobalto se enfocan principalmente a la aplicación del proceso en cobalto puro y a las aleaciones *Co-Cr-Ni*, *Co-WC* y *Co-Cr-Mo*, siendo esta última el tipo de aleación utilizada en el presente trabajo.

1.4.1 Aleaciones *Co-Cr-Mo*.

A inicios del siglo pasado Haynes (1907) caracterizó el comportamiento mecánico de la aleación binaria Cobalto-Cromo destacando su gran rigidez y resistencia, posteriormente identificó que ciertos elementos tales como el molibdeno actuaban como un poderoso aleante que proporcionaba aún más resistencia al sistema *Co-Cr*, dando origen a la aleación *Co-Cr-Mo*.

Muchas de las aleaciones base cobalto con mayor impacto comercial en la actualidad, se derivan de la aleación ternaria *Co-Cr-Mo*, debido a que por sus características es ideal para muchas aplicaciones. Por



Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

su alto nivel de rigidez, excelente resistencia al desgaste, gran dureza, resistencia a la corrosión y alto punto de fusión (1260 - 1482 °C), las aplicaciones de este tipo de aleaciones van desde la fabricación de implantes médicos hasta en elementos de turbinas de gas y toberas en aeronáutica.

El porcentaje y presencia de los elementos aleantes pueden variar de una designación de aleación a otra dependiendo de las propiedades deseadas, pero se exige que cumplan con ciertos estándares internacionales mínimos. Los porcentajes típicos de contenido en peso para los elementos aleantes en las aleaciones Cobalto-Cromo-Molibdeno según la ASM se muestran en la *Tabla 1.3*.

Tabla 1.3 Porcentaje en peso típico en Aleaciones Co- Cr- Mo. ASM Specialty Handbook (2000).

| Elemento | %Mínimo | % Máximo |
|-----------|---------|----------|
| <i>Co</i> | Base | Base |
| <i>Cr</i> | 25 | 33 |
| <i>Mo</i> | 4.5 | 9 |
| <i>Ni</i> | - | 1 |
| <i>Fe</i> | - | 0.75 |
| <i>C</i> | - | 0.35 |
| <i>Si</i> | - | 1 |
| <i>Mn</i> | - | 1 |

1.4.2 Crecimiento y composición de la capa en aleaciones base cobalto.

Minkevich (1961) estudio la formación y composición de las capas de boruro formadas en aleaciones de cobalto, hierro y níquel. Los experimentos mostraron que el crecimiento de las capas de boruro en las aleaciones de cobalto es muy similar al bien estudiado crecimiento de capas de boruro en hierro. Análogamente determinó que primero se forma el boruro Co_2B en el cobalto, similar al boruro Fe_2B en aceros. Posteriormente, mientras la concentración de boro incrementa, se forma una segunda fase, CoB para el cobalto y FeB para el hierro, ambos con un mayor contenido de boro en comparación con las respectivas fases formadas previamente.

El diagrama $Co-B$ de la *Fig. 1.1* establece la formación de las fases CoB y Co_2B , más una tercera fase Co_3B raramente reportada. Tanto los boruros formados en el hierro como en el cobalto,



Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

comparten una estructura cristalina similar. Las fases Co_2B y Fe_2B poseen una red cristalina tetragonal y un contenido de boro similar (8.4% y 8.8% respectivamente), mientras que las fases CoB y FeB también poseen un contenido de boro similar (15.5% y 16% respectivamente), ambas con una estructura cristalina ortorrómbica y parámetros de red similares.

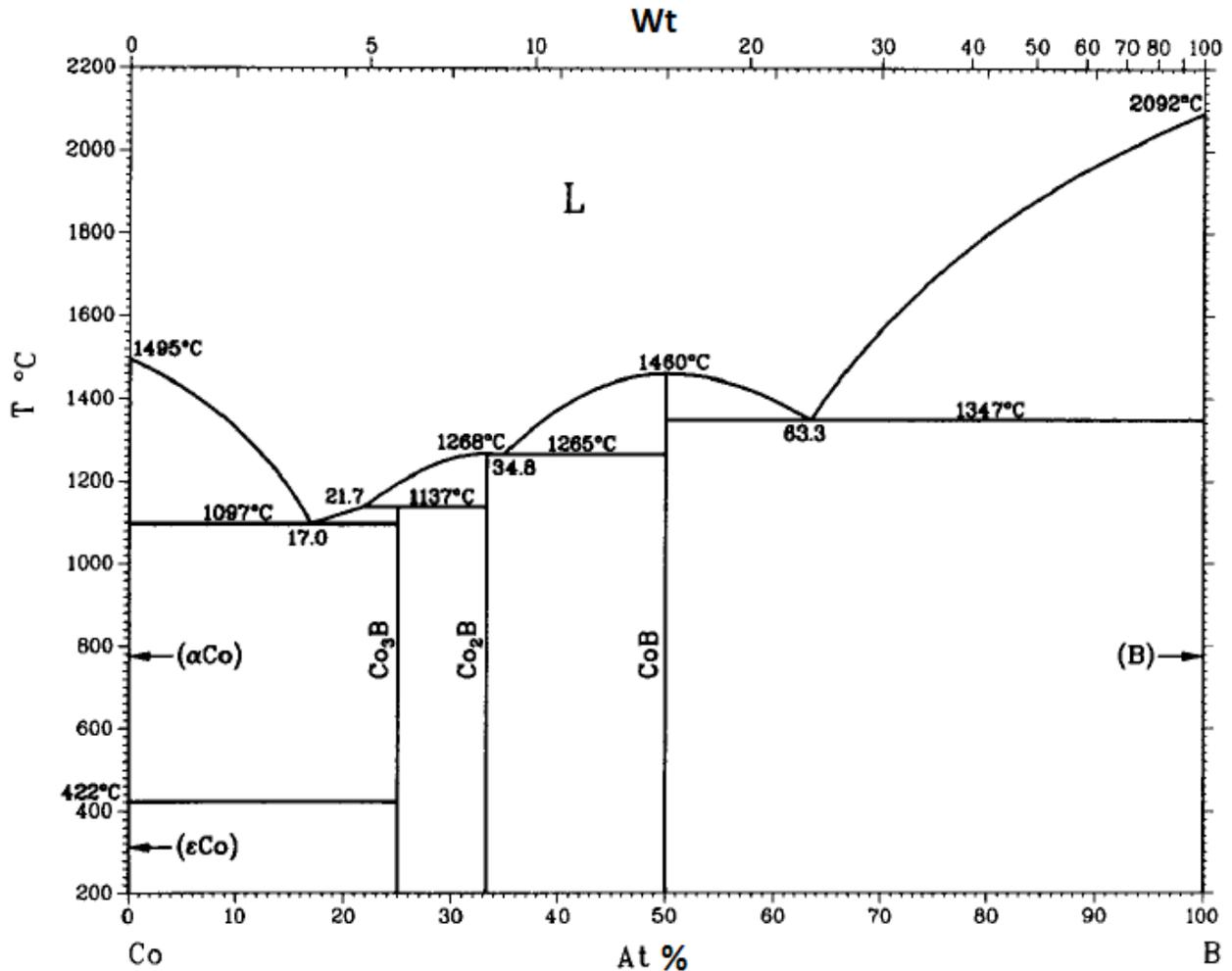


Fig. 1.1 Diagrama Co-B.

Otros estudios han confirmado la formación de los compuestos CoB y Co_2B durante el proceso de borurización. Knotek *et al.* (1997) estudian el crecimiento de las capas de boruro en cobalto aleado, utilizando diferentes mezclas como agente borurante, a diferentes tiempos y temperaturas de exposición. Por otra parte Campos *et al.* (2013) proponen un modelo de difusión, para estimar el crecimiento de CoB y Co_2B en una aleación ASTM F-75 (Co-Cr-Mo).

Las estructuras cristalinas de los boruros de cobalto formados (CoB y Co_2B) se muestran en la Fig. 1.2.

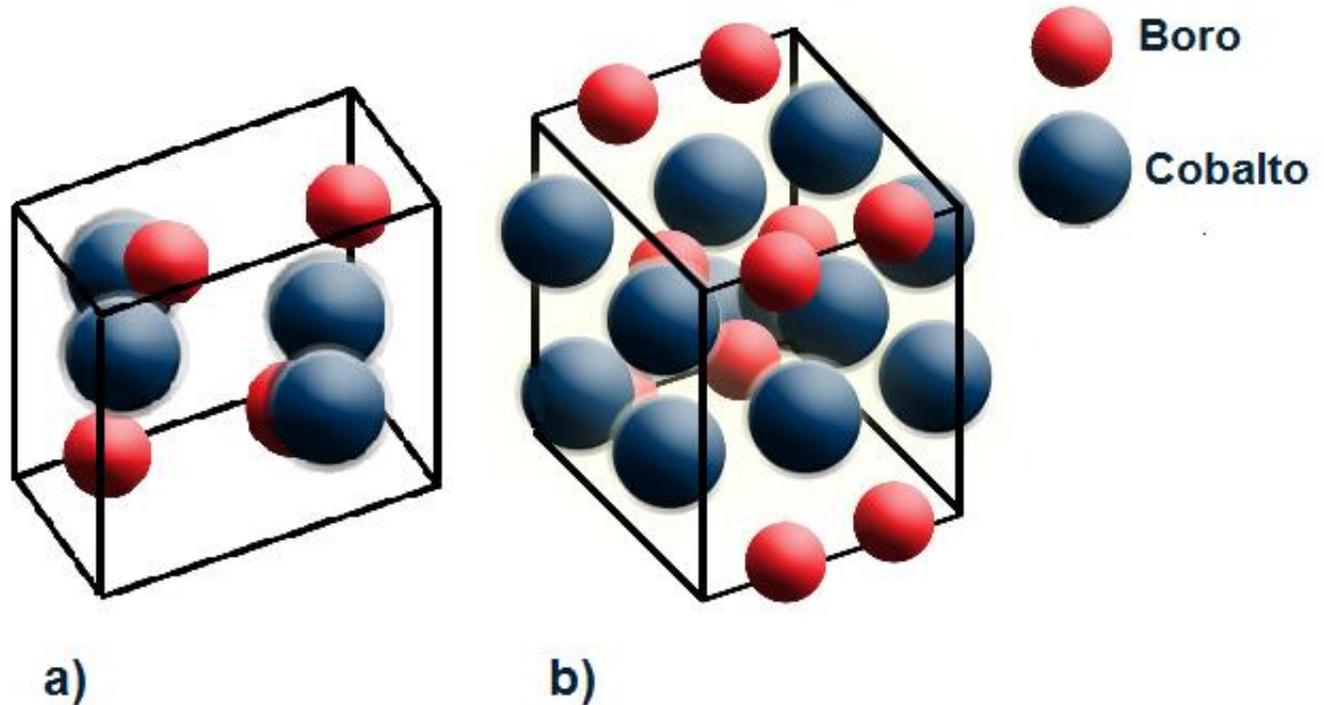


Fig. 1.2 Estructura cristalina de los boruros de cobalto a) Fase CoB b) Fase Co_2B .

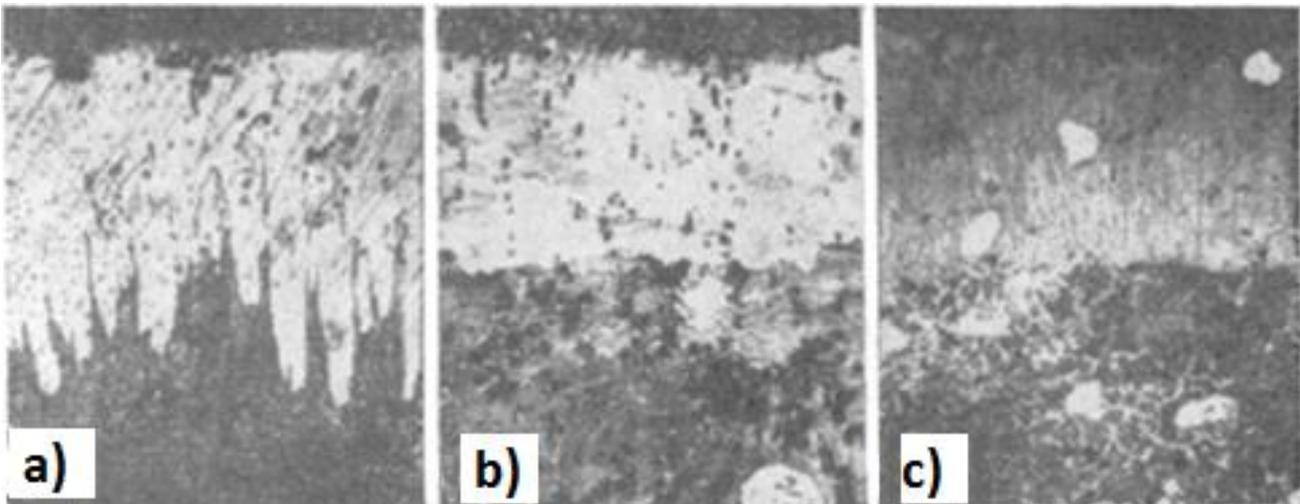
De manera general, se ha encontrado que las capas de boruros de cobalto exhiben un comportamiento ligeramente menos frágil que las capas de boruro de hierro. Así mismo, se reporta que presentan una gran dureza, buena resistencia al desgaste y resistencia a la oxidación a altas temperaturas (Dong Mu *et al.* (2009), Dong Mu *et al.* (2010)).

1.4.3 Efecto de los elementos aleantes.

La morfología de las capas en aleaciones base cobalto es generalmente uniforme o plana, esto se debe a que el principal elemento aleante es el cromo (Cr) que actúa entre la capa y el sustrato como una barrera para la difusión. Los átomos de cromo difunden fácilmente de manera sustitucional a través de los boruros formados, para posteriormente formar compuestos con el boro. Esta es la razón por la cual

se reporta la presencia de la fase CrB en varios de los trabajos revisados. La presencia de una zona de difusión entre la capa y el sustrato se debe también a la precipitación de cromo en los límites de grano del sustrato como lo establece Palombarini *et al.* (1993).

Además del cromo, la presencia de otros elementos aleantes influye en el crecimiento, morfología de las capas y formación de otras fases. Matiasovsky *et al.* (1998), Campos *et al.* (2013) reportan la formación de boruros de molibdeno Mo_2B . Minkevich *et al.* (1964) reportan capas de boruro con morfología aserrada en cobalto puro, mientras que para aleaciones $Co-Cr-Ni$ (con alto contenido de cromo y níquel) se reportan morfologías planas. De la misma manera, en el trabajo de Zhunkovskii *et al.* (1973) se desarrollan morfologías aserradas al borurizar cobalto puro y se observa una tendencia a el desarrollo de capas más uniformes a medida que se aumenta el porcentaje de carburo de tungsteno (WC) como elemento aleante, esto se muestra en la Fig. 1.3.



**Fig. 1.3 Morfología de capas de boruro en cobalto y aleaciones a) Cobalto puro, 1000°C
b) Co-4%WC, 950°C c) Co-8%WC, 950 °C . Tomada de Zhunkovskii *et al.* (1973)**

En la *Tabla 1.4* se resumen algunas de las propiedades de CoB y Co_2B reportadas en los trabajos de Campos *et al.* (2015) y Minkevich A. (1961).



Instituto Politécnico Nacional
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tabla 1.4 Propiedades mecánicas y parámetros cristalinos de los boruros CoB y Co₂B.

| Propiedades | CoB | Co ₂ B | Referencia |
|---------------------------|-------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------|
| Dureza | 18 - 20 GPa 20 - 21 GPa | 15 - 17 GPa 17 - 18 GPa | Minkevich A. (1961) Campos I. <i>et al.</i> (2015) |
| Módulo de elasticidad | 530-536 GPa | 476 GPa | Campos I. <i>et al.</i> (2015) |
| Contenido de boro en peso | 15.5 %B | 8.4% B | Minkevich A. (1961) |
| Estructura cristalina | Ortorrómbica | Tetragonal | Minkevich A. (1961) |
| Parámetros de red | a= 3.9480 Å b= 5.2430 Å c= 3.3070 Å | a= 5.0060 Å c= 4.2120 Å | Minkevich A. (1961) |



Capítulo 2

Marco teórico

2.1 Introducción.

Los aspectos teóricos con respecto a la fatiga por contacto se muestran en este capítulo, se inicia identificando la existencia e importancia de la fatiga por contacto en ingeniería. Posteriormente se presenta la revisión de los trabajos existentes en la literatura, referentes a la descripción analítica del contacto, la distribución de esfuerzos y los efectos desarrollados bajo condiciones de carga cíclicas y dinámicas propias del comportamiento a fatiga.

En la revisión bibliográfica no se ha encontrado algún trabajo que de manera teórica abunde en todas las implicaciones presentes en la fatiga por contacto (contacto cíclico y dinámico, en un material con recubrimiento o capa). Algunos trabajos describen el campo de esfuerzos en presencia de recubrimiento, tomando en cuenta únicamente condiciones cuasi estáticas y no dinámicas, y los trabajos que consideran condiciones dinámicas se encauzan solo a materiales sin recubrimiento. Jackson C. *et al*, (1969), Johnson (1972).

Los aspectos teóricos revisados se limitan al caso particular del contacto entre una esfera y una superficie plana, ya que esta es la configuración geométrica con la que se llevó a cabo la experimentación y simulación numérica en este trabajo. Si bien la teoría presentada aquí es aplicable en las pruebas estáticas experimentales y no para las pruebas bajo cargas cíclicas, es importante conocerla para entender el proceso.



2.2 Fatiga por contacto.

La mayoría de componentes mecánicos y elementos estructurales son diseñados basados en el cálculo de esfuerzos bajo la consideración de que no son afectados por concentradores de esfuerzos en la zona de contacto con otros elementos. En otras palabras, durante el proceso de diseño la mayoría de las fallas (por deflexión elástica excesiva, cedencia o fractura) se asocian con esfuerzos y deformaciones en regiones del cuerpo alejadas de los puntos de aplicación de carga.

Sin embargo, en algunos casos en ingeniería, cuando las superficies de dos cuerpos distintos entran en contacto transmitiendo grandes cargas entre ellos, se generan esfuerzos cuya magnitud es considerable, como consecuencia las fallas se presentan en la zona de contacto. Por ejemplo, los esfuerzos generados durante el contacto son significativos en los dientes de engranes o las superficies de contacto entre las válvulas y la cámara de combustión en motores a gasolina.

Es evidente que en los ejemplos anteriores, los miembros no necesariamente permanecen en contacto fijo. Los esfuerzos por contacto por lo general son de naturaleza cíclica, los cuales conducen frecuentemente a una falla que inicia cerca de la superficie la cual está asociada con la acumulación de daño, dando lugar al concepto de fatiga por contacto.

La fatiga por contacto es el resultado de la acumulación de daño debida a la aplicación periódica de un estado de esfuerzos por contacto de Hertz. El contacto es generado en un pequeño volumen del material produciendo intensas deformaciones plásticas. La deformación se acumula a medida que se aplican ciclos de carga. Ya que los daños de la fatiga por contacto se presentan principalmente en la superficie o cerca de ella, es imprescindible conocer el efecto presente en un material tratado superficialmente. En estos casos, la degradación progresiva puede ir desde el simple agrietamiento del recubrimiento, hasta la delaminación total de este, por lo que el tratamiento superficial puede no ser adecuado en determinadas aplicaciones.

2.3 Contacto mecánico.

La teoría del contacto mecánico es la base para la fatiga por contacto, una parte fundamental de la ingeniería mecánica que se encarga del estudio de la deformación de sólidos en contacto y de la formulación matemática para describir el fenómeno, en condiciones elásticas, plásticas, estáticas y



dinámicas, basándose en los principios de la teoría de la elasticidad. Los principios del contacto mecánico permiten obtener la información necesaria para un eficiente diseño de componentes mecánicos y estructurales. También proporcionan las bases para el estudio tribológico de sistemas y componentes utilizados en áreas de la ingeniería como la automotora, ferroviaria, aeronáutica, procesos de conformado de metales, diseño de contactos eléctricos y recientemente en micro y nanotecnología.

2.3.1 Modelos de contacto mecánico

El trabajo de Hertz (1881) es hasta ahora el fundamento de la mayoría de los problemas de contacto en ingeniería. Es aplicable para cuerpos sólidos elásticos en contacto entre los cuales no existe fricción. Considera que la única fuerza presente, es la carga aplicada, ignorando cualquier otra fuerza o interacción en la superficie de contacto.

Los trabajos de Johnson *et al.* (1972) y Derjaguin *et al.* (1991) son considerados de gran importancia en la teoría de contacto. El primero propone la llamada Teoría JKR, la cual establece que durante el contacto las superficies se adhieren entre sí, por lo que la carga aplicada no es la única fuerza presente, sino que existe además una fuerza de interacción interfacial de adhesión a medida que las superficies en contacto se deforman. Derjaguin (Teoría DMT) en su trabajo considera que además de la carga y la adhesión, las interacciones o fuerzas de Van der Waals intervienen, aún en puntos donde las superficies no están en contacto. Sin embargo, las magnitudes de las fuerzas tanto de adhesión como las de Van der Waals solo son considerables en aplicaciones micro y nano cuando la carga aplicada es pequeña (nano Newtons – mili Newtons), por lo que no son discutidas aquí. En la *Fig. 2.1* se muestran las teorías o modelos de contacto antes mencionadas.

Modelos de contacto mecánico

- Hertz: El modelo es completamente elástico
- JKR: El modelo es completamente elástico y se considera adhesión en la zona de contacto.
- DMT: El modelo es completamente elástico y considera adhesión y las fuerzas de Van der Waals.

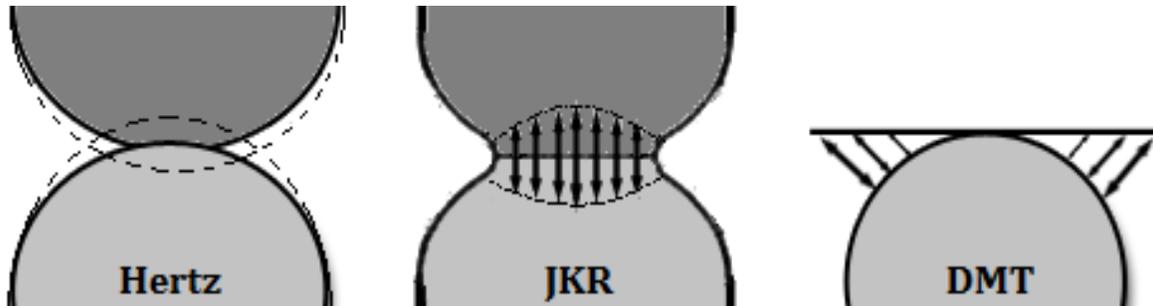


Fig. 2.1 Modelos de contacto mecánico (Galin L , 1980)

En función de las condiciones presentes durante el contacto, el análisis puede simplificarse. Si la aplicación de carga es totalmente perpendicular a la superficie, se puede ignorar los efectos de la fricción, en cambio si la carga aplicada tiene una componente tangencial a la superficie el análisis debe considerar la presencia de fricción.

2.3.2 Contacto de Hertz.

La naturaleza de los esfuerzos derivados del contacto entre dos cuerpos elásticos es de considerable importancia y en un inicio fue estudiada por Hertz (1881). Partiendo de la solución general de Hertz, han sido estudiados casos particulares para diferentes geometrías en contacto. Para estos casos, el comportamiento y descripción matemática de la distribución de presión y de los campos de esfuerzos se encuentran bien documentados. Algunos de los casos particulares son el contacto entre: dos esferas, dos cilindros, esfera - superficie plana, cilindro - superficie plana, cono- superficie plana, etc.

La formulación matemática de la teoría general de contacto de Hertz es bastante compleja, aun para sistemas formados por geometrías simples. En estas páginas únicamente se presentan las bases teóricas para el contacto entre una esfera y una superficie plana, mostrado en *la Fig. 2.2*. Este tipo de contacto es aplicado en el diseño de elementos mecánicos como rodamientos, uniones estructurales, etc. Además, es aplicable en ensayos de dureza e indentación que son útiles para la investigación de las propiedades mecánicas de materiales en ingeniería.

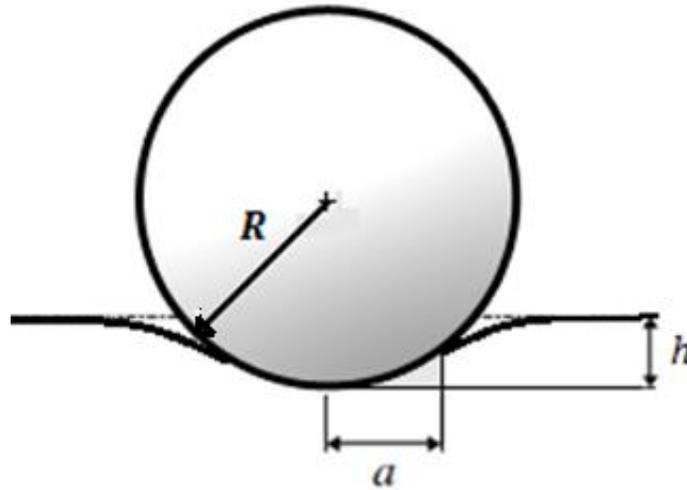


Fig. 2.2 Contacto entre una esfera y una superficie plana.

2.3.3 Distribución de la presión de contacto y campo de esfuerzos.

Cuando se aplica una carga transmitida entre las superficies de dos sólidos, estos inicialmente entran en contacto en un solo punto, pero a medida que aumenta la carga, las superficies se deforman alrededor de este punto, incrementándose cada vez más el área de contacto. La teoría de contacto de Hertz evalúa la forma y tamaño de la zona de contacto en función del incremento de carga, la distribución y magnitud de la presión ejercida entre las superficies de contacto. Finalmente permite calcular los esfuerzos y deformaciones en la región de contacto y alrededor de esta.

Para el contacto entre una esfera y una superficie plana Hertz (1881, 1883) encontró que debido a la simetría axial, la zona de contacto desarrollada tiene forma circular de radio a (radio de contacto), proporcional a la carga aplicada P y al radio de la esfera R . (Fig. 2.2)

$$a^3 = \frac{3PR}{4E^*} \quad (2.1)$$

Donde E^* es el módulo de elasticidad reducido o combinado de la esfera y el plano, dado por:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1 - \nu_p^2)}{E_p} + \frac{(1 - \nu_e^2)}{E_e} \quad (2.2)$$



Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

En donde E_e , ν_e y E_p , ν_p son el módulo de elasticidad y relación de Poisson de la esfera y el espécimen de superficie plana, respectivamente. Hertz también demostró que el máximo esfuerzo en tensión, ocurre en el borde del área de contacto, cuya magnitud está dada por:

$$\sigma_{max} = (1 - 2\nu) \frac{P}{2\pi a^2} \quad (2.3)$$

Combinando la Ec. 2.1 y 2.3.

$$\sigma_{max} = \frac{(1 - 2\nu)}{2\pi} \left(\frac{4E^*}{3} \right)^{\frac{2}{3}} P^{1/3} R^{-2/3}. \quad (2.4)$$

Un parámetro útil es la presión media P_m , obtenida por la división de la fuerza aplicada entre el área de contacto.

$$P_m = \frac{P}{\pi a^2} \quad (2.5)$$

O sustituyendo la Ec. 2.1 en Ec. 2.5.

$$P_m = \left[\frac{4E^*}{3\pi} \right] \frac{a}{R} \quad (2.6)$$

Esta última relación es de especial interés, ya que si se considera P_m como un esfuerzo durante el contacto y $\frac{a}{R}$ como una deformación generada durante este, se puede establecer una relación lineal similar a la ley de Hooke en esfuerzo uniaxial. Esta relación lineal puede ser utilizada para determinar la transición lineal a plástica en el material de la superficie plana.

Finalmente, Hertz determino que la distribución de la presión en el área de contacto entre una esfera y un plano, está representada por un perfil semi elíptico, mostrado en la Fig. 2.3 y matemáticamente expresado:

$$\frac{\sigma_z}{P_m} = -\frac{3}{2} \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{1/2} \quad r \leq a \quad (2.7)$$

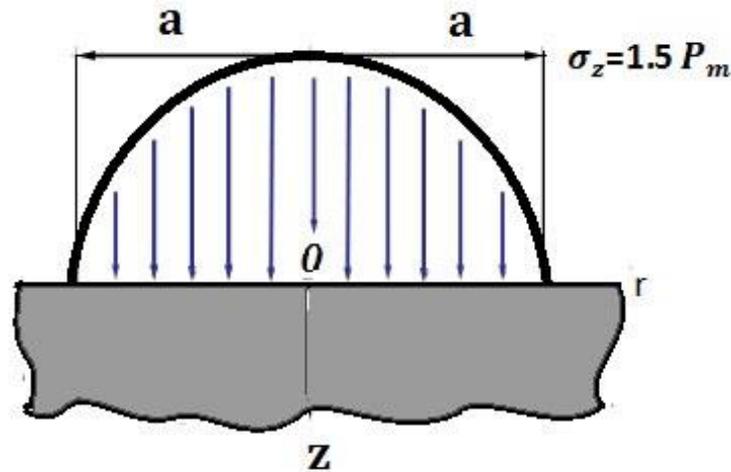


Fig. 2.3 Distribución de la presión entre una esfera y una superficie plana.

De la Ec. 2.7 se deduce que la presión máxima se da en el centro, cuando $r = 0$ con una magnitud de $\sigma_z = 1.5 P_m$.

El desplazamiento y magnitud de esfuerzos en los puntos de la superficie plana en contacto, están dados por Ec. 2.8 y 2.9.

$$u_z = \frac{1 - \nu^2}{E} \frac{3}{2} P_m \frac{\pi}{4a} (2a^2 - r^2) \quad r \leq a \quad (2.8)$$

$$\frac{\sigma_r}{P_m} = \frac{1 - 2\nu}{2} \frac{a^2}{r^2} \left[1 - \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{3/2} \right] - \frac{3}{2} \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{1/2} \quad r \leq a \quad (2.9)$$

Mientras que el desplazamiento y esfuerzo en los puntos de la superficie que no se encuentran en contacto, están dados por las Ec. 2.10 y Ec. 2.11.

$$u_z = \frac{1 - \nu^2}{E} \frac{3}{2} P_m \frac{1}{2a} \left[(2a^2 - r^2) \sin^{-1} \frac{a}{r} + r^2 \frac{a}{r} \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{1/2} \right] \quad r \geq a \quad (2.10)$$



$$\frac{\sigma_r}{P_m} = \frac{1 - 2\nu}{2} \frac{a^2}{r^2} \quad r \geq a \quad (2.11)$$

El máximo valor de σ_r se presenta en el borde de la superficie de contacto cuando $a=r$.

Los desplazamientos en la superficie obtenidos con Ec. 2.8 y Ec. 2.10 se muestran en la Fig. 2.4.

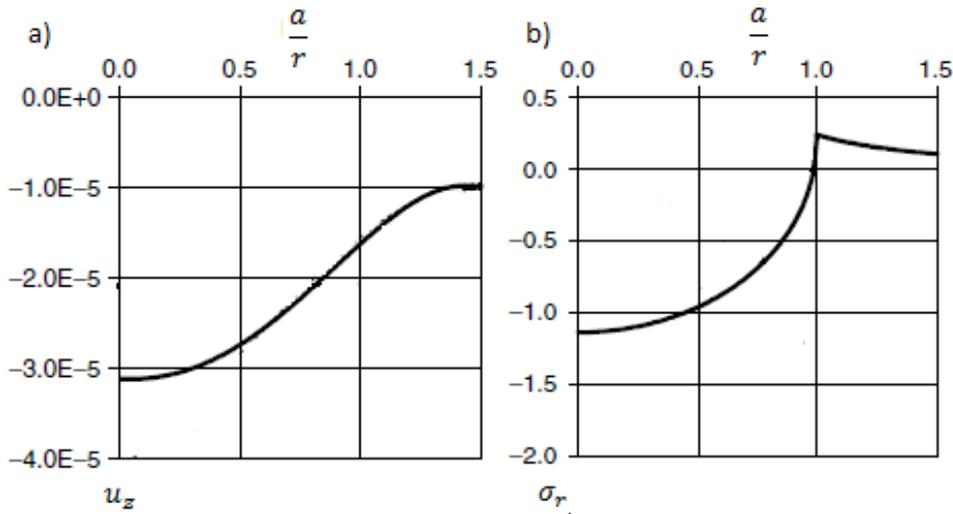


Fig. 2.4 a) Desplazamiento de la superficie en la zona de contacto b) Esfuerzos en la superficie de la zona de contacto. Considerando una $P_m = 1 \text{ MPa}$, $R=1\text{mm}$. Fischer A. (2007)

Finalmente, el campo de esfuerzos debajo de la superficie plana en coordenadas polares (σ_r es el esfuerzo en dirección radial y σ_θ el esfuerzo en dirección circunferencial).

$$\frac{\sigma_r}{P_m} = \frac{3}{2} \left\{ \frac{1 - 2\nu}{3} \frac{a^2}{r^2} \left[1 - \left(\frac{z}{u^{1/2}} \right)^3 \right] + \left(\frac{z}{u^{1/2}} \right)^3 \frac{a^2 u}{u^2 + z^2 a^2} + \frac{z}{u^{1/2}} \left[u \frac{1 - \nu}{a^2 + u} + (1 + \nu) \frac{u^{1/2}}{a} \tan^{-1} \left(\frac{a}{u^{1/2}} \right) - 2 \right] \right\} \quad (2.12)$$

$$\frac{\sigma_\theta}{P_m} = -\frac{3}{2} \left\{ \frac{1 - 2\nu}{3} \frac{a^2}{r^2} \left[1 - \left(\frac{z}{u^{1/2}} \right)^3 \right] + \frac{z}{u^{1/2}} \left[2\nu + u \frac{1 - \nu}{a^2 + u} - (1 + \nu) \frac{u^{1/2}}{a} \tan^{-1} \left(\frac{a}{u^{1/2}} \right) \right] \right\} \quad (2.13)$$



$$\frac{\sigma_z}{P_m} = -\frac{3}{2} \left(\frac{z}{u^{1/2}} \right)^3 \left(\frac{a^2 u}{u^2 + z^2 a^2} \right) \quad (2.14)$$

$$\frac{\tau_{rz}}{P_m} = -\frac{3}{2} \left(\frac{z^2 r}{u^2 + z^2 a^2} \right) \left(\frac{a^2 u^{1/2}}{a^2 + u} \right) \quad (2.15)$$

Donde u es igual a:

$$u = \frac{1}{2} \left[(r^2 + z^2 - a^2) + [(r^2 + z^2 - a^2)^2 + 4a^2 z^2]^{1/2} \right] \quad (2.16)$$

Para $z = 0$ y valores $r/a < 1$, $u=0$ ya que para conocer el estado de esfuerzos en la superficie es necesario utilizar la Ec. 2.9.

Los esfuerzos principales en el plano r, z :

$$\sigma_{1,3} = \frac{\sigma_r + \sigma_z}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_r - \sigma_z}{2} \right)^2 + \tau_{rz}^2} \quad (2.17)$$

$$\sigma_2 = \sigma_\theta \quad (2.18)$$

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (2.19)$$

La Fig. 2.5 muestra los diagramas de contorno para los esfuerzos principales en el plano r, z .

Como es bien sabido, los materiales dúctiles fallan debido a la acción de esfuerzos cortantes, en este caso el cortante máximo se presenta a una profundidad de aproximadamente $z = 0.49a$ con una magnitud máxima $\tau_{max} = 0.49 P_m$.

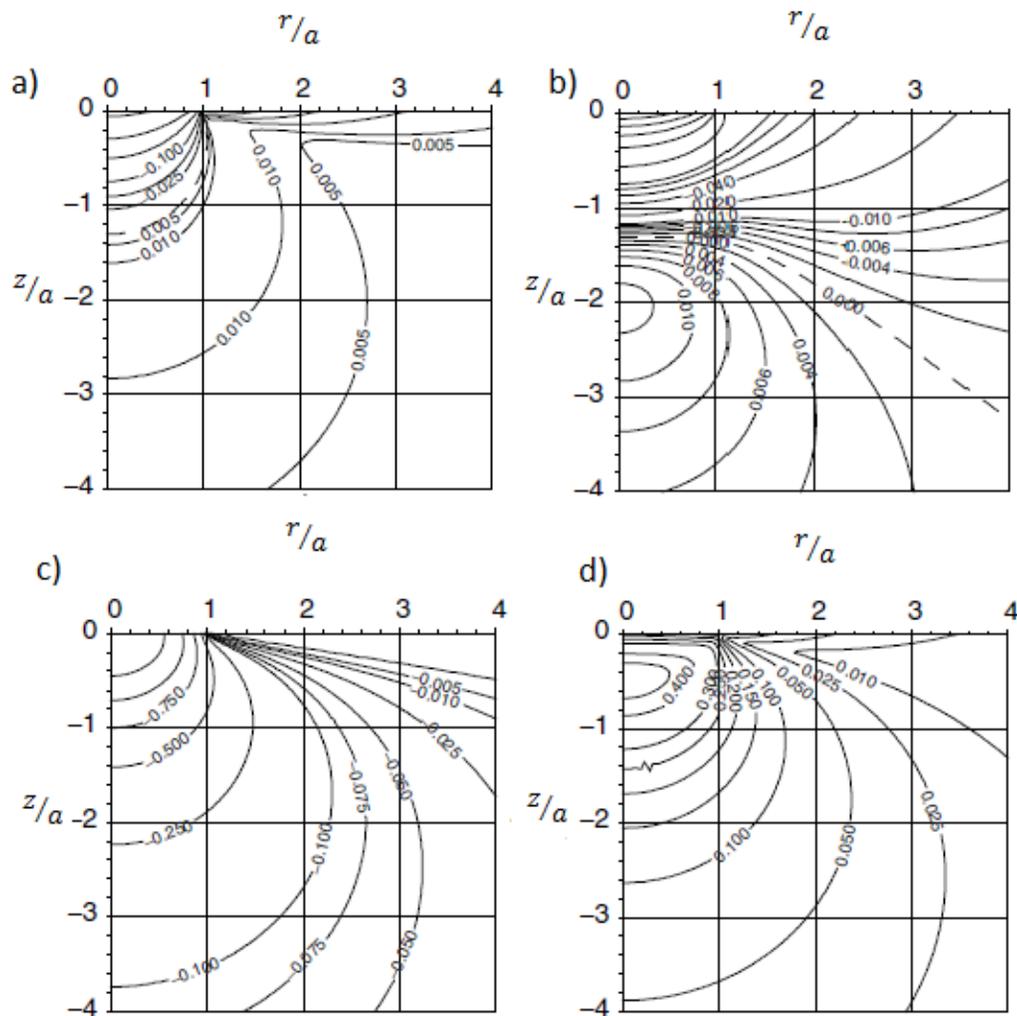


Fig. 2.5 Diagramas de contorno para las magnitudes de esfuerzos por contacto entre una esfera y una superficie plana a) σ_1 b) σ_2 c) σ_3 d) τ_{max} . Fischer A. (2007)

2.4 Contacto en sistemas capa/substrato.

El contacto entre dos sólidos con recubrimiento o capas en sus superficies frecuentemente se presenta en ingeniería. En dichos casos normalmente la capa y el substrato poseen propiedades mecánicas diferentes, por lo cual las ecuaciones planteadas por Hertz no son aplicables en este punto, sin embargo, aún son la base para el estudio del contacto entre un sistema capa/substrato.

En su libro, Johnson (1985) presenta un resumen general de los trabajos más relevantes hasta 1985 en relación al contacto con presencia de capas o recubrimientos. Plantea diferentes casos analizados en



función del espesor de la capa, las propiedades del sustrato y si existe o no deslizamiento entre la capa y el sustrato.

2.4.1 Contacto entre una esfera y un sistema con capa/sustrato.

Los fundamentos teóricos del contacto entre superficies con capa aún no son del todo entendidos, a diferencia del contacto entre superficies homogéneas (sin capa) establecido por la teoría de Hertz. Una gran cantidad de esfuerzos han sido realizados desde los años 50 para analizar el contacto entre superficies capa/sustrato. Muchas expresiones analíticas han sido propuestas utilizando diferentes aproximaciones matemáticas, dentro de las cuales destacan los trabajos de Gupta *et al.* (1974), Solecky *et al.* (1984), Olver (1997) entre otros. Sin embargo, la mayoría de ellas son matemáticamente complejas y únicamente son aplicables para casos particulares. A pesar de la gran cantidad de trabajos, no existe una expresión analítica general para el contacto entre una esfera y un sistema capa/sustrato.

Durante la última década, con el desarrollo y uso de las herramientas computacionales, los modelos matemáticos propuestos pasaron de estar fundamentados en un análisis experimental - analítico a un análisis experimental - numérico, utilizando el método de elemento finito, lo que permitió obtener soluciones más generalizadas. Nuevamente aquí se presentan únicamente aquellos trabajos para el contacto entre una esfera y un sistema capa/sustrato de superficie plana bajo las siguientes condiciones.

- 1.- El espesor de la capa t es más pequeño que el radio de contacto. ($t < a$)
- 2.- La capa permanece firmemente unida al sustrato.
- 3.- El material sustrato es deformable.

Un enfoque que resulta sencillo y que ha mostrado buenos resultados es presentado por Liu *et al.* (2005). El análisis plantea que debido a la presencia de capas, la Ec. 2.2 no es aplicable debido a que las propiedades de la superficie plana (E_p y ν_p) no son constantes, si no que están en función de las propiedades del sustrato (E_s y ν_s), las propiedades de la capa (E_c y ν_c), el espesor de capa t y la profundidad de penetración h . Para profundidades grandes en comparación con el espesor ($t \rightarrow 0$), el comportamiento del sustrato es dominante, mientras que para profundidades h comparables con el espesor t , las propiedades de la capa toman mayor relevancia. El módulo de la superficie plana es entonces expresado por la Ec. 2.20.



Instituto Politécnico Nacional
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

$$E_p = E_C \frac{1 - (\lambda + \kappa + 4\kappa\alpha^2 H^2)e^{-2\alpha H} + \alpha\kappa e^{-4\alpha H}}{1 + 4\kappa\alpha H e^{-2\alpha H} - \lambda\kappa e^{-4\alpha H}} \quad (2.20)$$

En donde: $\lambda = 1 - 4(1 - \nu_C)/1 + \mu(3 - 4\nu_C)$ $\kappa = 1 - (\mu - 1)/\mu + (3 - 4\nu_C)$

$$\mu = E_C(1 - \nu_S)/E_S(1 - \nu_C) \quad \alpha = \frac{Pt}{H}$$

El parámetro H es el espesor adimensional definido por $H = t/a$, donde a es el radio de contacto definido por la Ec. 2.1.

En forma alterna, tomando en cuenta algunos de los trabajos empírico - analíticos más relevantes y el desarrollo de un modelo numérico, Hsueh *et al.* (2004) establecen que el contacto entre una esfera y un sistema capa/substrato se define por 2 parámetros: el espesor de capa con respecto al radio de contacto $\left(\frac{t}{a}\right)$ y la relación entre módulos de elasticidad de la capa y el substrato $\left(\frac{E_C}{E_S}\right)$. El radio de contacto y la profundidad pueden ser estimados por:

$$\frac{a_t}{a_c} = 1 - \frac{1 - \left(\frac{E_C}{E_S}\right)^{\frac{1}{3}} - \frac{C_1 \left(\frac{t}{a}\right)^{C_2}}{1 + C_3 \left(\frac{E_C}{E_S}\right)} - \left(1 - \left(\frac{E_C}{E_S}\right)^{C_4}\right)}{1 + C_5 \left(\frac{t}{a}\right) + C_6 \left(\frac{t}{a}\right)^3} \quad (2.21)$$

Donde las constantes C_x fueron determinadas de acuerdo a los resultados de las simulaciones numéricas: $C_1 = 0.666$, $C_2 = 0.261$, $C_3 = 113.431$, $C_4 = 2.069$, $C_5 = 2.854$ y $C_6 = 3.143$, nuevamente a es estimado por la Ec. 2.1.

El desplazamiento está dado por:

$$h_c = h \alpha^{\frac{2}{3}} \quad (2.22)$$

Con α :

$$\alpha = \left\{ 1 + \frac{E_C(1 + \nu_S)}{\pi E_S(1 + \nu_C^2)} [(3 - 2\nu_S)\lambda_1 + \lambda_2] - \frac{1}{\pi(1 + \nu_C)} [(3 - 2\nu_S)\lambda_1 + \lambda_2] \right\}^{-1}$$

De nuevo λ_1 y λ_2 dependen de la relación t/a .



$$\lambda_1 = \frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{t^2}{a^2} \right) - \frac{t}{a} - \left(1 + \frac{t^2}{a^2} \right) \sin^{-1} \left[\frac{t}{a} \left(1 + \frac{t^2}{a^2} \right)^{-1/2} \right] \quad (2.23 a)$$

$$\lambda_2 = \frac{-\pi}{2} \left(1 + \frac{3t^2}{a^2} \right) - \frac{3t}{a} - \left(1 + \frac{3t^2}{a^2} \right) \sin^{-1} \left[\frac{t}{a} \left(1 + \frac{t^2}{a^2} \right)^{-1/2} \right] \quad (2.23 b)$$

El modelo de Hsueh *et al.* (2004) es utilizado para distintos valores de t/a y es válido para un rango de $0 \leq \frac{E_C}{E_S} \leq 10$.

Además de los trabajos aquí presentados existe una gran cantidad de ellos que utilizan metodologías similares basadas en análisis por elemento finito. Sin embargo, su validación se realiza únicamente basada en las propiedades de los materiales particulares, por lo que no son presentados.

Aunque el método del elemento finito representa una poderosa herramienta, los trabajos relacionados al contacto en sistemas capa/substrato están limitados únicamente a la obtención de los parámetros de contacto; no obstante es evidente la necesidad de trabajar en la obtención de los campos de esfuerzos y deformaciones tanto en régimen elástico como plástico, lo que hasta el momento es escaso.

2.4.2 Contacto en sistemas capa/substrato en presencia de deformación plástica.

Para sistemas capa/substrato los modelos propuestos de Hsueh *et al.* (2004) y Liu *et al.* (2005) presentados en la sección anterior son aplicables únicamente en el régimen elástico de los materiales. Sin embargo, para condiciones en las cuales se presenta deformación plástica los estudios realizados únicamente se limitan a un análisis por elementos finitos y experimentales.

Tal y como se estableció anteriormente en la sección 2.3.1, si se considera P_m el equivalente a un esfuerzo aplicado durante el contacto y $\frac{a}{R}$ el equivalente a una deformación, es posible determinar la transición lineal a plástica de un material. Kot *et al.* (2013) sugieren que dicho análisis puede ser extendido con el fin de entender el comportamiento en un sistema capa/substrato. En el diagrama de la Fig. 2.6 se identifican 3 diferentes regiones que se presentan durante la deformación producida por el aumento gradual de la carga.

- Región lineal: Al inicio cuando se aplican cargas de pequeña magnitud, se presenta un comportamiento lineal (una extensión de la Ec. 2.6).
- Región 1: Conforme aumenta la carga aplicada, eventualmente el material sustrato alcanza su esfuerzo de cedencia, mientras que la capa aún se deforma elásticamente. Esto se manifiesta como un cambio en la pendiente de la recta.
- Región 2: Conforme la esfera penetra a mayor profundidad, el sustrato se deforma hasta alcanzar un estado totalmente plástico, en el diagrama se manifiesta como un pronunciado cambio en la pendiente.
- Región 3: A medida que se deforma el sustrato, la capa se flexiona provocando el incremento en los esfuerzos por tensión en zonas localizadas, los cuales conducen finalmente al agrietamiento de la capa. La formación de grietas se presenta en el diagrama como una ligera caída con comportamiento irregular.

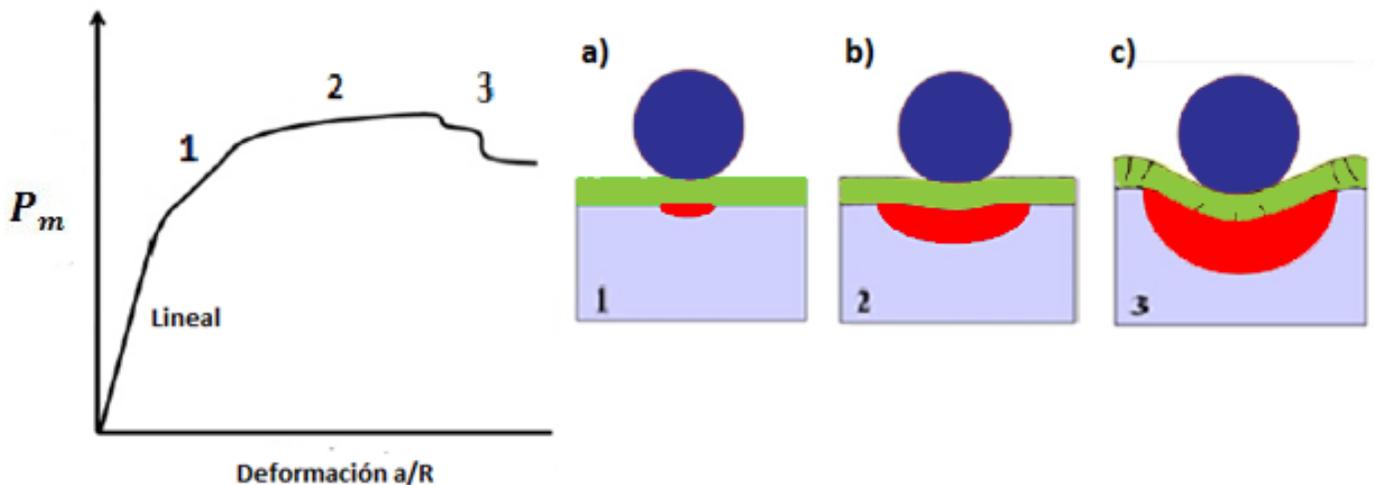


Fig. 2.6 Deformación, cedencia y agrietamiento en un sistema capa/sustrato durante el contacto.

a) Región elasto-plástica b) Región perfectamente plástica c) Fractura del recubrimiento. (Kot M

2013)



2.5 Efectos dinámicos y cíclicos.

Algunos de los fundamentos de la fatiga por contacto en recubrimientos han sido mostrados en las secciones anteriores de este capítulo, partiendo de la teoría de Hertz y posteriormente la extensión de esta cuando hay presencia de recubrimiento y deformación plástica. Sin embargo, estos trabajos son únicamente válidos cuando la velocidad a la cual es aplicada la carga es suficientemente pequeña para considerar que los esfuerzos generados se encuentren en equilibrio estático con las cargas externas aplicadas en todo momento.

La fatiga por contacto implica la aplicación periódica de una carga cíclica por impacto. Cuando la velocidad a la cual se aplica la carga es considerable los efectos dinámicos pueden ser importantes. El análisis analítico completo de la fatiga por contacto se torna entonces bastante complejo, razón por la cual la totalidad de trabajos referentes al tema presentados como antecedentes de este trabajo son dirigidos a entender el problema desde el punto de vista experimental para caracterizar el comportamiento de recubrimientos y finalmente establecer ciertas conclusiones.

Debido a la gran complejidad teórica que representan y las limitaciones en su estudio enfocado a materiales con recubrimiento, únicamente una breve reseña de los efectos dinámicos presentes se mencionan a continuación.

2.5.1 Efectos de inercia.

Cuando las cargas por contacto aplicadas son dinámicas o cambian durante el tiempo, las ecuaciones que gobiernan el fenómeno deben ser modificadas para incluir los efectos de inercia. En la mayoría de aplicaciones prácticas, las aceleraciones y por lo tanto los efectos de inercia son lo suficientemente pequeños para ser ignorados, conduciendo a una formulación cuasi estática. La solución dinámica es de especial interés en casos particulares como en impactos a altas velocidades o vibraciones.

Los modelos analíticos presentes en la literatura están basados en la determinación de las velocidades de propagación de las ondas en los materiales, en función de las propiedades, velocidades y cargas, pero son únicamente aplicables para un solo ciclo de carga y materiales homogéneos (sin recubrimiento o capa). En materiales con recubrimiento no existe estudio acerca de los efectos de inercia generados por contacto pero comúnmente estos son considerables cuando la velocidad de aplicación de carga (o

frecuencia) es alta, las deformaciones alcanzadas son considerables y la masa del indentador (esfera o cualquier otro objeto) es considerable.

2.5.2 Acumulación de daño.

Abordando el problema de la fatiga por contacto desde un punto de vista energético, se considera que la esfera impacta con una velocidad inicial v_0 correspondiente a una cantidad de energía cinética aplicada $\frac{1}{2}mv_0^2$. Para un régimen completamente elástico durante el contacto, la energía cinética es transmitida hacia el sistema capa/substrato transformándola en energía potencial elástica. El proceso se considera reversible tras cada ciclo de aplicación de carga, es decir tras el retiro de la carga, el material regresa a su estado inicial.

Sin embargo, cuando se alcanza el régimen plástico del material, una pequeña cantidad de la energía es disipada por medio de emisiones acústicas, mientras que la mayoría es utilizada para deformar plásticamente el material, el proceso entonces se vuelve irreversible aún después del retiro de la carga. Tras la aplicación de cada ciclo de carga, mayor cantidad de energía es invertida para deformar el material substrato plásticamente, lo cual se traduce como una acumulación de daño.

Además, debido a la deformación plástica el área de contacto inicial cambia con cada ciclo de carga y descarga, como se muestra en la Fig. 2.7. Tanto el radio de contacto (a) como la distribución de presión en la superficie (P_m) cambian con cada ciclo de carga, lo cual invalida cualquiera de los modelos de contacto presentados en las secciones anteriores.

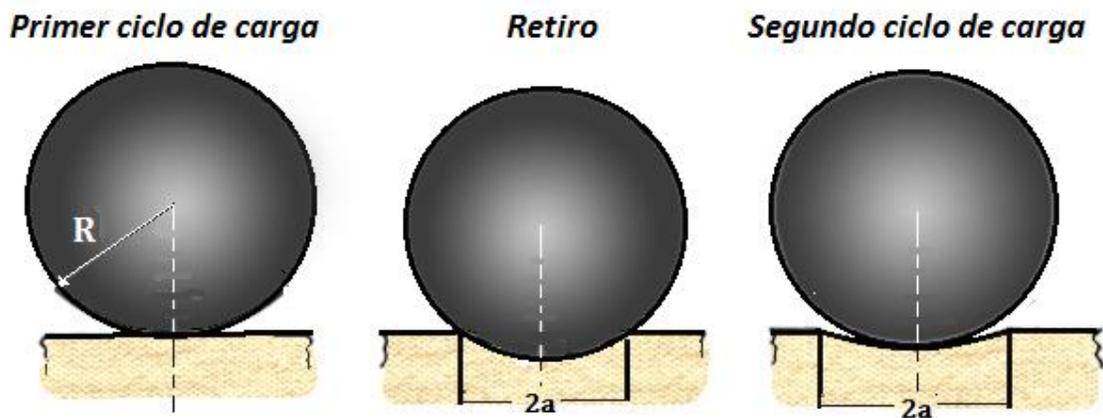


Fig. 2.7 Variación del área de contacto conforme se aplican ciclos de carga.

2.5.3 Endurecimiento por deformación.

Durante la fatiga por contacto, el efecto de la aplicación de las cargas cíclicas repercute también en las propiedades mecánicas del material. Anteriormente se estableció que tras la aplicación de cada ciclo de carga por encima del límite elástico el material acumula deformación plástica, por lo cual las propiedades del material no permanecen constantes durante el proceso, si no que el material se endurece progresivamente a medida que se deforma.

El proceso de endurecimiento por deformación es descrito a continuación:

El diagrama esfuerzo-deformación de la Fig. 2.8 muestra el proceso de endurecimiento por deformación. Considerando un material metálico que se ensaya a tensión, si se aplica un esfuerzo σ_1 mayor al esfuerzo de cedencia σ_Y , el material se deformará de forma plástica y permanente, cuando se retira el esfuerzo se da una recuperación elástica pero permanece una deformación ϵ_1 . Si el material deformado permanentemente se vuelve a tensar, el material comenzará a fluir o deformarse plásticamente cuando el esfuerzo aplicado alcance una magnitud σ_1 . Se define esfuerzo de fluencia como el esfuerzo necesario para iniciar el flujo plástico en un material. De esta manera σ_1 es ahora el esfuerzo de fluencia del material. Si se sigue aplicando esfuerzo hasta alcanzar un valor σ_2 y se retira el esfuerzo, y de nuevo se tensa el material, el nuevo esfuerzo de fluencia es σ_2 .

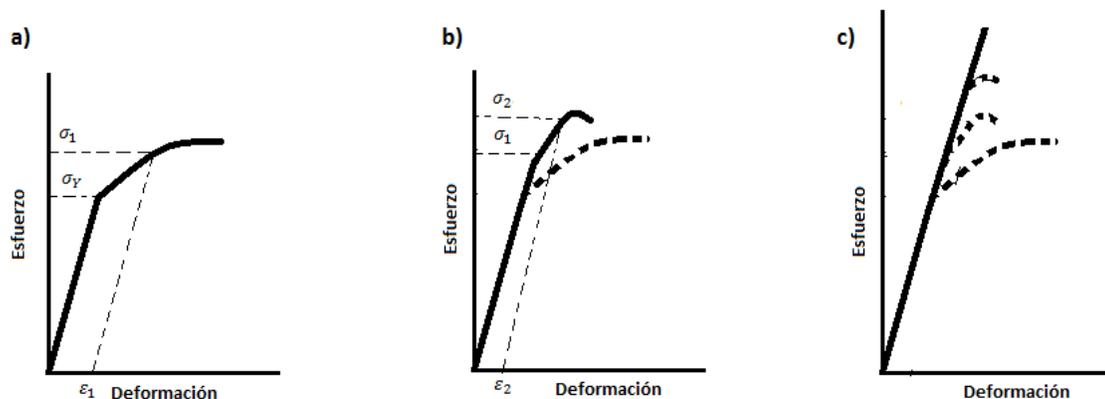


Fig. 2.8 Desarrollo del endurecimiento por deformación. a) Se somete el material a un esfuerzo que excede el esfuerzo de cedencia b) El material ahora tiene un límite elástico y una resistencia a la tensión más altas c) Repitiendo este proceso, la resistencia del metal se sigue incrementando y la ductilidad reduciéndose, hasta que el material se vuelve frágil.

Cada vez que se aplica un esfuerzo mayor, el esfuerzo de fluencia y la resistencia a la tensión aumentan, mientras que la ductilidad disminuye. Al final el material metálico se fortalece hasta que el esfuerzo de fluencia y la resistencia máxima a la tensión son iguales. En este punto el metal ya no puede ser deformado plásticamente, ya que el esfuerzo de fluencia es máximo se dice que el material se ha endurecido y fragilizado.

2.5.4 Plasticidad cíclica.

El comportamiento plástico de esfuerzos y deformaciones bajo la aplicación de cargas cíclicas difiere del comportamiento bajo la aplicación de cargas monotónicas. Para la descripción de la plasticidad cíclica se han propuesto modelos basados en la observación experimental del comportamiento de los materiales, conocidos como modelos o reglas de endurecimiento cinemático. Sin embargo, no existe un modelo aplicable de manera general, debido a la presencia de ciertos fenómenos que causan que cada material se comporte de manera diferente.

Bajo la aplicación de cargas cíclicas los metales tienden a endurecerse o emblandecerse, lo cual significa que aumentan o disminuyen su resistencia a deformarse con la aplicación de cada ciclo de carga (Fig. 2.9).

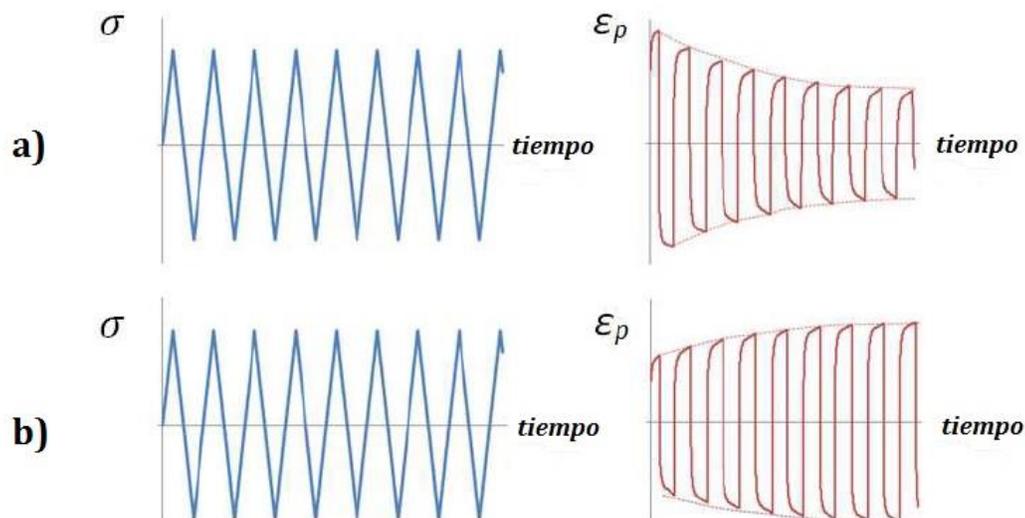


Fig. 2.9 Comportamiento de los metales bajo cargas cíclicas
a) Endurecimiento cíclico
b) Emblandecimiento cíclico



Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

En la *Fig. 2.9 a)* para cada ciclo de esfuerzo aplicado la magnitud de deformación plástica generada disminuye, debido a que el material se endurece. Mientras que en la *Fig. 2.9 b)* a medida que se aplican los ciclos de esfuerzo, la deformación plástica es mayor como consecuencia del emblandecimiento del material.

En algunos materiales (como los aceros inoxidables, aleaciones de cobre, etc.) este fenómeno es muy pronunciado, mientras que para otros (aceros de contenido medio de carbono) es muy poco evidente, de hecho existen algunos materiales para los cuales el efecto es prácticamente nulo. Normalmente el endurecimiento y emblandecimiento son despreciables o imperceptibles si las magnitudes de deformación plástica son pequeñas, aunque no existe una regla general.



Capítulo 3

Procedimiento experimental

3.1 Introducción.

En este capítulo se describe el procedimiento experimental seguido durante el desarrollo de este trabajo, así como los procesos y técnicas que fueron utilizadas para la formación de las capas de boruro de cobalto, empezando por la preparación de las probetas y las diferentes condiciones en las que se desarrollaron los tratamientos de borurización. La caracterización físico-química por medio de la técnica de difracción de rayos X (XRD) para las capas de boruro de cobalto ya han sido reportadas recientemente por el grupo de Ingeniería de Superficies, por lo que únicamente se hace referencia a los resultados. Mientras que para la caracterización mecánica se utilizaron técnicas de indentación instrumentada. En gran parte del capítulo se detallan las condiciones experimentales establecidas y metodología seguida para evaluar la fatiga por contacto en los sistemas capa/substrato.

3.2 Proceso de borurización.

Con fundamento en los trabajos presentados en el capítulo 1, el tratamiento de borurización por empaquetamiento en polvo fue utilizado para endurecer superficialmente la aleación *Co-Cr-Mo* cuya composición química se detalla en la *Tabla 3.1*. La denominación comercial de la aleación *Co-Cr-Mo* utilizada es Micro-Melt Bio Dur Carpenter CCM alloy (*Carpenter Technical Data Sheet 2007*), una versión forjada de la aleación ASTM F-75.



Instituto Politécnico Nacional
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tabla 3.1 Composición química (wt %) de la aleación Co-Cr-Mo (Micro-Melt Bio Dur Carpenter CCM Alloy) Carpenter Technical Data Sheet 2007.

| <i>Elemento</i> | <i>Porcentaje</i> | <i>Elemento</i> | <i>Porcentaje</i> |
|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| Cobalto | Base | ----- | ----- |
| Cromo | 26 - 30% | Silicio | 1 % (Máximo) |
| Molibdeno | 5 - 7 % | Carbono | 0.14 % (Máximo) |
| Niquel | 1 % (Máximo) | Hierro | 0.75 % (Máximo) |
| Manganeso | 1 % (Máximo) | Nitrógeno | 0.25% (Máximo) |

La geometría de las probetas utilizadas es cilíndrica y se muestra en la *Fig. 3.1*. El espesor propuesto fue de 5 mm, lo suficientemente grande para permitir el desarrollo completo del campo de esfuerzos y deformaciones por contacto durante la experimentación. Mientras que el diámetro de estas es de 19.05 mm (3/4 in). Se realizó un pre tratamiento a 1050 °C por 30 minutos con el fin de homogenizar y diluir la presencia de carburos en la aleación. Las probetas fueron lijadas y pulidas hasta conseguir un acabado espejo en la superficie antes del tratamiento termoquímico de borurización.

La cinética de crecimiento de las capas de boruro formados en este tipo de aleación se reportan por Campos *et al.* (2013). Apoyado en este trabajo, se propusieron 3 condiciones diferentes de tiempo y temperatura de exposición para los tratamientos, con la finalidad de lograr 3 sistemas capa/substrato con espesores y características diferentes, pero una misma microestructura de capa CoB/Co_2B . Debido a la constante referencia de estos tratamientos a lo largo de este trabajo, se establece una designación para cada tratamiento, en lo adelante se usara tal designación para referirse a ellos. (*Tabla 3.2*).

Tabla 3.2 Condiciones propuestas para los tratamientos termoquímicos y su designación en la nomenclatura para este trabajo.

| | Temperatura de exposición | Tiempo de exposición | Designación |
|----------------------|----------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| Tratamiento 1 | 850°C | 3h | s1 |
| Tratamiento 2 | 950°C | 1h | s2 |
| Tratamiento 3 | 950°C | 5h | s3 |

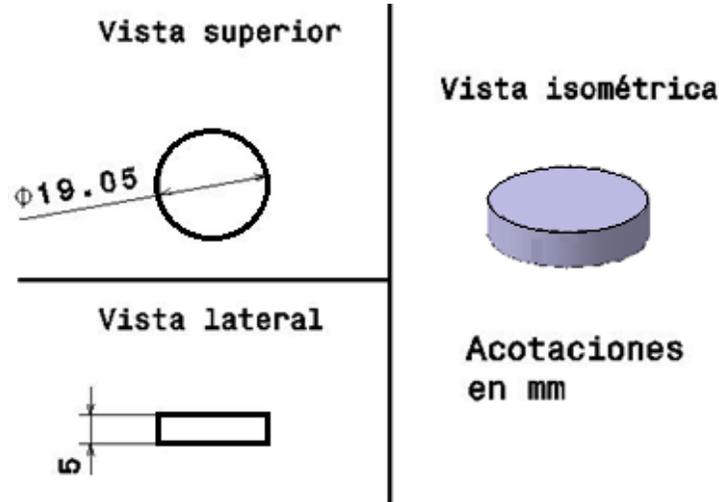


Fig. 3.1 Geometría y dimensiones de las probetas.

Las probetas fueron empaquetadas en un contenedor cilíndrico de acero inoxidable, cubiertas por el agente borurante *Ekabor II* compuesto principalmente por carburo de boro (B_4C) y carburo de silicio (SiC). En la Fig. 3.2 se muestra un esquema del empaquetamiento y las distancias que se dejaron entre probetas y las paredes del contenedor durante el tratamiento termoquímico. Los contenedores se introdujeron en una mufla marca Felisa para las 3 diferentes condiciones mostradas en la *Tabla 3.1*. Después del tratamiento los contenedores fueron retirados del interior de la mufla y se dejaron enfriar a temperatura ambiente.

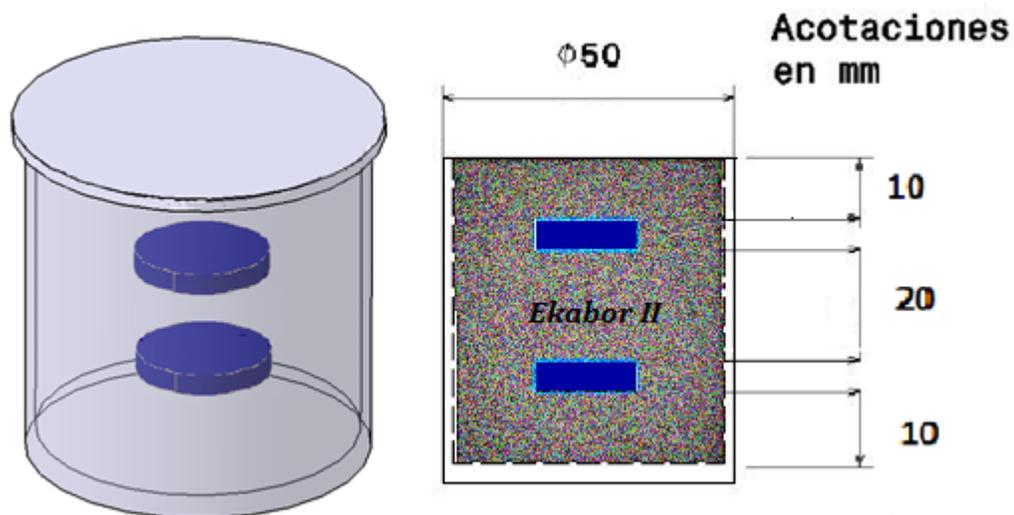


Fig. 3.2 Esquema del empaquetamiento de las probetas para el tratamiento termoquímico.

3.3 Caracterización de las capas.

3.3.1 Metalografía.

Una vez finalizado el tratamiento termoquímico, las probetas se cortaron transversalmente y fueron preparadas mediante desbaste por lija de carburo de silicio desde N 80 hasta N 2000 y un sucesivo pulido metalográfico con alúmina de $0.05 \mu\text{m}$, siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM E3-11. Para revelar las capas formadas se preparó un ataque químico compuesto por 90 ml de metanol y 10 ml de HNO_3 (ASTM E 407-07). Para cada condición de tratamiento, se tomaron micrografías en 4 zonas diferentes con ayuda de un microscopio óptico Olympus GX-51, las imágenes digitalizadas fueron analizadas con el programa *Image Pro Plus V6.0*, para cada micrografía se realizaron 40 mediciones de las fases apreciables CoB y Co_2B . Debido a la irregular morfología de las capas y con el fin de obtener mediciones estadísticamente confiables, para determinar el espesor de las capas se obtuvo el promedio de las mediciones hechas anteriormente para cada micrografía, como lo establecen las Ec. 3.1 y 3.2 e ilustrado en la Fig. 3.3.

$$\text{Espesor } \text{CoB} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} \quad (3.1)$$

$$\text{Espesor } \text{Co}_2\text{B} = \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{n} \quad (3.2)$$

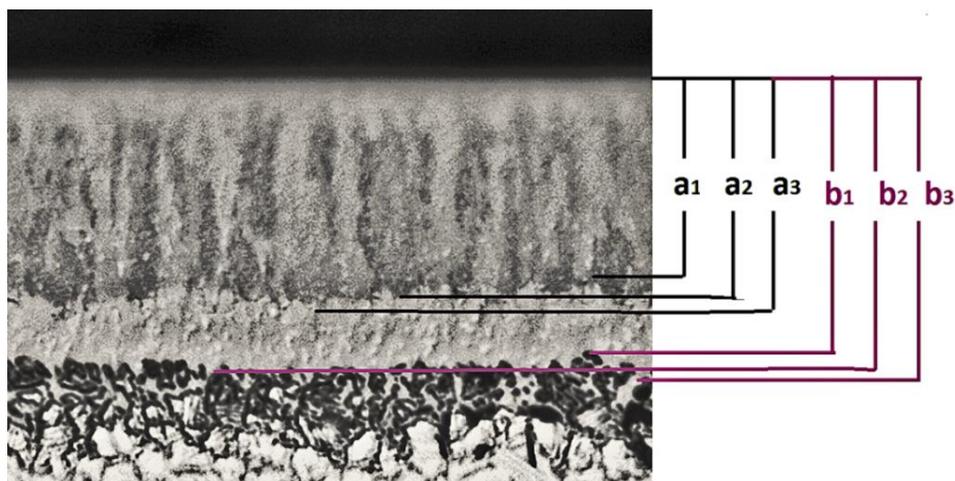


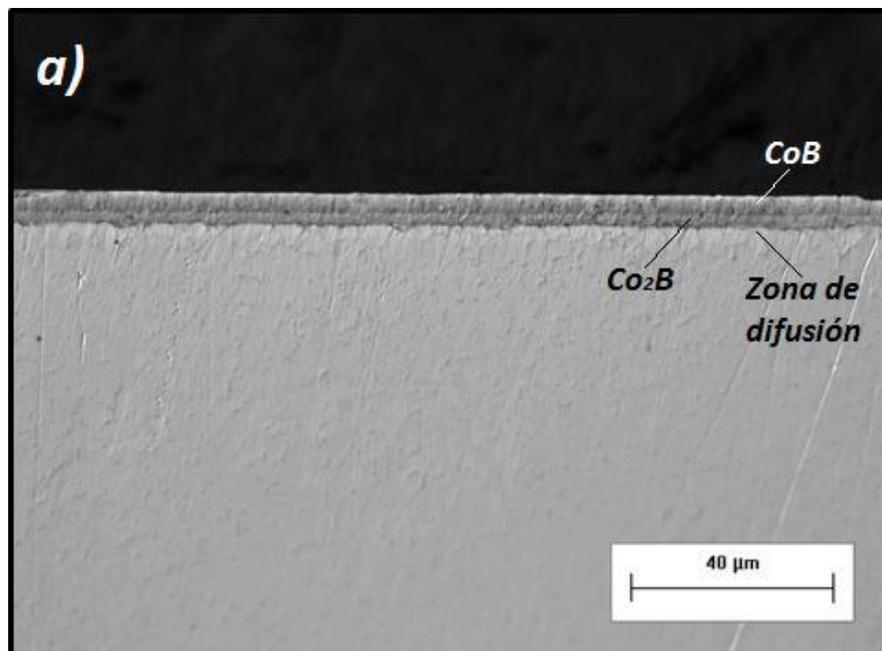
Fig. 3.3 Medición de los espesores de capa.

La capa formada consta de un sistema bifase compuesto por las fases CoB y Co_2B . El término “sistema capa/substrato” en conjunto con la notación presentada en la primer columna de la *Tabla 3.3* es utilizada en este trabajo para referirse a cada uno de los sistemas $CoB - Co_2B$ /substrato, generados durante los tratamientos. La notación utilizada para los sistemas obtenidos corresponde con los espesores totales de capa medidos, siendo $s1$ el sistema capa/substrato con capa más delgada y $s3$ el sistema con mayor espesor de capa. Los resultados de las mediciones de las capas para cada tratamiento se muestran en la *Tabla 3.3*.

Tabla 3.3 Espesores de capa medidos.

| Sistema capa/substrato | Condiciones | Espesor (μm) | | $\left(\frac{CoB}{Co_2B}\right)$ |
|---------------------------|-------------|---------------------------|----------------|----------------------------------|
| | | CoB | Co_2B | |
| $s1$ | 850°C 3h | 3.7 ± 0.1 | 5.8 ± 0.3 | 0.64 |
| $s2$ | 950°C 1h | 7.7 ± 0.2 | 11.2 ± 0.3 | 0.69 |
| $s3$ | 950°C 5h | 22.5 ± 0.4 | 27.3 ± 1.7 | 0.82 |

La mayor presencia de la fase CoB implica un comportamiento más frágil del sistema (consecuencia de los esfuerzos residuales a tensión presentes en CoB). En la última columna de la *Tabla 3.3* se indica la relación entre fase CoB y Co_2B para cada uno de los sistemas obtenidos. Las micrografías de los tres tratamientos se muestran en las *Fig. 3.4*.



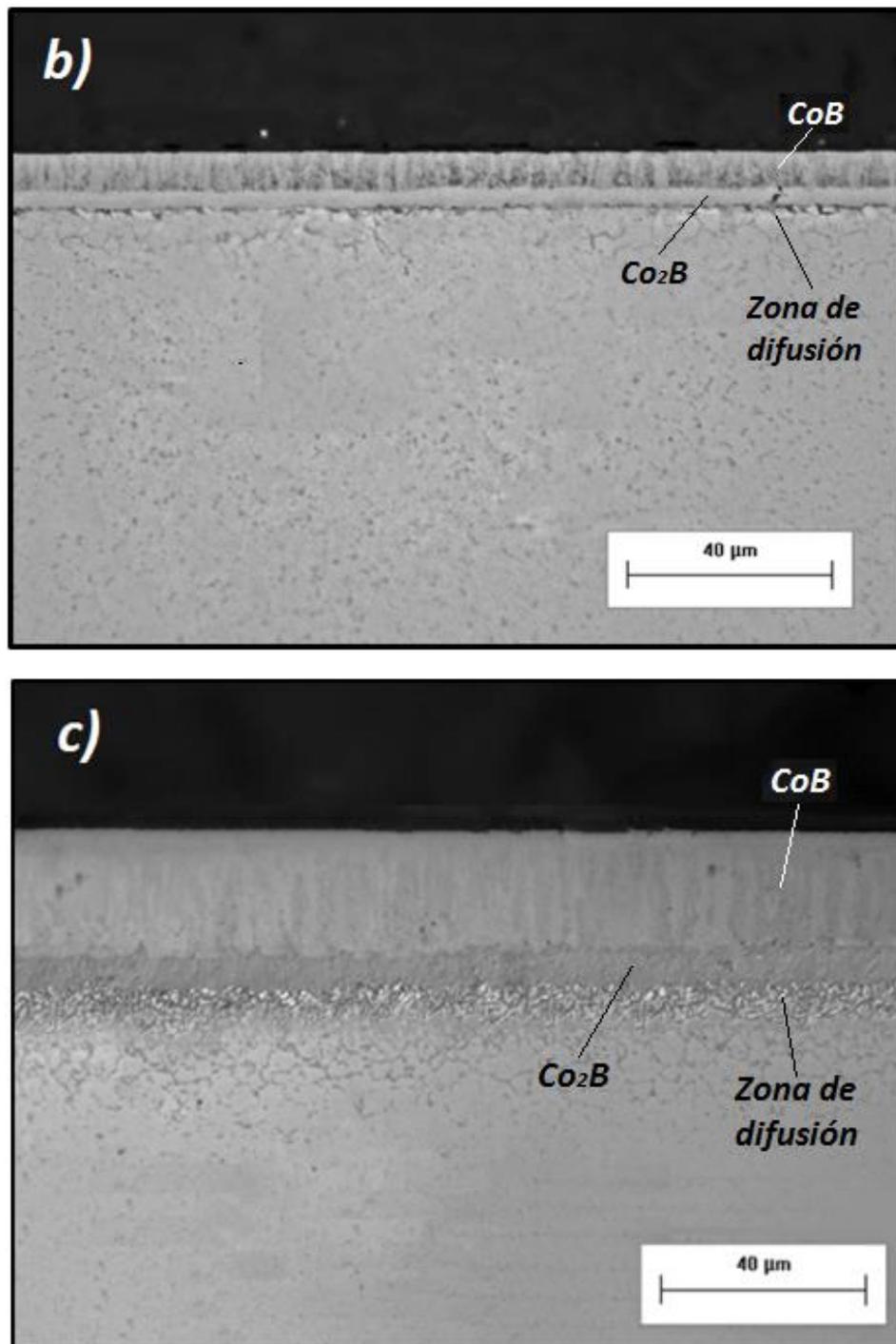


Fig. 3.4 Micrografías de la aleación Co-Cr-Mo Borurada a) 850°C 3 h b) 950°C 1h c) 950°C 5h.

Tal y como se mencionó anteriormente, las capas formadas consisten de dos fases (CoB y Co_2B) las cuales se observan en la Fig. 3.4. En un inicio los átomos de boro difunden a través de la superficie de la aleación Co-Cr-Mo, al alcanzar cierta concentración comienza la nucleación de los cristales Co_2B ,

dando lugar a la formación de una capa Co_2B en la superficie de la aleación, con una zona de difusión debajo de ella. Posteriormente y como consecuencia del alto potencial de boro en la superficie de la aleación y las altas temperaturas de exposición, se inicia la nucleación y crecimiento de los cristales de la fase CoB . (Campos *et al*, 2013)

La técnica de Difracción de Rayos X (XRD) fue empleada por Campos *et al*. (2013) del grupo de Ingeniería de Superficies, con la finalidad de confirmar la formación de los boruros de cobalto en una aleación ASTM - F75 ($Co-Cr-Mo$) e identificar otras fases que pudieran formarse durante el tratamiento. El difractómetro mostrado en la Fig. 3.5 confirma la presencia de las principales fases CoB y Co_2B , así como la presencia de boruros de CrB y Mo_2B disueltos en la capa de boruro formada.

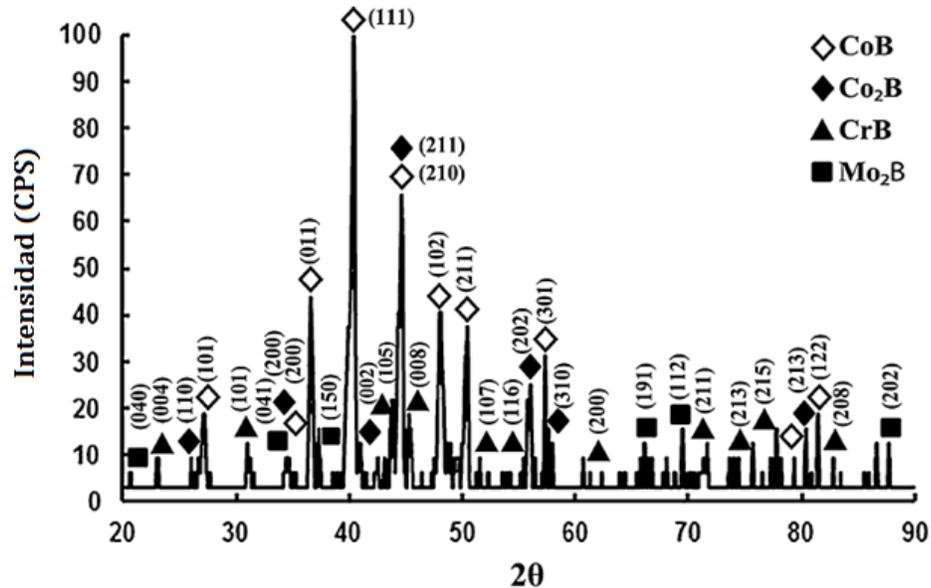


Fig. 3.5 Patrón de difracción para una aleación ASTM - F75 (Co-Cr-Mo) borurada.

Tomada de Campos I. et al. (2015)

La zona de difusión desarrollada presenta una morfología compuesta por “estrías” con una aparente orientación preferencial (más apreciable en la Fig. 3.4. c). Campos *et al*. (2014), a través de un análisis EDS directamente en esta zona, reportan un alto contenido de Cr y una reducida cantidad de Mo , C , Si y B . Además, proponen que la formación de la zona de estrías se debe a la precipitación de compuestos formados con el Cr y al crecimiento de compuestos de Si y Mo entre los límites de grano de la aleación en una orientación cristalográfica preferencial.

3.3.2 Caracterización mecánica por indentación instrumentada.

De manera general, las técnicas de indentación son un método que consiste esencialmente en la interacción por contacto entre un material de propiedades desconocidas con otro material cuyas propiedades son conocidas. Entonces, la indentación instrumentada es simplemente una clasificación dentro de las técnicas de indentación que tiene como principal característica que la escala de penetración es medida en el orden de nanómetros (10^{-9}m), por lo que permite la evaluación de propiedades mecánicas de pequeños volúmenes de material y películas delgadas a diferencia de los ensayos convencionales de dureza. Además de la escala de penetración, otra característica es que esta técnica no requiere de la medición directa del área de contacto entre el indentador y el material como en los ensayos convencionales, sino que esta es medida indirectamente en función de la geometría del indentador y la precisa medición de las profundidades de penetración.

Además de la dureza, las técnicas de nanoindentación pueden ser utilizadas para calcular el módulo de elasticidad, el exponente de endurecimiento por deformación, la tenacidad a la fractura (en materiales frágiles) y el trabajo elástico y plástico durante la indentación.

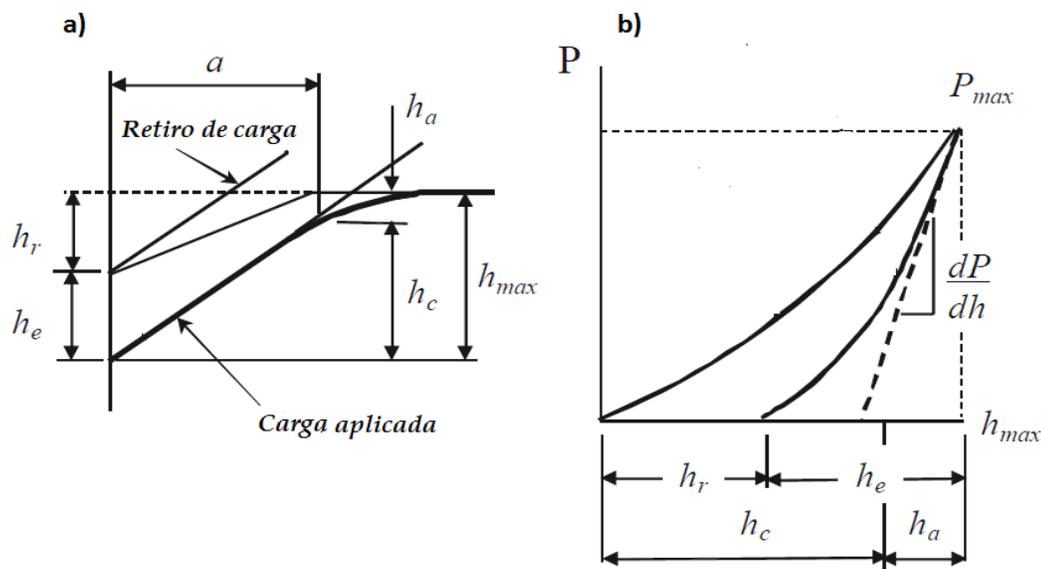


Fig. 3.6 a) Vista transversal de la indentación. b) Curva de carga y descarga generada durante las indentaciones.

La determinación de las diferentes propiedades por esta técnica se basa en el análisis de la curva de carga y descarga desarrollada durante la prueba (Fig. 3.6). La curva se forma principalmente de una línea de carga, producida durante la deformación elástica y plástica del material, seguida de una línea de descarga formada por el desplazamiento y recuperación elástica cuando la carga es retirada.

Tal y como se mencionó anteriormente, el área de contacto proyectada por el indentador se encuentra en función de la geometría del indentador y la profundidad de contacto h_c , para el indentador Berkovich (Fig. 3.7) la función del área de contacto es:

$$A_c = 3\sqrt{3}h_c^2 \tan^2 \theta \quad (3.3)$$

Con $\theta=65.27^\circ$

$$A_c = 24.494 h_c^2 \approx 24.5 h_c^2 \quad (3.4)$$

Por lo tanto, una vez que se determina h_c , el área proyectada es calculada. Utilizando el concepto de presión media de contacto como definición de dureza, esta es calculada por

$$H = \frac{P}{A} = \frac{P}{24.5h_c^2} \quad (3.5)$$

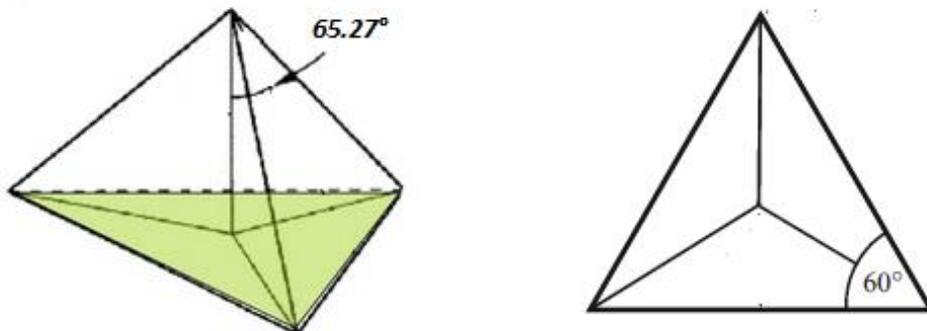


Fig. 3.7 Geometría y área proyectada de un indentador Berkovich.

Una manera para determinar la profundidad de contacto h_c durante la prueba es mostrada a continuación:

La profundidad h_c se puede encontrar a partir de un análisis de la pendiente de la curva. Para esto, es conveniente examinar a detalle el método con referencia a un cono axial simétrico en lugar de tratar



Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

con la geometría piramidal no simétrica del indentador Berkovich. Un cono con un semi ángulo $\alpha=70.296^\circ$ presenta la misma área proyectada en función de la profundidad que el indentador Berkovich triangular.

Según Sneddon (1948) para un comportamiento totalmente elástico en la descarga, la relación entre la carga y la profundidad de penetración para un cono está dada por:

$$P = \frac{2}{\pi} E^* h_e^2 \tan \alpha \quad (3.6)$$

Donde h_e es el desplazamiento elástico (Fig.3.5) y E^* el módulo reducido.

El desplazamiento normal h de cualquier punto en la superficie bajo el indentador como función de la distancia radial r medida desde el eje de simetría está dada por:

$$h = \left(\frac{\pi}{2} - \frac{r}{a} \right) a \cot \alpha \quad r \leq a \quad (3.7)$$

Como se observa en la Fig. 3.6, mientras el indentador es retirado, la punta del indentador ($r = 0$) se desplaza una distancia h_e , mientras que el borde del círculo formado por el cono y la superficies ($r = a$) se desplaza h_a . Sustituyendo los valores anteriores de r en la Ec. 3.7.

$$h_e = \frac{\pi}{2} a \cot \alpha \quad (3.8a)$$

$$h_a = \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) a \cot \alpha \quad (3.8b)$$

Combinando las Ec. 3.8 y 3.8.

$$h_a = \left(\frac{\pi - 2}{\pi} \right) h_e \quad (3.9)$$

De la Fig. 3.6 también se establece

$$h_{max} = h_c + h_a \quad (3.10)$$



Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Por otro lado la pendiente de la curva de descarga puede ser determinada derivando la Ec. 3.6 con respecto a h .

$$\frac{dP}{dh} = 2 \frac{2}{\pi} E^* h_e \tan \alpha \quad (3.11)$$

Sustituyendo en 3.6

$$P = \frac{1}{2} \frac{dP}{dh} h_e \quad (3.12)$$

Sustituyendo la Ec. 3.12 en 3.9

$$h_a = \left(\frac{2(\pi - 2)}{\pi} \right) \frac{P}{\frac{dP}{dh}} \quad (3.13)$$

Si se considera que la profundidad máxima h_{max} se presenta con la carga máxima aplicada P_{max} y sustituyendo en la Ec. 3.10.

$$h_c = h_{max} - \left(\frac{2(\pi - 2)}{\pi} \right) \frac{P_{max}}{\frac{dP}{dh}} \quad (3.14)$$

El factor que se encuentra entre paréntesis en general depende del tipo de indentador, comúnmente denominado ε y que para un indentador cónico $\varepsilon \approx 0.72$

$$h_c = h_{max} - \varepsilon \frac{P_{max}}{\frac{dP}{dh}} \quad (3.15)$$

Las cantidades $\frac{dP}{dh}$ y P_{max} son obtenidas durante la realización de la prueba. Por lo que la profundidad de contacto h_c puede ser determinada en cualquier punto.

Conjuntando Ec. 3.7 y Ec.3.10 es posible obtener una expresión para el módulo reducido en función de $\frac{dP}{dh}$ y A .

$$E^* = \frac{dP}{dh} \frac{1}{2a} = \frac{1}{2} \frac{dP}{dh} \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{A}} \quad (3.16)$$



Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Finalmente el módulo de indentación del espécimen es calculado por la siguiente ecuación, en donde el sub índice i se refiere a las propiedades del indentador y p se refiere a las propiedades del espécimen en prueba.

$$E = \frac{1 - \nu_p^2}{\frac{1}{E^*} - \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}} \quad (3.17)$$

Como parte de la caracterización mecánica, de la curva $P - h$ se obtuvo el módulo de elasticidad E y la dureza H de las capas. Considerando H y E , se determinó el esfuerzo de cedencia, coeficiente de resistencia y exponente de endurecimiento por deformación, utilizados en la simulación numérica. Aunque es parte de la caracterización mecánica, estos procedimientos se especifican en el siguiente capítulo.

Las pruebas de indentación instrumentada se realizaron utilizando un Nanoindentador NHT, marca CSM Instrument del Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías del Instituto Politécnico Nacional. Las condiciones de prueba utilizadas fueron:

- Carga máxima aplicada: 50 mN
- Velocidad de aplicación de carga: 100 mN/min
- Velocidad de retiro de carga: 100 mN/min
- Pausa: 10 s

Los ensayos fueron realizados a lo largo la sección transversal de las capas CoB y Co_2B hasta llegar al sustrato (Fig. 3.9). Para los sistemas $s2$ y $s3$ la primera indentación se realizó a 4 μm desde la superficie, aproximadamente igual a 3 veces el tamaño de la huella, con lo que se evita el efecto generado por la superficie libre. Para el sistema $s1$ el criterio anterior no se cumple, ya que debido al pequeño espesor de la fase CoB la primer indentación se realizó a una distancia de aproximadamente 3 μm , sin embargo, los valores de dureza y módulo de elasticidad obtenidos son similares a los encontrados para los otros dos sistemas, por lo que se puede asumir que la distancia 3 μm es suficiente para evitar el efecto de la superficie libre.

La profundidad de indentación máxima aproximada es de 317 nm para la fase CoB y de 361.5 nm para la fase Co_2B (Fig.3.8), la relación entre las profundidades máximas respecto al espesor total de capa más

pequeño ($5.8 \mu\text{m}$) es igual a 6.3% y 5.4 % los cuales se encuentra en los límites aceptables (10 %) para realizar la prueba confiablemente.

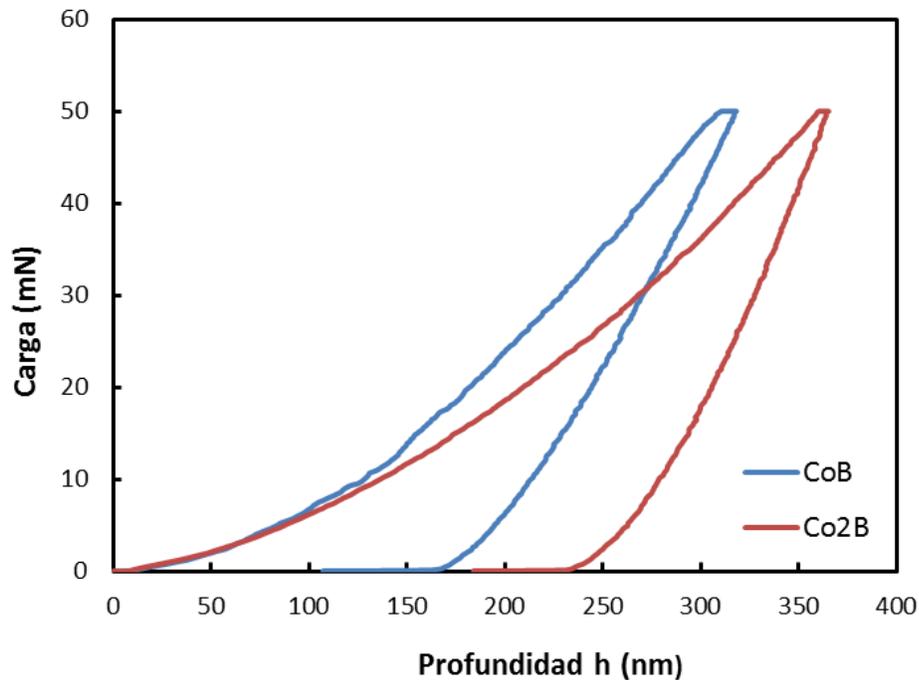


Fig. 3.8 Grafico carga-profundidad obtenido a $6 \mu\text{m}$ (fase CoB) y $10 \mu\text{m}$ (fase Co2B) desde la superficie de la aleación Co-Cr-Mo borurada. Sistema s2.

Las distancias entre indentaciones es variable para los 3 sistemas (Fig. 3.9) y se determinaron en función de los espesores de capa, tamaño de huella y carga aplicada. Todas las distancias cumplen con la recomendación propuesta por la norma ISO 14577-1-2002, la cual establece que la distancia mínima entre indentaciones debe ser igual a 5 veces el tamaño de la huella. Otro criterio comúnmente utilizado en literatura (Hay J, (2000)) establece que para indentadores tipo Berkovich y Vickers la distancia entre indentaciones debe ser de por lo menos 20 veces la profundidad máxima alcanzada durante la prueba, por lo que las distancias entre indentaciones mínimas son $6.3 \mu\text{m}$ para la fase CoB y $7.2 \mu\text{m}$. Todas las distancias entre indentaciones cumplen también con este criterio.

a)



b)



c)

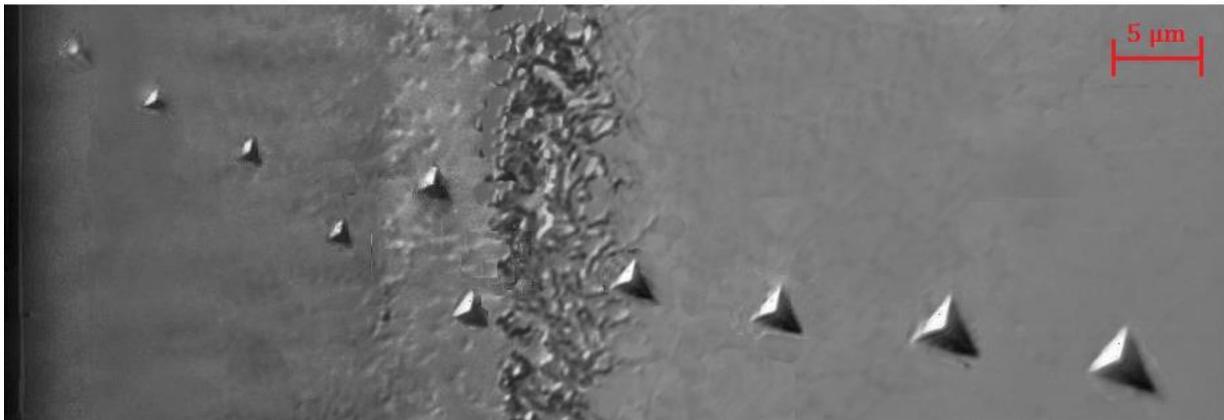


Fig. 3.9 Indentaciones Berkovich realizadas a lo largo de la capa de boruros de cobalto empleando 50 mN de carga. Sistema capa sustrato a) s1 b) s2 c) s3.

La máxima dureza se presenta en las mediciones cercanas a la superficie (Fig. 3.10), la cual disminuye a medida que se acerca hacia el sustrato, la diferencia entre las durezas es atribuida a la presencia de los compuestos formados durante el tratamiento. Para los tratamientos con temperaturas de 950°C (s2 y s3) los valores de dureza más estables (26.75 ± 0.73 GPa) se encontraron a $\approx 4\mu\text{m}$ de distancia desde la superficie. Mientras que para el tratamiento a 850°C (s1) a $\approx 3\mu\text{m}$ de distancia desde la superficie el valor de dureza fue (25.88 ± 0.45 GPa) lo que sugiere propiedades mecánicas similares.

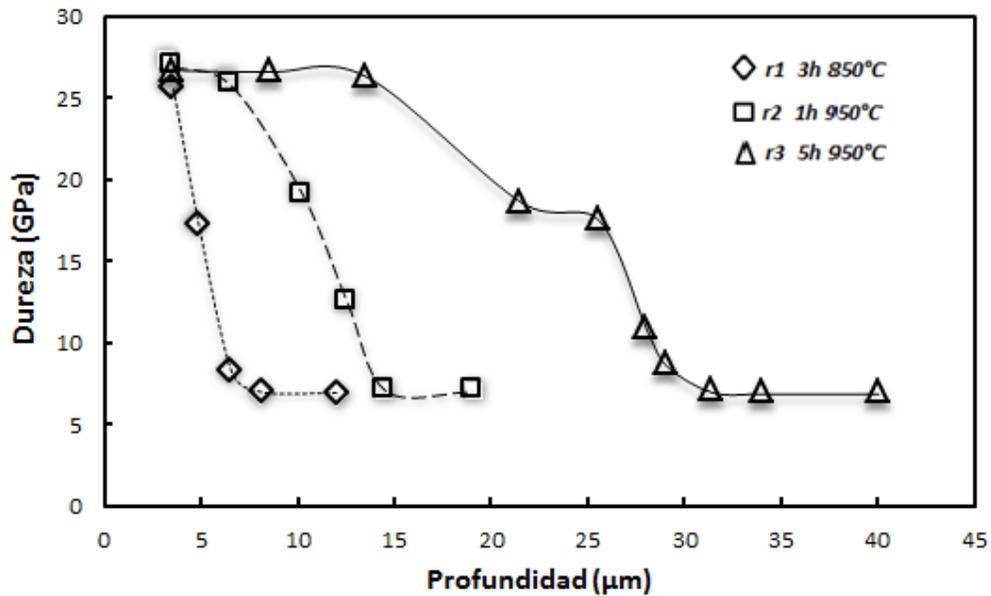


Fig. 3.10 Perfiles de dureza obtenidos por indentación instrumentada bajo una carga de 50 mN en la aleación Co-Cr-Mo borurada.

Para el módulo de elasticidad se obtuvo un comportamiento similar al de las durezas (Fig 3.11). Para la fase CoB se presentó un módulo de elasticidad (394.3 ± 14.6 GPa) superior al registrado en la fase Co_2B (361.75 ± 9.5 GPa).

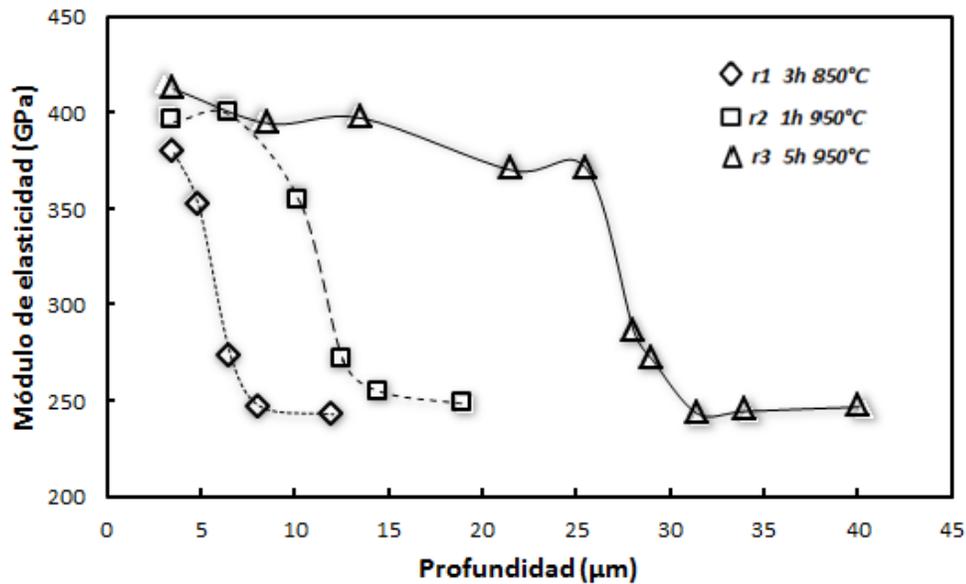


Fig. 3.11 Comportamiento del módulo de elasticidad obtenido por indentación instrumentada bajo una carga de 50 mN en la aleación Co-Cr-Mo borurada.



Las durezas y módulos de elasticidad presentados fueron obtenidos bajo la aplicación de 50 mN de carga, sin embargo, en pruebas de indentación instrumentada se ha observado que la dureza medida disminuye a medida que se aumenta la carga, como consecuencia de un fenómeno conocido como “efecto de tamaño de indentación” o ISE por sus siglas en inglés (Indentation size effect).

De acuerdo a la literatura el ISE es consecuencia de factores propios de la experimentación como la sensibilidad de la celda de carga y la baja resolución de los lentes de los objetivos, así como de factores estructurales intrínsecos de los materiales frágiles como la recuperación elástica y el endurecimiento por trabajo durante la indentación. Campos *et al* (2015) confirman la presencia del ISE durante la indentación de las capas de boruro de cobalto, posteriormente utilizando el modelo de bandas propuesto por Bull *et al.* (1989) determinan que la dureza real para la fase CoB es de aproximadamente 20 – 21 GPa y un módulo de elasticidad de 530 - 536 GPa, mientras que para Co_2B la dureza real es de 17 - 18 GPa y un módulo de elasticidad 479 GPa.

3.4 Prueba de fatiga por contacto.

Las convencionales y bien conocidas técnicas aplicadas para la caracterización de adhesión y comportamiento de sistemas capa/substrato no son adecuadas en algunos casos, ya que no consideran todas las características y condiciones presentes en aplicaciones reales; particularmente se ignora el comportamiento dinámico y por lo general repetitivo de cargas aplicadas, las cuales a pesar de su pequeña magnitud degradan continuamente al sistema.

El objetivo principal de la experimentación propuesta es determinar un procedimiento por medio del cual sea posible la evaluación y evolución del daño en los sistemas capa/substrato formados, en función del número de ciclos y de las magnitudes de carga por contacto aplicadas. Otro de los objetivos es comparar como afecta el espesor de capa en la fatiga por contacto (3 condiciones de tratamiento mencionadas en la sección 3.2 de este capítulo).

Para la evaluación experimental, la metodología propuesta se basa en los trabajos de Knotek *et al.* (1992) y Bantle (1995). Es necesario aclarar que con esta metodología no se busca simular las condiciones de contacto presentes para una aplicación específica, más bien una evaluación cualitativa de la resistencia a la aplicación de cargas por contacto que presentan este tipo de capas. Debido a que no se trata de una prueba normalizada, los parámetros utilizados durante la prueba se establecieron en función de las características, propiedades y comportamiento del sistema capa/substrato.

3.4.1 Descripción de la prueba.

A grandes rasgos la prueba de fatiga por contacto consiste en la aplicación controlada de cargas estáticas y cíclicas mediante el impacto de una pequeña esfera dura sobre una superficie plana (Fig. 3.12) y el constante monitoreo del daño producido. La superficie plana consiste de un sistema capa/substrato (probeta con recubrimiento). Primero se determina una carga estática crítica para la que la capa presenta daño y posteriormente se aplican cargas sub críticas de manera cíclica, bajo la hipótesis de que estas cargas a pesar de ser pequeñas (menores a las cargas estáticas) degradan progresivamente al sistema.

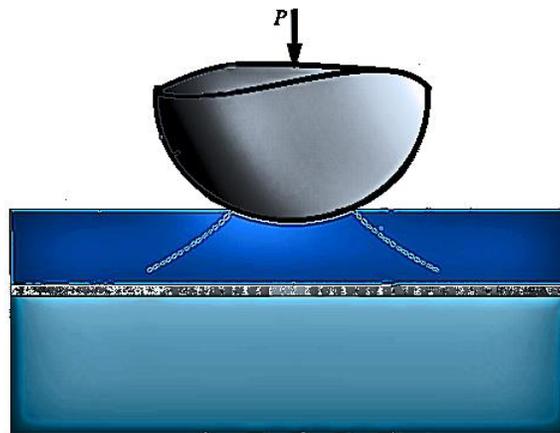


Fig. 3.12 Esfera en contacto con un sistema capa/substrato.

Con base en la teoría del contacto mecánico presentados en el capítulo 2, se establece que la configuración geométrica esfera-superficie plana presenta ciertas ventajas en comparación con otras, dentro de las que se destacan:

- a) Permite la aplicación de grandes cargas de manera sencilla y fácilmente controlable.
- b) Simula el comportamiento de un amplio rango de sistemas tribológicos. Johnson (1980).
- c) Permite el desarrollo de un campo de esfuerzos variable en magnitud y permite la identificación de diferentes comportamientos (en régimen elástico y plástico).

3.4.2 Equipo utilizado.

Para la aplicación de cargas de magnitud controlada, tanto estáticas como cíclicas se utilizó una máquina de ensayos universal servo hidráulica marca MTS – 858 cuya capacidad de carga es de 2.5 kN y una máxima frecuencia de actuador de 10 Hz mostrada en la *Fig. 3.13*. La máquina pertenece a la Sección de Estudios de Posgrado de la ESIME Zacatenco.



Fig. 3.13 Máquina de ensayos universal MTS -858.

Los dispositivos mostrados en la *Fig. 3.14* fueron diseñados y fabricados con el fin de adaptar la maquina MTS para la realización de las pruebas de fatiga por contacto. El dispositivo mostrado en la *Fig. 3.14 a)* se utilizó para mantener fijamente las probetas durante la prueba, mientras que el dispositivo de la *Fig 3.14 b)* tiene la función de sostener firmemente la esfera, pero permitiendo desmontarla fácilmente. La esfera se revisó después de cada prueba para descartar deformación plástica o daño que pudiera afectar durante la experimentación, se giró continuamente y en caso de presentar daño era remplazada.

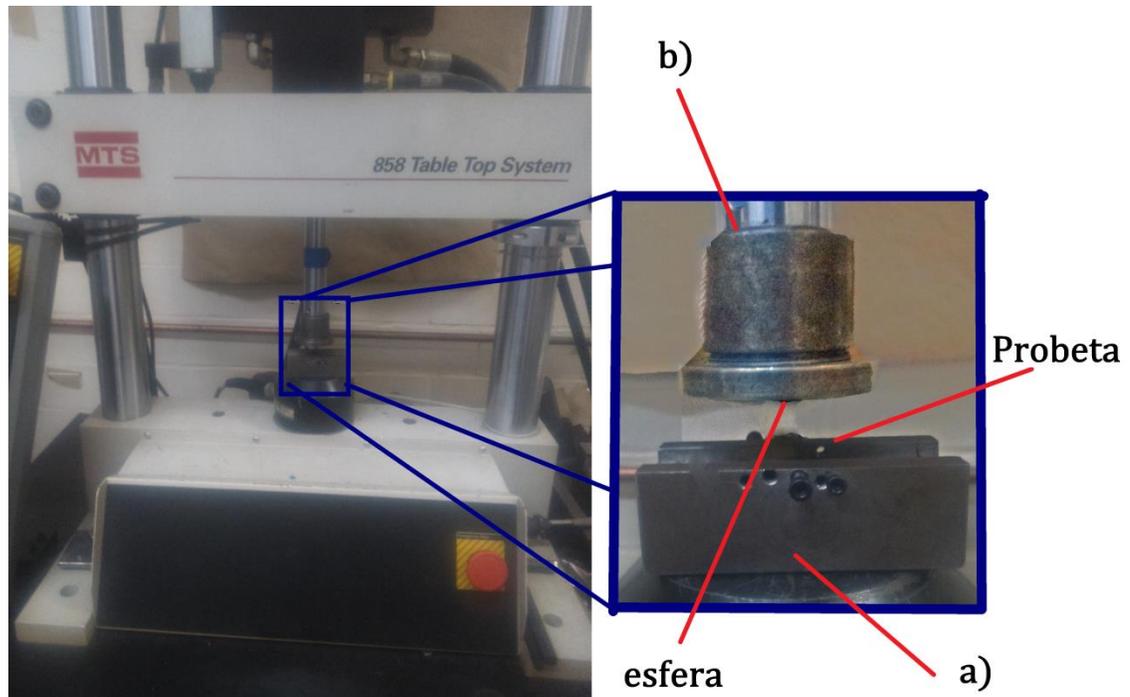


Fig. 3.14 *Ensamble y montaje de los dispositivos para la prueba de fatiga por contacto a) Dispositivo sujetador de probetas b) Dispositivo para la aplicación de carga.*

La esfera utilizada está hecha de nitruro de silicio (Si_3N_4), un cerámico estructural de gran resistencia mecánica con un diámetro de 6 mm. Una comparación de las propiedades mecánicas entre la aleación *Co-Cr-Mo* utilizada como material sustrato y Si_3N_4 se muestran en la *Tabla 3.4*. Se observa que las propiedades de la esfera son considerablemente mayores que las del sustrato, buscando que el daño generado sea desarrollado en el sistema capa/sustrato. Las propiedades mecánicas de las capas de boruro de cobalto se encuentran en el rango de la cuarta parte, sin embargo, los espesores de capa son pequeños en comparación con el área de contacto, por lo que las propiedades del sustrato son dominantes.

Tabla 3.4 *Propiedades mecánicas del sustrato y esfera utilizados en la experimentación.*

| | Dureza HV | Módulo de elasticidad E (GPa) | Esfuerzo de cedencia σ_Y (MPa) |
|-------------------------------------|-------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| Aleación <i>Co-Cr-Mo</i> (Sustrato) | 450 | 240 | 1117 |
| Si_3N_4 (Esfera) | 1580 | 315 | ----- |

3.5 Metodología experimental para la prueba.

3.5.1 Condiciones generales.

A continuación se presentan y justifican los criterios y condiciones utilizada durante la experimentación. Para cada uno de los pasos de la metodología establecida, se definen las condiciones experimentales bajo las cuales se realizaron las pruebas.

- **Distancia entre pruebas.** Con el objeto de garantizar que los esfuerzos y deformaciones residuales producidas durante otras pruebas cercanas no interfirieran con la prueba dentro de una misma probeta, se realizó una simulación numérica utilizando la condición de carga más crítica (1500 N) y sin recubrimiento. La Fig. 3.15 muestra la sección transversal de la simulación realizada, se aprecia el campo de esfuerzos residual dejado por una indentación y a continuación el espectro de esfuerzos de magnitud máxima generado durante la prueba. Se establece entonces que la distancia mínima entre cada prueba realizada debe de ser de por lo menos 4 veces el diámetro residual D , generado durante la prueba.

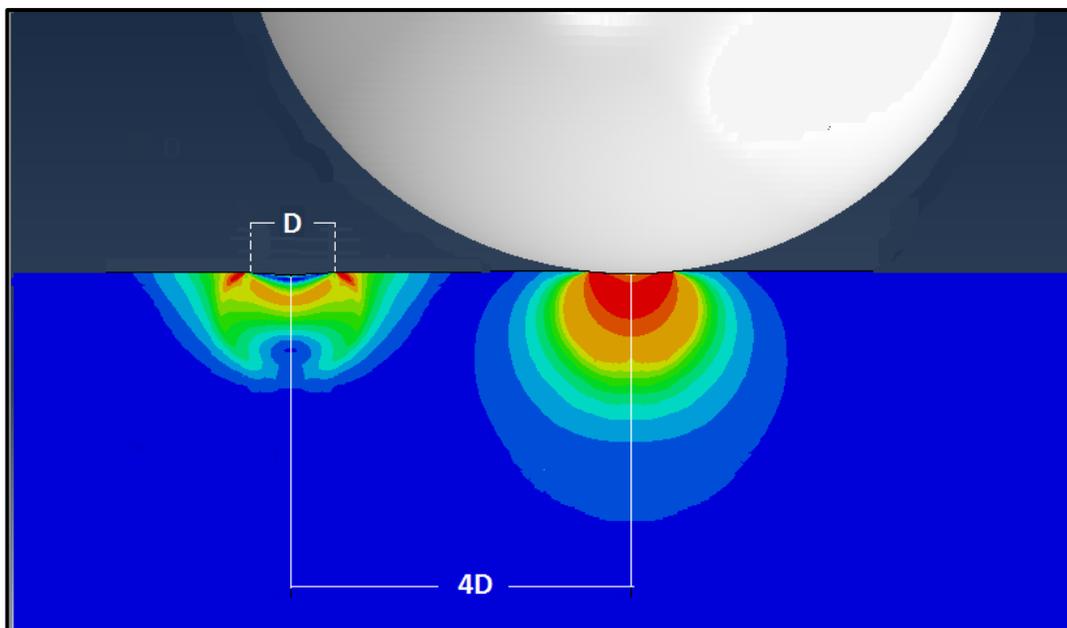


Fig. 3.15 Simulación numérica de una indentación esférica. Utilizando una carga de 1500 N.



- Fricción y adhesión despreciables.

En función de las condiciones presentes durante el contacto el análisis puede simplificarse, si la aplicación de carga es totalmente perpendicular a la superficie se puede ignorar los efectos de la fricción; en cambio si la carga aplicada tiene una componente tangencial a la superficie, el análisis debe considerar la presencia de fricción. Para este trabajo, se puede considerar que no hay fricción por lo que el análisis de los esfuerzos por contacto es descrito únicamente por la teoría de Hertz.

Además, considerando las dimensiones geométricas y las magnitudes de carga utilizadas en la experimentación (100 N -1500 N), para este trabajo se pueden despreciar las fuerzas de adhesión y de van der Waals (establecidas en la sección 2.2).

3.5.2 Determinación del nivel de daño.

El primer paso es determinar el criterio para el cual se considera que el sistema capa/substrato ha alcanzado el daño crítico y que servirá como referencia para las pruebas estáticas y cíclicas.

De acuerdo a Voevodin *et al.* (1995), dependiendo de las propiedades del substrato y la capa, el daño presente en esta última puede ir desde la presencia de grietas tipo anillo hasta delaminación. Siendo la rigidez del substrato el factor más determinante (a mayor rigidez menor daño en la capa). Por otra parte Tarres *et al.* (2009) sugieren que el criterio adecuado para establecer las condiciones críticas de daño durante la fatiga por contacto es la formación de grietas tipo anillo en la capa, debido a que las grietas pueden propagarse hacia el substrato conforme se aplican ciclos de carga.

Tomando como base los trabajos antes mencionados, la gran rigidez del material substrato ($E=240$ GPa) y la observación del comportamiento del sistema capa/substrato en pruebas preliminares realizadas, se decidió establecer la formación de grietas tipo anillo como el criterio para determinar el nivel de daño crítico en el sistema. La formación de estas grietas en la aleación *Co-Cr-Mo* borurada se muestra en la Fig. 3.16., la intensidad de las grietas varía en función de las cargas aplicadas y el espesor de capa.

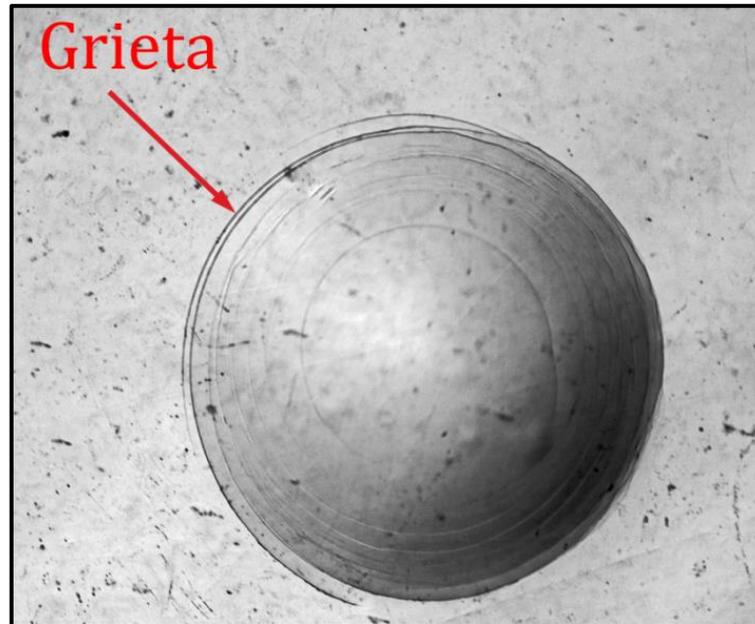


Fig. 3.16 Nivel de daño crítico utilizado, presencia de grietas tipo anillo.

Un comportamiento similar (grietas tipo anillo) se presentó en los sistemas capa/substrato s1, s2 y s3, variando simplemente la intensidad del daño, por lo que el criterio utilizado es el mismo para los tres sistemas.

3.5.3 Determinación de las cargas estáticas críticas.

Una vez establecido el criterio de daño se determinan las cargas críticas para las que la capa se agrieta, bajo las consideraciones mencionadas a continuación.

- Cargas aplicadas.

La aplicación de cargas controladas se hizo con la ayuda del programa Test Star, que sirve como interface entre el usuario y la máquina de ensayos universal. Las pruebas se realizaron aplicando cargas estáticas de 100 N, 150 N, 200 N, 250 N hasta 1500 N, para determinar con la mayor precisión posible el daño en la capa. Cada una de las pruebas se replicó un total de tres veces en diferentes zonas de la probeta.

- Velocidad de aplicación de carga.

Para poder considerar las cargas como una condición estática se controló la velocidad de aplicación de carga fue lenta y gradual a una razón de 10 N/s.



- Microscopia óptica.

Con la ayuda de un microscopio óptico Olympus modelo Gx-51 se inspeccionaron las huellas buscando la presencia de grietas tipo anillo formadas durante la pruebas y se midieron los diámetros de las huellas. Las condiciones de carga mínimas para las cuales las capas presentaron formación de grietas fueron consideradas como cargas estáticas críticas F_{c1} , F_{c2} y F_{c3} para los sistemas $s1$, $s2$ y $s3$ respectivamente.

Las pruebas que llegaban a presentar evidencia de movimiento (relativo entre la probeta y la esfera), deformación de la esfera o simplemente no cumplían con la distancia de $4D$ establecida anteriormente fueron descartadas y repetidas nuevamente. Para cada huella se realizó un total de 8 mediciones del diámetro.

- Análisis de varianza.

Con las 8 mediciones de diámetro obtenidas de cada una de las tres pruebas replica (hechas en diferentes zonas de la probeta) se realizó un análisis de varianza de un solo factor para cada condición de carga, con el objeto de garantizar que los resultados obtenidos son confiables, repetibles e independientes de la zona (en la superficie de la probeta) en que se desarrolla la prueba.

Debido a que la varianza para las mediciones de cada una de las tres replicas es menor que la varianza total, se establece que las tres replicas son suficientes para garantizar una muestra representativa. Un total de $3 \times 8 = 24$ datos fueron analizados por cada condición de carga. Para todos los casos, por medio del análisis de varianza de un solo factor se confirmó estadísticamente que el resultado de la prueba es independiente de la zona en donde se realiza. Posiblemente esto se debe a que el crecimiento de la capa es uniforme en la probeta.

3.5.4 Aplicación de cargas cíclicas.

La presencia de fatiga por contacto en las capas se determina al aplicar cargas repetidas de menor magnitud a las cargas estática crítica F_c encontradas anteriormente. A pesar de que las cargas cíclicas aplicadas son más pequeñas, comúnmente conducen a un daño progresivo y más severo en la superficie de la capa.

La aplicación y secuencia de las cargas cíclicas aplicadas se controló por medio del programa Test Star, la secuencia de carga programada para las pruebas cíclicas se muestra en la Fig. 3.17. Inicialmente una carga se aplica de manera gradual hasta alcanzar una magnitud igual a $F/2$, al llegar a este punto la magnitud de carga comienza a variar de manera senoidal con la magnitud F en el límite superior y un valor fijo de 5 N en el límite inferior, durante n número de ciclos programados. Finalmente la carga es retirada.

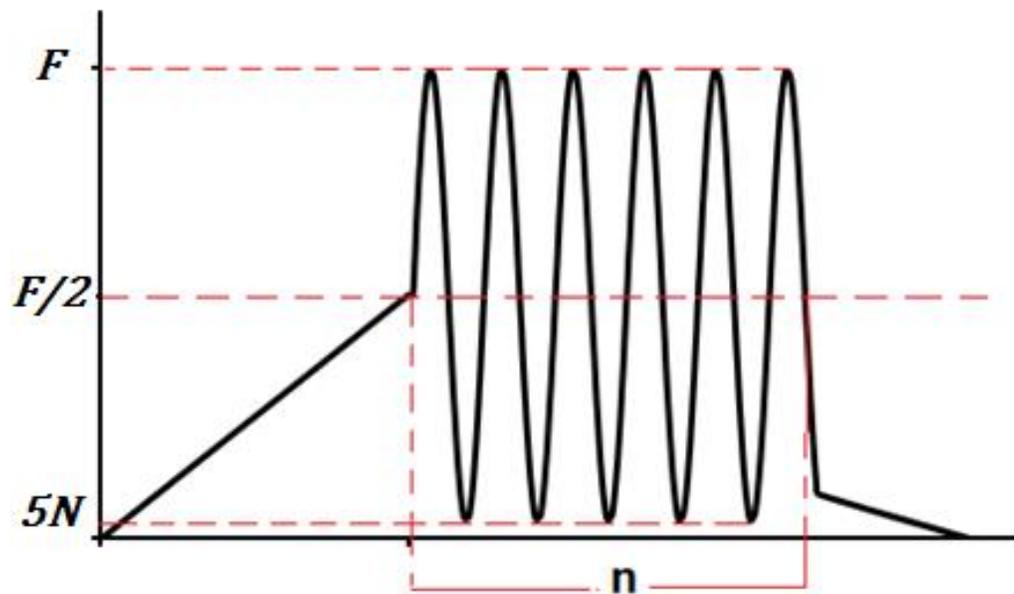


Fig. 3.17 Secuencia en la aplicación de cargas cíclicas.

A continuación se presentan los detalles referentes a la selección y aplicación de las cargas cíclicas para cada sistema capa/substrato.

- Magnitudes de carga.

Una vez determinadas las cargas críticas F_{c1} , F_{c2} y F_{c3} para los recubrimientos $s1$, $s2$ y $s3$ respectivamente, se aplicaron cargas con magnitudes fraccionarias a las cargas críticas.

De las cargas críticas estáticas determinadas se seleccionó la carga de mayor magnitud para ser utilizada como referencia, correspondiente al sistema $S1$ con magnitud F_{c1} entonces las cargas cíclicas aplicadas al sistema $s1$ fueron de $0.8 F_{c1}$, $0.6 F_{c1}$, $0.4 F_{c1}$ y $0.2 F_{c1}$. Para los dos sistemas capa/substrato restantes $s2$ y $s3$ se realizó un procedimiento similar, procurando que algunas de las magnitudes de carga aplicadas fueran comunes para los tres sistemas. Esto con el fin de poder



Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

comparar el daño producido bajo las mismas condiciones de carga cíclica. Las magnitudes de las cargas cíclicas aplicadas se muestran en la *Tabla 3.5*.

- Número de ciclos de carga aplicado.

Para este trabajo se estableció el número máximo de ciclos aplicados en 100 000 ya que la formación de grietas tipo anillo (nivel de daño crítico seleccionado) comúnmente se presenta por debajo de este régimen de ciclos. Lo anterior fue confirmado mediante pruebas preliminares aplicando las magnitudes de carga previamente determinadas.

Con el objeto de poder observar la evolución del daño generado en las capas, la cantidad de ciclos aplicados para cada condición de carga fueron de 1, 10, 30, 50, 75, 100, 500, 1000, 5 000, 10 000, 30 000, 50 000 y 100 000 ciclos.

Un resumen total de las condiciones de prueba bajo cargas cíclicas se presenta en la *Tabla 3.5*

Tabla 3.5 Cargas y número de ciclos aplicados a cada sistema capa/substrato durante la prueba de fatiga por contacto a una frecuencia de 6 Hz.

| Sistema capa/substrato | Condiciones de prueba cíclicas | | |
|------------------------|----------------------------------|---------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| | Carga crítica estática F_c (N) | Cargas cíclicas (N) | Número de ciclos |
| s1 | $F_{c1} = 1000$ | 800 | 1, 10, 30, 50, 75, 100, 500, 1000, 5 000, 10 000, 30 000 50 000 y 100 000 |
| | | 600 | |
| | | 400 | |
| | | 200 | |
| s2 | $F_{c2} = 650$ | 600 | |
| | | 400 | |
| | | 200 | |
| | | 100 | |
| s3 | $F_{c3} = 550$ | 500 | |
| | | 400 | |
| | | 200 | |
| | | 100 | |

- Frecuencia de carga.

Las pruebas fueron realizadas bajo carga controlada, por lo que los desplazamientos registrados son pequeños, minimizando el efecto de la frecuencia en la aplicación de las cargas. Esto fue confirmado



Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

mediante pruebas preliminares realizadas, en las cuales la frecuencia de carga fue variada (dentro de las capacidades del equipo 1- 10 Hz). No se observó efecto considerable en el daño generado al cambiar la frecuencia, por lo que se decidió trabajar con una frecuencia “intermedia” igual a 6Hz.

Para garantizar la repetitividad experimental cada conjunto de condiciones se replicó un total de tres veces en diferentes zonas de las probetas y se realizó un análisis de varianza similar al de las pruebas estáticas, pero contemplando el número de ciclos.

Un total de 56 diferentes condiciones experimentales fueron propuestas por cada sistema analizado, para un tiempo total aproximado de 345 horas de experimentación. Finalmente los resultados son presentados en diagramas que muestran la presencia del daño en los sistemas capa/substrato como función de las cargas aplicadas y el número de ciclos. El análisis final de los resultados se muestra en el capítulo 5.



Capítulo 4

Simulación Numérica de la Prueba de Fatiga por Contacto.

4.1 Introducción.

El método del elemento finito (MEF) es un método numérico que se utiliza para la solución de sistemas físicos complejos y consiste en la partición o seccionamiento del sistema en pequeñas partes conocidas como elementos finitos. Las ecuaciones fundamentales que describen el comportamiento de cada elemento son conocidas y la solución simultánea de estas, representa una aproximación del comportamiento general del sistema. El método del elemento finito en conjunto con las herramientas computacionales disponibles en la actualidad son una poderosa herramienta para cualquier área de la ingeniería.

Una simulación numérica de la prueba de fatiga por contacto fue desarrollada con el fin de tener un punto de comparación para los resultados experimentales, haciendo uso del programa comercial Abaqus 6.13. La selección del tipo de análisis, la obtención de las propiedades mecánicas de los materiales y las condiciones bajo las cuales se realizó la simulación se exponen en el presente capítulo. La simulación numérica realizada únicamente representa una aproximación del comportamiento inicial de la prueba de fatiga por contacto, por lo que los alcances del modelo también son mencionadas.

4.2 Descripción general de la simulación.

La geometría del modelo desarrollado corresponde a un sistema compuesto por una esfera en contacto con una superficie plana (sistema capa/substrato). Tanto cargas estáticas y cíclicas dinámicas son aplicadas por medio de la esfera. La modelación para dicho sistema en tres dimensiones se muestra en la Fig. 4.1.

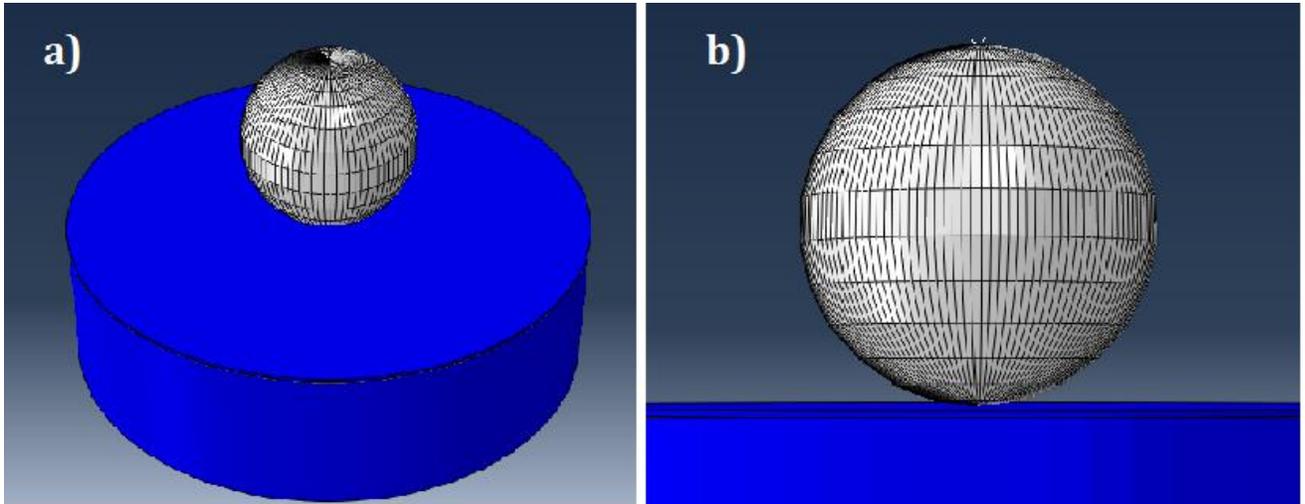


Fig. 4.1 Contacto entre esfera y una superficie plana. a) Vista isométrica. b) Vista lateral.

En diversas simulaciones numéricas los modelos se simplifican considerando condiciones cuasi estáticas para el análisis, simulando únicamente la repuesta estabilizada del sistema. Cuando la aplicación de la carga es lenta esta aproximación es válida, pero los modelos desarrollados son incapaces de mostrar la evolución del daño generado. Por otra parte, otros modelos propuestos son poco eficientes ya que es necesario que el usuario defina una nueva secuencia de carga por cada ciclo a simular, limitando la simulación a muy pocos ciclos (los cuales no llegan a ser representativos del proceso de fatiga por contacto).

De lo anterior, se pueden establecer ciertos requerimientos para el modelo desarrollado:

- Simular las condiciones presentes durante la experimentación.
- Capaz de simular por lo menos una cantidad representativa de ciclos de carga aplicados.
- Modelo optimizado (Control de los ciclos de carga en un sólo paso).
- Capaz de simular la respuesta dinámica del sistema.



4.2.1 Secuencia de pasos.

Un concepto básico en el programa Abaqus es la división de la historia de cargas en pasos (steps). Para cada paso el usuario puede definir un procedimiento de análisis, las cargas y condiciones de frontera aplicadas de manera conveniente. La simulación desarrollada en el presente trabajo consiste de tres pasos, de tal manera que la secuencia de carga sea similar a la establecida en el procedimiento experimental. Los tres pasos se describen a continuación:

Paso 1.- “Posicionamiento”: Durante este paso se aplica una carga que aumenta gradual y lentamente desde 0 hasta un valor aproximado de $F/2$. El valor de F corresponde a la carga cíclica aplicada.

Paso 2.- “Carga cíclica”: Inmediatamente después de alcanzar un valor ligeramente superior a $F/2$ comienza la aplicación de ciclos de carga, la amplitud de carga y frecuencia se define mediante una serie de Fourier, variando desde un máximo F hasta un mínimo de 5 N con una frecuencia de 6 Hz. El número de ciclos aplicados es controlado únicamente cambiando el tiempo de duración de este paso t_2 (6 ciclos por cada segundo de duración). La serie de Fourier por medio de la cual se controló la carga cíclica se presenta en la Ec. 4.1

$$F(t) = A_0 + B \sin \omega(t - t_1) \quad (4.1)$$

Considerando los parámetros:

$$A_0 = \left(\frac{F}{2} + 2.5\right) N, B = \left(\frac{F}{2} - 2.5\right) N \text{ y } \omega = 2\pi f \approx 37.7 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Paso 3.- “Retiro”: Una vez que termina la aplicación de los ciclos de carga, la esfera es retirada lentamente dando fin a la simulación.

La secuencia completa de los pasos seguida para la simulación se muestra en la Fig.4.2.

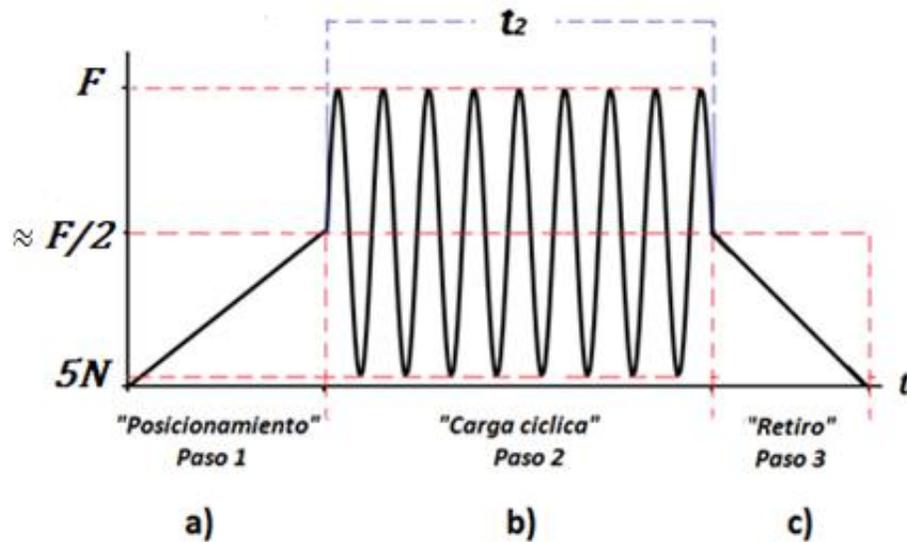


Fig. 4.2 Secuencia de pasos para la simulación. a) "Posicionamiento". b) "Carga cíclica". c) "Retiro".

4.2.2 Definición del tipo de análisis.

4.2.2.1 Lineal o no lineal.

En el programa Abaqus, un análisis para el cual la respuesta del sistema puede ser lineal o no lineal es llamado análisis general; mientras que un análisis en el cual la respuesta es únicamente lineal es conocido como análisis de perturbación lineal. En un análisis de esfuerzos la no linealidad del sistema es generada debido a la presencia de variables dependientes del tiempo o cualquiera de las siguientes condiciones:

- **No linealidad del material:** Se presenta cuando los esfuerzos en el material sobrepasan el límite elástico, por lo que el comportamiento del material se vuelve plástico y no lineal.
- **No linealidad geométrica:** Abaqus considera una no linealidad geométrica cuando se presentan grandes deformaciones y desplazamientos.
- **No linealidad en las condiciones de borde:** Los problemas de contacto son comúnmente considerados como no lineales y en general aquellos problemas en los cuales existe interacción entre dos superficies.



Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

El modelo desarrollado simula un problema de contacto, implica cargas que varían con el tiempo y además en cualquiera de los tres pasos el material substrato se deforma plásticamente. Si bien los desplazamientos generados no son grandes, existen las condiciones suficientes para establecer el análisis de los tres pasos como no lineal y por lo tanto, el análisis es definido como general.

4.2.2.2 Estático o dinámico.

Además, para el análisis es importante conocer si los efectos de inercia tienen influencia. Si los efectos inerciales son despreciables el análisis es considerado estático, mientras que si los efectos de inercia son importantes el tipo de análisis utilizado tiene que ser dinámico.

Para el paso de “posicionamiento” la velocidad de aplicación de carga es baja por lo que los efectos de inercia no tienen influencia, estableciendo el análisis como estático.

Para el paso llamado “carga cíclica”, si bien los desplazamientos generados son pequeños la frecuencia de aplicación de cargas por contacto es considerable (6 Hz), por lo que los efectos de inercia pueden ser de importancia. Por dicha razón el análisis elegido es dinámico. Un análisis dinámico puede ser implícito o explícito en función del método que utiliza el programa para integrar en el tiempo. El análisis implícito es adecuado para la simulación de cargas cíclicas y cuando las deformaciones y desplazamientos generados son pequeños, por esta razón el análisis dinámico implícito fue seleccionado.

Finalmente, para el paso “Retiro” el movimiento de la esfera es nuevamente lento por lo que el análisis seleccionado fue estático. La *Tabla 4.1* resume el tipo de análisis establecido para cada paso.

Tabla 4.1 Pasos para la simulación y tipo de análisis.

| Paso (step) | Descripción | Tipo de análisis |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.- Posicionamiento | Aplicación de carga gradual y lenta. | <ul style="list-style-type: none">• General (No lineal)• Estático |
| 2.- Carga cíclica | Aplicación de ciclos de carga por contacto con una frecuencia de 6 Hz. | <ul style="list-style-type: none">• General (No lineal)• Dinámico implícito |
| 3.- Retiro | Retiro de la esfera lentamente. | <ul style="list-style-type: none">• General (No lineal)• Estático |



Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Los tres pasos establecidos para el modelo son no lineales. El análisis de un problema no lineal se basa en la aplicación de la carga de manera gradual en una serie de intervalos o incrementos. Para cada incremento Δt se busca un estado de equilibrio entre las fuerzas externas aplicadas R y las fuerzas internas desarrolladas F (fuerzas en cada nodo).

$$R^{t+\Delta t} - F^{t+\Delta t} = 0 \quad (4.2)$$

Si se considera que la carga externa $R^{t+\Delta t}$ es independiente de cualquier reacción en el material, la Ec.

4.2 se puede expresar como:

$$R^{t+\Delta t} = F^t + F \quad (4.3)$$

Donde F representa el incremento en las fuerzas internas durante el incremento Δt (debido al incremento en los esfuerzos y deformaciones). Si el incremento de tiempo Δt es pequeño, F puede aproximarse linealmente como una función del desplazamiento mediante.

$$F = K^t U \quad (4.4)$$

Donde K^t se define como matriz de rigidez tangente y puede ser definida como:

$$K^t = \frac{d^t F}{d^t U} \quad (4.5)$$

Sustituyendo la K^t en la ecuación de equilibrio (Ec. 4.3)

$$K^t U = R^{t+\Delta t} - F^t \quad (4.6)$$

Los desplazamientos entonces pueden ser definidos

$$U^{t+\Delta t} = U^t + U \quad (4.7)$$

Las Ec. 4.6 y 4.7 en conjunto con el método iterativo de Newton - Raphson son empleados para encontrar el equilibrio para cada incremento de carga.

4.3 Modelado Geométrico.

Con el fin de disminuir el tiempo de solución y debido a las características simétricas que existen en el contacto entre una esfera y el sistema capa/substrato, el análisis puede ser simplificado utilizando una geometría axial simétrica, esto es modelando y analizando únicamente la mitad de la sección transversal como se ilustra en la *Fig. 4.3*.

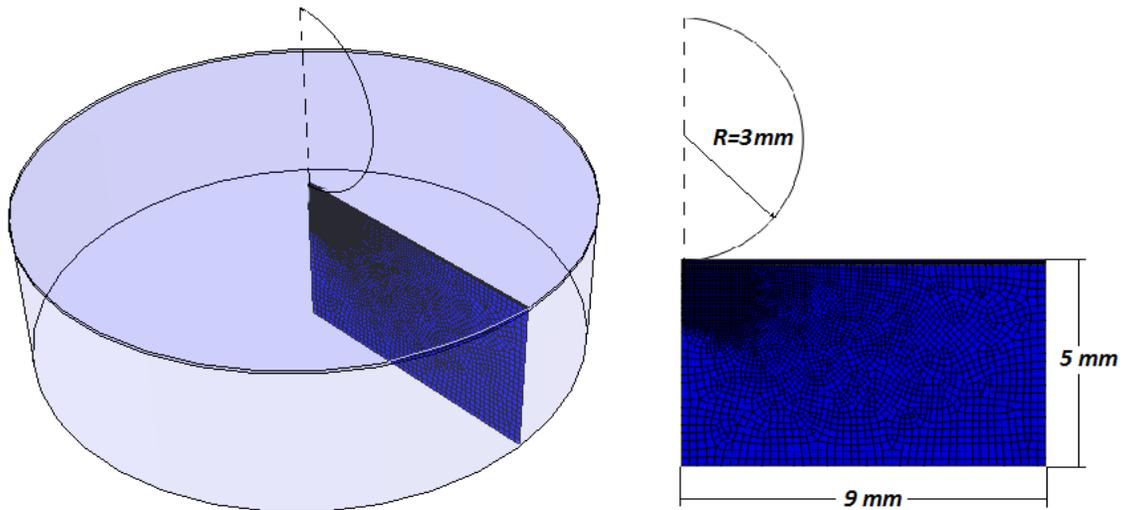


Fig. 4.3 Geometría Axial simétrica para la simulación desarrollada.

Los espesores de las capas (CoB y Co_2B) fueron modeladas de acuerdo a los parámetros mecánicos obtenidos experimentalmente, mostrados en la *Tabla 3.3*. La morfología de las capas para la simulación fue considerada plana, además de que las capas y substrato permanecen adheridas en todo momento.

4.4 Propiedades mecánicas para la simulación.

Debido al comportamiento mecánico exhibido, para la aleación $Co-Cr-Mo$ (substrato) se definieron propiedades elasto-plásticas. Las capas de boruro formadas exhiben un comportamiento mecánico frágil, por lo que la deformación plástica generada en ellas es despreciable, por tal motivo para la simulación únicamente se utilizaron propiedades elásticas. Finalmente, la esfera fue considerada como un cuerpo rígido analítico (Cuerpo no deformable) justificado por las propiedades superiores de la esfera (Nitruro de silicio) en comparación con las del substrato.

4.4.1 Propiedades mecánicas del sustrato.

La ficha técnica de la aleación proporciona algunas de las propiedades de la aleación *Co-Cr-Mo* utilizada para la simulación. Estas propiedades se muestran en la *Tabla 4.2*.

Tabla 4.2 Propiedades mecánicas de la aleación Co-Cr-Mo. (Carpenter Technical Data Sheet 2007)

| Material | Esfuerzo de cedencia σ_Y (MPa) | Esfuerzo último σ_U (MPa) | Módulo de elasticidad E (GPa) | Relación de Poisson |
|--------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------|
| <i>Co-Cr-Mo</i> (Micro-Melt BioDur carpenter) | 1117 | 1420 | 240 | 0.3 |

Al no contar con la curva esfuerzo deformación real de la aleación *Co-Cr-Mo* esta fue aproximada. La parte elástica de la curva queda definida por el módulo de elasticidad E , el esfuerzo de cedencia σ_Y y la ley de Hooke, mientras que el comportamiento plástico es estimado por medio de la Ec. 4.8 y que se muestra en la *Fig. 4.4*.

$$\sigma = K \varepsilon^n \quad (4.8)$$

En donde K es el coeficiente de resistencia y n es conocido como exponente de endurecimiento.

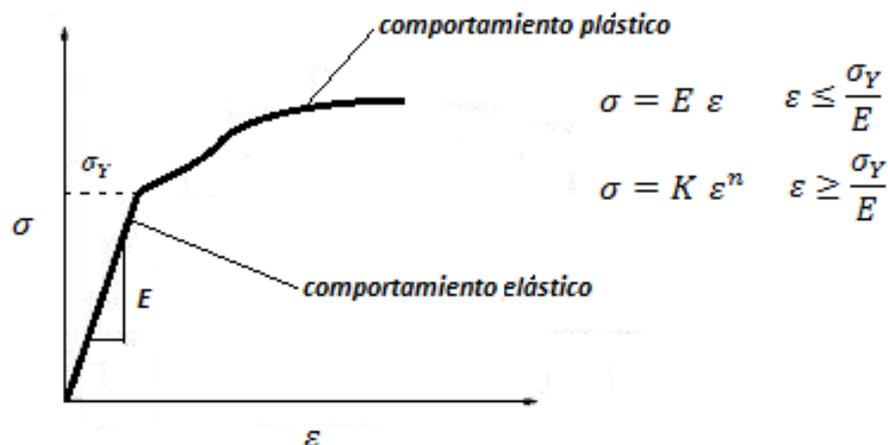


Fig. 4.4 *Comportamiento de la curva esfuerzo deformación para un material isotrópico.*



Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

El exponente de endurecimiento fue calculado por medio de la ecuación propuesta por Casals y Alcalá (2005), a partir de la curva de carga desplazamiento obtenida mediante la técnica de indentación instrumentada realizada en el sustrato.

$$n = D + I \left(\frac{h_r}{h_{max}} \right) + J \left(\frac{h_r}{h_{max}} \right)^2 \quad (4.9)$$

Donde h_r es la profundidad residual, h_{max} la profundidad máxima alcanzada, $D=0.9358$, $I=-1.6781$ y $J=0.9931$.

Por su parte coeficiente de resistencia se estimó por medio de la Ec. 4.10.

$$K = \sigma_Y \left(\frac{E}{\sigma_Y} \right)^n \quad (4.10)$$

Los valores para el coeficiente de endurecimiento calculados fueron $n = 0.228$ y $K = 3.79 \text{ GPa}$. Con estos valores la curva esfuerzo deformación real para la aleación *Co-Cr-Mo* fue trazada y se muestra en la Fig. 4.5.

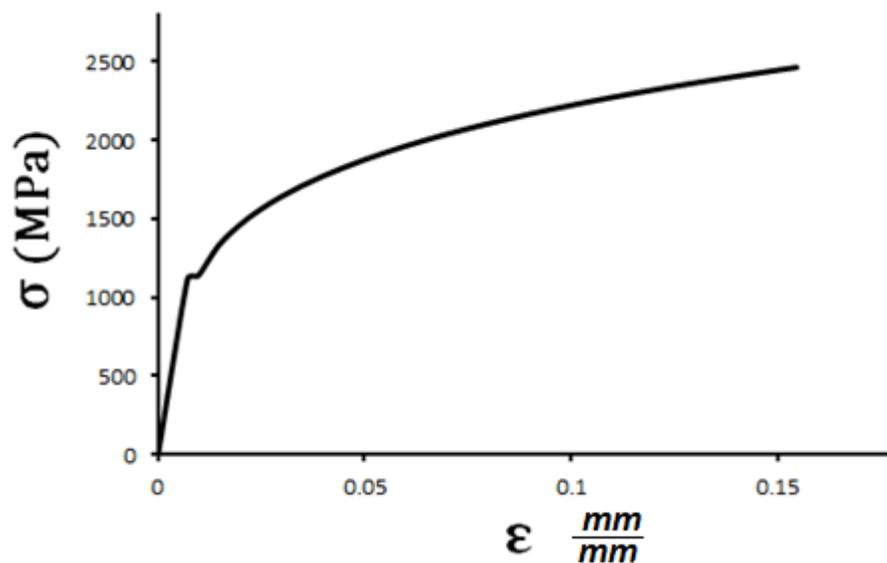


Fig. 4.5 Curva esfuerzo deformación calculada para la aleación *Co-Cr-Mo*.

Es necesario aclarar que debido a la aplicación de cargas cíclicas, el comportamiento plástico en realidad tendría que ser obtenido de manera experimental bajo la aplicación de cargas o desplazamientos cíclicos. Sin embargo, considerando la gran rigidez y alto esfuerzo de cedencia de la aleación, la deformación plástica generada es pequeña por lo que el comportamiento puede ser aproximado mediante la curva esfuerzo deformación más la aplicación de una regla de endurecimiento cinemático en Abaqus (Fig. 4.6).

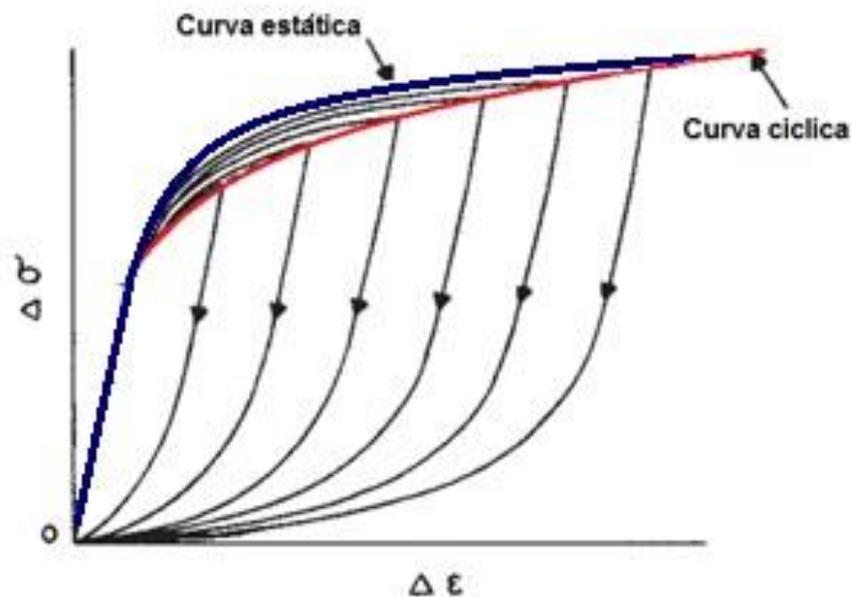


Fig. 4.6 Diferencias entre el endurecimiento isotrópico y el endurecimiento cíclico.

4.4.2 Propiedades mecánicas de las capas.

Los valores para el módulo de elasticidad y dureza para cada capa fueron obtenidos en el capítulo 3 por medio de indentación instrumentada. Sin embargo, como se mencionó anteriormente estos valores son dependientes de la carga aplicada, por lo que para la simulación también se utilizaron las propiedades para las capas de boruro de cobalto encontradas en literatura (Campos I. *et al.* (2015)).

Para materiales duros la resistencia a la cedencia representativa puede ser derivada a partir de la presión media (dureza) por medio de la Ec. 4.11 propuesta por Johnson (1985).



Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

$$\frac{H}{\sigma_Y} = A + B \ln \left(k \frac{E}{\sigma_Y} \varepsilon_{rep} \right) \quad (4.11)$$

Donde $A = \frac{4}{3}$ $B = \frac{2}{3}$ $k = \frac{5}{3}$

La definición de la deformación representativa ε_{rep} depende del tipo de indentador, para indentadores agudos Tabor (1951) propuso:

$$\varepsilon_{rep} = 0.2 \beta \quad (4.12)$$

Para un indentador Berkovich o Vickers $\beta = 19.7$

Los esfuerzos residuales en las capas de boruros de cobalto fueron estimados por Bravo D. (2013) encontrando un estado de esfuerzos a tensión de 0.16 GPa - 1.76 GPa en la fase *CoB* y un estado de esfuerzos compresivos 0.39 GPa - 1.8 GPa para la fase *Co₂B*. Durante la simulación los esfuerzos residuales fueron variados dentro de estos rangos. Si bien estos resultados no fueron obtenidos bajo las mismas condiciones de tratamiento que en el presente trabajo, sirven para hacer una aproximación en el modelo numérico.

La *Tabla 4.3* resume las propiedades para las capas utilizadas en la simulación. Los esfuerzos de cedencia fueron calculados utilizando la *Ec. 4.11.*

Tabla 4.3 Propiedades mecánicas para las capas *Co₂B* y *CoB*.

| Fase | Indentación (Carga 50 mN) | | Campos I. et al. (2015) | | Relación de Poisson | Esfuerzos residuales(GPa) |
|------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------|---------------------------|
| | Módulo de elasticidad <i>E</i> (GPa)(Promedio) | Esfuerzo de cedencia σ_Y (GPa) (Promedio) | Módulo de elasticidad <i>E</i> (GPa) | Esfuerzo de cedencia σ_Y (GPa) | | |
| <i>CoB</i> | 394.3 | 9.7 | 530 | 7.2 | 0.3 | +0.2 --- +1.8 |
| <i>Co₂B</i> | 361.8 | 7.2 | 479 | 5.9 | 0.3 | -0.4 --- -1.8 |



4.5 Condiciones de simulación.

La simulación del total de ciclos aplicados en la experimentación no es factible, debido al tiempo que tardaría la solución. Sin embargo, durante la experimentación se observó que bajo la aplicación de las cargas cíclicas de mayor magnitud, los 3 sistemas capa/substrato agrietaron a un bajo número de ciclos (>150), una cantidad de ciclos razonable y que de acuerdo a los resultados experimentales es representativo de la prueba de fatiga por contacto.

El tipo de elemento seleccionado tiene por designación CAX4, la malla es fina y estructurada en las capas y cerca de la zona de contacto y no estructurada lejos de esta zona. El coeficiente de fricción entre la esfera y la capa fue considerado nulo, al no observar efecto al variarlo desde 0 hasta 0.15. La *Tabla 4.4* resume las condiciones de carga y número de ciclos para las cuales se realizaron las simulaciones.

Tabla 4.4 Cargas y número de ciclos simulados para cada recubrimiento.

| Sistema capa/substrato | Espesor total (μm) | Carga estática (N) | Carga cíclica máxima (N) | Numero de ciclos simulados |
|------------------------|---------------------------------|--------------------|--------------------------|-----------------------------------------------|
| <i>s1</i> | 5.8 | 1000 | 800 | 1, 6, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80..... 150 |
| <i>s2</i> | 11.2 | 700 | 600 | |
| <i>s3</i> | 27.3 | 550 | 500 | |

4.6 Criterio de daño.

En el procedimiento experimental de la prueba de fatiga por contacto se estableció como criterio de daño crítico la aparición de la primera grieta tipo anillo en la capa. El modelo desarrollado no es capaz de simular la formación y crecimiento de grietas anillo, sin embargo, por medio de la aplicación de una teoría de falla adecuada es posible estimar las condiciones para las cuales la capa se fractura.

Ya que las capas de boruros de cobalto presentan un comportamiento mecánico frágil, la “Teoría del esfuerzo principal máximo” puede aplicarse como criterio de falla. Esta teoría establece que el estado de esfuerzos crítico en cualquier punto de un sólido se alcanza cuando la magnitud de uno de los esfuerzos



principales es igual al esfuerzo de cedencia del material (a tensión o compresión). Para dos dimensiones la superficie de falla se representa de manera gráfica en la Fig. 4.7 y matemáticamente por:

Considerando $\sigma_1 > \sigma_2$, el material falla si:

$$\sigma_{YT} \leq \sigma_1 \quad (4.13)$$

$$\sigma_{YC} \leq \|\sigma_2\| \quad (4.14)$$

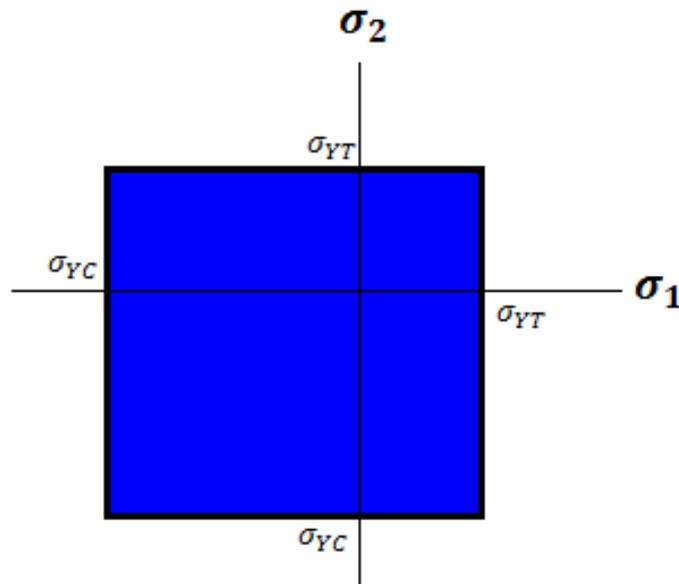


Fig. 4.7 Superficie de falla “Teoría del esfuerzo principal máximo”.

Donde σ_{YT} es el esfuerzo de cedencia en tensión y σ_{YC} es el esfuerzo de cedencia en compresión. Si se considera que generalmente $\sigma_{YC} \geq \sigma_{YT}$, un criterio conservador es considerar $\sigma_{YC} = \sigma_{YT} = \sigma_Y$, las Ec. 4.13 y 4.14 se convierten en:

$$\sigma_Y \leq \sigma_1 \quad (4.15)$$

$$\sigma_Y \leq \|\sigma_2\| \quad (4.16)$$

Al analizar los resultados, los primeros elementos que satisfacen la teoría del esfuerzo principal máximo se consideran como los puntos en donde se inicia la grieta. Los esfuerzos principales de mayor

magnitud actúan a tensión y se presentan alrededor de la zona donde experimentalmente se presentan las grietas. Un comportamiento similar se presenta en los 3 sistemas capa/substrato.

Debido al comportamiento frágil de las capas, la ruptura (o agrietamiento) ocurre inmediatamente después de sobrepasar el esfuerzo de cedencia. Para una mejor visualización, se utilizó la herramienta AC YIELD de Abaqus (*Fig. 4.8*), la cual permite mostrar aquellos puntos para los cuales el esfuerzo de cedencia es superado (puntos en rojo). Esta superficie es entonces considerada como la representación de la grieta.

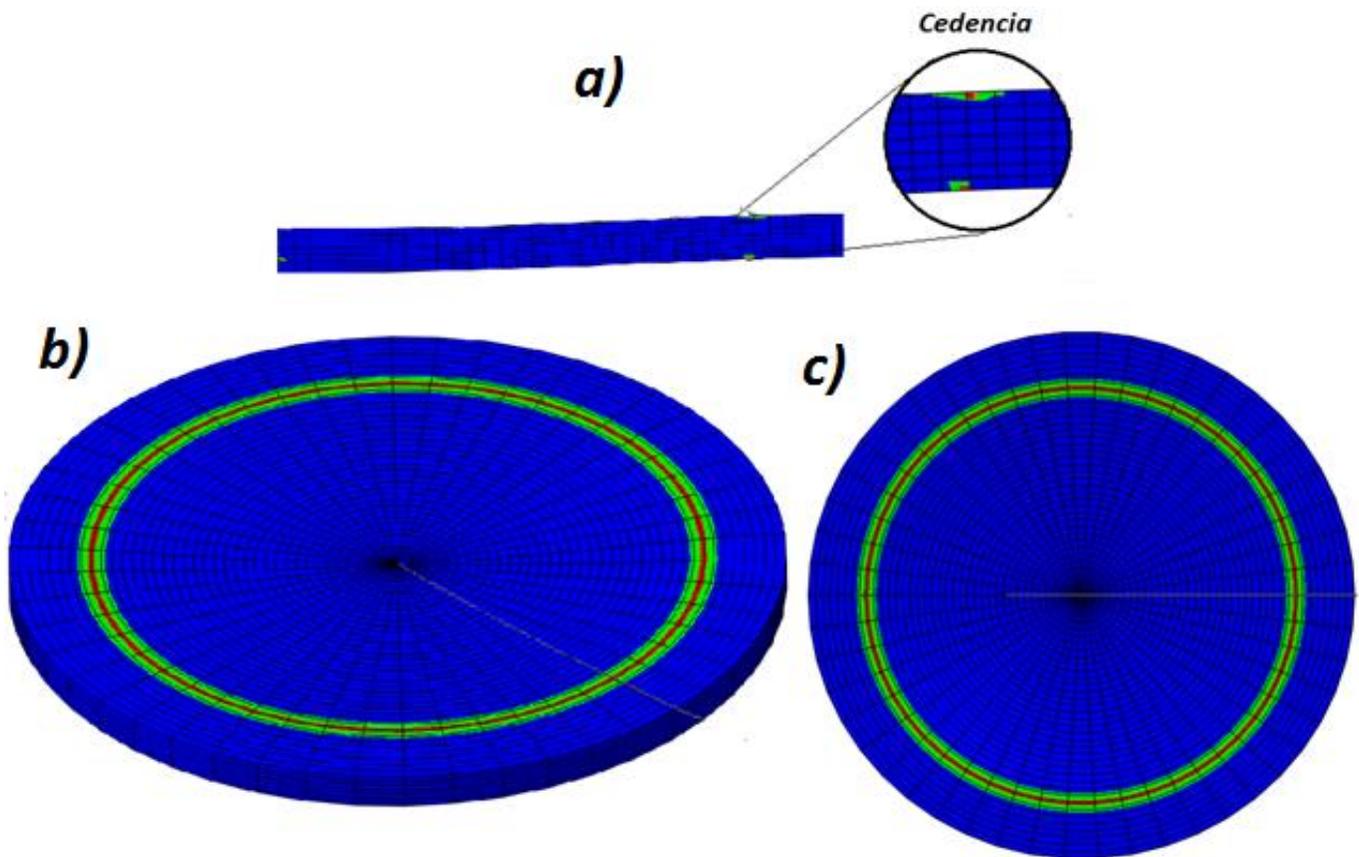


Fig. 4.8 Representación de grietas tipo anillo durante la simulación numérica a) Representación axial simétrica b) Representación en 3 dimensiones c) Vista superior



4.7 Validación del modelo.

Algunas de las propiedades de los materiales en la simulación fueron aproximadas por diferentes métodos, los cuales a pesar de estar comprobados presentan cierto margen de error, como consecuencia los modelos desarrollados presentan también un margen de error. Antes de realizar la simulación de los ciclos de carga, los modelos se validaron comparando con los resultados obtenidos bajo la aplicación de las cargas estáticas críticas.

Para las capas se utilizaron los valores obtenidos por indentación instrumentada (E y H), así como las propiedades reportadas por Campos *et. al* (2015). Para ambos casos el esfuerzo de cedencia se calculó por medio de la Ec. 4.11 ($\sigma_Y = f(E, H)$).

A continuación se muestran los principales resultados obtenidos:

Simulación (1) realizada con las propiedades obtenidas por indentación instrumentada. (Carga 50 mN)

Simulación (2) realizada con las propiedades obtenidas por Campos *et. al* (2015).

Tabla 4.5 Comparación de las cargas críticas estáticas obtenidas experimentalmente y por simulación.

| Sistema capa/substrato | Carga crítica (N) experimental | Carga crítica (N) simulación (1) | Porcentaje de error | Carga crítica (N) simulación (2) | Porcentaje de error |
|------------------------|--------------------------------|----------------------------------|---------------------|----------------------------------|---------------------|
| <i>s1</i> | 1000 | 1150 | 13.9 % | 940 | 6.2 % |
| <i>s2</i> | 650 | 750 | 14.2 % | 600 | 8 % |
| <i>s3</i> | 550 | 640 | 15.2 % | 520 | 5.6 % |

Tabla 4.6 Comparación de los diámetros de grieta obtenidos experimentalmente y por simulación.

| Sistema capa/substrato | Diámetro grieta experimental (μm) | Diámetro de grieta (μm) simulación (1) | Porcentaje de error | Diámetro de grieta (μm) simulación (2) | Porcentaje de error |
|------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------|-----------------------------------------------------|---------------------|
| <i>s1</i> | 620.4 \pm 14 | 660 | 6.2 % | 597.6 | 3.8 % |
| <i>s2</i> | 525.9 \pm 11 | 576.2 | 9.1 % | 510.6 | 3 % |
| <i>s3</i> | 504.3 \pm 8 | 550.7 | 8.8 % | 485 | 3.8 % |



Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tabla 4.7 Comparación de las profundidades residuales obtenidas experimentalmente y por simulación.

| Sistema capa/substrato | Profundidad residual experimental (μm) | Profundidad residual (μm) simulación (1) | Porcentaje de error | Profundidad residual (μm) simulación (2) | Porcentaje de error |
|------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------|-------------------------------------------------------|---------------------|
| s1 | 10.9 ± 0.7 | 12 | 9.1 % | 11.9 | 9.1 % |
| s2 | 8.2 ± 0.1 | 9 | 9.5 % | 9 | 9.5 % |
| s3 | 6.3 ± 0.1 | 6.6 | 4.6 % | 6.6 | 4.6 % |

La profundidad residual depende principalmente de la deformación plástica desarrollada en el sustrato y de la recuperación elástica que este presenta. En las simulaciones se utilizan las mismas propiedades para el sustrato por lo que prácticamente no existe diferencia entre los resultados (Tabla 4.7). El porcentaje de error entre los valores experimentales y los obtenidos numéricamente es aceptable (<10%) por lo que se puede asumir que las propiedades definidas para el sustrato son correctas.

Por otro lado, para estimar las cargas estáticas críticas y el diámetro de las grietas en las capas, los resultados más precisos se obtuvieron con los valores propuestos por Campos *et. al* (2015), por lo que las simulaciones posteriores con carga cíclica fueron realizadas utilizando estas propiedades.

El análisis de las simulaciones con carga cíclica es mostrado en el capítulo 5 con el fin de comparar los resultados obtenidos con los experimentales.



Capítulo 5

Análisis de Resultados

5.1 Introducción.

La primera parte del capítulo muestra los resultados y análisis de la prueba de fatiga por contacto descrita en el capítulo 3, una comparación entre el comportamiento exhibido por los 3 sistemas capa/substrato propuestos bajo la aplicación de cargas estáticas y cargas cíclicas, así como las técnicas utilizadas para el análisis de las marcas y grietas formadas durante la experimentación. La segunda parte muestra los resultados obtenidos a partir de la simulación numérica, la comparación de estos con los resultados experimentales y finalmente las limitaciones y conclusiones a partir de la simulación.

5.2 Pruebas estáticas.

Bajo las condiciones de carga y criterio de daño establecidos en el capítulo 3, se determinaron las cargas estáticas críticas para cada sistema capa/substrato (magnitud de carga mínima para la cual la capa presenta grietas tipo anillo). Las cargas críticas para cada sistema se muestran en la *Tabla 5.1*.

Tabla 5.1 Cargas estáticas críticas para cada sistema capa/substrato.

| Sistema capa/substrato | Espesor Total (μm) | Carga Estática Crítica F_c (N) |
|------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| s1 | 5.8 | 1000 |
| s2 | 11.2 | 650 |
| s3 | 27.3 | 550 |

Para generalizar los resultados y utilizando la Ec. 2.5 de la teoría de contacto de Hertz mostrada en el capítulo 2, se define un presión media P_m .

Al igual que para un material sin capa se asume una relación proporcional entre la presión media P_m y la razón a/R ($P_m \propto \frac{a}{R}$) similar a la propuesta por la Ec. 2.6. En la Fig. 5.1 es posible observar el comportamiento que muestra la presión media calculada para cada una de las cargas estáticas aplicadas al sistema $s1$.

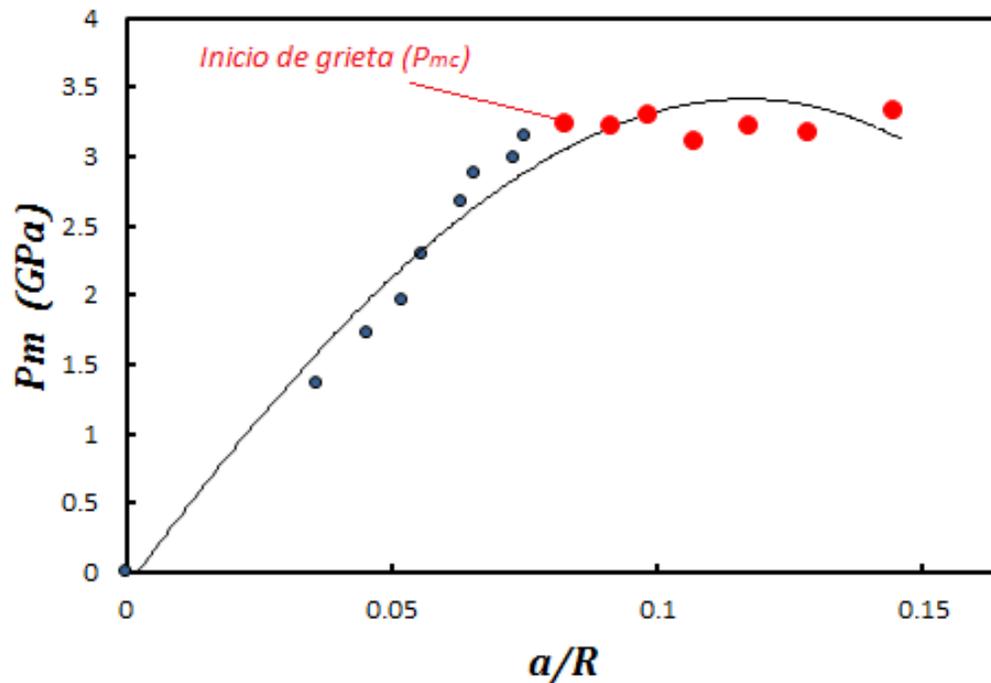


Fig. 5.1 P_m calculada para las cargas estáticas aplicadas en el sistema $s1$.

La presión media crítica P_{mc} es indicada en la Fig. 5.1. En los puntos anteriores a P_{mc} se observa una relación proporcional entre P_m y $\frac{a}{R}$, mientras que para los puntos posteriores el comportamiento se vuelve ligeramente inestable como consecuencia del agrietamiento generado en la capa. Un comportamiento similar se encontró para los sistemas $s2$ y $s3$, mostrado en la Fig. 5.2 y 5.3.

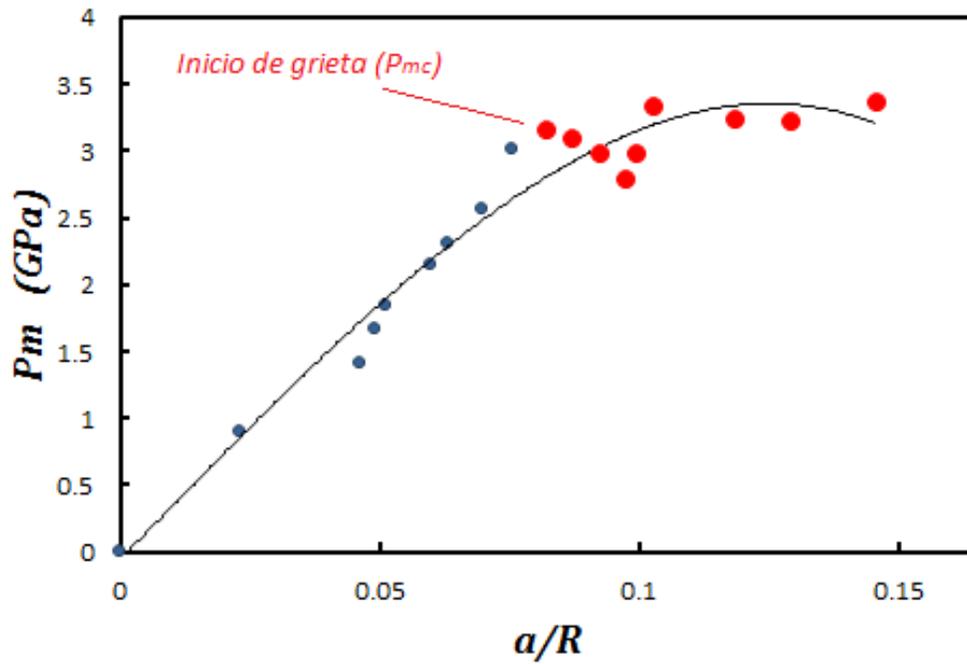


Fig. 5.2 P_m calculada para las cargas estáticas aplicadas en el sistema capa/substrato s2.

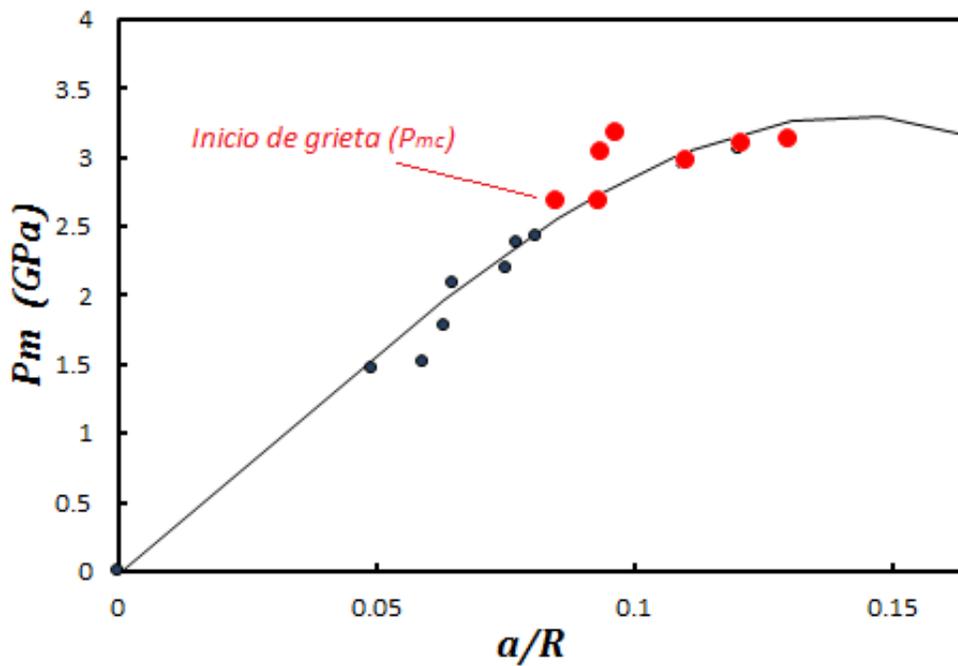


Fig. 5.3 P_m calculada para las cargas estáticas aplicadas en el sistema capa/substrato s3.

La *Tabla 5.2* resume los parámetros críticos determinados para cada sistema capa/substrato, se aprecia que los valores de carga crítica y presión media crítica disminuyen a medida que el espesor total de la capa es más grande.

Tabla 5.2 Cargas estáticas críticas y presiones medias críticas obtenidas para cada sistema capa/substrato.

| Sistema capa /substrato | Espesor Total (μm) | Carga estática crítica F_c (N) | Presión media crítica P_{mc} (GPa) |
|-------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
| <i>s1</i> | 5.8 | 1000 | 3.2 |
| <i>s2</i> | 11.2 | 650 | 3.1 |
| <i>s3</i> | 27.3 | 550 | 2.7 |

La *Fig. 5.4* muestra el daño generado en los tres sistemas bajo la aplicación de una carga de igual magnitud (1000 N). Para el sistema capa/substrato con capa más delgada *s1* el daño apenas se percibe, mientras que para el sistema con capa más gruesa *s3*, una gran cantidad de grietas tipo anillo es apreciable lo que indica una mayor fragilidad en este sistema. Como una conclusión parcial se puede establecer que a mayor espesor de la capa, el sistema presenta mayor fragilidad, posiblemente como consecuencia de la mayor presencia de la fase *CoB* (comportamiento más frágil y con esfuerzos residuales a tensión. Sección 3.3) con respecto al espesor total, pero también del propio comportamiento en flexión de la capa.

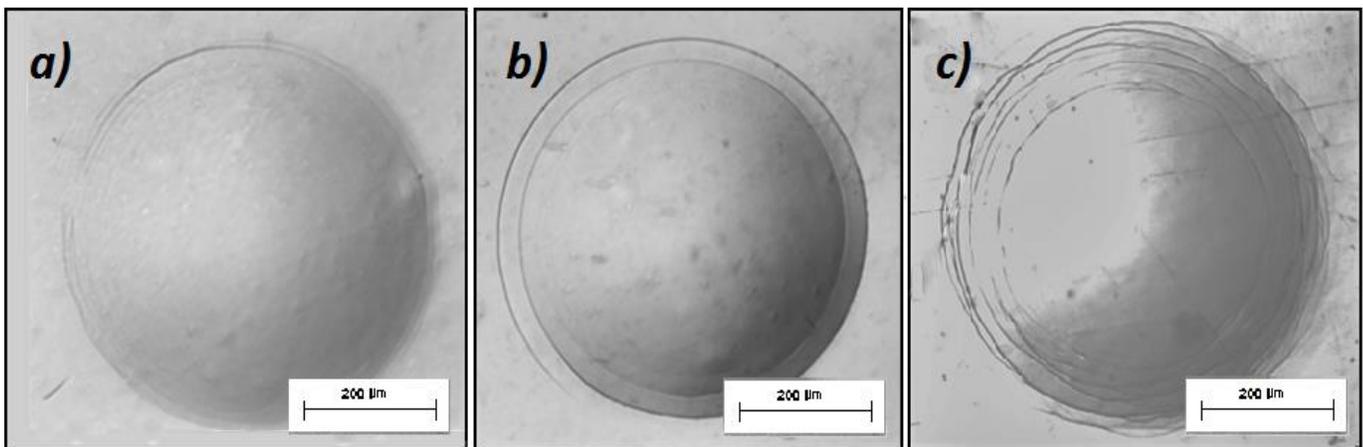


Fig. 5.4 Daño generado en los 3 sistemas capa/substrato bajo una carga de 1000 N a) *s1* b) *s2* c) *s3*.



Instituto Politécnico Nacional Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

En el sistema capa/substrato s2 la carga mínima para la cual se presentaron grietas anillo es de 400 N tras la aplicación de solo 300 000 ciclos. Mientras que para el sistema s3 la carga cíclica menor para la cual la capa presento agrietamiento tiene una magnitud de 200 N tras la aplicación de 100 000 ciclos.

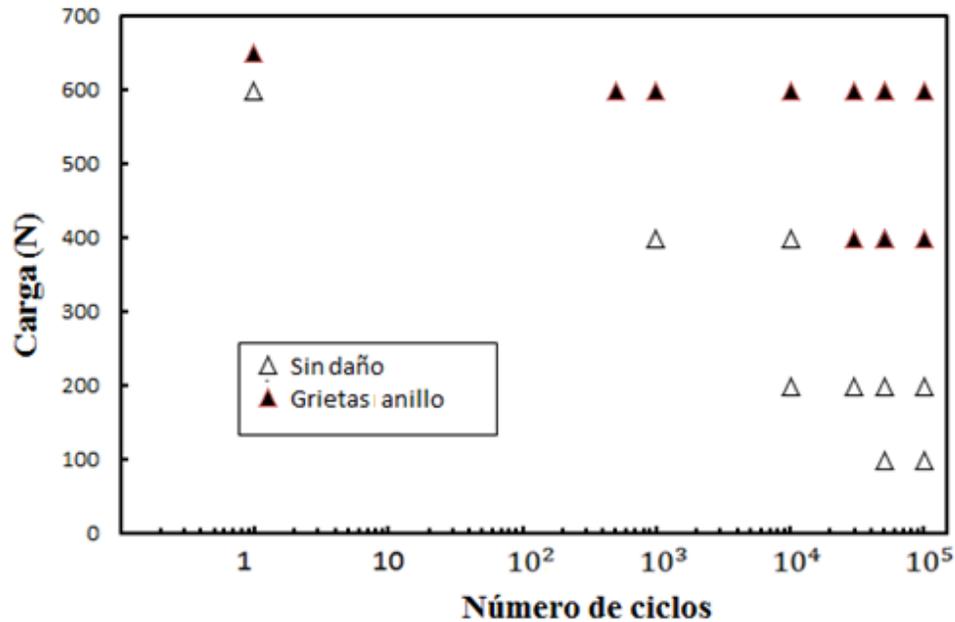


Fig. 5.6 Diagrama Carga vs Número de ciclos y daño generado en el sistema capa/substrato s2.

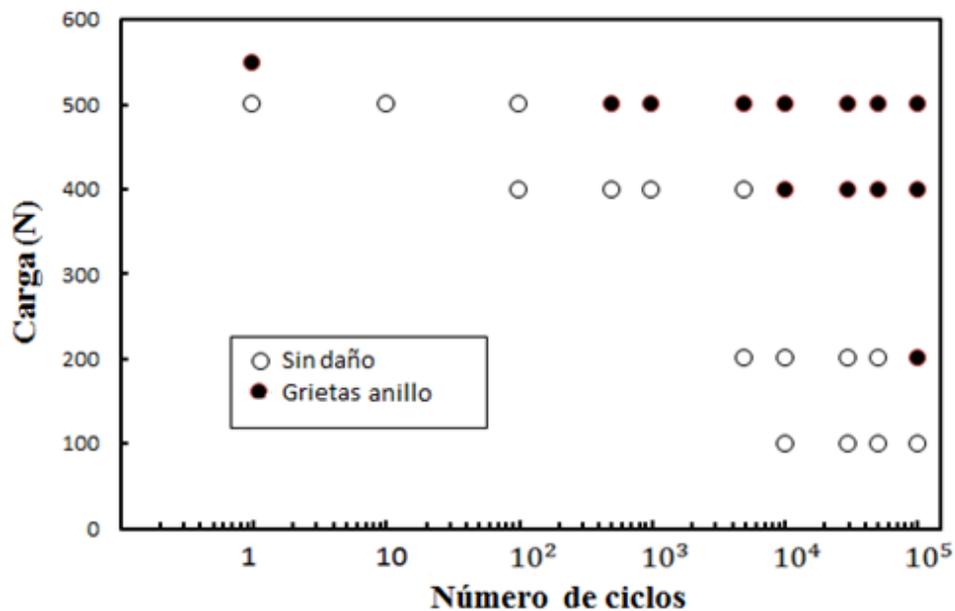


Fig. 5.7 Diagrama Carga vs Número de ciclos y daño generado en el sistema capa/substrato s3.



Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Nuevamente se puede concluir que los sistemas capa/substrato presentan mayor fragilidad a medida que se aumenta el espesor de capa. Siendo $s1$ el más resistente y $s3$ el más frágil.

Siguiendo el mismo análisis que en las pruebas estáticas, se estimó la presión media (Ec.2.5) pero bajo las condiciones de fatiga (P_{mf}), utilizando las cargas cíclicas y los radios de las huellas formadas. Los resultados para las cargas estáticas y cíclicas se resumen en la *Tabla 5.3*

Tabla 5.3 Cargas y presiones medias críticas bajo condiciones estáticas y cíclicas para los 3 sistemas capa/substrato.

| Sistema capa/substrato | Espesor Total (μm) | Carga estática crítica F_c (N) | Presión media crítica P_{mc} (GPa) | Carga cíclica crítica F_f (N) | Presión media en fatiga P_{mf} (GPa) | Sensibilidad a la fatiga P_{mf} / P_{mc} |
|------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|
| $s1$ | 5.8 | 1000 | 3.2 | 400 | 2.4 | 0.75 |
| $s2$ | 11.2 | 650 | 3.1 | 400 | 2.2 | 0.7 |
| $s3$ | 27.3 | 550 | 2.7 | 200 | 1.8 | 0.66 |

De acuerdo a Llanes L. *et al.* (2010), una forma de cuantificar la susceptibilidad a la fatiga por contacto que presentan los sistemas capa/substrato es por medio de la relación P_{mf} / P_{mc} , un parámetro que usualmente es conocido en la literatura como sensibilidad a la fatiga. Una sensibilidad cercana a 1 indica que el sistema es poco susceptible o presenta una buena resistencia a la aplicación de cargas cíclicas, mientras que un valor cercano a 0 sugiere que el sistema presenta una pobre resistencia a la aplicación de cargas cíclicas por contacto o fatiga por contacto.

Tomando en consideración lo expuesto anteriormente y a falta de un criterio más riguroso para determinar la resistencia a la fatiga por contacto, la relación P_{mf} / P_{mc} podría ser utilizada como un parámetro de diseño durante la selección de un espesor de capa en aplicaciones con cargas repetidas presentes. Bajo la hipótesis antes planteada, se concluye que el sistema $s1$ con espesor total de $5.8 \mu\text{m}$ presenta una mejor resistencia a la fatiga por contacto, en comparación con los sistema $s2$ ($11.2 \mu\text{m}$) y $s3$ ($27.3 \mu\text{m}$), siendo este último el que presenta la resistencia más pobre.



En este trabajo se llega a la conclusión de que el espesor total de la capa afecta directamente la resistencia a la fatiga por contacto, como consecuencia de la mayor presencia de la fase con respecto al espesor total (sección 3.3) y a la influencia del espesor durante la flexión de la capa. Sin embargo, esto no indica que capas gruesas no puedan ser aplicables en condiciones de carga repetida, pero posiblemente estos sean más adecuados para aplicaciones con mayor área de contacto (esferas de mayor diámetro). Los resultados aquí presentados no pueden ser comparables con los de otros trabajos publicados, debido a que como se mencionó en el inicio de este trabajo, no existe una norma para esta prueba, por lo que cada autor utiliza condiciones y equipos con características diferentes en sus investigaciones.

5.4 Daño generado durante la prueba.

5.4.1 Microscopia óptica

Generalmente en sistemas capa/substrato la aplicación de cargas repetidas conduce a la generación de fallas severas, las cuales no se presentan bajo la aplicación de cargas estáticas de gran magnitud. Las cargas y presiones presentadas anteriormente fueron determinadas bajo el criterio de la aparición de la primera grieta tipo anillo. Sin embargo, una de las principales hipótesis de este trabajo es que la cantidad de daño generada en los sistemas aumenta con el número de ciclos aplicados, por lo que a continuación se presenta un análisis de las huellas aun después del primer agrietamiento.

La *Fig. 5.8* muestra la evolución del daño generado en cada uno de los 3 sistemas capa/substrato bajo las condiciones de carga cíclica más críticas, en donde el daño generado en el sistema es más notorio.

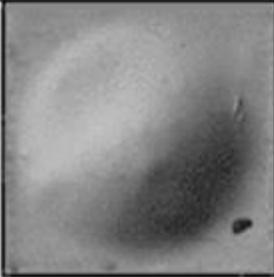
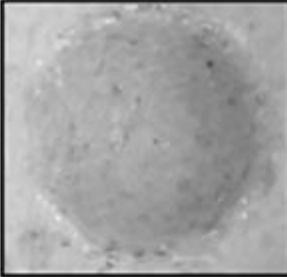
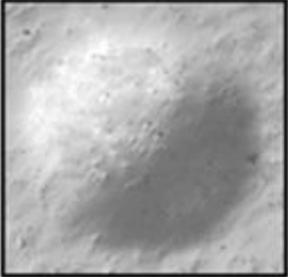
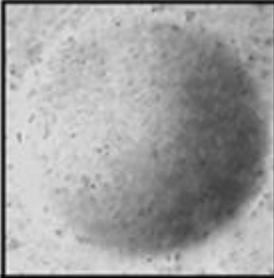
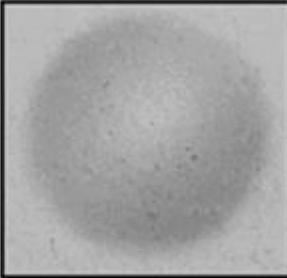
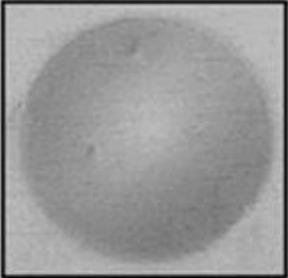
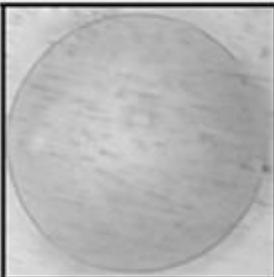
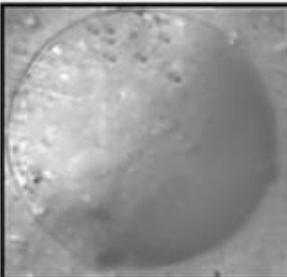
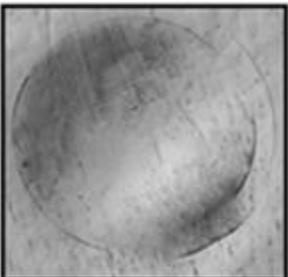
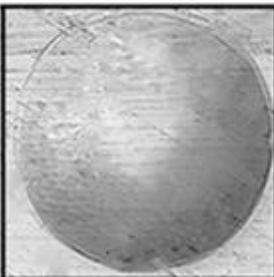
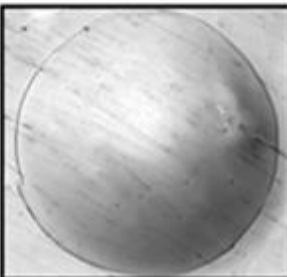
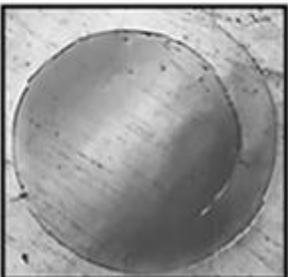
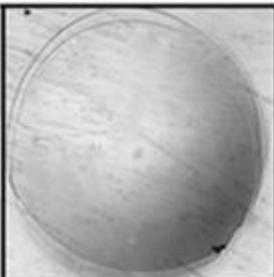
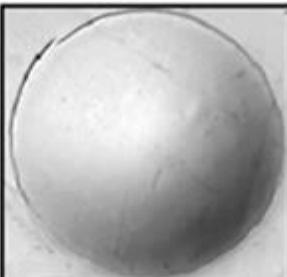
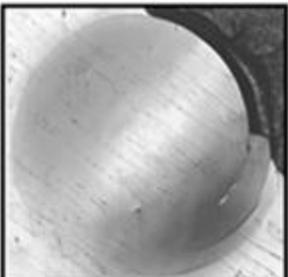
| <i>Sistema</i> | <i>S1</i> | <i>S2</i> | <i>S3</i> |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Carga</i> | <i>800N</i> | <i>600N</i> | <i>500N</i> |
| <i>Ciclos</i> | | | |
| <i>1</i> |  |  |  |
| <i>100</i> |  |  |  |
| <i>10 000</i> |  |  |  |
| <i>50 000</i> |  |  |  |
| <i>100 000</i> |  |  |  |

Fig. 5.8 Evolución de daño en los 3 sistemas capa/substrato bajo las magnitudes de carga cíclicas más críticas.

Para el sistemas capa/substrato *s1* la carga cíclica aplicada de mayor magnitud fue de 800 N. A pesar de ser sometido a la mayor carga crítica en comparación con los otros sistemas, este presenta menor daño con el paso de los ciclos. La formación de las grietas tipo anillo no es uniforme, esta inicia en un punto y posteriormente crece en una trayectoria circular (probablemente como consecuencia de los defectos en la capa), una vez formada la grieta tipo anillo con el pasar de los ciclos se intensifica.

La carga cíclica máxima para *s2* fue de 600 N. En los primeros ciclos se observa la formación de una primera grieta anillo y a medida que aumentan los ciclos se desarrolla una segunda de mayor tamaño. En algunas muestras claramente se observa una grieta con circunferencia abierta, lo que sugiere un crecimiento en forma de espiral. Nuevamente el sistemas capa/substrato más grueso *s3* presenta el mayor daño, a pesar de que la carga cíclica máxima aplicada fue de 500 N (la menor para los 3 sistemas). Las grietas formadas son más notables, la trayectoria de crecimiento es claramente marcada por una espiral y finalmente se desarrolla delaminación.

Es evidente que existe una degradación progresiva en los 3 sistemas, conforme el número de ciclos de carga aplicados aumenta, destacando lo que ocurre en el sistema *s3* en el cual el efecto de las cargas cíclicas cobra mayor notoriedad que las cargas estáticas, ya que los tipos de falla cambian. Por ejemplo, en la *Fig. 5.9* bajo una carga estática de 1500 N el sistema *s3* sólo presento una gran densidad de grietas tipo anillo, en cambio bajo una carga de apenas 500 N (tres veces menor) aplicada por 100 000 ciclos, el sistema presenta sólo 2 grietas anillo pero se desarrolla falla por delaminación.

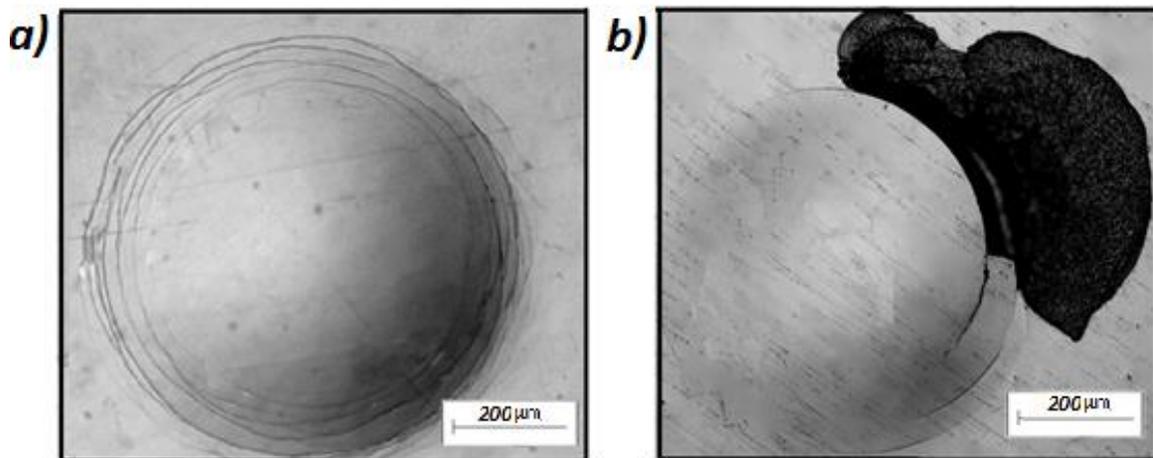


Fig. 5.9 Fallas presentes en *s3* a) Carga estática de 1500 N b) Carga cíclica de 500 N (100 000 ciclos)

5.4.2 Análisis por Microscopia Confocal y perfilometría.

La técnica de microscopia confocal de barrido laser (MCBL) fue utilizada para el análisis de las características topográficas de las marcas y grietas formadas durante la experimentación. Esta técnica permite la reconstrucción y análisis de imágenes en 3 dimensiones, por lo que se pueden obtener resultados más precisos en comparación con otras técnicas.

Debido a la gran cantidad de pruebas realizadas la MCBL únicamente se realizó para las condiciones más críticas y representativas de cada sistema, complementando el análisis con la técnica de perfilometría. Las Fig. 5.10, 5.11 y 5.12 muestran la reconstrucción de la imagen en 3D y la topografía de las huellas en dos dimensiones para las condiciones de pruebas más críticas en cada sistema junto a la evolución de la profundidad residual en función del número de ciclos.

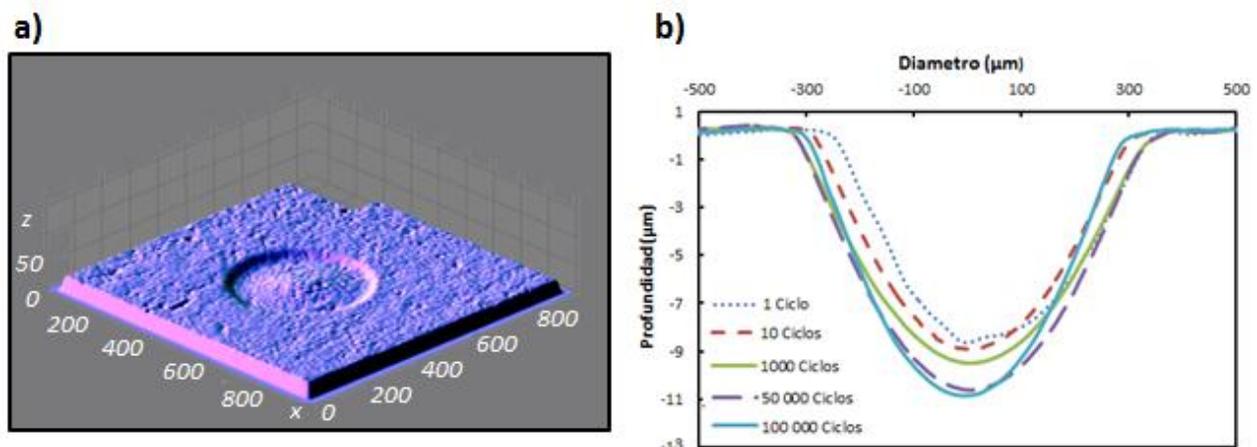


Fig. 5.10 a) Imagen en 3 dimensiones de una huella formada en s1 b) Cambio en la profundidad residual en función del número de ciclos. Carga aplicada de 800 N.

Si se analiza la profundidad residual Fig. 5.10 como una medida de la cantidad de deformación plástica presente en el sistema, se observa durante los primeros ciclos es cuando se genera la mayor parte de ella y a medida que aumentan los ciclos la deformación generada disminuye. De hecho para grandes números de ciclos (de 50 000 a 100 000) el cambio es prácticamente nulo.

Como consecuencia de la aplicación de cargas de mayor magnitud, la profundidad residual máxima reportada para el sistema s1 fue la más grande ($\approx 11\mu\text{m}$), a pesar de ello el daño generado en el recubrimiento fue el más ligero (Fig. 5.8). En contraste, para el sistema s3 (Fig. 5.12) el daño reportado fue mayor aun cuando la profundidad residual máxima alcanzada fue la más pequeña ($\approx 6\mu\text{m}$). Para el

sistema s2 la profundidad residual máxima fue de aproximadamente $8.5 \mu\text{m}$ (Fig. 5.11). La discusión anterior sugiere que el daño generado durante la fatiga por contacto no solo es función de la acumulación de deformación plástica en el sustrato, si no de la combinación de las propiedades mecánicas del sistema capa/sustrato y del espesor de capa.

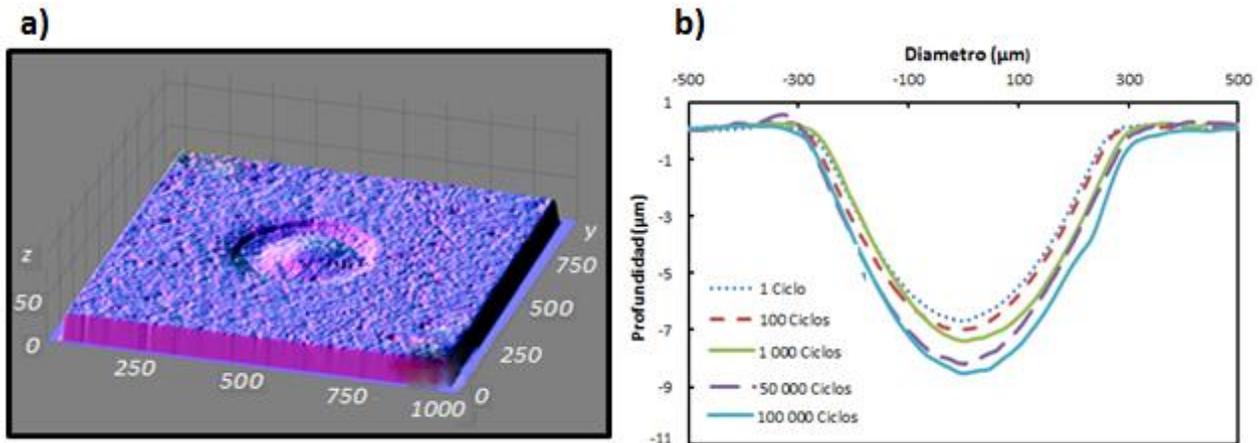


Fig. 5.11 a) Imagen en 3 dimensiones de una huella formada en s2 b) Cambio en la profundidad residual en función del número de ciclos. Carga aplicada de 600 N.

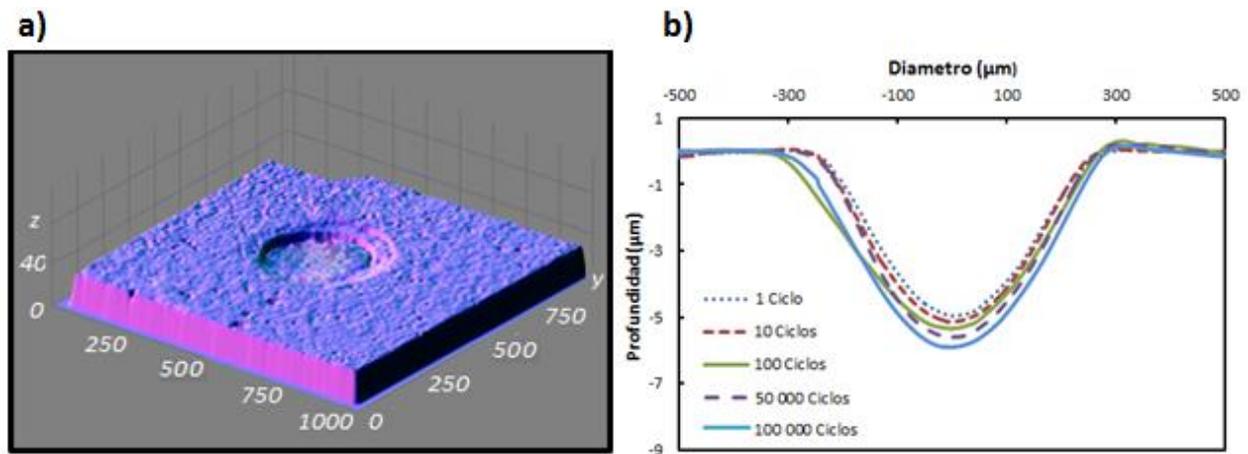


Fig. 5.12 a) Imagen en 3 dimensiones de una huella formada en s3 b) Cambio en la profundidad residual en función del número de ciclos. Carga aplicada de 500 N.

Haciendo un barrido directamente sobre las grietas formadas, se estimó la profundidad alcanzada por estas bajo las condiciones de carga más críticas. Debido a las propiedades de la capa y características del equipo, la profundidad alcanzada es de aproximadamente $13 \mu\text{m}$, por lo que únicamente se muestran resultados para las capas de los sistemas s1 y s2.

Para el sistema s1. La propagación de las grietas bajo las condiciones cíclicas más severas, 800 N y 100 000 ciclos atraviesa aproximadamente las fases CoB y Co_2B , como se muestra en la Fig. 5.13.

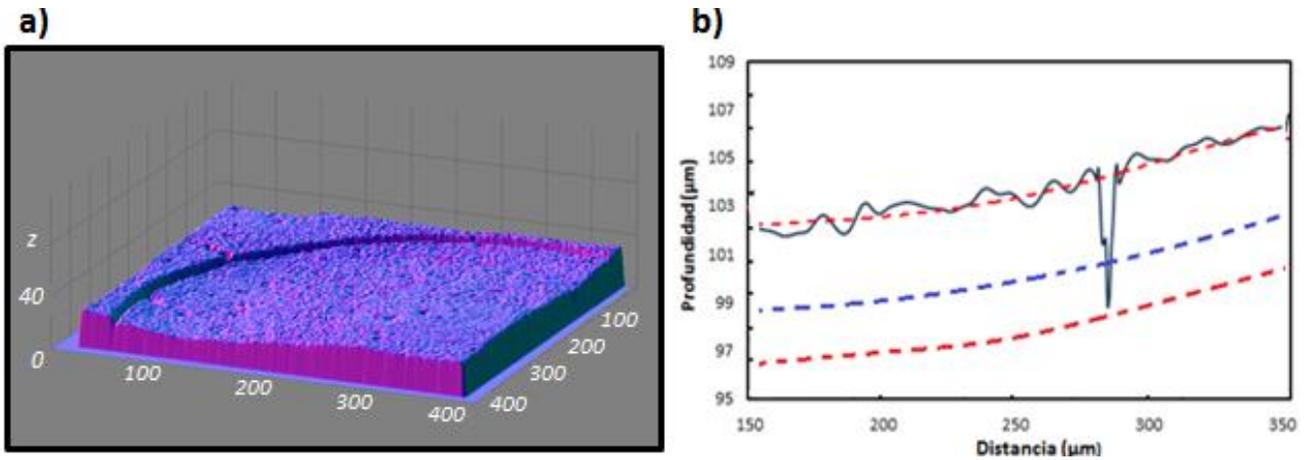


Fig. 5.13 Profundidad de una grieta generada en s1. a) Imagen en 3 dimensiones. b) Profundidad aproximadamente igual al espesor total de la capa 5.8 μm .

En el sistema s2, la propagación de las grietas atraviesa aproximadamente las fases CoB y Co_2B , por completo. Sin embargo, por el cierre de la grieta, las capacidades del equipo y la naturaleza de la técnica no es posible determinar si la grieta se propaga hacia el sustrato.

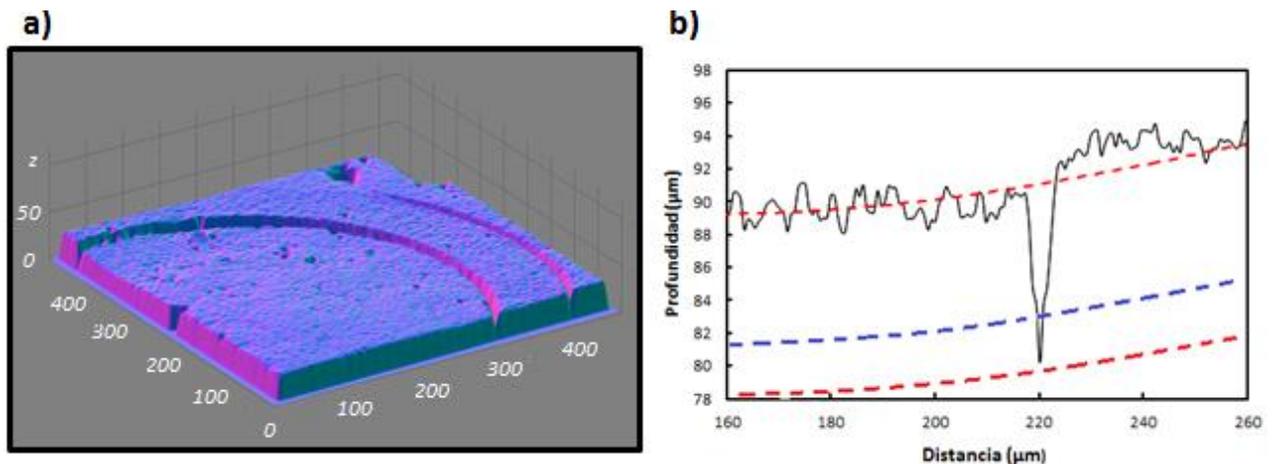


Fig. 5.14 Profundidad de una grieta generada en s2. a) Imagen en 3 dimensiones. b) Profundidad aproximadamente igual al espesor total de la capa 11.2 μm .

5.5 Simulación numérica.

Si se conocen las propiedades mecánicas de las capas y del sustrato por medio de las simulaciones numéricas realizadas es posible estimar las cargas estáticas críticas, profundidades residuales y estimar la aparición y tamaño de las primeras grietas tipo anillo en condiciones de carga cíclica. Los modelos numéricos también sirven para estudiar el comportamiento y entender la forma en la cual el sistema capa/sustrato falla.

La Fig. 5.15 muestra la distribución de los esfuerzos principales máximos en el sistema s3. Observando las magnitudes y colores correspondientes en el diagrama de contorno es posible apreciar las zonas en las cuales se generan esfuerzos a tensión o a compresión durante el contacto. Las grietas anillo formadas en la capa se generan por la acción de los grandes esfuerzos a tensión generados en la superficie de esta.

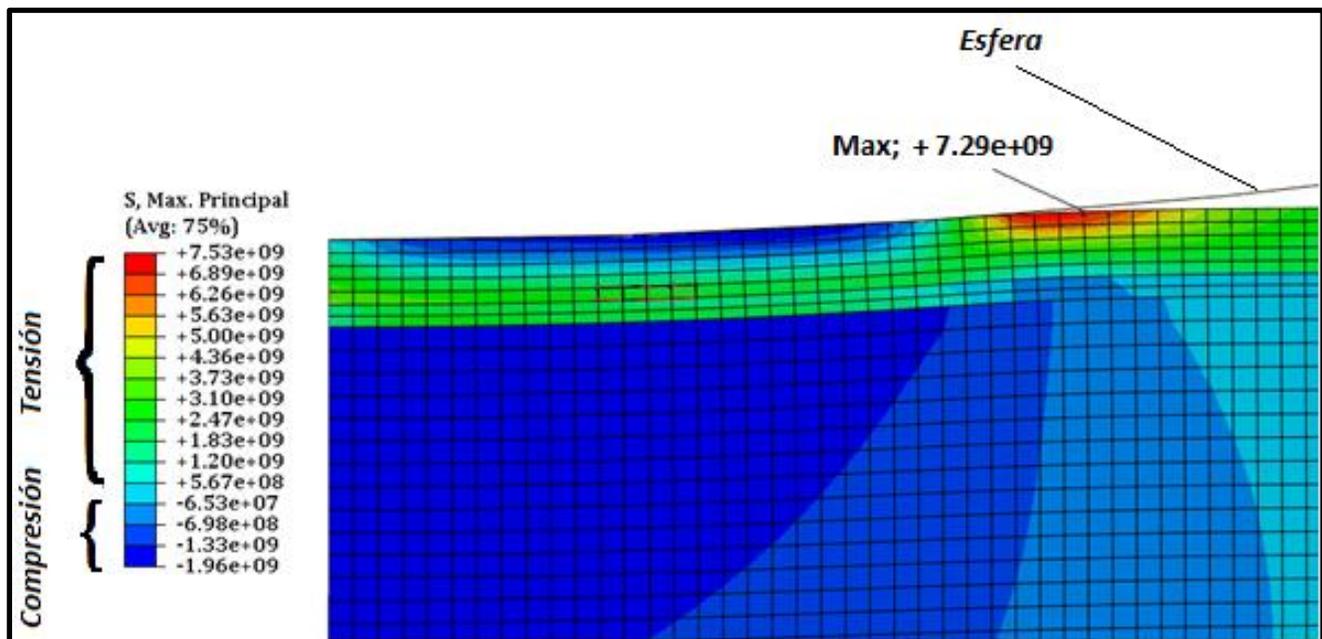


Fig. 5.15 Diagrama de contorno para el esfuerzo principal máximo en el sistema s3.

Las simulaciones numéricas cíclicas se realizaron para las condiciones más críticas de carga. Variando el valor de los esfuerzos residuales (valores consultados en literatura). Para los tres sistemas capa/sustrato se obtuvieron buenas aproximaciones para los diámetros y profundidades residuales, valores que dependen principalmente de la deformación plástica y recuperación elástica del sustrato



y que por lo tanto permanecían constantes al cambiar la magnitud de los esfuerzos residuales en las capas.

La comparación de los resultados experimentales y numéricos para los diámetros y profundidades residuales para el sistema s1 se muestra en las Fig. 5.16 y 5.17.

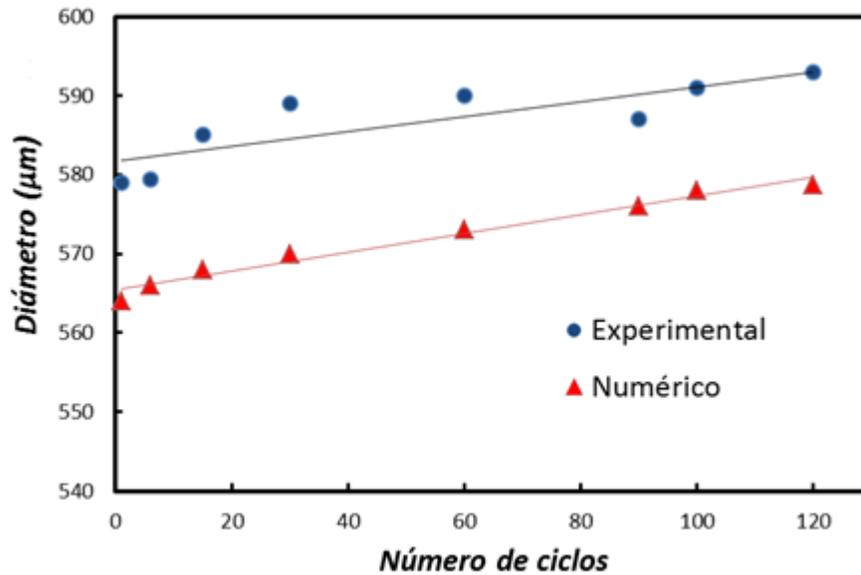


Fig. 5.16 Comparación de los diámetros residuales obtenidos experimental numéricamente en s1.

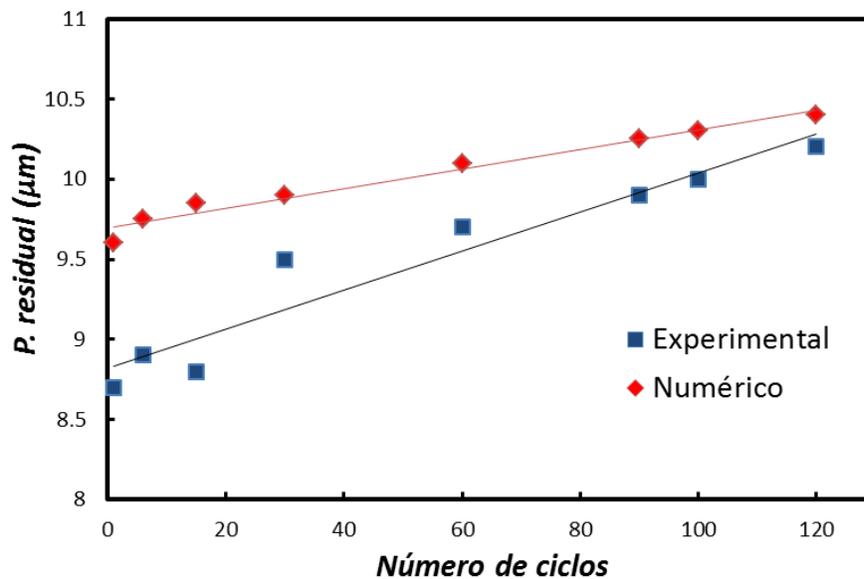


Fig. 5.17 Comparación de las profundidades residuales obtenidas experimental y numéricamente en s1.

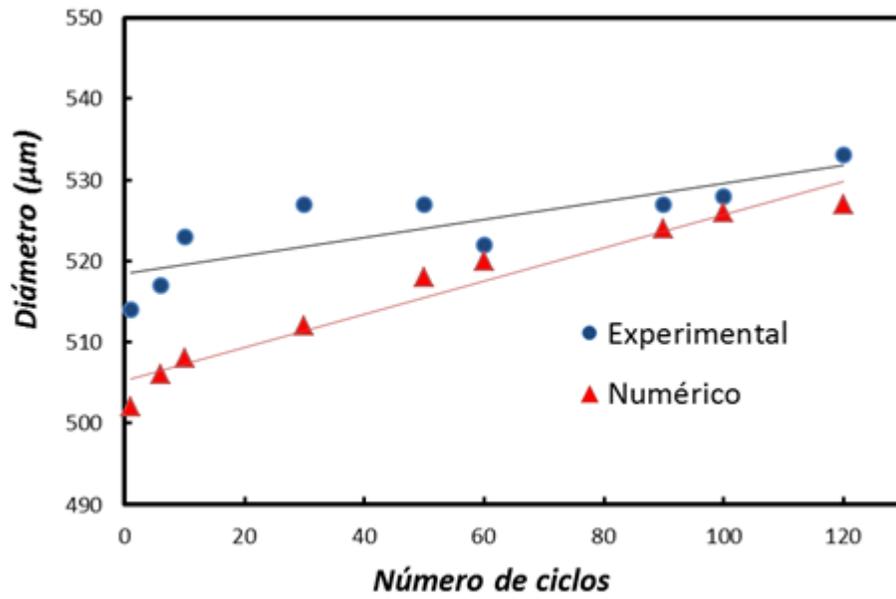


Fig. 5.18 Comparación de los diámetros residuales obtenidos experimental numéricamente en s2.

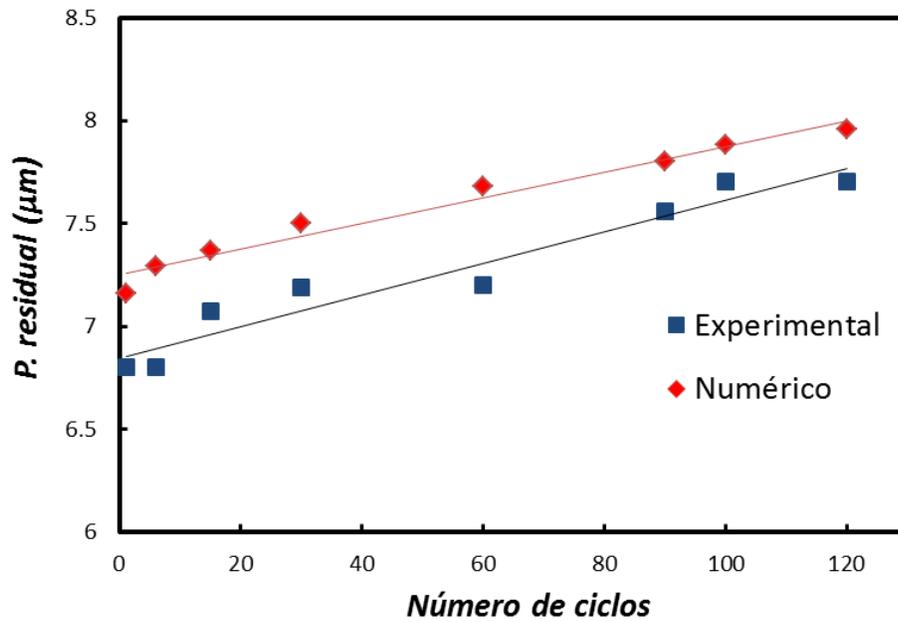


Fig. 5.19 Comparación de las profundidades residuales obtenidas experimental y numéricamente en s2.

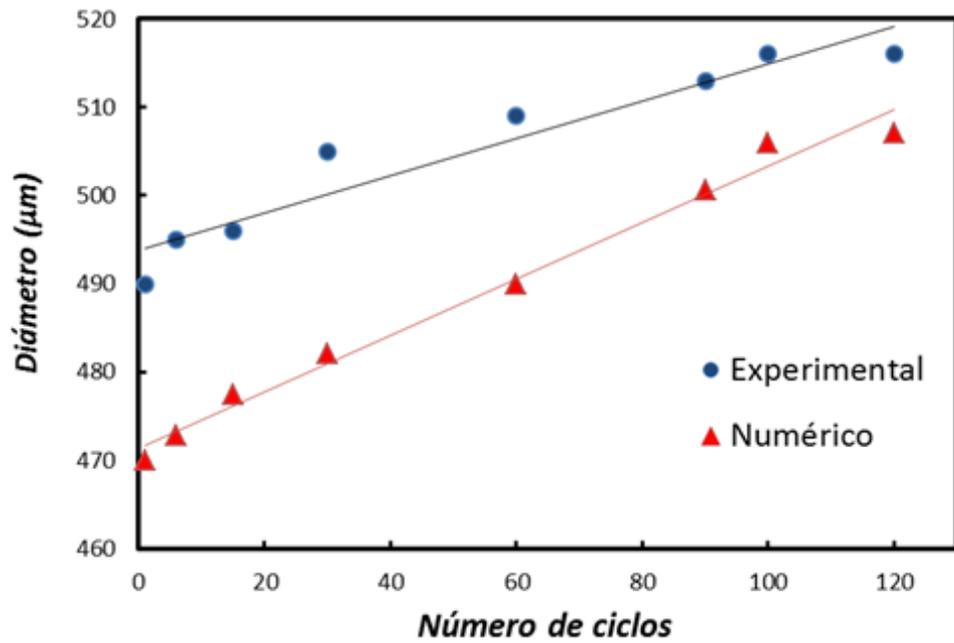


Fig. 5.20 Comparación de los diámetros residuales obtenidos experimental numéricamente en s3.

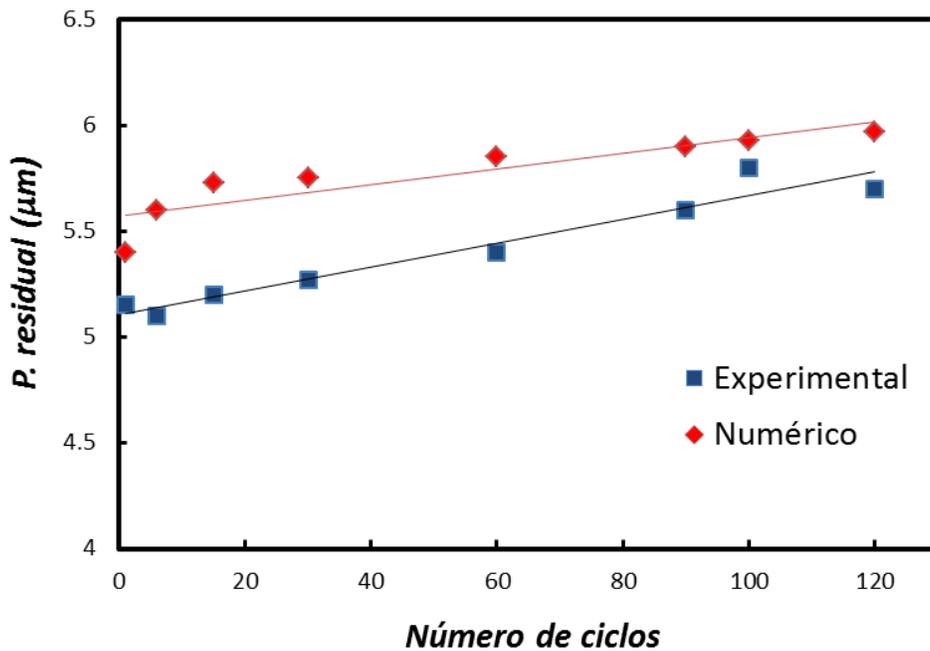


Fig. 5.21 Comparación de las profundidades residuales obtenidas experimental y numéricamente en s3.



Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Cuando la capa se fractura se genera un reordenamiento de esfuerzos y deformaciones en el sistema. El modelo numérico no es capaz de considerar este comportamiento, por lo que la simulación está limitada únicamente a la estimación de la primera grieta tipo anillo, una vez alcanzado el criterio de daño establecido, los resultados arrojados por el modelo pueden no ser precisos.

Para obtener una buena estimación del agrietamiento en las capas, la correcta definición de los esfuerzos de cedencia y esfuerzos residuales de las capas cobra mayor importancia, junto a las propiedades del sustrato. Al aumentar la magnitud de los esfuerzos residuales (principalmente los de tensión en CoB) claramente se observó una disminución en la magnitud y ciclos de carga soportados por el sistema capa/sustrato. La mejor aproximación en cuanto a la estimación de los ciclos de carga se obtuvo considerando las magnitudes de esfuerzos residuales más severas reportadas (1.76 GPa para CoB en tensión y 1.8 GPa en compresión para Co_2B). Si bien en este trabajo no se estimaron los esfuerzos residuales, el utilizar las magnitudes máximas reportadas puede ser justificable si se toma en cuenta que el modelo numérico no considera el efecto de ciertos factores (como la porosidad) que al igual que los esfuerzos residuales de tensión disminuyen las propiedades mecánicas de las capas.

En la *Tabla 5.4* se muestran una comparación entre la cantidad de ciclos hasta el agrietamiento experimental y numéricamente.

Tabla 5.4 Número de ciclos aplicados hasta la presencia de la primera grieta tipo anillo.

| Sistemas capa/sustrato | Espesor Total (μm) | Carga cíclica (N) | Numero de Ciclos (experimental) | Numero de Ciclos (simulación) |
|------------------------|---------------------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| <i>s1</i> | 5.8 | 800 | 90 \pm 10 | 75 |
| <i>s2</i> | 11.2 | 600 | 60 \pm 10 | 50 |
| <i>s3</i> | 27.3 | 500 | 150 \pm 10 | 120 |

Finalmente en las *Fig. 5.22, Fig. 5.23 y 5.24* se muestra la evolución en la distribución y magnitud de esfuerzos en las capas de los sistemas *s1, s2 y s3 respectivamente*, tras la aplicación de diferentes números de ciclos. Para las 3 figuras, en el inciso a) se muestra el estado de inicial (sin aplicación de carga y únicamente aparecen los esfuerzos residuales), mientras que el inciso d) muestra el estado de esfuerzos una vez superado el esfuerzo de cedencia.

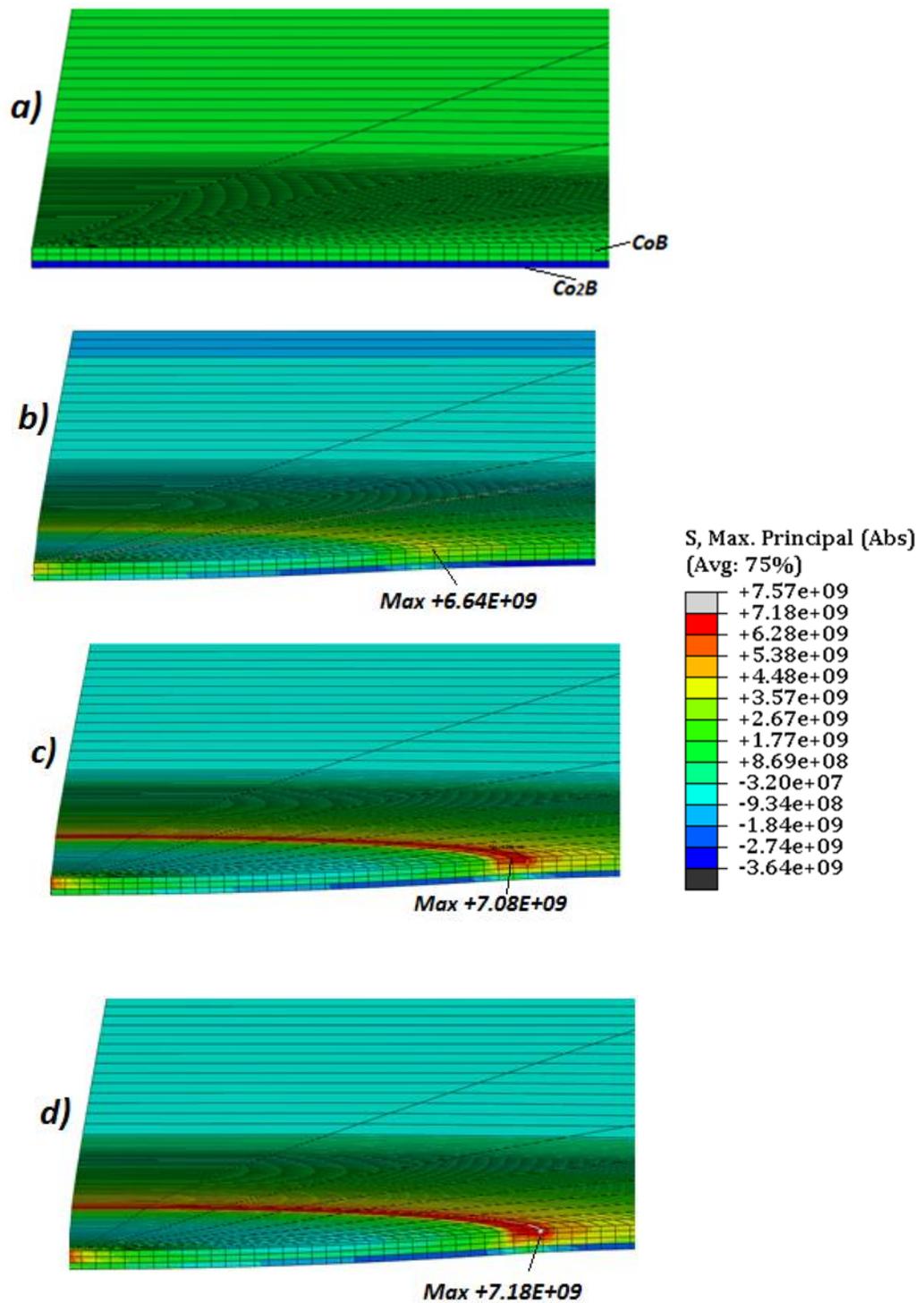


Fig. 5.22 Evolución del campo de esfuerzos con respecto al número de ciclos aplicados en s1, carga 800 N a) Estado inicial b) 1 ciclo de carga c) 30 ciclos de carga d) 750 ciclos de carga.

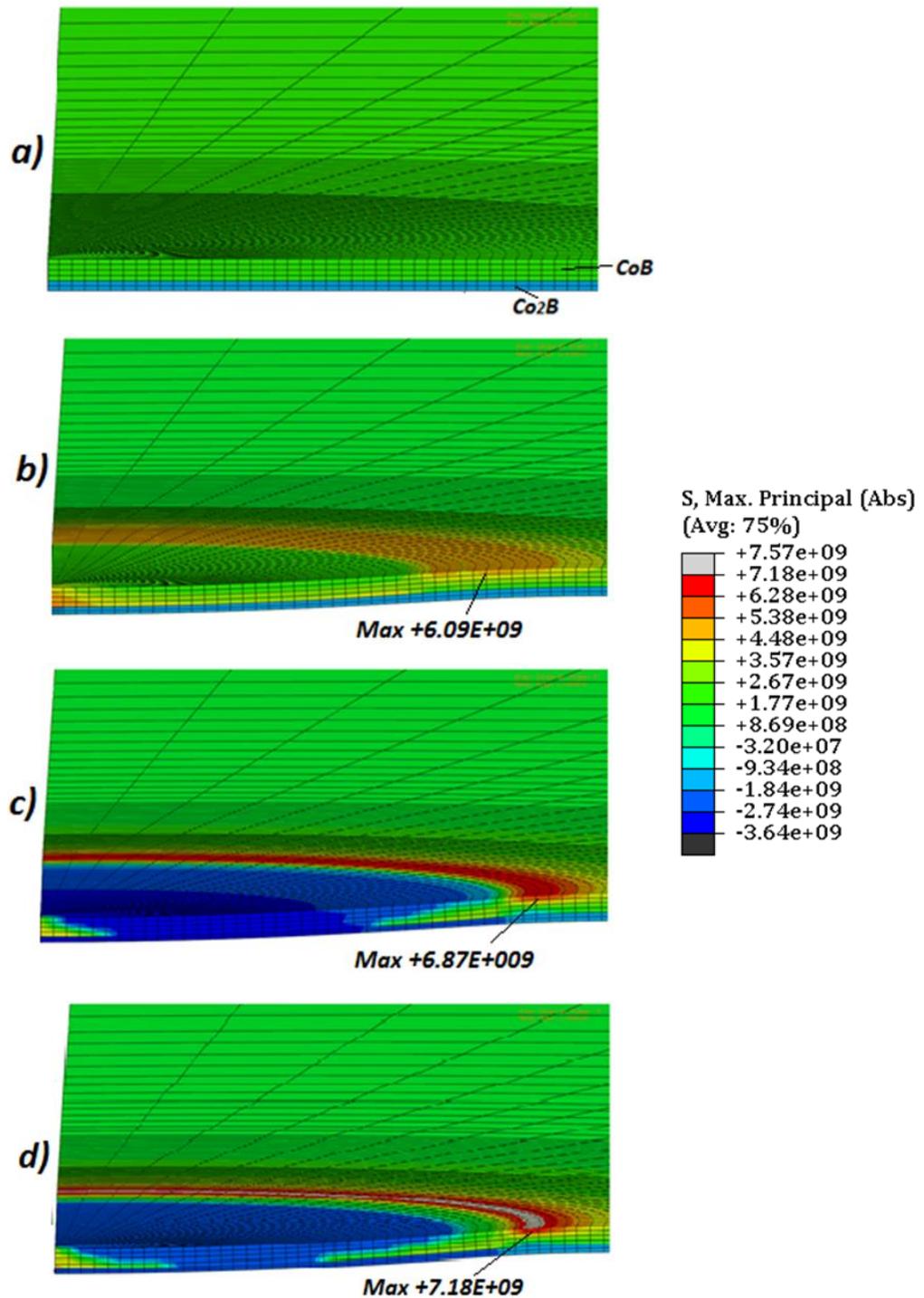


Fig. 5.23 Evolución del campo de esfuerzos con respecto al número de ciclos aplicados en s2, carga 600 N a) Estado inicial b) 1 ciclo de carga c) 30 ciclos de carga d) 50 ciclos de carga.

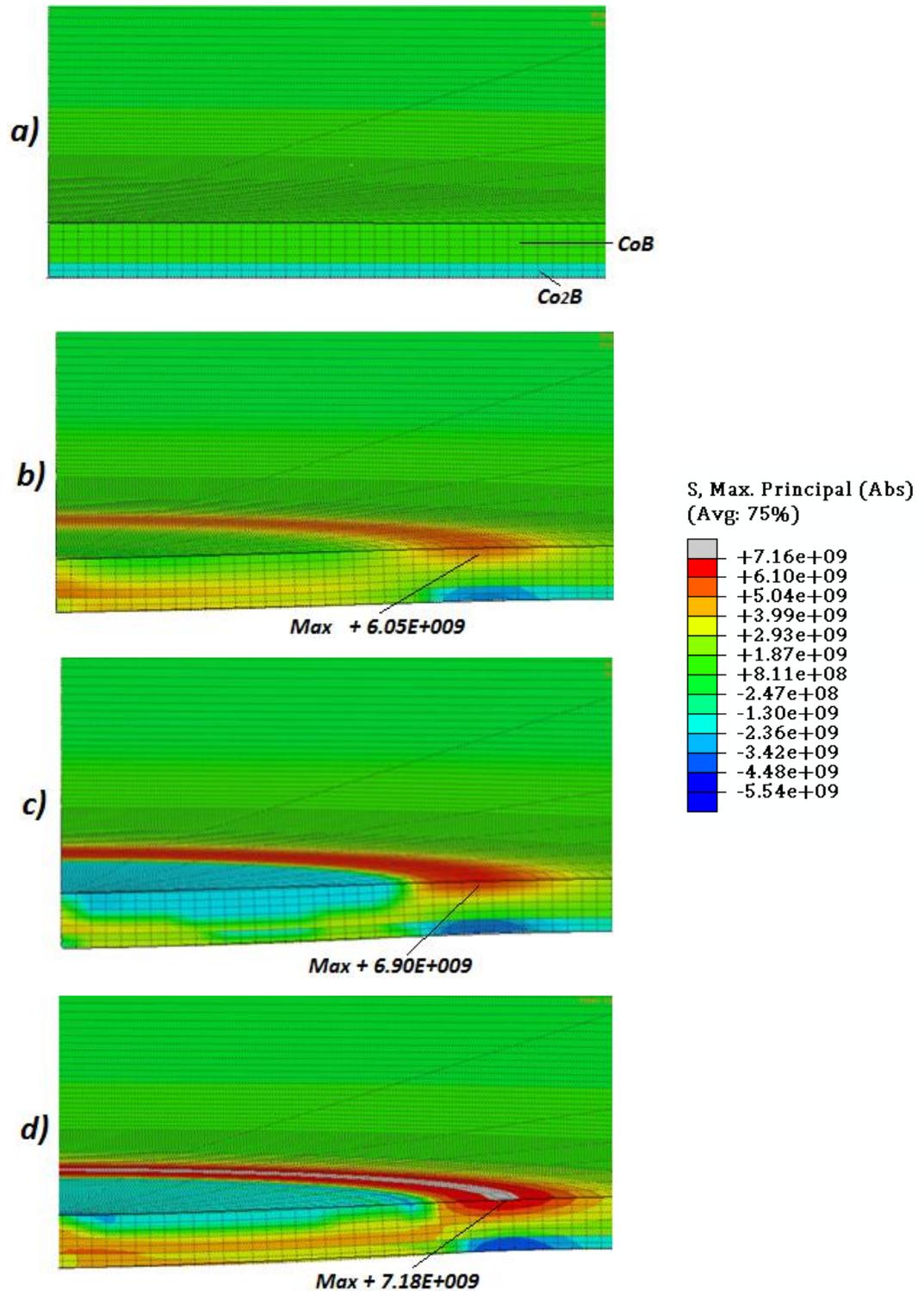


Fig. 5.24 Evolución del campo de esfuerzos con respecto al número de ciclos aplicados en s3, carga 500N a) estado inicial b) 1 ciclo de carga c) 90 ciclos de carga d) 120 ciclos de carga.



Conclusiones

En este trabajo se evaluó de manera experimental y numérica el comportamiento bajo condiciones de fatiga por contacto de una aleación *Co-Cr-Mo* endurecida por medio de un tratamiento de borurización. Como consecuencia de la falta de una norma establecida para este tipo de pruebas, los resultados obtenidos son particulares para las condiciones y sistemas utilizados. Sin embargo, más allá de la obtención de un criterio cuantificable y general, se determinó información importante sobre el comportamiento de este tipo de capas bajo la aplicación de cargas repetidas.

1. Tras la aplicación de cargas cíclicas, los 3 sistemas capa/substrato propuestos alcanzaron el nivel de daño crítico establecido (grietas tipo anillo) en comparación con cargas de mayor magnitud aplicadas de manera estática, por lo que se confirma la presencia de fatiga por contacto en los 3 sistemas
2. La intensidad del daño generado aumenta con la cantidad de ciclos aplicados y es más evidente conforme el espesor de la capa incrementa. Al observar la evolución del daño, se concluye que la integridad de los sistemas *s1* y *s2* se mantiene en condiciones aceptables aún después de la formación de grietas tipo anillo. Por otra parte, para el sistema *s3* la acumulación de daño es más apreciable e incluso se presentó falla por delaminación para las condiciones cíclicas más severas.
3. El sistema con el espesor de capa más delgada *s1* presentó una mejor resistencia a la aplicación de cargas (estáticas y cíclicas), en contraste, el sistema con mayor espesor de capa *s3* fue el que presentó mayor fragilidad. Lo anterior posiblemente se debe a la mayor presencia de la fase *CoB* (fase con mayor fragilidad y esfuerzos residuales tensiles) con respecto al espesor total de la capa (para *s1* la razón de $\left(\frac{CoB}{Co_2B}\right)=0.64$, mientras que para *s3* $\left(\frac{CoB}{Co_2B}\right)=0.82$). También existe una directa influencia del espesor durante la flexión de la capa, de manera similar a lo que ocurre en una placa en flexión (la magnitud de los esfuerzos generados es proporcional al espesor).
4. Se concluye que la resistencia a la fatiga por contacto disminuye conforme el espesor de la capa aumenta, lo que no significa que sistemas con capa de gran espesor no puedan ser utilizados



Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

exitosamente en aplicación con cargas cíclicas presentes, pero probablemente sean más adecuados para objetos (esferas) con mayor área de contacto.

5. Las técnicas de microscopia confocal de barrido laser (MCBL) y perfilometría fueron utilizadas para determinar las profundidades residuales máximas alcanzadas por las huellas durante las pruebas. De los resultados obtenidos (considerando la profundidad residual como una medida de la deformación plástica) se establece que la mayor parte de la deformación plástica en el sustrato se produce durante la aplicación de los primeros ciclos de carga. A medida que aumentan los ciclos, la profundidad residual presenta un comportamiento “asintótico” como consecuencia del aumento en el área de contacto y del endurecimiento del sustrato con cada ciclo aplicado. Además haciendo un barrido sobre las grietas, se estimó que la profundidad alcanzada por las estas, es aproximadamente igual al espesor total de la capa..
6. Por medio de la simulación numérica se determinó que la formación de las grietas tipo anillo se debe a los esfuerzos de tensión formados en el límite del radio de contacto con la esfera. El modelo numérico propuesto en este trabajo presenta una buena aproximación en cuanto a la zona y profundidad afectada por el contacto. Sin embargo, una aproximación precisa del agrietamiento está limitada por la correcta determinación de las propiedades de la capa y los defectos presentes. La simulación desarrollada representa herramienta útil para la estimación de ciertos parámetros durante la prueba de fatiga por contacto.



Perspectivas del trabajo

Con base a los resultados obtenidos se obtuvieron algunas conclusiones importantes para el entendimiento del comportamiento de capas de boruro bajo la aplicación de cargas cíclicas. Sin embargo, debido a la poca cantidad de trabajos referentes al tema, se identifican algunos aspectos para los cuales una investigación más detallada es necesaria.

- Evaluar la resistencia a la fatiga por contacto para los tres sistemas capa/substrato propuestos en este trabajo, aplicando mayores magnitudes de carga, número de ciclos y considerando la delaminación del sistema como criterio de daño, para estudiar el comportamiento los tres sistemas capa/substrato, en condiciones más críticas.
- Disminuir o eliminar la fase *CoB* por medio de un pos-tratamiento con el fin de estudiar el comportamiento bajo cargas cíclicas de un sistema capa/substrato compuesto por solo la fase *Co₂B*.
- Evaluar el comportamiento en fatiga por contacto para capas formadas mediante otros tratamientos por difusión, tales como nitruración, cementación, etc., aplicando la metodología propuesta en este trabajo, con el fin de determinar cuál es el tratamiento que presenta mayor resistencia a la aplicación de cargas por contacto.
- Determinar la influencia de cada uno de los parámetros que involucra la prueba de fatiga por contacto (tamaño de esfera, cargas, frecuencias, equipo, etc.) estableciendo recomendaciones y parámetros útiles con base en las conclusiones establecidas para contribuir al desarrollo de una prueba estandarizada para la evaluación de la fatiga por contacto.
- Mejorar la simulación numérica desarrollada, mediante la caracterización mecánica precisa del sistema capa/substrato y la modelación geométrica de factores que influyen en el comportamiento real del sistema, como la porosidad en las capas y la presencia de una zona de difusión para ampliar la capacidad y precisión de la simulación.



Referencias

- Aneesh B, Raghu V, Prakash, (2012), "Energy Parameter Correlation of Failure Life Data between Cyclic Ball Indentation and Low Cycle Fatigue", *Open J. Met.*, 2, 31-36.
- ASM International, (2002), "Introduction to Surface Hardening of Steels", United States.
- ASM International, (1991), "ASM Handbook: Heat Treating" Vol. 4, United States.
- ASM International, (1998), "ASM Handbook: Metallography and microstructures" Vol. 9, United States.
- ASTM E 3-11, (2001), "*Standard guide for Preparation of Metallographic Specimens*", United States.
- ASTM E 407, (2007), "*Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*", United States.
- Bantle R, and Mathews A, (1992), "Investigation into the impact wear behavior of ceramic coatings", *Surf. Coat. Technol.*, 74, 857-68.
- Bouzakis K D, Vidakis N, David K, (1995), "The concept of an advanced impact tester supported by evaluation software for the fatigue strength characterization of hard layered media", *Thin Solid Films*, 35, 355-356.
- Bravo D I, (2014), "Caracterización mecánica y estructural de una aleación Co-Cr-Mo ASTM F-75 endurecida superficialmente por difusión de boro", Tesis Doctoral, SEPI ESIME Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional.
- Cahoon J R, Broughton W H, Kutzak A R, (1971), "The Determination of Yield Strength From Hardness Measurements", *Metall. Mater. Trans.*, 2, 323-325.
- Campos S I, Ortíz D M, Bravo B O, Doñu R M A, Bravo B D, Tapia Q C, Jiménez R M Y, (2010), "Formation and kinetics of FeB/Fe₂B layers and diffusion zone at the surface of AISI 316 borided steels", *Surf. Coat. Technol.*, 205, 403-412.
- Campos S I, Bravo B D, Meneses A A, Ortíz D M, Cimenoglu H, Figueroa L U, Andraca A J, (2013), "Growth kinetics and mechanical properties of boride layers formed at the Surface of the ASTM F-75 biomedical alloy", *Surf. Coat. Technol.*, 237, 402-414.



Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Campos S I, Bravo B D, Cimenoglu H, Figueroa L U, Flores J M, Meydanoglu O, (2014), “The boriding process in CoCrMo alloy: Fracture toughness in cobalt boride coatings” Surf. Coat. Technol., 260, 362–368.

Campos S I, Bravo B D, Flores J M, Arzate V I, Lopez G C, Bernabe M S, (2015), “Diffusion Boride Coatings in CoCrMo Alloy and Some Indentation Properties”, Metallogr. Microstruct. Anal., 4, 158–168.

Carpenter Technology Corporation, (2007), BioDur Carpenter CCM Alloy Technical Datasheet, Texas US.

Cataldo J, Galligani F, Harraden D, (2000), “Boriding of Nickel by the powder-pack method”, Adv. Mater. Processes, 157, 35–38.

David J R, Davis and Associates, (2000), “ASM Specialty Handbook: Nickel, Cobalt, and their alloys”, ASM International, 343-406.

Derjaguin B V, Muller V M, Toporov Y P, (1995), “Effect of contact deformations on the adhesion of particles”, J. Colloid Interface Sci., 3, 131-143.

Dessaults Systems Simulia Corp, (2010), “Abaqus 6.10 Analysis user’s manual “ vol. I, Rhode Island, Dessaults Systems Editions.

Dessaults Systems Simulia Corp, (2010), “Abaqus 6.10 Analysis user’s manual “ vol. II, Rhode Island, Dessaults Systems Editions.

Dessaults Systems Simulia Corp, (2010), “Abaqus 6.10 Analysis user’s manual “ vol. III, Rhode Island, Dessaults Systems Editions.

Dessaults Systems Simulia Corp, (2010), “Abaqus 6.10 Analysis user’s manual “ vol. IV, Rhode Island, Dessaults Systems Editions.

Dessaults Systems Simulia Corp, (2010), “Abaqus 6.10 Analysis user’s manual “ vol. V, Rhode Island, Dessaults Systems Editions

Fleck N A, Kang K J, Ashby M F, (1994), “The cyclic properties of engineered materials”, Acta Metall. Mater., 42, 365-81.

Galin L A, (1980), “Contact problems in the classical theory of elasticity”, Vol. 15, Gladwell G M (ed), Waterloo, Springer.



Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Gupta P K, and Walowit J A, (1974), "Contact stresses between an elastic cylinder and a layered elastic solid", J. Lubr. Technol., 96, 250-257.

Hay J L, Pharr G M, (2000), "ASM Handbook: Mechanical Testing and Evaluation", 10th ed., Materials Park OH, ASM International.

Haynes E, (1907), Cobalt metal alloy, US patent no 873745.

Hertz H, (1896), "Miscellaneous papers", Jones D E (ed), London , Macmillan.

Heinke W, Leyland A, Matthews A, Berg G, Friedrich C, Broszeit E, (1995), "Evaluation of PVD nitride coatings, using impact, scratch and Rockwell-C adhesion tests", Thin Solid Films, 270, 431-438.

Hsueh C H, and Miranda P, (2004), "Combined empirical-analytical method for determining contact radius and indenter displacement during Hertzian indentation of coating/substrate systems", J. Mater. Res., 19, 2774-2781.

Huber N, and Tsakmakis C, (1998), "Experimental and theoretical investigation of the effect of kinematic hardening on spherical indentation", Mech. Mater., 27, 241-248.

ISO 14577-1, (2002), "*Metallic materials: Instrumented indentation test for hardness and materials parameters*", United States.

Jackson C S and Yang D C, (1969), "Application of the hertz contact law to problems of impact in plates", United States Naval Ordnance Laboratory, White Oak, Maryland, MD. Noltr., 69-152.

Johnson K L, (1985), "Contact Mechanics" Cambridge U.K., Cambridge University Press.

Knotek O, Lugscheider L, Leuscheh K, (1977), "Surface layers on cobalt base alloys by boron diffusion", Thin Solid Films, 45, 331-339.

Knotek O, Bosserhoff B, Schrey A, Leyendecker T, Lemmer O, Esser S, (1992), "A new technique for testing the impact load of thin films: the coating impact test", Surf. Coat. Technol., 54, 102-107.

Kot M, Rakowski W, Lackner J M, Major L, (2012), "Analysis of spherical indentations of coating-substrate systems: experiments and finite element modeling", Mater. Des., 43, 99-111.

Liao P K and Spear K E, (1988), "B-Co (Boron-Cobalt)", Alloy Phase Diagrams, 9, 471-472.



Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Liu S, Peyronnel A, Wang Q J, Keer K J, (2005), "An extension of the Hertz theory for 2D coated components", *Tribol. Lett.*, 18 (4), 505-511.

Liu Y, Wang Y, Xia L, Song D, Wang Y, Jiao L, Yuan H, (2008), "Structure and electromechanical behaviors of a series of Co-B alloys", *Electrochim. Acta*, 53, 2265-2271.

Matiašovský K, Chrenková P M, Feliner P, Makyta M, (1988), "Electrochemical and thermochemical boriding in molten salts", *Surf. Coat. Technol.*, 35, 133-149.

Matuschka A Graf Von, (1980), "Boronizing", Hanser C (ed), Munich, FRG.

Minkevich A N, (1961), "Diffusion boride layers in metals", *Met. Sci. and Heat Treat.*, 3, 347-351.

Oliver W C, Pharr G M, (2004), "Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: advances in understanding and refinements to methodology", *J. Mater. Res.*, 18, 3-20.

Palombarini G, and Carbucicchio M, (1987), "Effects on the alloying elements on the growth of iron boride coatings", *J. Mater. Sci. Lett.*, 6, 1147-1149.

Ramírez G, Tarrés E, Casas B, Valls I, Martínez R, Llanes L, (2009), "Contact fatigue behavior of PVD-coated steel", *Plasma Process Polym.*, 6, 588-591.

Solecki R, and Ohgushi Y, (1984), "Contact Stresses Between Layered Elastic Cylinders", *J. Tribol.*, 106, 396-440.

Tarrés E, Ramírez G, Gaillard Y, Jiménez P E, Llanes L, (2005), "Contact fatigue behaviour of PVD-coated hardmetals", *J. Refract. Met. Hard Mater.*, 27, 323-31.

Torres Y, (2002), "Comportamiento a fractura y fatiga de carburos cementados WC-Co", PhD Thesis, Universidad Politècnica de Catalunya.

Voevodin A, Bantle R, Matthews A, (1995), "Dynamic impact wear of TiC_xN_y and Ti-DLC composite coatings", *Wear*, 185, 151-157.

Zhunkovskii G L, Navrotskii B S, and Kolosvetov Y P, (1972), "Boronizing of cobalt and some cobalt base alloys", *Poroshkovaya Metallurgiya*, 119, 888-890.