

**ANÁLISIS NUMÉRICO DEL CONTACTO EN RODAMIENTOS RECUBIERTOS CON DIAMANTE
SINTÉTICO POR TRIBOADHESIÓN**

José Alfredo Rodríguez Ramírez, Wadi Elim Sosa González, Elda Griselda Flores Padilla
Universidad Autónoma del Carmen
Teléfono 7351501980
jrodriguez@pampano.unacar.mx, wsosa@pampano.unacar.mx, elda_flor@hotmail.com

Juan Carlos García Castrejón
Universidad Autónoma de Morelos
Teléfono 017773297984
rejon@uaem.mx

RESUMEN

Palabras Claves: *Triboadhesión o fricción seca, Contacto, Desgaste*

Un sin número de problemas están presentes en la industria relacionados con maquinaria y equipo mecánico entre los que se encuentran, desgaste de componentes, vibraciones mecánica, fatiga de bajos y altos ciclos, etc., ocasionando grandes pérdidas económicas.

El desgaste, presente prácticamente en todas las piezas en movimiento tales como: rodamientos, chumaceras, sellos, engranes, etc., origina alrededor del 75 % [1] de las fallas mecánicas; a causa de esto, se desarrollan técnicas para mejorar las propiedades mecánicas de las partes que entran en contacto. La triboadhesión o fricción seca es una técnica que consiste en aprovechar el calor que se genera de dos piezas en contacto y aplicar un recubrimiento para mejorar las propiedades mecánicas e incrementar la vida útil del elemento.

En este trabajo se realizaron simulaciones numéricas con el método de elemento finito para analizar las variaciones en los esfuerzos y deformaciones al entrar en contacto una bola de rodamiento sobre una pista recubierta con diamante sintético por el proceso de fricción seca y una pista sin presentar este recubrimiento. Se compararon los resultados obtenidos del modelo numérico del rodamiento recubierto y sin el mismo.

ABSTRACT

Key Word: *Triboadhesion or Dry Friction, Contact, Wear*

Many problems currents in the industry are related with machinery and mechanical machine, this kind of problems, cause lost of money; some of them are: wear, mechanical vibrations, low and high cycles fatigue, etc.

The wear process in the surfaces in contact is present in the most of the pieces with movement: bearings, rowlocks, seals, gear, etc., the wear process originates around 75% [1] of the mechanical faults; due many techniques have developed to improve the mechanical properties of the parts in contact. Triboadhesion or dry Friction is a technique that consists in to take advantage of the heat that is generated of two pieces in contact and applying a coating to get better mechanical properties and increasing the useful life of the element.

In this work a numerical simulation using the finite element method was made in order to analyze the variations in the stresses and deformations when entering in contact a ball bearing on row coated by dry friction process and uncoated. A comparison of result of numerical model of ball bearing coated and uncoated is realized.

NOMENCLATURA

| | |
|---------|--|
| E | Módulo de elasticidad |
| P | Densidad |
| C_p | Capacidad calorífica |
| K | Conductividad térmica |
| S_y | Resistencia a la fluencia |
| E_i | Módulo de elasticidad de la interfase DLC-AISI 52100 |
| E_c | Módulo de elasticidad del compuesto DLC-AISI 52100 |
| E_b | Módulo de elasticidad del material base |
| E_a | Módulo de elasticidad del agregado |
| E_v | Módulo de elasticidad vertical |
| E_h | Módulo de elasticidad horizontal |
| μ_i | Módulo de Poisson interfase DLC-AISI 52100 |
| μ_c | Módulo de Poisson compuesto DLC-AISI 52100 |
| μ_b | Módulo de Poisson del material base |
| μ_a | Módulo de Poisson del agregado |
| μ_v | Módulo de Poisson vertical |
| μ_h | Módulo de Poisson horizontal |
| V | Fracción de Volumen |

INTRODUCCIÓN

En la industria, año tras año se presentan problemas que se relacionan con el funcionamiento de piezas mecánicas de maquinaria; de manera general, esto es a causa de que algunos componentes llegan al final de su vida útil antes de lo esperado [1]. Algunos de estos componentes son los rodamientos, en los cuales se presentan diversos mecanismos de desgaste, ya sea por adherencia, abrasión ó fatiga. Esto ocasiona que se cambie el elemento ó provoca daños por tracción de las piezas móviles que soportan al mismo [2].

Actualmente, existen diferentes técnicas para dar tratamiento a superficies de dispositivos mecánicos con el propósito de incrementar la resistencia al desgaste y aumentar su vida útil entre las cuales se encuentran la deposición física y química de vapor, siendo la deposición química de vapor la que se emplea en la gran mayoría de los casos por las altas temperaturas que manejan y que permiten la difusión del material y la adhesión del recubrimiento a la superficie [3]. Q.H. Fan deposito diamante en cobre utilizando el proceso de deposición química y encontró que la nucleación de diamante se incrementa cuando la superficie de cobre se pulía con pasta de diamante [4]. Una de las técnicas más recientes para modificar las propiedades mecánicas de las superficies de los materiales, es la triboadhesión o fricción seca, propuesta por Ernst Nagy [5]; esta técnica consiste en poner dos superficies en contacto, una girando a grandes velocidades, mientras la otra se mantiene a baja velocidad en movimiento lineal o circular, este fenómeno aprovecha el calor generado por fricción para depositar partículas que otorguen las características requeridas por los elementos de una máquina [6]. Robles J. M. desarrollo un dispositivo para el recubrimiento de superficies curvas, el cual utiliza el mismo proceso de fricción seca [7]

En el caso específico de los rodamientos, se han logrado hacer deposiciones de diamante sintético, Figura 1, en sus pistas logrando un menor desgaste y un incremento significativo en su vida útil [8].



Figura 1. Rodamiento con recubrimiento en sus pistas con diamante sintético.

El modelo numérico para este tipo de problemas, depende de la geometría del contacto, tipo de contacto y si se presentan en estado estable o transitorio [9]. Los tipos de contacto se dividen en bidimensionales para contactos línea y tridimensionales para contactos punto. Los contactos punto son aquellos en que la presión varía en todos los ejes, entre los que se encuentran, el contacto entre una esfera y un plano, dos esferas, rodillos cilíndricos. Además de esto, las soluciones numéricas pueden ser en estado estable o transitorio. En estado estable, son para superficies lisas donde la presión y espesor del recubrimiento se han estabilizado y no varían en el tiempo [10].

En este trabajo se utilizan las ecuaciones desarrolladas por Flores M. para la obtención de las propiedades mecánicas del material compuesto que se genera al incorporarse el recubrimiento de diamante sintético [11]. Las propiedades calculadas con estas ecuaciones se incorporan al modelo numérico de contacto, cuando el rodamiento presenta sus pistas recubiertas, generado por el método de elementos finitos en el programa Ansys. Los resultados obtenidos se comparan con los resultados del modelo numérico sin recubrimiento.

El propósito de este trabajo es el análisis del comportamiento mecánico de un rodamiento de 2 hileras de bolas mediante el desarrollo del modelo por elementos finitos, cuando las pistas de acuerdo al cambio en sus propiedades mecánicas se encuentran recubiertas. Además comprobar de acuerdo a resultados experimentales que el rodamiento recubierto por fricción seca mejora las propiedades mecánicas aumentando su vida útil [8]. Este tipo de rodamiento por su diseño fue de fácil manipulación para el análisis experimental, además de ser ampliamente utilizados en la industria por su capacidad para soportar cargas radiales y axiales en ambos sentidos y sus fuerzas resultantes [12].

La demanda de esta tecnología se debe al bajo costo que tiene el recubrir la pieza comparado con la reducción de desgaste e incremento de su vida útil [8]

PROPIEDADES DEL RECUBRIMIENTO DLC-AISI 52100.

Las propiedades del acero AISI 52100 se presentan en la Tabla 1, debido a que este se utiliza para la construcción de rodamientos. Presenta un endurecimiento de superficie de 58-65 HRC [12].

Tabla 1 Propiedades físico-químicas del acero AISI 52100

| | |
|-----------|---------------------------|
| Material | AISI 52100 |
| Condición | Endurecido |
| ρ | 7810 (Kg/m ³) |
| k | 46.6 (J/m*s*°K) |

| | |
|-----------------------|---------------|
| C_p | 475 (J/Kg*°K) |
| E | 193.06 (GPa) |
| S_v | 286.9 (GPa) |
| Temperatura de Fusión | 1426.6 (°K) |

MODELO MATEMÁTICO

Flores M [11], desarrolló un modelo matemático, ecuaciones 1-9, para la obtención de los módulos de elasticidad y relación de Poisson del material compuesto y de la interfase y agregado como función de variables de entrada, longitud, propiedades mecánicas del material del rodamiento y del recubrimiento (Diamante sintético). Además, también obtuvo el módulo de elasticidad equivalente de las esferas de contacto.

De acuerdo a las siguientes ecuaciones, se obtienen las propiedades mecánicas efectivas del material compuesto particulado. Para tal efecto se dividen la obtención de propiedades en caso vertical y caso horizontal.

Caso vertical

$$E_v = \frac{1}{\frac{1}{E_a} + \frac{1}{E_i} \frac{f_2}{a_1} + \frac{1}{E_b} \frac{f_1}{a_1}} + \frac{1}{\frac{1}{E_i} + \frac{1}{E_i} \frac{f_2}{a_1} + \frac{1}{E_b} \frac{f_1}{a_1}} + E_b \frac{f_2}{c} \dots\dots (1)$$

$$\mu_v = \frac{\frac{\mu_a}{E_a} a_1 + \frac{\mu_i}{E_i} f_1 + \frac{\mu_a}{E_a} f_2}{\frac{a_1}{E_a} + \frac{f_1}{E_i} + \frac{f_2}{E_b}} \frac{a_1}{c} + \frac{\frac{\mu_i}{E_i} b_1 + \frac{\mu_b}{E_b} f_2}{\frac{b_1}{E_i} + \frac{f_2}{E_b}} \frac{f_1}{c} + \mu_b \frac{f_2}{c} \dots\dots (2)$$

Caso horizontal

$$E_h = \frac{1}{\frac{1}{E_a + E_i \frac{f_1}{a_1} + E_b \frac{f_2}{a_1}} + \frac{1}{E_i \frac{b_1}{f_1} + E_b \frac{f_2}{f_1}} + \frac{1}{E_m} \frac{f_2}{c}} \dots\dots\dots (3)$$

$$\mu_h = \left[\frac{\mu_a a_1 + \mu_i f_1 + \mu_b f_2}{E_a a_1 + E_i f_1 + E_b f_2} \frac{a_1}{c} + \frac{\mu_i b_1 + \mu_b f_2}{E_i b_1 + E_b f_2} \frac{f_1}{c} + \frac{\mu_b f_2}{E_b c} \right] E_h \dots\dots\dots (4)$$

Donde para ambos casos E_n , μ_n y V_n (n=1,2,3) son, respectivamente el módulo elástico, la relación de Poisson, la fracción de volumen agregado, interfase y matriz, además:

$$a_1 = \sqrt{V_1} \dots\dots\dots (5)$$

$$b_1 = \sqrt{V_1 + V_2} \dots\dots\dots (6)$$

$$c = \sqrt{V} \dots\dots\dots (7)$$

$$f_1 = b_1 - a_1 \dots\dots\dots (8)$$

$$f_2 = c - b_1 \dots\dots\dots (9)$$

MODELO DISCRETO DEL PROBLEMA

De acuerdo al programa Ansys utilizado para el modelado, para estructuras con simetría cíclica, la solución del análisis numérico se obtiene simulando solo una parte de la estructura, geometría, cargas estáticas y dinámicas, etc., lo que permite realizar la simulación en un menor tiempo y costo [13]. Con base en lo anterior, se construyó el modelo numérico de elementos finitos para la simulación de la pista y la bola en contacto, con solo 1/8 parte de una bola sobre una parte proporcional de la pista del rodamiento, con 7846 elementos y 11270 nodos, utilizando elementos del tipo solid92, targe170 y conta175, Figura 2. Disminuyendo el tiempo de solución y los recursos computacionales.

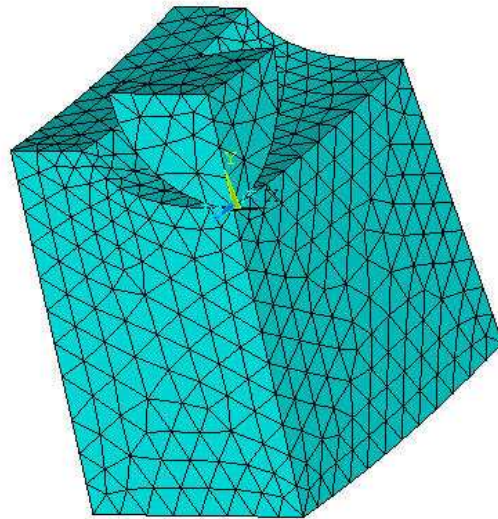


Figura 2. Modelo discretizado de la pista y la bola del rodamiento

La geometría del modelo consiste de dos elementos en contacto para el análisis, Figura 3. El elemento inferior, corresponde a una pequeña sección de la pista de rodadura exterior del rodamiento. El elemento superior, corresponde a la 1/8 parte del tamaño de la bola del rodamiento. Se realizó la geometría con las dimensiones de un rodamiento que se suministró para recubrirse y evaluarse de manera experimental [8].

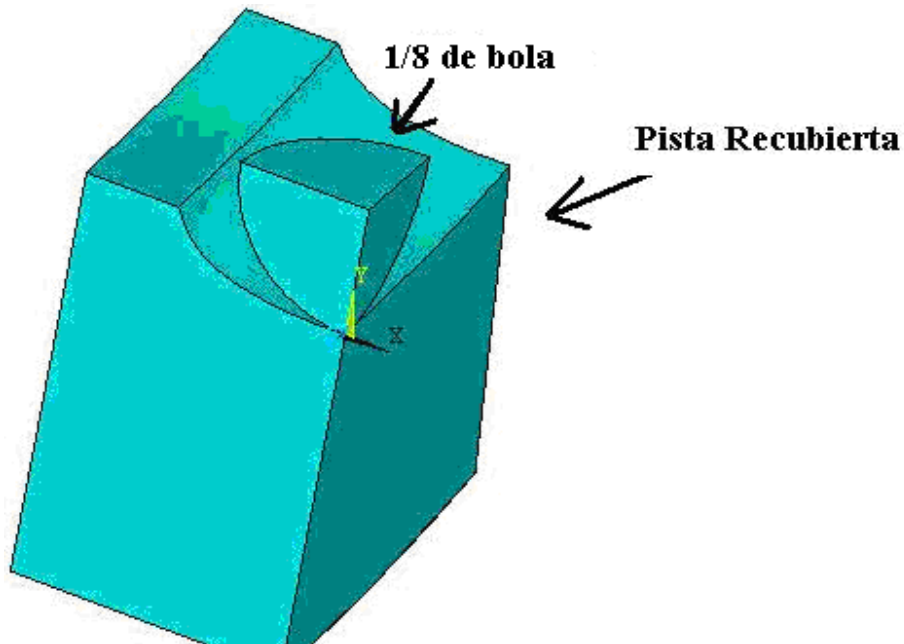


Figura 2, Geometría del modelo del rodamiento

La Figura 4 presenta las cargas aplicadas de acuerdo al análisis experimental [8]. En el caso de la fuerza normal se aplicaron 1250 N y para el caso de la fuerza tangencial fue de 416 N.

Fuerza en Newton

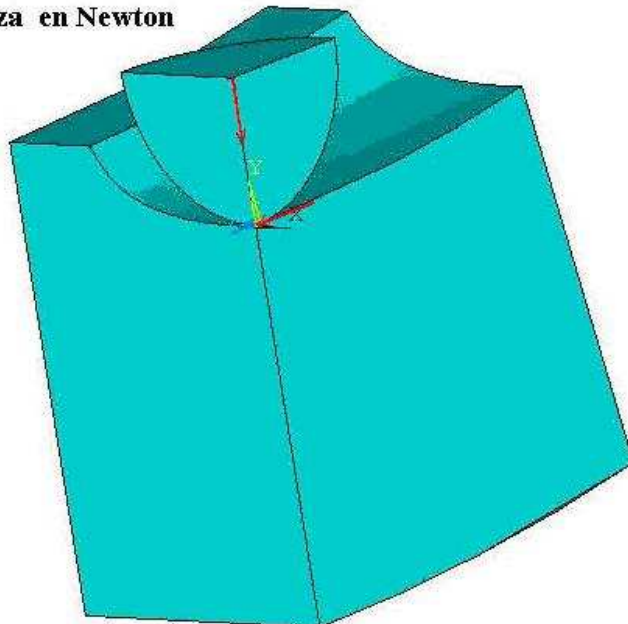


Figura 4 Fuerza normal y tangencial del modelo en elementos finitos.

Para el caso del rodamiento sin recubrimiento se utilizaron las características física y mecánicas del diseño original, en el modelo donde se aplica la técnica de triboadhesión, se modificaron los valores obtenidos de

manera analítica aplicando los resultados de las ecuaciones mencionadas, creando el modelo numérico cuando las pistas presentan recubrimiento de diamante sintético.

RESULTADOS

La Tabla 2, muestra los datos obtenidos para la simulación en elementos finitos del modelo numérico del rodamiento recubierto al aplicar las ecuaciones correspondientes.

Tabla 2. Propiedades mecánicas de interfase y compuesto.

| | |
|---------|------------|
| E_i | 265 GPa |
| E_c | 574.32 GPa |
| μ_i | 0.08 |
| μ_c | 0.1813 |

Los resultados de los esfuerzos, la deformación, la penetración y el deslizamiento, obtenidos por la simulación numérica de elemento finito para la superficie recubierta y para la superficie donde no existe recubrimiento se presentan en la Tabla 3 y 4.

La Tabla 3 presenta la deformación del rodamiento, la cual disminuye en un 30 % con respecto al rodamiento que no se recubre; los esfuerzos de uno con respecto de otro disminuyen en 2909 MPa, lo cual de acuerdo al modelo numérico y al tipo de análisis es una diferencia considerable.

Tabla 3. Deformación y Esfuerzo del Rodamiento con y sin recubrimiento.

| | Deformación (mm) | Esfuerzo (MPa) |
|--------------|------------------|----------------|
| Recubierto | 4.279e-2 | 31791 |
| Sin recubrir | 5.592e-2 | 28822 |

Los esfuerzos máximos del rodamiento recubierto respecto al rodamiento sin recubrimiento, aumentan, esto se debe al cambio del módulo de elasticidad cuando se aplica la técnica de triboadhesión, Figura 5, concentrándose en la unión entre la pista del rodamiento y el recubrimiento, lo que indica que la capa de recubrimiento es factible que se desprenda [2].

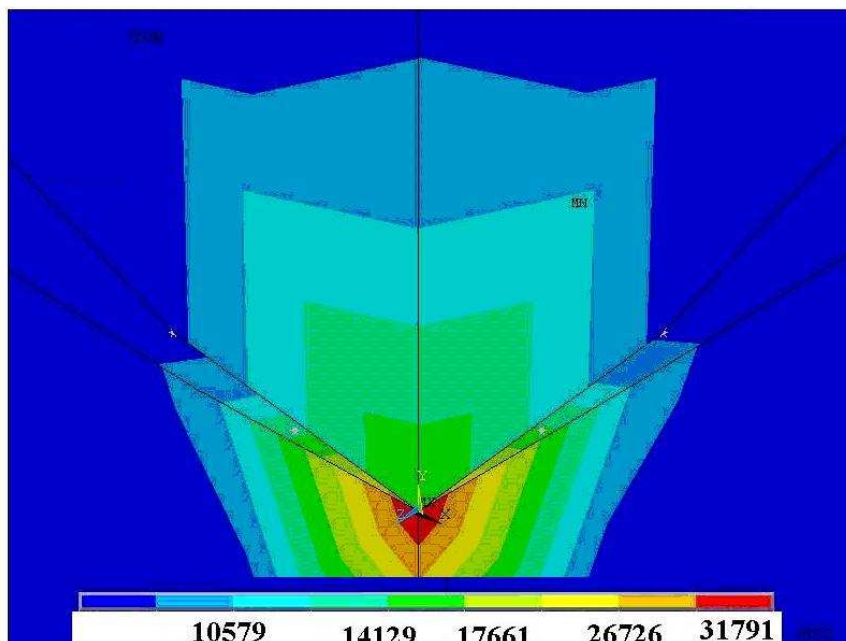


Figura 5. Esfuerzos de Von Mises en Rodamiento recubierto.

En la tabla 4 se observa que a causa del aumento en la dureza del rodamiento recubierto, se disminuye el índice de penetración en un 3 % y como se presenta una disminución en el factor de fricción, existe un aumento del deslizamiento a causa de la disminución del factor de fricción en un 38 %, lo que da origen a una disminución del desgaste y un aumento en la vida útil del rodamiento.

Tabla 4. Penetración y Deslizamiento del rodamiento con y sin recubrimiento.

| | Penetración (mm) | Deslizamiento (mm) |
|--------------|------------------|--------------------|
| Recubierto | 4.35e-5 | 1.8365e-2 |
| Sin recubrir | 4.45e-5 | 1.3229e-2 |

CONCLUSIONES

1. Los resultados obtenidos con la superficie sin recubrimiento y la que presenta el recubrimiento, a causa de que el coeficiente de fricción (uno de los parámetros más importantes en problemas de contacto) entre la superficie recubierta y la bola se reduce se tiene una longitud mayor de deslizamiento, lo que se traduce en una mayor resistencia al desgaste y mejoramiento de vida útil.
2. La reducción de la penetración en un 3% y la deformación en un 30 %, como consecuencia de la dureza del material que recubre el rodamiento origina un aumento en la resistencia al desgaste a causa de un mejor deslizamiento.
3. Se comprobó la importancia del proceso de triboadhesión a causa de mejorar las propiedades mecánicas del componente y aumentando su resistencia al desgaste.

Se agradece a la Universidad Autónoma del Carmen el apoyo y financiamiento. Clave del proyecto: 08/DIP/2004.

Se agradece al M. en C. José Ángel Segura Victorino su valiosa aportación a este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Morales E. [et al]. “Desarrollo de la Tribología en el Mundo”. Reporte técnico, pp1-6.
- [2] Harris T. A.. “Rolling Bearing Analysis”. (3rd rev. ed.; John Wiley and Sons.
- [3] Ohring M., “The Material Science of Thin Films, Deposition and Structure”, 2nd Edition, Academic Process.
- [4] Fan H.Q., “Diamond Deposition Cooper, studies on nucleation, growth, and adhesion behaviors” 21 August 1998.
- [5] Aguilar J, “Diseño y Construcción de un Dispositivo utilizado para Recubrir Superficies Metálicas con Óxidos Metálicos por Fricción Seca”. (Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica; Cuernavaca Morelos,; Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, 1999).
- [6] Colín J. “Un modelo Experimenta en el Proceso de Recubrimiento de Superficies por Medio de Fricción Seca” (Doctorado en Ciencias en Ingeniería Mecánica; Cuernavaca Morelos,; Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Diciembre 2004).
- [7] Robles J. M., “Diseño y construcción de un dispositivo para el recubrimiento de superficies curvas por fricción seca”, Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, Cuernavaca Morelos,; Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Octubre 2000).
- [8] Rodríguez J. A. “Diseño y Construcción de un Dispositivo Para Evaluar la Resistencia al Desgaste en Rodamientos Recubiertos a base de Fricción Seca Con Diamante” (Tesis de Maestría, México, Junio de 2003 CENIDET).
- [9] Venner C.H.. “Multilevel Solution of the EHL Line and Point Contact Problems”. Ph.D. Thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands, ISBN 90-9003974-0, 1991
- [10] Morales E. y Quiñones F.. “Solución Numérica del Problema de Lubricación Elastohidrodinámica de Contactos Circulares Rugosos”. Memorias del XXIX Congreso de Investigación y Extensión del Sistema ITESM, enero 1999.
- [11] Flores M., “Caracterización del Comportamiento de Láminas Recubiertas por Triboadhesion, por el Método de Elemento Finito” (Tesis de Maestría, México, Agosto de 2004 CENIDET).
- [12] SKF, “Setting up an operating a cost effective Predictive maintenance program at champion paper company”, SKF, www.Skfc.com , 1997.
- [13] Ansys Advance Guide, “Understanding Cyclic Symmetry Analysis” Chapter 7.