

## DISEÑO DE UN COJINETE DE GAS DE LÁMINAS FLEXIBLES

MARCELO DI LISCIA<sup>1</sup>, ANDRÉS DE STEFANO<sup>1</sup> y SERGIO DIAZ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Simón Bolívar. Departamento de Mecánica.  
Laboratorio de Dinámica de Máquinas, email: sdm-laba@usb.ve

Recibido: noviembre 2013

Recibido en forma final revisado: noviembre 2015

### RESUMEN

En la lubricación hidrodinámica usar un fluido compresible proporciona varias ventajas, como poder alcanzar altas velocidades de operación con baja fricción, eliminación de sellos y que el lubricante permanezca estable en rango amplio de temperaturas. En los cojinetes de gas radiales hay que considerar los delgados espesores de la película de lubricante, las estrictas tolerancias en su fabricación y los rangos limitados en su operación. Los Cojinetes de Láminas Flexibles (GFB) consisten en una superficie compuesta por una lámina delgada (*top-foil*) apoyada sobre láminas onduladas (*bump-foils*) las cuales funcionan como resortes ante las cargas a las que está sometido el cojinete. Este trabajo presenta el diseño de un GFB tipo *bump* basándose en un modelo de elementos finitos para determinar las características estructurales del cojinete y a partir de ese modelo establecer los parámetros de diseño comparándolo con un cojinete de propiedades y características conocidas. Este trabajo es una propuesta para la construcción de un cojinete de láminas flexibles en el Laboratorio de Dinámica de Máquinas de la Universidad Simón Bolívar.

*Palabras claves:* Tribología, Lubricación, Cojinete de Láminas, Diseño Conceptual, Elementos Finitos.

### A GAS FOIL BEARING DESIGN

#### ABSTRACT

The use of a compressible fluid in hydrodynamic lubrication provides a series of advantages, like reaching high speeds with low friction, sealing elimination and lubricant stability in a wide temperature range. When radial gas bearings are used, the thin lubricant film thickness, the strict manufacturing tolerances and the limited operating range all need to be taken into consideration. Gas Foil Bearings (GFB) consist of a surface composed by a thin foil (*top-foil*) lying over corrugated foils (*bump-foils*) which acts as springs to the loads to which the bearing is subjected. This work presents the design of a *bump* type GFB based on a finite element model to determine the bearing structural characteristics and from the model establish design parameters comparing it with a bearing of known properties. This is a proposal to the construction of a flexible foil bearing at the Machine Dynamics Laboratory at the Simón Bolívar University.

*Keywords:* Tribology, Lubrication, Foil Bearing, Conceptual Design, Finite Element.

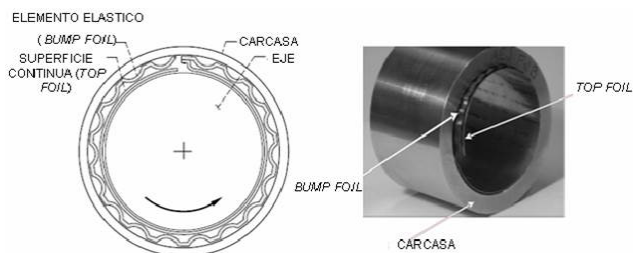
#### INTRODUCCIÓN

Trabajar con fluidos compresibles en lubricación hidrodinámica tiene varias ventajas en comparación con la lubricación con fluido incompresible. Siendo la viscosidad de los gases menor que la de los líquidos se reduce significativamente el roce entre las superficies, lo cual es deseable, mayormente o sobre todo, en máquinas pequeñas o de alta velocidad. La lubricación compresible tiene como ventajas la reducción de la contaminación ocasionada por los lubricantes líquidos, la reducción y eliminación de sellos, la estabilidad del lubricante en un rango amplio de temperaturas y el poder alcanzar velocidades de

operación de hasta 700.000RPM sin necesitar sistemas de enfriamiento (Bhushan, 2001). Las películas de lubricantes con las que funcionan los cojinetes hidrodinámicos de gas son más delgadas que las de los cojinetes hidrodinámicos que utilizan los lubricantes líquidos. Las tolerancias de fabricación son muy pequeñas y esto limita los rangos de operación. La holgura radial entre el eje y el cojinete es usualmente inferior a  $2\mu\text{m}$  para un eje de 50mm de diámetro a una velocidad de operación de 36.000RPM; sin embargo, el incremento del diámetro del eje a causa de la fuerza centrífuga y la temperatura puede llegar a ser de hasta  $6\mu\text{m}$ , lo que limita las velocidades y temperaturas de funcionamiento (Agrawal, 1997). Los cojinetes de gas

rígidos proporcionan poca amortiguación y pueden soportar poca desalineación. Estos problemas pueden ser resueltos con los cojinetes de gas de láminas flexibles que cuentan con una superficie que puede acomodarse al crecimiento del eje y a variaciones de la holgura radial (Agrawal, 1997). La figura 1 muestra un cojinete de gas de láminas flexibles tipo *bump*.

La superficie del cojinete reposa sobre una lámina corrugada llamada *bump foil*. La lámina actúa como elemento elástico permitiendo que la superficie se adapte según los requerimientos del eje. El eje se introduce en el cojinete de manera tal, que en muchos de los casos, existe una pequeña interferencia que provoca una precompresión del *bump foil*. Las tolerancias de fabricación para el eje y para el cojinete se reducen significativamente y el contacto entre el *bump foil*, la superficie y la carcasa introduce amortiguación debido a la fricción.



**Figura 1.** Cojinete de láminas flexibles tipo *bump*

El cojinete de láminas flexibles como concepto apareció descrito por primera vez en un trabajo realizado por Blok & Van Rossum (1953). Desde entonces, diversos investigadores han llevado a cabo numerosos trabajos, entre los que se puede mencionar: Ma (1965), Barnett (1975), Heshmat (1982), Heshmat (1991), Ku & Heshmat (1993), Peng y Carpino (1993), DellaCorte & Valco (2000), Radil (2002), Peng y Khonsari (2004) y Rubio y San Andrés (2004).

Desde comienzos de la década de los setenta se ha comercializado turbomaquinaria que utiliza cojinetes de láminas flexibles (Dellacorte & Valco, 2003). Las primeras aplicaciones fueron en máquinas de ciclo de aire ACM (Air Cycle Machines). Estas máquinas son utilizadas para mantener la presurización en el interior de los aviones y fueron introducidas al mercado para ser usadas en el sistema de control del ambiente ECM (Environmental Control System) de los aviones DC-10 (Agrawal, 1997). Las ACM son máquinas pequeñas y las cargas de funcionamiento en los cojinetes son bajas. Estas unidades mostraron una confiabilidad mayor que las que utilizaban rodamientos. Luego en 1974, la USAF (fuerza aérea de los Estados

Unidos) reemplazó los rodamientos por cojinetes de gas en las ACM de sus aviones A7E, los cuales tuvieron un alto desempeño y confiabilidad. En 1978 cuando el programa para el avión caza F-18 comenzó, su ACM se diseñó para que utilizara cojinetes de aire. Esta fue la primera unidad militar producida con el uso de esta tecnología y a partir de entonces, diversas empresas han comercializado ACM que utilizan cojinetes de aire de láminas flexibles en otros tipos de aviones tales como el Cessna-550 y los Boeing 767/757; los cojinetes empleados han demostrado tener un tiempo de vida por encima de las 100.000 horas de operación lo que los hace altamente confiables (Agrawal, 1997). Actualmente compañías en diversos países, realizan trabajos en cojinetes de gas de láminas para ser usados en la industria de la aviación, entre éstas se tienen: British Aerospace (Inglaterra), ABG Semca (Francia) & Tupolev (Rusia) (Agrawal, 1997).

Al final de los setenta la tecnología en cojinetes de gas de láminas mejoró, al punto que su capacidad de carga fue suficiente para soportar turbocompresores de alta velocidad (Dellacorte & Valco, 2003). Últimamente las mejoras en los modelos computacionales y el modelado estructural en elementos finitos, han permitido el desarrollo de cojinetes con alta capacidad de carga (Dellacorte & Valco, 2000). En 1999 la NASA presentó un turbo cargador que opera con cojinetes de láminas (Dellacorte & Valco, 2003). En 1998 la empresa Capstone Turbine Corporation lanzó al mercado una microturbina para generación eléctrica que trabaja con cojinetes de láminas, la cual presenta una capacidad de carga entre 30kW a 60kW (2006). Entre las empresas que actualmente se dedican a comercializar este tipo de tecnologías se tiene: Mohawk Innovative Technology Inc., Aentl Inc. y Foster-Miller Inc. entre otros.

Este trabajo presenta el diseño de un cojinete de láminas flexibles tipo *bump*, para ser utilizado en el banco de pruebas del laboratorio de dinámica de máquinas. A diferencia de los cojinetes convencionales, hay pocos trabajos que presenten planos y metodologías para el diseño de cojinetes de láminas flexibles (Bhushan, 2001); un diseño inicial ayudará a entender la influencia de algunos parámetros en el comportamiento del cojinete, estudiar las dificultades del proceso de fabricación, validar los modelos y los resultados analíticos, sentar precedentes y enfrentarse a dificultades como la disponibilidad de los materiales y tecnologías necesarios para la construcción del cojinete. Se estudió el comportamiento estructural de un cojinete de parámetros y condiciones conocidas, para determinar algún medio comparativo y establecer 3 requerimientos para el diseño de un cojinete con otras condiciones de operación. El procedimiento se centra principalmente en

la estructura del cojinete y no utiliza la resolución de las ecuaciones analíticas que rigen el fenómeno ni introduce como parámetros de diseño, condiciones rotodinámicas como rigidez o amortiguación específicas.

## ABREVIATURAS, SÍMBOLOS Y TERMINOLOGÍA

$c$	Holgura radial
$D$	Diámetro del eje
$e$	Excentricidad
$E$	Modulo de elasticidad
$F$	Carga de prueba sobre el cojinete
$h$	Altura del <i>bump</i>
$K$	Rigidez estructural del elemento elástico
$Kb$	Rigidez del Gump
$Kc$	Rigidez del cojinete
$l$	Longitud de arco del <i>bump</i>
$L$	Ancho de cojinete
$Oc$	Punto centro del cojinete
$Oe$	Punto centro del eje
$P$	Presión
$Pa$	Presión de descarga (atmosférica)
$R$	Radio eje
$Rh$	Radio rueda hembra
$Rm$	Radio rueda macho
$Se$	Límite de resistencia a fatiga
$Se\ corr.$	Límite de resistencia a fatiga corregido
$s$	Paso del <i>bump foil</i>
$t$	Espesor de la lámina de trabajo
$W$	Carga que soporta el cojinete
$x$	Coordenada horizontal
$y$	Coordenada vertical
$\theta$	Coordenada angular
$\mu$	Viscosidad dinámica
$\nu$	Módulo de Poisson
$\varphi$	Angulo de ubicación de la carga
$\omega$	Velocidad angular eje
<i>bump</i>	Ondulación de lámina que funciona como elemento elástico
<i>bump foil</i>	Lámina ondulada (elemento elástico)
<i>leaf foil</i>	Lámina que forma las hojas de un cojinete de gas segmentado
<i>top foil</i>	Lámina superficial

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Los cojinetes hidrodinámicos son dispositivos que permiten el movimiento relativo entre superficies, generando una pequeña película de fluido lubricante entre

ellas. El empuje generado por este simple dispositivo puede ser considerablemente elevado por lo que se pueden soportar grandes cargas con pocas pérdidas. Otro beneficio es que se introduce amortiguación en la dirección de empuje del cojinete lo que puede ser muy favorable en diversas situaciones (Müller-Karger, 2004). Los cojinetes hidrodinámicos son dispositivos relativamente fáciles de construir y su mantenimiento no suele ser complejo, por lo que los costos de fabricación y operación no son muy elevados. Estas características los hacen preferibles en diversas situaciones a otro tipo de cojinetes como los de bola o rodillo. La figura 2 muestra la configuración de un cojinete hidrodinámico radial.

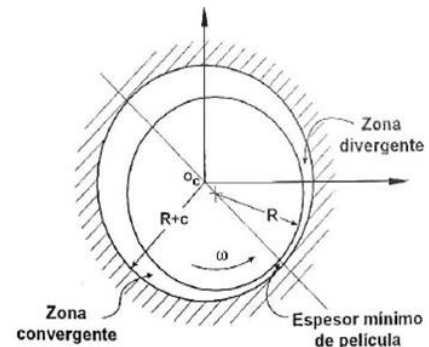


Figura 2. Cojinete hidrodinámico radial

La aplicación de la carga sobre el eje hace que éste se desplace y se genere una geometría en forma de cuña entre el muñón y el cojinete. Debe existir una holgura entre el cojinete y el eje de forma que se pueda generar la excentricidad. En esta configuración se reconoce una zona donde la holgura decrece (zona convergente) y una zona en la cual la holgura crece (zona divergente). En la zona convergente aparece una distribución de presiones positivas que aplica fuerza sobre el eje y equilibra la carga. La figura 3 muestra la distribución de presiones típicas en un cojinete radial.

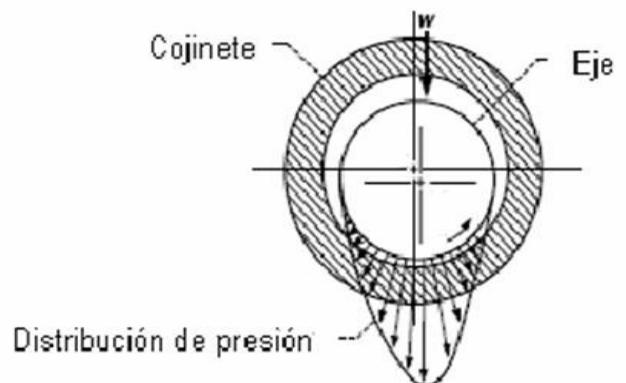


Figura 3. Distribución de presiones en un cojinete hidrodinámico radial. (Bhushan 2001)

En la dirección axial la presión es mínima en los extremos y va aumentando hasta tener un máximo en el centro del cojinete. En la dirección radial la presión es máxima acercándose al punto central del eje, lo que hace, que la posición de equilibrio se encuentre en un punto no alineado con la vertical (Bhushan, 2001).

La ecuación que describe el fenómeno de la lubricación hidrodinámica es la ecuación de Reynolds. Ésta se deduce al aplicar las ecuaciones de Navier-Stokes y la ecuación de continuidad. Para deducir esta ecuación se hace una serie de suposiciones respecto al comportamiento del flujo en el cojinete (Müller-Karger 2004). La ecuación de Reynolds relaciona el espesor cambiante en el cojinete, la velocidad relativa entre las superficies, la viscosidad del fluido y la distribución de presiones. La ecuación de Reynolds para un flujo compresible, isoviscoso y Newtoniano, en un cojinete isotérmico, se puede expresar en forma adimensionalizada como lo indica la Ecuación 1 (Di Liscia, 2007):

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left( \bar{h}^3 \bar{P} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} \right) + \left( \frac{D}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left( \bar{h}^3 \bar{P} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{z}} \right) = \Lambda \frac{\partial (\bar{h} \bar{P})}{\partial \bar{t}} \quad (1)$$

Basándose en las variables adimensionales de la Ecuación 2 (Di Liscia 2007):

$$\bar{z} = \frac{z}{L/2}, \quad \bar{P} = \frac{P}{P_a}, \quad \bar{h} = \frac{h}{C}, \quad \bar{t} = \omega \cdot t$$

$$y \quad \Lambda = \frac{6\omega\mu}{P_a} \left( \frac{R}{C} \right)^2 \quad (2)$$

El espesor de la película de lubricante ( $h$ ) es función de la presión. Considerando que el fluido es compresible Heshmat (1982) indicó que para un cojinete cilíndrico el espesor puede expresarse adimensionalmente según la Ecuación 3 (Di Liscia, 2007):

$$\bar{h}_i = 1 - \bar{x} \cdot \cos \theta - \bar{y} \cdot \sin \theta + \alpha \cdot (\bar{P}_i - 1) \quad (3)$$

Donde  $\alpha$  se expresa como lo indica la Ecuación 4 (Di Liscia, 2007):

$$\alpha = \frac{\kappa \cdot P_0}{C}, \quad \alpha = \frac{2P_0 S}{CE} \left( \frac{1}{t_B} \right)^3 (1 - v^2) \quad (4)$$

Heshmat (1982) definió la constante  $\alpha$  como la constante de adaptabilidad del *bump foil*, esta variable es adimensional y depende de las propiedades del material y de las características geométricas del cojinete. Se puede apreciar que la ecuación de Reynolds es compleja, lo que obliga a los investigadores a realizar modelos numéricos elaborados para resolverla. Por esta razón el enfoque del estudio de los

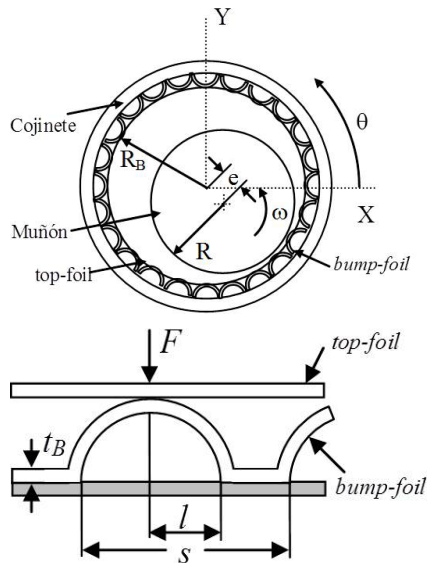
cojinetes de gas de láminas flexibles está orientado hacia el área experimental, para validar los modelos numéricos que se proponen con datos experimentales.

## COJINETES DE LÁMINAS FLEXIBLES

Los cojinetes de gas de láminas flexibles son cojinetes hidrodinámicos que utilizan gas como fluido de trabajo. La característica principal de este tipo de cojinetes es que cuentan con una estructura formada por elementos elásticos que le proporcionan movilidad a la superficie. La estructura elástica permite mantener el espesor de película de gas y la holgura ante cualquier crecimiento del eje a causa de la temperatura de funcionamiento y las fuerzas centrífugas. Diversas configuraciones han sido propuestas desde la aparición de este tipo de cojinetes para lograr la movilidad de la superficie. Por ejemplo, la figura 1 muestra un cojinete de láminas flexibles tipo *bump*. Este cojinete usa una delgada lámina ondulada de metal para formar el elemento elástico de la estructura y una delgada lámina de metal para formar la superficie del cojinete; cualquiera que sea la configuración para formar el cojinete de láminas flexibles, el principio de funcionamiento es el mismo.

La superficie del cojinete responde a la formación del perfil de presiones y a las cargas y deformaciones que puedan aparecer en el eje durante la operación. El eje se suele montar en el cojinete con una pequeña precompresión, por lo que no son necesarias estrictas tolerancias en su fabricación (Rubio & San Andrés 2004). La fricción entre las láminas permite la aparición de amortiguación en el sistema (Dellacorte & Valco, 2003). Al incrementar la velocidad del eje se tiende a incrementar el espesor de la película de gas y la capacidad de carga del cojinete aumenta linealmente con la velocidad, es decir, mientras mas rápido rota el eje mayor es la capacidad de carga del cojinete (Dellacorte *et al.*, 2000).

Suelen usarse recubrimientos sólidos en la superficie del cojinete como lubricantes (teflón®, etc.) para aminorar los efectos de desgaste ocasionados en los arranques y paradas, en los cuales la velocidad del eje no permite la formación de la película de aire y del perfil de presiones necesario para soportar la carga (Heshmat & Ku, 1994). Los materiales utilizados más frecuentemente para la fabricación de los cojinetes de láminas son Inconel® y diversos tipos de acero inoxidable; recientemente se están evaluando como posibles materiales aleaciones como Rene 41, MA-2000 y MA-956 para aplicaciones a muy alta temperatura (Laskowski & Dellacorte, 1996). Normalmente se describen las características geométricas del cojinete y del *bump foil* de la siguiente manera (figura 4) (Di Liscia, 2007):



**Figura 4.** Descripción de la geometría de un cojinete de láminas tipo bump

El *bump foil* y el *top foil* suelen ir soldados a la carcasa. La mayoría de los cojinetes de este tipo suelen montarse precargados (Rubio & San Andrés, 2004). Los cojinetes de láminas flexibles se suelen clasificar según su configuración y según su generación. Según su configuración se dividen en cojinetes tipo *bump-foil* y tipo *leaf-foil* (Dellacorte & Valco, 2003), también se dividen en: cojinetes de superficie continua y cojinetes de superficie segmentada (Bhushan, 2001). Los cojinetes tipo *bump* son de superficie continua y los tipo *leaf* son de superficie segmentada. Según la configuración del elemento elástico, se suelen dividir los cojinetes según su generación (Dellacorte & Valco, 2003). Los cojinetes de primera generación fueron desarrollados en la década de los setenta y fueron aplicados en turbomaquinaria de baja carga (Dellacorte *et al.*, 2000). Estos cojinetes tienen una estructura elástica relativamente simple. En la década de 1980 aparecieron nuevos diseños conocidos como segunda generación, los cuales cuentan con una estructura elástica más compleja y presentan una capacidad de carga cercana al doble de los de primera generación (Dellacorte & Valco, 2000). En la década de 1990 mejoras en el diseño de la estructura elástica y en los modelos analíticos, condujeron a la aparición de cojinetes de tercera generación (Dellacorte & Valco, 2000) cuya estructura elástica es mucho más compleja y presentan una capacidad de carga del doble de los de segunda generación (Dellacorte & Valco, 2003).

## CONSIDERACIONES

Para simular el comportamiento estructural del cojinete de láminas flexibles tipo *bump* se estableció un modelo

utilizando el software MSC Nastran®. Este software permite el análisis estructural mediante el método de elementos finitos. El modelo fue aplicado a un cojinete de características y comportamiento conocido con el fin de establecer parámetros comparativos de diseño. A partir del conocimiento de las características de un cojinete construido, se buscó relacionar y comprender sus parámetros de funcionamiento para luego aplicarlos al diseño de un nuevo cojinete. El modelo permite el cálculo de la resistencia estructural de las partes que componen el cojinete.

Se desea señalar que se realizó una comparación estructural debido a las pocas herramientas analíticas disponibles para el abordaje del problema. Como parte de la línea de investigación que se lleva a cabo en el Laboratorio de Dinámicas de Máquinas, se están desarrollando procedimientos numéricos para la solución de la ecuación de Reynolds, considerando la flexibilidad de la superficie y la geometría del *bump*. Esto permitirá relacionar de manera más confiable parámetros rotodinámicos con el diseño del cojinete. Los modelos que se presentan para el cálculo de resistencia en el *bump foil* y en el *top foil*, podrán seguirse utilizando, una vez que se decida, la geometría del *bump*, al resolver las ecuaciones. Como se señaló en la introducción, este trabajo hace especial hincapié en proponer el proceso de fabricación de los elementos del cojinete una vez que los principales parámetros geométricos estén definidos.

El cojinete se diseñó para ser utilizado y probado en el banco de pruebas del laboratorio de dinámica de máquinas. Dicho equipo apoya su funcionamiento en un banco de cojinetes magnéticos y permite la caracterización dinámica del cojinete, es decir, obtener la rigidez y amortiguación equivalentes del sistema formado por la película de gas, el *bump* y el eje. Una mejor descripción del banco de pruebas es proporcionada por Bellabarba (2004). Para efectos de este trabajo, los parámetros principales del banco a tomar en consideración son el diámetro del eje, el diámetro máximo externo del cojinete a ser evaluado, la capacidad de carga y su velocidad de operación. Estos parámetros se describen en la tabla 1, que se muestra a continuación:

**Tabla 1.** Características del banco de pruebas de cojinetes magnéticos

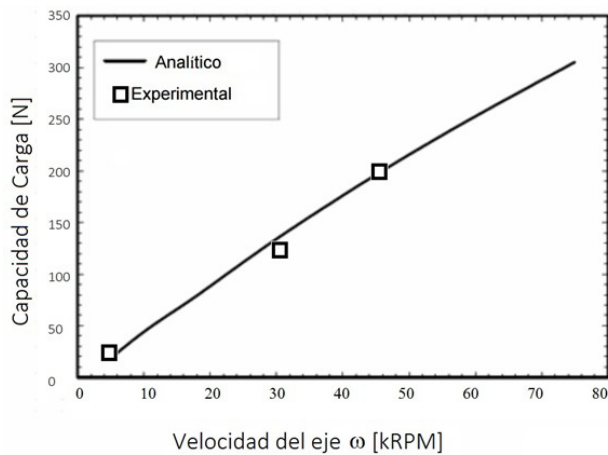
Parámetro	Medida
Diámetro del eje.	28,4785mm
Diámetro máximo externo del cojinete.	44,00mm
Máxima carga dinámica.	76 N
Velocidad del eje.	12.000RPM

Rubio y San Andrés (2004) describen la geometría y el comportamiento de un cojinete de láminas flexibles tipo *bump*. Las características de este cojinete se muestran en la tabla 2.

**Tabla 2.** Características del Cojinete descrito por San Andrés y Rubio (2004)

Parámetro	Medida
Radio interno ( $R$ )	19,05mm
Longitud axial del cojinete ( $L$ )	38,1mm
Holgura radial ( $c$ )	$50 \times 10^{-3}$ mm
Espesor del <i>top foil</i> . ( $t$ )	0,1016mm
Espesor del <i>bump foil</i> ( $t$ )	0,1016mm
Paso del <i>bump foil</i> ( $s$ )	4,572mm
Longitud del <i>bump</i> ( $l$ )	4,064mm
Altura del <i>bump</i> ( $h$ )	0,381mm
Módulo de Poisson ( $\nu$ )	0,29
Módulo de Young ( $E$ )	$21,37 \times 10^{10}$ Pa

En lo que resta del presente trabajo, se hará referencia a este cojinete como: cojinete de parámetros conocidos (CPC). La figura 5 muestra la relación experimental entre velocidad y capacidad de carga para este cojinete (Peng & Khonsari, 2004).



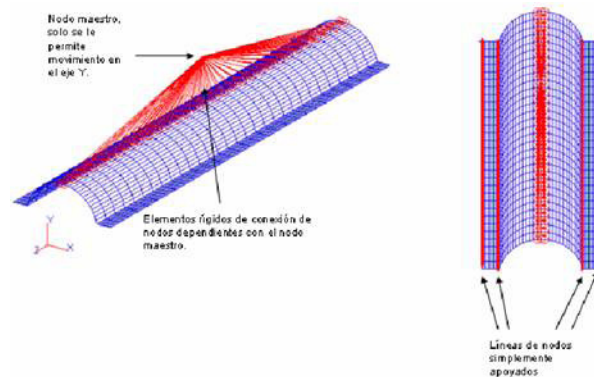
**Figura 5.** Capacidad de carga Vs. Velocidad del eje para el CPC

## MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

El modelo de la estructura del cojinete se dividió en dos partes. Primero se realizó el estudio del *bump* por separado, del cual se puede obtener su rigidez. En segundo lugar se relacionó la rigidez del *bump* con el *top foil* y con la carga a la cual está sometido el cojinete. De ambos estudios se pudo evaluar el comportamiento del cojinete en su totalidad,

obteniendo resultados como la deformación máxima, esfuerzos en el *bump foil* y en el *top foil* (De Stefano, 2007).

Se realizó un modelo del *bump* por separado despreciando la relación que hay entre *bumps* y los efectos de la fricción. Aunque esto afecta de manera significativa la rigidez calculada, ésta se puede utilizar para el diseño (a falta de un análisis más riguroso) y para el cálculo de la resistencia del *bump*. La figura 6 muestra el modelo utilizado.



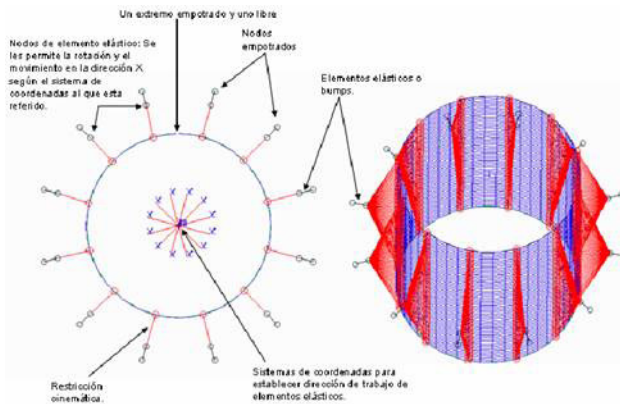
**Figura 6.** Modelo del bump

Se observa la vinculación usada para la simulación. El *bump* está simplemente apoyado a lo largo de cuatro líneas de contacto. Se definió un nodo, llamado nodo maestro y se aplicó un desplazamiento controlado en la dirección  $y$ . Este nodo está vinculado al extremo superior del *bump* mediante una serie de restricciones cinemáticas; esto simula el hecho de que el *bump* se deforma de manera constante a lo largo de toda su dirección axial, aunque dista un poco de la situación de carga real en la cual, la presión va decreciendo desde el centro del cojinete hacia fuera.

Utilizando este modelo se realizó un estudio paramétrico del *bump* para determinar cómo una variable determinada afecta su rigidez total. Para ello se utilizó el CPC (tabla 2) y se realizaron gráficas de Fuerza vs. Desplazamiento del nodo maestro, variando uno de los parámetros y dejando el resto constante. Estas gráficas son una información valiosa a la hora de diseñar el cojinete y permiten saber en qué grado afecta una determinada variable geométrica en la rigidez total del *bump*.

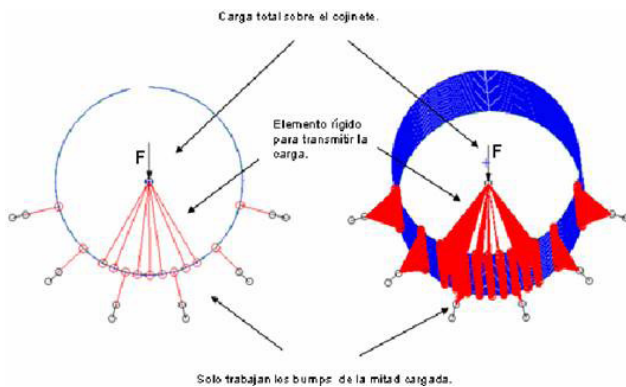
El modelo utilizado para estudiar la deformación y la rigidez del *top foil* se muestra en la figura 7. El *top foil* se vincula empotrado en un extremo, dejando libre el otro; el *bump* se simula mediante la conexión de un elemento elástico a un nodo maestro el cual está unido a su vez con el *top foil* a través de una restricción cinemática o elemento totalmente rígido. Al nodo maestro de cada *bump* sólo se le permite el movimiento a lo largo de su línea de acción

(previamente establecida referenciándolo a su respectivo sistema de coordenadas) y la rotación.



**Figura 7.** Modelo del cojinete tipo bump

Para establecer una variable comparativa entre el CPC y el cojinete a diseñar, se utilizó el modelo de elementos finitos. La carga fue aplicada a un nodo maestro unido mediante restricciones cinemáticas a la superficie del cojinete. Al nodo maestro sólo se le permite el desplazamiento en el eje (figura 8).



**Figura 8.** Modelo para establecer la rigidez del cojinete

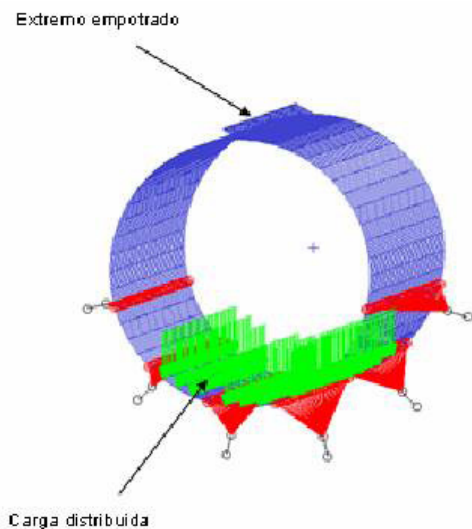
La base comparativa que se usó entre el CPC y el cojinete a diseñar, fue la rigidez total del cojinete. La figura 5 muestra que el CPC tiene una capacidad de carga cerca de 50N a los 12.000RPM por lo que funcionaría en el banco de pruebas de cojinetes magnéticos. Se procedió de forma tal, que el cojinete a diseñar presentara una rigidez entre 20 % y 30 % menor que el CPC, para así garantizar su funcionamiento en el banco de pruebas mencionado.

Este método de diseño, busca la manera de comparar la rigidez total de los cojinetes para que se garantice el funcionamiento del cojinete a diseñar. Esto es simplemente una primera aproximación para el diseño de un prototipo de cojinete y las limitaciones de este modelo son evidentes: en primer lugar, se están despreciando las condiciones de

diseño rotodinámico para una aplicación específica y en segundo lugar, se está considerando que el perfil de presión se forma independientemente de la velocidad de giro. Sin embargo, el método permite el diseño basado en parámetros estructurales y es lógico pensar que mientras menor sea la velocidad de giro del eje, menor debe ser la rigidez del bump para permitir la formación del perfil de presiones necesario para sostener el eje.

## CÁLCULO DE FALLA ESTÁTICA Y FATIGA

El cálculo de falla por carga estática y fatiga fue realizado con el modelo de elementos finitos descrito. Se utilizó el software MSC Nastran para determinar los esfuerzos y la vida útil de los elementos constitutivos del cojinete respectivamente (De Stefano, 2007). La carga fue distribuida de manera uniforme entre los nodos de un cuarto del área del cojinete y la geometría de la unión fue incorporada al modelo (figura 9). Se evaluaron cuatro situaciones de carga según la ubicación de ésta con respecto al cojinete (figura 10). Se utilizó como carga de diseño una fuerza de 100N. El bump fue cargado dividiendo la carga de 100N entre el número de bumps en contacto con un cuarto de la superficie del cojinete.



**Figura 9.** Carga distribuida en un cuarto de la superficie del cojinete

En cada situación se utilizó el criterio de Von Mises (Goncalves, 1999) para calcular los factores de seguridad de diseño y establecer la confiabilidad de la geometría y materiales planteados. El comportamiento a fatiga fue calculado utilizando el procedimiento de esfuerzo-vida (Norton, 1999). Se utilizó el valor del esfuerzo de Von Mises previamente calculado y se estableció un estado de esfuerzos fluctuantes desde cero hasta su valor específico; el estado de esfuerzos fue tratado como un caso de esfuerzos

de flexión. Los factores de maximización de esfuerzos y los procedimientos para el cálculo de los factores de seguridad a fatiga fueron tomados de Norton (1999).

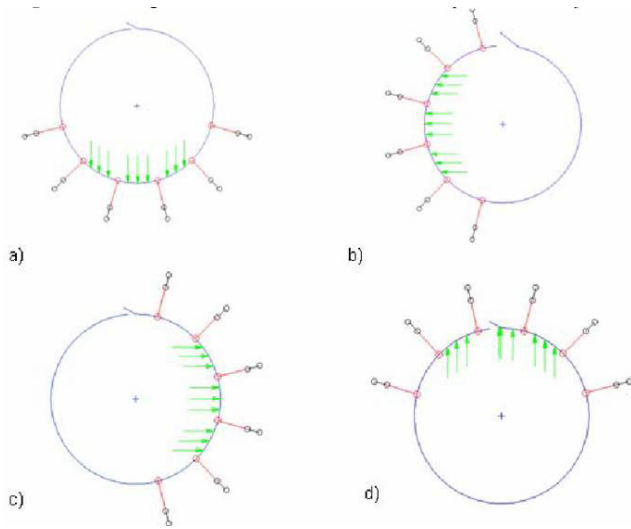


Figura 10. Orientaciones de carga. a) caso I; b) caso II; c) caso III; d) caso IV

## DISEÑO DEL COJINETE

En los resultados del estudio paramétrico del *bump* los desplazamientos varían entre 0 y 0,1mm, según valores frecuentes de la sumatoria de la excentricidad y el espesor mínimo de película de gas (Peng & Khonsari, 2004). Todos los parámetros son mantenidos en su valor nominal (tabla 2), excepto el espesor de la lámina ( $t$ ), su altura ( $h$ ) y su longitud ( $l$ ), como se indica en las figuras 11, 12 y 13, respectivamente.

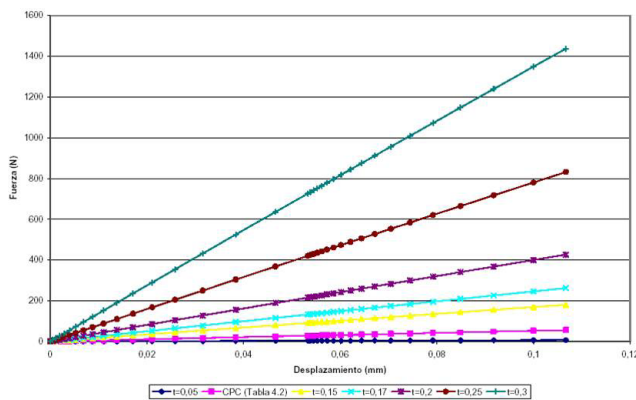


Figura 11. Análisis paramétrico del *bump* variando el espesor  $t$

Las gráficas muestran como la variación de  $h$  afecta muy poco la rigidez del *bump* en comparación con el efecto de la longitud del arco  $l$  y el espesor de lámina  $t$ . Para materiales con módulo de Young alrededor de 200GPa un espesor de lámina de 0,2mm, requeriría una fuerza muy alta sobre el

*bump* para poder lograr el desplazamiento deseado; por lo que los valores del espesor de lámina deben ser inferiores a 0,2mm. Las figuras 14, 15 y 16 muestran la variación de la rigidez del *bump* en función del espesor  $t$ , la altura  $h$  y la longit, considerando el resto de los parámetros con el valor del CPC (tabla 2).

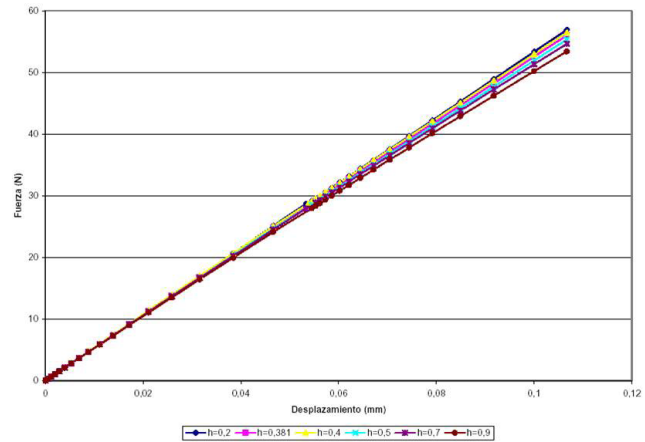


Figura 12. Análisis paramétrico del *bump* variando la altura  $h$

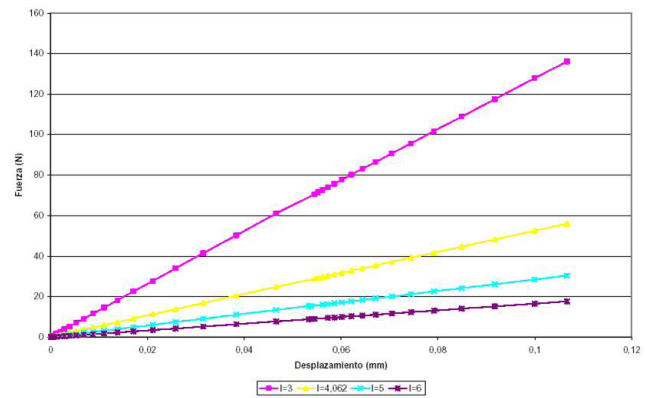


Figura 13. Análisis paramétrico del *bump* variando la longitud  $l$

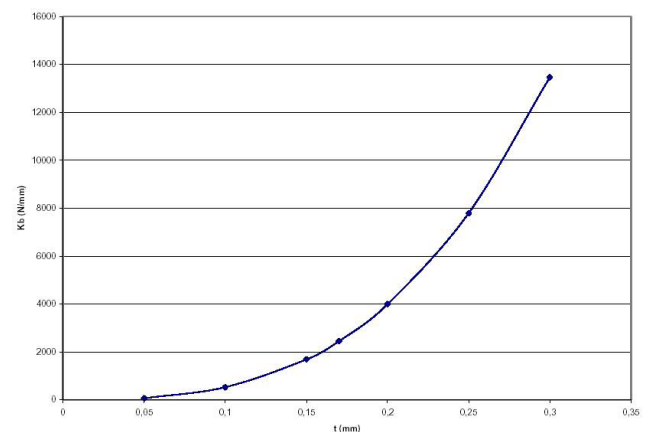


Figura 14. Rigidez del *bump* vs.  $t$



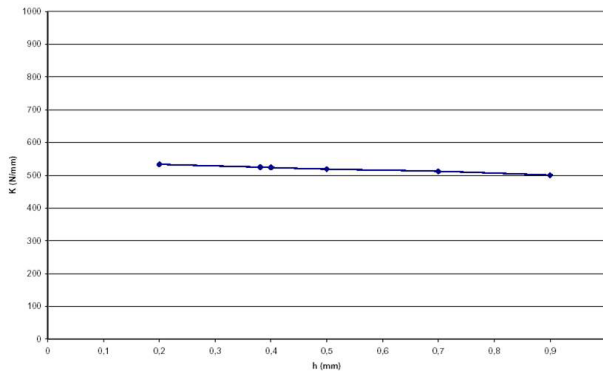


Figura 15. Rigidez del bump vs.  $h$

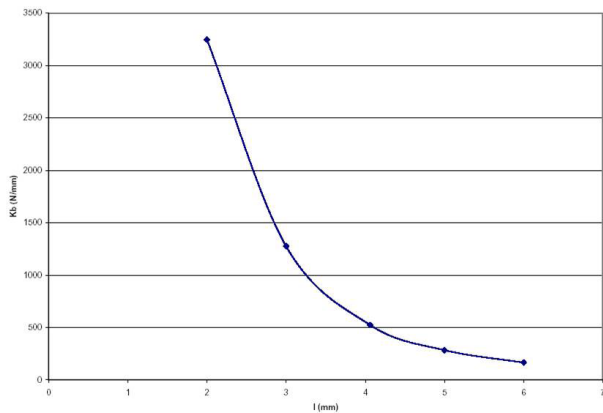


Figura 16. Rigidez del bump vs.  $l$

El análisis muestra que la rigidez del *bump* del CPC es 510N/mm. Las gráficas sirven para establecer valores convenientes para los 31 parámetros geométricos del *bump* a la hora de diseñar un cojinete de láminas. Valores muy pequeños de  $l$  darán como resultado una alta rigidez y, por consecuencia, poco desplazamiento de la superficie del cojinete. El efecto de  $h$  sobre la rigidez total del *bump* es menos significativo. Despreciando el efecto de  $h$  se puede obtener una gráfica que relacione los parámetros geométricos del cojinete con su rigidez total de tal forma que contenga toda la información para el diseño del *bump*, esto se muestra en la figura 17.

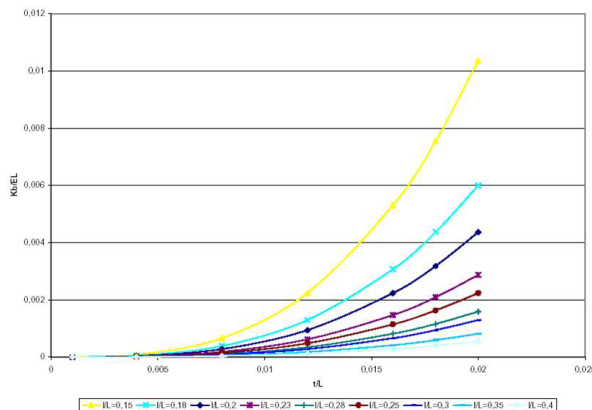


Figura 17. Análisis paramétrico del bump  $K_b/EL$  en función de  $t/l$

Al aplicar el modelo de elementos finitos descrito en el cojinete de parámetros conocido (usando elementos cuadriláteros bidimensionales), se obtuvo una rigidez de 2600N/mm. Rubio y San Andrés (2004) obtuvieron datos experimentales para el desplazamiento del un eje cargado estáticamente sobre el CPC. La figura 18 muestra los resultados experimentales junto a los resultados obtenidos con el modelo propuesto.

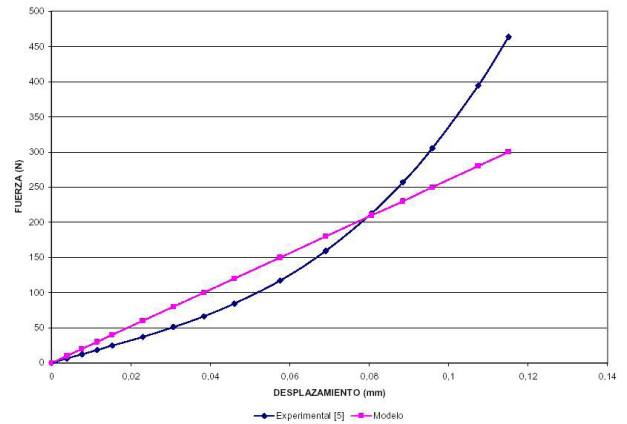


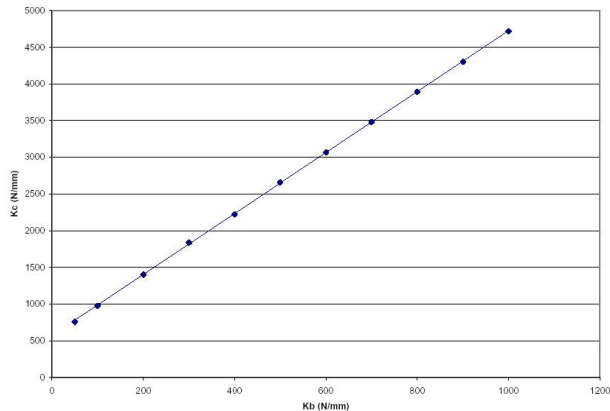
Figura 18. Resultados del modelo propuesto. Curva experimental tomada de Rubio & San Andrés (2004)

El estudio experimental demuestra el comportamiento no lineal de la relación entre la fuerza y el desplazamiento del eje, reflejando variaciones de rigidez que pueden ir de los 1700N/mm hasta los 2900N/mm, con fuerzas entre 10N y 230N (Rubio & San Andrés, 2004). El resultado del modelo presenta un comportamiento lineal que se desvía del comportamiento experimental. Este hecho se debe a que el modelo no considera la influencia de la fricción entre los *bumps* y la carcasa y entre los *bumps* y el *top foil*. Para valores de cargas muy altas, el modelo dista significativamente del resultado experimental porque la fricción involucrada y la influencia de la interacción entre *bumps*, llega a ser muy alta. También es importante considerar que para altas cargas los *bumps* pueden trabajar fuera del rango elástico, situación que no es considerada en el modelo. Sin embargo, el comportamiento del modelo se acerca lo suficiente como para ser usado en un primer prototipo y para obtener valores aproximados de la rigidez estructural del cojinete. La figura 19 muestra como varía la rigidez del CPC (tabla 2) al variar la rigidez del *bump*.

## SELECCIÓN DEL MATERIAL

En la figura 17 se puede observar que la rigidez del cojinete es altamente dependiente del espesor de la lámina. La tabla 3 muestra las características de distintos materiales que cumplen con los requerimientos necesarios para ser candidatos de materiales a ser utilizados en cojinetes de

lámina flexible, todos disponibles dentro de los Estados Unidos. La tabla 3 muestra las configuraciones disponibles (Goodfellow, 2006).



**Figura 19.** Variación de la rigidez del CPC (tabla 2) en función de la rigidez del bump

**Tabla 3.** Materiales candidatos para ser utilizados en el diseño

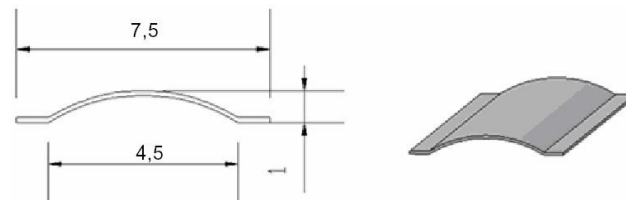
Material	ACERO INOX. AISI 316 Recocida	ACERO INOX. AISI 347 Recocida	INCONEL® 600. Propiedades a 22 °C
Esfuerzo Último[MPa]	580	655	580
Esfuerzo de Fluencia[MPa]	290	275	290
Módulo de Young[GPa]	193	195	214
Módulo De Poisson	0,29	0,27	0,324
Reducción de Área [%]	50	50	68
Configuración [mm <sup>3</sup> ]	0,125x150x150	0,1x150x150	0,1x150x150

### SELECCIÓN DE LA GEOMETRÍA

La rigidez total del cojinete depende de la rigidez de los *bumps*, del paso de los *bumps* y del espesor del *top foil*. Por lo tanto, para lograr la rigidez establecida como parámetro de diseño, se propusieron varios *bumps* y varios pasos dentro de lo permitido por la geometría. En todo momento se usó como diámetro del cojinete el del eje del banco de pruebas de cojinetes magnéticos, esto es justificable por la condición de movilidad de la superficie. El ancho del cojinete fue fijado de forma arbitraria en 30mm. La altura del *bump* fue fijada en 1mm, ya que, como se vio anteriormente este parámetro poco influye en la rigidez total.

Se seleccionó como espesor de trabajo 0,125mm. La figura

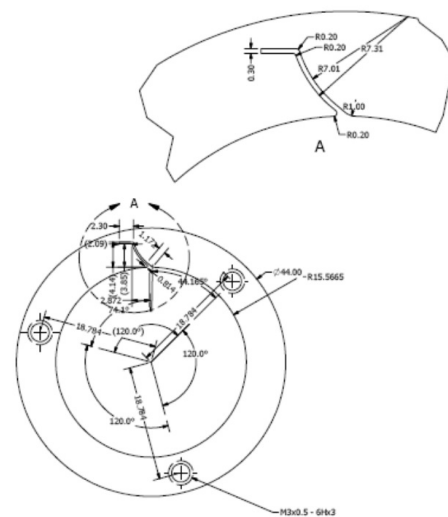
20 muestra la selección final del *bump* y del paso. Este *bump* presenta una rigidez de 400N/mm. Con esta configuración se obtiene una rigidez de 2096,21N/mm, aproximadamente un 20% menos que la rigidez del CPC.



**Figura 20.** Variación de la rigidez del CPC (tabla 2) en función de la rigidez del bump

La geometría de la unión fue construida para asegurar un contacto entre las láminas y la carcasa, de manera de asegurar el apoyo y el roce en todo momento. Se incorporó al doblé de ambas láminas una especie de pestaña para asegurar la sujeción entre éstas y la carcasa. La ranura tiene un espesor de 0.3mm para asegurar un ajuste de deslizamiento H7/g6 (ajuste ISO) (Luzadder & Duff, 1994), considerando la tolerancia de espesor de la lámina que es suministrada por el fabricante y tiene un valor de ± 10% del espesor de la misma.

La geometría de la carcasa se muestra en la figura 21, en donde se puede observar con detalle la ranura con su curvatura seleccionada. Se observa también la incorporación de tres orificios roscados separados 120 grados entre sí para incorporar las cubiertas que evitan el movimiento en la dirección axial.



**Figura 21.** Geometría definitiva de la carcasa (medidas en mm)

La longitud total de carcasa se estableció en 30,5mm, 0,5mm más que la longitud del *top foil* y del *bump foil*,

para facilitar el apriete de las cubiertas. En la figura se puede observar como los bordes de salida de la ranura son redondeados para evitar la concentración de esfuerzos en las láminas y la posible falla a fatiga. El diámetro interno de la carcasa, depende de la altura del *bump*, el diámetro externo es de 44mm, lo que permite que el cojinete sea evaluado en el banco de pruebas.

La figura 22 muestra la geometría final del *bump foil*. Se pueden observar un total de 15 *bumps* con un paso de 7,50mm, la longitud axial es de 30mm.

La figura 23 muestra la geometría del *top foil*, en ella se puede observar como el radio interno corresponde exactamente al diámetro del eje. Al doblar de la lámina se le incorporó un asentamiento para el extremo libre.

La figura 24 muestra el ensamble del cojinete propuesto. La longitud inicial que deben tener las láminas antes del proceso de doblado se determinó con el uso del programa de diseño Autodesk Inventor; la longitud de la lámina para el *bump* debe ser de 109,452mm y la del *top foil* debe ser de 98,227mm.

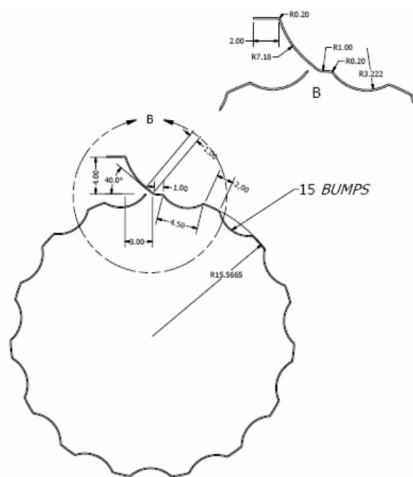


Figura 22. Geometría del bump foil (medidas en mm)

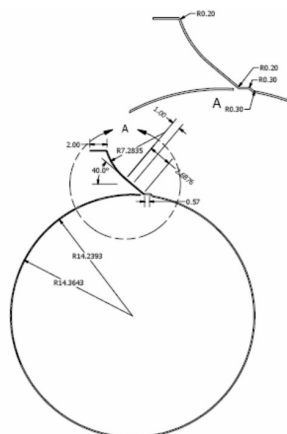


Figura 23. Geometría del bump foil (medidas en mm)

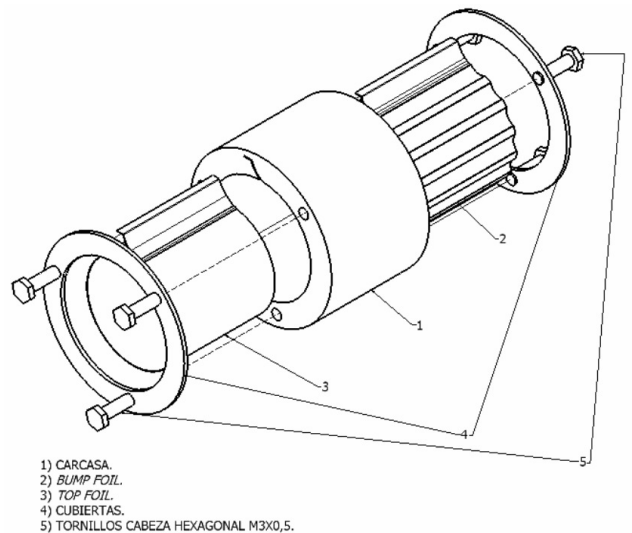


Figura 24. Ensamblaje del cojinete

### CÁLCULO DE RESISTENCIA A LA FATIGA

La figura 25 muestra los resultados del esfuerzo de Von Misen en el *top foil* en las cuatro situaciones de carga. Para el caso I, II y III (figura 10) el valor del esfuerzo es prácticamente el mismo. La situación más crítica se presenta en el caso IV cuando la carga se aplica sobre la dirección de la unión.

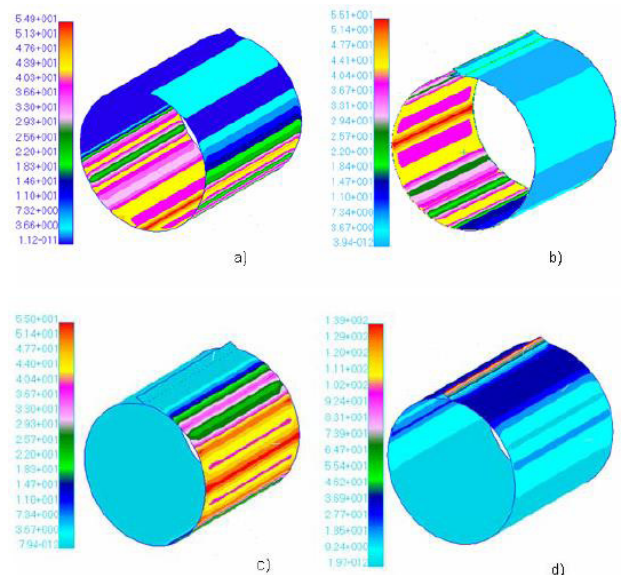
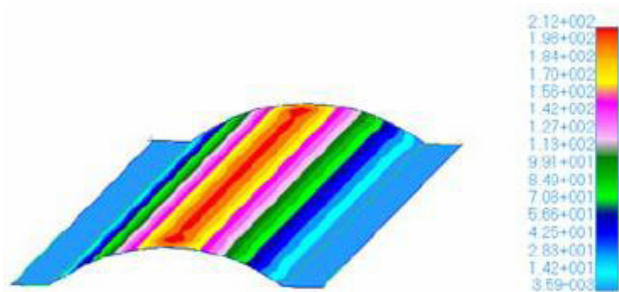


Figura 25. Análisis de falla en el top foil. (esfuerzo en  $N/mm^2$ ). a) caso I; b) caso II; c) caso III; d) caso IV

La figura 26 muestra los esfuerzos en el *bump*. La tabla 4 muestra el valor de los esfuerzos máximos y de los factores de seguridad en cada situación de carga. En ningún momento se alcanza el esfuerzo admisible.



**Figura 26.** Análisis de falla en el bump.  
(esfuerzo en  $N/mm^2$ )

**Tabla 4.** Esfuerzos y factores de seguridad

	<b>Esfuerzo (<math>N/mm^2</math>)</b>	<b>Factor de seguridad</b>
<i>Bump</i>	212	1,368
<i>Top foil</i>	55	5,273
<b>Unión</b>	139	2,086

La tabla 5 muestra los resultados del análisis de fatiga aplicado a los puntos principales del cojinete. En ninguno de los casos se presenta la falla por fatiga.

**Tabla 5.** Resistencia a la fatiga

	Se [ $N/mm^2$ ]	Se corr. [ $N/mm^2$ ]	Esfuerzo medio [ $N/mm^2$ ]	Esfuerzo Alternante [ $N/mm^2$ ]	Factor de seguridad a la fatiga
<i>Bump</i>	290	212	106	106	1,634
<i>Top foil</i>	290	212	27,5	27,5	7,3
<b>Unión</b>	290	172	69,5	69,5	2,17

## CONCLUSIONES

El modelo propuesto para el *bump* permite obtener la influencia de las propiedades del material y las características geométricas sobre su rigidez.

La altura del *bump* ( $h$ ) tiene poca influencia en la rigidez. Se pudo obtener una relación adimensional entre las Principales Variables.

Son claras las limitaciones del modelo al despreciar el efecto de la fricción, los valores obtenidos pueden ser significativamente distintos a los valores reales.

Los valores son válidos siempre que los esfuerzos en el *bump* permanezcan dentro del rango lineal de la curva esfuerzo-deformación.

El modelo propuesto para el cojinete permite una primera aproximación a su comportamiento estructural y una

valoración de los esfuerzos.

Utilizar el modelo como base comparativa permitió obtener el diseño del cojinete.

El sistema de sujeción entre las láminas y la carcasa evita la soldadura y permite el cambio de *bump* y del *top foil* en caso de falla o mantenimiento.

Este trabajo representa un primer diseño de cojinete de láminas tipo *bump* y deberá ser mejorado y evaluado, una vez este sea fabricado.

La construcción de un primer prototipo requerirá la modificación de los diseños iniciales al mostrar variables y factores que pudieron no ser considerados.

La construcción del cojinete y su funcionamiento, permitirá mejorar y validar los modelos planteados en el diseño.

Deben desarrollarse estudios analíticos del comportamiento del *bump* y de los mecanismos de amortiguación y elasticidad del cojinete.

## REFERENCIAS

- AGRAWAL, G. L. (2006). Foil Air/Gas Bearing Technology- An Overview. Asme International Gas Turbine & Air Engine Congress, Florida, 97-Gt-347.
- BARNETT, M. A., SILVER, A. (1970). Application Of Air Bearings To High-Speed Turbomachinery. Sae Paper, 700720, 1970.
- BELLABARBA, E. (2004). Banco De Pruebas Para Determinar Constantes Dinámicas En Cojinetes Hidrodinámicos. Tesis De Maestría En Ingeniería Mecánica (Universidad Simón Bolívar, Caracas).
- BHUSHAN, B. (2001). Modern Tribology Handbook. CRC Press, Boca Raton.
- BLOK, H., VAN ROSSUM, J. J. (1953). The Foil Bearing – A New Departure in Hydrodynamic Lubrication. Lubrication Engineering, Vol. 9, No 12, 316-320.
- CAPSTONE TURBINE CORPORATION. (2006). Technology Tour. Recuperado el 01-05-2006 en el sitio web: <http://www.capstoneturbine.com>
- DE STEFANO, A. (2007). Diseño Conceptual de un Cojinete de Aire de Láminas Flexibles. Tesis de pregrado.

- (Universidad Simón Bolívar, Caracas).
- DELLACORTE, C., LUKASZEWICS, V., VALCO, M. J., RADIL, K. C., HESHMAT, H. (2000). Performance and Durability of High Temperature Foil Air Bearings for Oil-Free Turbomachinery. *Tribology transactions*, Vol. 43, No 4, 774-780.
- DELLACORTE, C., VALCO, M. J. (2000). Load Capacity Estimation of Foil Air Journal Bearings for Oil-Free Turbomachinery Applications. NASA/TM-2000-209782.
- DELLACORTE, C., VALCO, M. J. (2003). Oil-Free Turbomachinery Technology for Regional Jet, Rotorcraft and Supersonic Business Jet Propulsion Engines. American Institute of Aeronautics and Astronautics, ISABE-2003-1182.
- DI LISCIA, M. H. (2007). Cálculo de Coeficientes Dinámicos en Cojinetes de Película de Gas. Tesis de Maestría. (Universidad Simón Bolívar, Caracas).
- GONCALVES, R. (1999). Introducción al Análisis de Esfuerzos. Editado por Goncalves Raul, Primera Edición.
- HESHMAT, H. (1991). A Feasibility Study on the Use of Foil Bearing in Cryogenic Turbopumps. AIAA/SAE/ASME 27th Joint Propulsion Conference, 91-2103.
- HESHMAT, H., KU, C. (1994). Structural Stiffness and Coulomb Damping in Compliant Foil Journal Bearing: Parametric Studies. *Tribology Transactions*, Vol. 37, No 3, 455-462.
- HESHMAT, H., SHAPIRO, W., GRAY, S. (1982). Development of Foil Journal Bearing for High Load Capacity and High Speed Whirl Stability. *ASME Journal of Lubrication Technology*, Vol. 104, 149-146.
- LASKOWSKI, J. A., DELLACORTE, C. (1996). Friction and Wear Characteristics of Candidate Foil Bearing Materials from 25 °C to 800 °C. NASA/TM-107082, 1996.
- MA, J. T. S. (1965). An Investigation of Self-Acting Foil Bearings. *ASME Journal of Basic Engineering*, 837-846.
- MÜLLER-KARGER, C. (2004). Teoría de Lubricación. Guía de Clases del Curso de Cojinetes Hidrodinámicos. (Universidad Simón Bolívar, Caracas).
- NORTON, R. L. (1999). Diseño de Máquinas. Prentice Hall, Primera Edición.
- PENG, J., CARPINO, M. (1993). Calculation of Stiffness and Damping Coefficient for Elastically Supported Gas Foil Bearings. *ASME Journal of Tribology*, Vol. 115, 20-27.
- PENG, Z.-C., KHONSARI, M. M. (2004). Hydrodynamic Analysis of Compliant Foil Bearings with Compressible Air Flow. *ASME Journal of Tribology*, Vol. 126, 542-546.
- RADIL, K., HOWARD, S., DYKAS, B. (2002). The Role of Radial Clearance on the Performance of Foil Air Bearings. *Tribology Transactions*, Vol. 45, No 4, 485-490.
- RUBIO, D., SAN ANDRÉS, L. (2004). *Bump-Type Foil Bearings Structural Stiffness: Experiments and Predictions*. ASME Turbo Expo, Viena, GT2004-53611.
- GOODFELLOW. (2006). Lista de Hojas Standard. Recuperado el 04-02-2006 en el sitio web: <http://www.goodfellow.com>
- LUZADDER, W. J., DUFF, J. M. (1994). Fundamentos de Dibujo en Ingeniería. Prentice Hall, Undécima Edición.