

CONSTRUCCIÓN DE UN COJINETE DE GAS DE LÁMINAS FLEXIBLES

MARCELO DI LISCIA, VALENTINA DÍAZ, ANDRÉS DE STEFANO, RAFAEL RUIZ

Laboratorio de Dinámica de Máquinas. Departamento de Mecánica. Universidad Simón Bolívar,
email: sdm-laba@usb.ve

Recibido: noviembre 2013

Recibido en forma final revisado: mayo 2014

RESUMEN

Desde los años sesenta los cojinetes de gas de láminas flexibles o Gas Foil Bearings (GFB) han sido utilizados en turbomáquinas de alto desempeño gracias a que permiten operar a altas velocidades con baja fricción, no utilizar sellos y el lubricante permanece estable en un amplio rango de temperaturas. Los GFB consisten en una lámina delgada (*top-foil*) apoyada sobre láminas corrugadas (*bump foils*) que actúan como resortes ante las cargas a las que está sometido el cojinete. En este trabajo se presenta la construcción de unos dispositivos capaces de conformar los elementos que componen un GFB tipo *bump*. Se realizó una revisión del diseño conceptual para complementarlo de acuerdo con los procesos de fabricación y materiales disponibles. Se procedió a la construcción y montaje de las piezas y se realizaron las primeras pruebas. Una de las ventajas de la propuesta es que los dispositivos construidos permiten fabricar distintas geometrías de las láminas *top-foil* y *bump-foil*. Los cojinetes obtenidos a partir de este prototipo servirán para conducir diversas mediciones y pruebas en el Laboratorio de Dinámica de Máquinas de la Universidad Simón Bolívar.

Palabras clave: Tribología, Lubricación, Cojinete de láminas, Construcción, Mecanizado.

GAS FOIL BEARING CONSTRUCTION

ABSTRACT

Since the seventies, Gas Foil Bearings (GFB) have been used in high performance turbomachinery, as they allow operating at high speeds with low friction, no seals are needed and the lubricant remains stable under a wide temperature range. GFB consist of a thin foil (*top-foil*) supported over corrugated foils (*bump foils*) that act as springs to the loads to which the bearing is subjected. This work presents the construction of the devices capable of forming the elements of a GFB bump-type. A conceptual design review was performed in order to complement it according to the manufacturing processes and materials available. Afterwards, the construction and assembly of parts were performed and the first tests were conducted. One of the advantages of the proposal is that the devices allow building different geometries for the top and bump-foils. The bearings obtained from this prototype will be used to perform various measurements and tests in the Machine Dynamics Laboratory.

Keywords: Tribology, Lubrication, Foil bearing, Manufacturing, Machining.

INTRODUCCIÓN

Últimamente el estudio de cojinetes de láminas flexibles ha despertado gran interés debido a las numerosas ventajas que ofrecen en comparación con otros cojinetes, específicamente en su aplicación en turbomáquinas de alto desempeño. Esta tecnología nació en los años sesenta en los sistemas de aclimatación de aviones comerciales. Hoy en día se utiliza en turbocompresores, equipos auxiliares de potencia, microturbinas (Ruiz, 2007), helicópteros, misiles, tanques, entre otros, soportando condiciones ambientales severas y altas temperaturas (Valco & DellaCorte, 2002). La carga del rotor es soportada por una película de gas que es

generada gracias a un perfil hidrodinámico y los elementos mecánicos del cojinete permiten alcanzar velocidades de operación de hasta 700.000rpm (De Stefano, 2007) sin que haya contacto con el eje, salvo en el arranque y parada (Valco & DellaCorte, 2002). La particularidad mencionada, permite aumentar la eficiencia de la máquina rotativa considerablemente. Además, poseen la ventaja de poder utilizar el fluido de trabajo del equipo como lubricante, especialmente si es compresible y de baja viscosidad como el aire. De esta forma se elimina todo el equipamiento auxiliar que requiere la lubricación con aceite, ofreciendo una tecnología más limpia y libre de mantenimiento.

A diferencia de los cojinetes de aire flexibles, los cojinetes rígidos de gas exigen ínfimas holguras entre el cojinete y el eje del rotor. Esto se debe a la poca viscosidad y baja capacidad de carga del aire (Ruiz *et al.* 2006). La holgura ocasiona problemas de operatividad al momento de la puesta en marcha del equipo. Además acarrea altos costos de fabricación debido a las estrictas tolerancias. Los inconvenientes mencionados se pueden evitar utilizando cojinetes deformables, ya que reducen considerablemente el costo y complejidad en su proceso de fabricación. Pueden además ser utilizados en altas temperaturas puesto que la dilatación térmica es compensada por la deformación de las láminas flexibles. Las características flexibles del cojinete proporcionan además amortiguación al sistema, disipando energía a través del roce.

Para el diseño y dimensionamiento de equipos rotativos, es necesario conocer con anterioridad los coeficientes dinámicos de rigidez y amortiguación de los cojinetes. Debido a la estrecha relación rotor/soporte, conocer los coeficientes resulta necesario para predecir el comportamiento dinámico del equipo. Estos coeficientes pueden ser obtenidos numérica y/o experimentalmente.

Numéricamente debe resolverse una ecuación diferencial acoplada a un modelo de deformación de las láminas flexibles. Varios autores han propuesto una resolución al problema. Peng & Khonsari (2004) acoplaron una ecuación que relaciona la deformación de las láminas debido a la presión hidrodinámica a un esquema de elementos finitos. Rubio & San Andrés (2005), también modelaron cojinetes *bump foil*. Hoy en día se siguen buscando modelos, dada la alta complejidad de las ecuaciones, que acierten en predecir el comportamiento de dichos dispositivos.

Se pueden mencionar varias investigaciones experimentales entre las que destacan la de Rubio & San Andrés (2004), quienes realizaron pruebas con 4 cojinetes tipo foil de segunda generación midiendo su capacidad de carga en condiciones estáticas bajo distintas tolerancias radiales que causaban distintas precargas. Los resultados obtenidos mostraron que variando la orientación de la carga en relación con el punto de soldadura las cargas estáticas producen deflexiones no lineales. Las pruebas de carga y descarga mostraron adicionalmente que existe histéresis en los *bumps* (protuberancias que funcionan como elemento elástico), pues al ser cargado y descargado se observa que la fuerza de roce restringe el movimiento del *top foil* (lámina superficial) y el *bump foil* (lámina corrugada). Los resultados también mostraron que el cojinete con mayor precarga presentaba mayor rigidez y evidenciaba menos el efecto de la soldadura. Luego, Rubio & San

Andrés (2005) propusieron un modelo analítico para el cálculo de la rigidez equivalente en un cojinete tipo *bump* y lo compararon con resultados experimentales. De los resultados obtenidos se pudo observar que la amortiguación es altamente dependiente de la frecuencia, mientras que la rigidez estructural no. La rigidez estructural aumenta cuando las cargas dinámicas disminuyen, dependiendo de la orientación de la carga relativa al punto de soldadura. Realizar una comparación de los resultados obtenidos con un modelo numérico con los resultados obtenidos experimentalmente, permite corroborar la validez del modelo. Esto es importante para predecir el comportamiento del cojinete antes de su construcción y evitar la necesidad de probar con distintos cojinetes, lo cual reduce costos y tiempo.

De lo antes mencionado, surge la necesidad de construir un cojinete de láminas flexibles para montarlo en el banco de pruebas y obtener datos experimentales. Mas allá de construir solamente el prototipo, se plantea que el diseño sea a través de un proceso de fabricación versátil que permita construir otros cojinetes de láminas flexibles, variando sus dimensiones, con pocas o pequeñas modificaciones en el proceso.

El Laboratorio de Dinámica de Máquinas de la Universidad Simón Bolívar tiene un relevante interés en el desarrollo de conocimientos en el área de tribología y lubricación. Se inició construyendo un banco de pruebas para medir coeficientes dinámicos en cojinetes de aire (Bellabarba *et al.* 2005) y se desarrollaron y verificaron modelos numéricos para cojinetes de aire rígidos (Ruiz *et al.* 2006). El siguiente paso es el estudio de cojinetes deformables. En el año 2007 se realizó un trabajo de grado en el que se propone un diseño conceptual de un cojinete de láminas flexibles tipo *bump* para ser ensayado en el banco de pruebas (De Stefano, 2007).

Los métodos y las tecnologías utilizadas en la fabricación de cojinetes de aire, son desconocidos en su mayoría y se hace difícil la adquisición de cojinetes para propósitos académicos. Esto junto a la complejidad de la teoría que rodea a este tipo de cojinetes, ha obstaculizado que se avance en la validación de los modelos numéricos que intentan predecir su comportamiento.

Este trabajo muestra las dificultades que se presentaron en la fabricación de un dispositivo que permite doblar o conformar las láminas de un cojinete tipo *bump* diseñado para ser utilizado en el banco de pruebas basándose en un diseño conceptual del proceso de construcción de los componentes del cojinete elaborado previamente. Para

finalizar el diseño previo, se elaboró el diseño en detalle de los dispositivos, un estudio de los procesos de fabricación, la selección de los materiales y la realización de las modificaciones que fueron necesarias para poder fabricar los dispositivos y, por último, el cojinete.

ABREVIATURAS, SÍMBOLOS Y TERMINOLOGÍA

c	Holgura radial
C	Holgura nominal
D	Diámetro del eje
e	Excentricidad
E	Módulo de Young
F	Carga de prueba sobre el cojinete
h	Altura del <i>bump</i>
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
θ	Coordenada angular
μ	Viscosidad dinámica
ν	Módulo de Poisson
ϕ	Ángulo de ubicación de la carga
ω	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 aire segmentado
<i>top foil</i>	Lámina superficial
WEDM	Electroerosión por Hilo (Wire Electrical Discharge Machining)

COJINETES DE LÁMINAS FLEXIBLES

Los cojinetes hidrodinámicos son elementos mecánicos y su función primordial es soportar la carga del rotor de un equipo rotativo. Los cojinetes hidrodinámicos emplean una película de fluido cuya presión hidrodinámica permite soportar la carga a la que es sometido (Müller-Karger,

2004). Además de soportar las altas cargas, los cojinetes hidrodinámicos reducen el desgaste del eje, reducen las pérdidas de energía y la fricción, añaden amortiguación y ayudan a controlar las vibraciones.

El perfil de presión que genera el fluido del cojinete genera la fuerza que permite sustentarlo. Este fenómeno hidrodinámico ocurre debido a que el giro del eje empuja el fluido a una zona convergente y luego sale a una divergente. El fluido es bombeado y obligado a pasar de una zona de área transversal mayor a una zona de área transversal menor generando un perfil de presiones para balancear el fluido que entra con el fluido que sale. La Figura 1 ilustra este fenómeno.

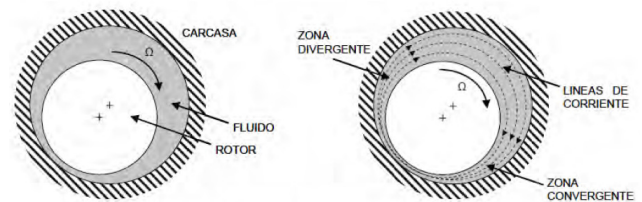


Figura 1. Esquemización de las zonas convergentes y divergentes en un sistema cojinete-eje (Ruiz, 2007)

Los cojinetes de láminas flexibles son un tipo de cojinete hidrodinámico que trabaja con un fluido compresible, como por ejemplo el aire. Estos cojinetes están compuestos por una serie de láminas delgadas deformables que están unidas a una carcasa. Las láminas se deforman bajo el efecto de la presión que se genera por la película de fluido una vez que se ha alcanzado la velocidad de despegue (lift off speed) y la película es capaz de soportar la carga del eje.

La capacidad de carga de estos cojinetes se incrementa con la velocidad de giro. Al aumentar la velocidad, la deflexión radial de las láminas flexibles aumenta, incrementando la rigidez estructural a causa de un efecto de endurecimiento (Rubio & San Andrés, 2004). Lo anterior representa una ventaja de los cojinetes de gas flexibles en comparación con otros soportes, como lo son los rodamientos rígidos. El comportamiento de estos últimos demuestra ser opuesto, ya que su capacidad de carga disminuye con el incremento de la velocidad de operación.

Los cojinetes de láminas flexibles se instalan con ajuste deslizante. La configuración de las láminas permite que estando en operación la presión hidrodinámica deforme la lámina generando la película de aire. El espesor de la película de lubricante es función de la presión. El efecto de dilatación por efecto del incremento de temperatura es compensado por la deflexión de las láminas. La elasticidad

de las láminas añade amortiguación, la cual proviene de la disipación de energía por medio de la histéresis producida en las láminas (Agrawal, 1997) y el roce generado en los puntos de contacto y esto disminuye las inestabilidades del sistema.

Los cojinetes flexibles de gas comenzaron a desarrollarse como respuesta a los problemas que presentaban sus antepasados, los cojinetes hidrodinámicos de superficie rígida -estrictas tolerancias de fabricación, rotores esbeltos para minimizar las cargas por las fuerzas centrífugas (Agrawal, 1997), la necesidad de agregar amortiguación al sistema debido a que las altas velocidades de operación propician inestabilidades- y otros inconvenientes que impedían el avance tecnológico de las turbomáquinas de alto desempeño.

El primer cojinete de láminas flexibles de aire que se produjo fue utilizado para las máquina de ciclo de aire ACM (*Air Cycle Machines*) del sistema de control ambiental ECS (*Enviromental Control System*) en un DC-10 de *Boeing* en 1969 (Agrawal, 1997). Gracias a la confiabilidad y el éxito de esta nueva tecnología, paulatinamente se fue extendiendo su uso, desplazando a los rodamientos rígidos de bola en aviones militares y comerciales. La tecnología libre de aceite se ha utilizado en tanques, motores de turbinas a gas, compresores para celdas de combustible (compresores libre de aceite), helicópteros y para motores de propulsión tipo turbofán (Valco & DellaCorte, 2002). Se han utilizado en aplicaciones en las cuales el fluido empleado es diferente al aire, como freón en la máquina de ciclo de vapor en un avión de la Naval Norteamericana.

Se puede clasificar a los cojinetes de láminas flexibles por dos criterios: según su configuración y según su generación. Según su configuración se tienen los cojinetes tipo *bump foil* y los tipo *leaf foil*. Los *bump foil* consisten en una lámina delgada específicamente corrugada para conferirle flexibilidad (esta lámina se denomina *bump foil*), la cual está cubierta por otra lámina que es lisa y es la que entra en contacto con el eje en los momentos de arranque y parada. Los *leaf foil* poseen una superficie dividida similar a pétalos fabricados de delgadas láminas soldadas en un extremo a una carcasa. La Figura 2 ilustra los cojinetes mencionados.

Por generación la clasificación está definida por el aumento de la capacidad de carga gracias a mejoras en la configuración del elemento elástico. Cada generación soporta aproximadamente el doble de carga que la generación anterior. La diferencia entre cada generación se resume principalmente en una distribución más compleja de los *bumps* como por ejemplo pasos variables y/o colocar

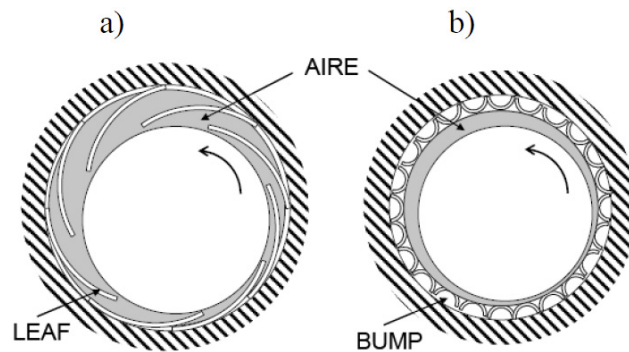


Figura 2. Cojinetes de láminas flexibles según su configuración: a) leaf foil b) bump foil (Ruiz, 2007)

divisiones en la dirección axial (Valco & DellaCorte, 2002). Los cojinetes de láminas flexibles poseen numerosas ventajas, esto ha hecho que se proyecten como el futuro en la tribología y la base del desarrollo de tecnologías libres de aceite. Esto se debe a que para aplicaciones de alto desempeño superan muchas de las limitaciones que presentan los otros tipos de soportes para aplicaciones de alto desempeño. Cabe destacar que los cojinetes de gas de láminas flexibles siguen siendo una tecnología emergente a pesar de sus numerosas aplicaciones. Restan por hacer numerosas investigaciones sobre el diseño y los procesos de fabricación para optimizarlos e implementarlos en más aplicaciones.

La geometría del cojinete está definida por una serie de parámetros que son importantes para su diseño. La Figura 3 muestra estas características.

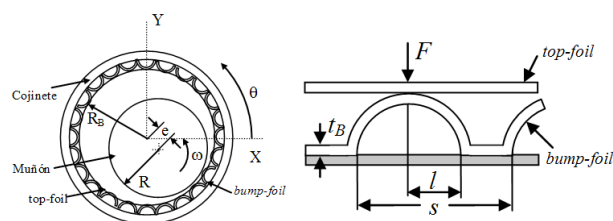


Figura 3. Descripción de la geometría de un cojinete de láminas tipo bump (Di Liscia, 2007)

ECUACIÓN DE REYNOLDS

La ecuación de Reynolds fue deducida por el Profesor Osbourne Reynolds y proporciona una noción de la complejidad del modelo y la dificultad de predecir el comportamiento de los cojinetes de láminas flexibles. Es la resolución de la ecuación clásica de dinámica de los fluidos de Navier-Stokes acoplada con la ecuación de continuidad. En el modelo el flujo de lubricante está restringido entre dos superficies que llevan una velocidad relativa determinada.

Para el caso de los cojinetes de gas se debe añadir a la ecuación de Reynolds una ecuación que describa el comportamiento de la película de lubricante bajo las condiciones del perfil de presión generado en el cojinete. La ecuación de Reynolds para un flujo compresible, isoviscoso y Newtoniano en un cojinete isotérmico puede expresarse en su forma adimensional como la Ecuación (1) (Di Liscia, 2007):

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

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

$$\bar{z} = \frac{z}{L/2}, \quad \bar{P} = \frac{P}{P_a}, \quad \bar{h} = \frac{h}{C}, \quad \bar{t} = \omega \cdot t, \quad \Lambda = \frac{6\omega\mu}{P_a} \left(\frac{R}{C} \right)^2 \quad (2)$$

El espesor de la película (h) es función de la presión, considerando que el fluido es compresible. Según Heshmat *et al.* (1982) para un cojinete cilíndrico se puede expresar adimensionalmente como 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: α se expresa como en la Ecuación 4 (Di Liscia, 2007):

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

Heshmat *et al.* (1982) definieron la constante α como la constante de adaptabilidad del *bump foil*, es adimensional y depende de las características geométricas del cojinete y las propiedades del material. Como se puede apreciar, la ecuación de Reynolds es compleja, lo que obliga a los investigadores a realizar modelos numéricos elaborados para su resolución. Por esto el enfoque del estudio de los cojinetes de aire de láminas flexibles está orientado hacia el área experimental para tratar de validar los modelos numéricos propuestos.

BANCO DE PRUEBAS

Para el diseño del cojinete se consideraron las dimensiones y características del banco de pruebas con cojinetes magnéticos del Laboratorio de Dinámica de Máquinas (Figura 4). El banco fue construido para realizar mediciones de las respuestas de numerosos tipos de cojinete, y así obtener los valores experimentales de sus rigideces y amortiguaciones entre otros parámetros rotodinámicos. El banco permite independizar los movimientos de rotación y

traslación del eje. Bellabarba *et al.* (2005) describen con detalle el banco.

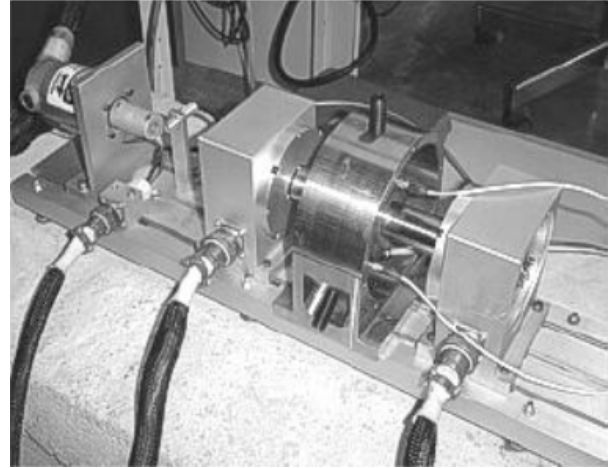


Figura 4. Banco de pruebas (Bellabarba *et al.* 2005)

El banco está compuesto principalmente por dos actuadores de cojinetes magnéticos, capaces de producir cualquier tipo de órbita sobre el rotor. Para efectos de este trabajo, los parámetros principales del banco que se va a tomar en consideración se describen en la Tabla 1:

Tabla 1. Especificaciones del banco de pruebas

Parámetro	Magnitud
Máxima frecuencia de operación	1kHz
Diámetro máximo externo del cojinete	44mm
Longitud del cojinete	30mm
Fuerza máxima	152N
Número de ejes de mov. caracterizados	2 (v. y h.)

DISEÑO CONCEPTUAL

La razón para realizar un diseño conceptual de un dispositivo para conformar las láminas de un cojinete deformable tiene sus orígenes en dos factores. El primero es la falta de recursos para adquirir un cojinete comercial para propósitos académicos y el segundo la falta de información disponible sobre los parámetros de diseño y procesos refabricación. El ensayo y prueba de cojinetes de láminas flexibles era el siguiente paso lógico en la línea de investigación de cojinetes de aire del Laboratorio de Dinámica de Máquinas, luego de comenzar con cojinetes rígidos de gas. El diseño preliminar del cojinete *bump foil* se basó en la configuración de los cojinetes de primera generación debido a que su fabricación es más sencilla. El diseño fue realizado por De Stefano (2007) partiendo de un cojinete de parámetros conocidos, objeto de una investigación de Rubio & San

Andrés (2004). El diseño consideró que el cojinete va a ser montado en el banco de pruebas del Laboratorio de Dinámica de Máquinas. Ciertas características geométricas y su capacidad de carga y rigidez fueron definidas por su configuración y condiciones de operación en el banco. La Tabla 2 muestra algunas de las características del banco de ensayo:

Tabla 2. Características geométricas y de operación del banco de pruebas

Parámetro	Magnitud
Diámetro del Eje	28,48mm
Diámetro máximo externo del cojinete	44mm
Máxima carga dinámica soportada	76N
Velocidad máxima de rotación	12.000rpm

De Stefano (2007) realizó dos modelos de elementos finitos, el primero fue un modelo del *bump* despreciando el roce y la relación entre los *bumps* y el segundo fue un modelo del *top foil* donde se modeló cada *bump* como un resorte independiente sobre el *top foil*. Esto se hizo con el propósito de obtener una primera aproximación de la rigidez, tanto del *bump* como del cojinete y luego realizar un análisis paramétrico del cojinete (De Stefano, 2007). Los resultados sirvieron para aproximar la rigidez del cojinete que se desea diseñar. El valor de la rigidez debe ser de 20% a un 30% inferior a la del cojinete de Rubio & San Andrés (2004) (50N a una velocidad de 12.000rpm). Al comparar los resultados de rigidez obtenidos en Rubio & San Andrés (2004) con el modelo, se observa que, a pesar de presentar una desviación notable con los experimentales, se consideran suficientemente cercanos para una primera estimación de rigidez.

En el estudio se analizó la altura y longitud del *bump* y el espesor de la lámina. Los resultados arrojaron que la altura del *bump* no afecta en mayor grado, mientras que la longitud del *bump* y el espesor de la lámina sí afectan la rigidez. Para establecer las dimensiones del *bump*, De Stefano (2007) se basó en los resultados del análisis paramétrico. Se estimó una rigidez equivalente de 2096,21N/mm para el cojinete diseñado, teniendo cada *bump* por separado una rigidez de 400N/mm. Sobre la base de esa información y las características del banco de pruebas, se determinó la longitud del *bump* y el espesor de la lámina. Se determinó arbitrariamente la altura del *bump* al igual que la longitud del cojinete debido a su poca incidencia en la rigidez. El diámetro interno es el diámetro del eje del banco de pruebas. Todas estas decisiones fueron tomadas considerando que los cojinetes flexibles no requieren de estrictas tolerancias en el diámetro interior (De Stefano, 2007). La Tabla 3 muestra

las especificaciones y la Figura 5 el esquema del *bump* del cojinete diseñado.

Tabla 3. Parámetros del cojinete diseñado

Parámetro y dimensiones	Magnitud
Diámetro interno [mm], Dc	28,48
Longitud axial del cojinete [mm], L	30
Número de <i>bumps</i> , N	15
Paso de los <i>bump</i> [mm], p	6,5
Longitud del <i>bump</i> [mm], 2l	4,5
Espesor de la lámina [mm], tb	0,125
Altura del <i>bump</i> [mm], hb	1
Módulo de Poisson, ν	0,29
Módulo de Young [Pa], E	21,4x1010
Peso estimado del cojinete [g]	330

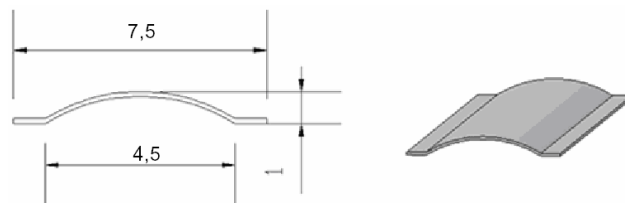


Figura 5. Geometría del *bump* del cojinete

De Stefano (2007) ideó una forma de sujeción de las láminas a la carcasa distinta a la usual. El *top foil* y *bump foil* poseen unas pestañas que son introducidas dentro de una ranura mecanizada en la carcasa. La forma usual de fijar las láminas es soldando éstas a la carcasa, pero esto es difícil de realizar en el proceso de fabricación y se desconoce el efecto que produce en las láminas (concentración de esfuerzos, cambio de las propiedades del material, entre otros). De esta forma alternativa se evita realizar la soldadura y permite reemplazar las láminas sin perjudicar su integridad y utilizar la misma carcasa para futuras configuraciones de *bump foil*. La idea es diseñar un cojinete que permita intercambiar las láminas por versatilidad y en el momento de adaptar un cojinete tipo *bump foil* a una máquina, el procedimiento iterativo de probar varias configuraciones (geometrías del *bump foil*) sería más sencillo y económico. La Figura 6 muestra la configuración de las láminas y la ranura en la carcasa. El ensamblaje incluye también tapas atornilladas que evitan el desplazamiento de las láminas en la dirección axial.

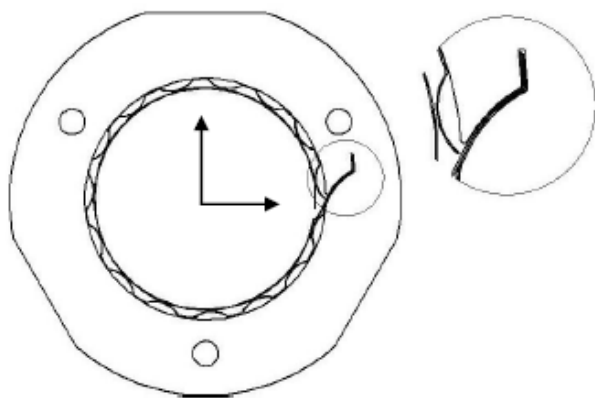


Figura 6. Detalle del sistema de sujeción entre las láminas y la carcasa (Díaz, 2010)

La ranura del cojinete tiene los bordes redondeados para evitar concentraciones de esfuerzos, debido a lo delgado de las láminas no se desea que ocurra falla por fatiga. La Figura 7 muestra el montaje de la carcasa, láminas y cubiertas.

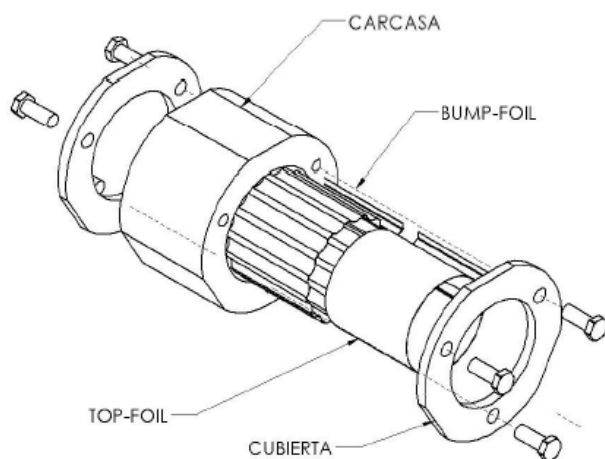


Figura 7. Montaje de las láminas bump foil y top foil dentro de la carcasa (Díaz, 2010)

DISPOSITIVO PARA FABRICAR EL BUMP FOIL

La fabricación de la lámina corrugada es la parte central del diseño. La geometría de los *bumps* debe ser la deseada para poder predecir correctamente el comportamiento. El dispositivo para conformar la lámina está basado en el concepto de calandra. Consta de dos matrices pseudo-cilíndricas que se acoplan a manera de engranajes (macho y hembra) y estampa la forma de los *bumps* (Figura 8). El dispositivo consta de un sujetador de lámina integrado a la matriz hembra que sirve de prensa para la lámina que se está corrugando imprimiendo la forma curva de la pestaña de sujeción. El dispositivo consta de dos partes. La superior donde está la rueda macho unida a una palanca o manilla que permite el movimiento gíatorio. Está acoplada

por tornillos y posee una serie de barras guías y separadoras cuya función es orientar las piezas. La parte inferior tiene un ensamblaje similar a la superior, exceptuando que la rueda es la hembra del conformador y tiene el sistema de sujeción de lámina antes mencionado. La Figura 9 muestra el dispositivo ensamblado.

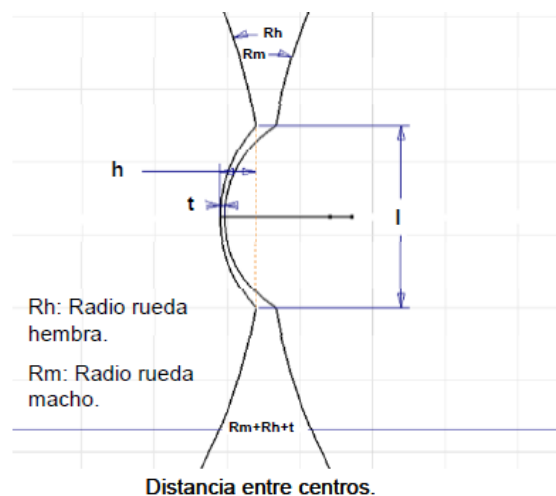


Figura 8. Base geométrica de construcción de ruedas para fabricar bump foil (De Stefano, 2007)

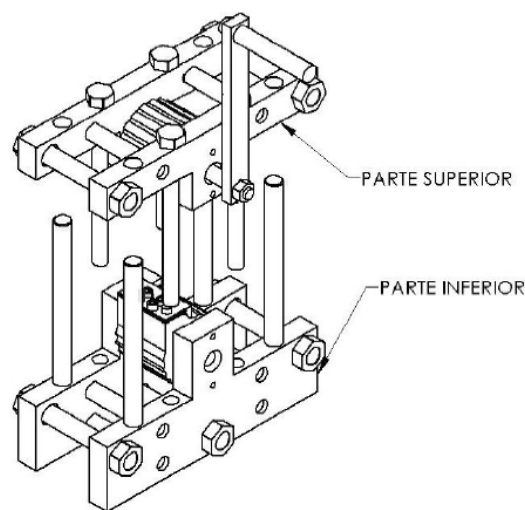


Figura 9. Ensamblaje de la conformadora de bumps

DISPOSITIVOS PARA FABRICAR EL TOP FOIL

El *top foil* es la lámina lisa que se apoya sobre el *bump foil* y entra en contacto con el eje en los ciclos de arranque y parada. Posee una pestaña que sirve de para su sujeción al cuerpo del cojinete. Para su fabricación se utilizan 2 dispositivos, uno es una prensa que estampa la pestaña de sujeción (Figura 10) y el segundo es la reproducción de una calandra fija (Figura 11) que le genera la curvatura a la lámina del *top foil* al diámetro deseado.

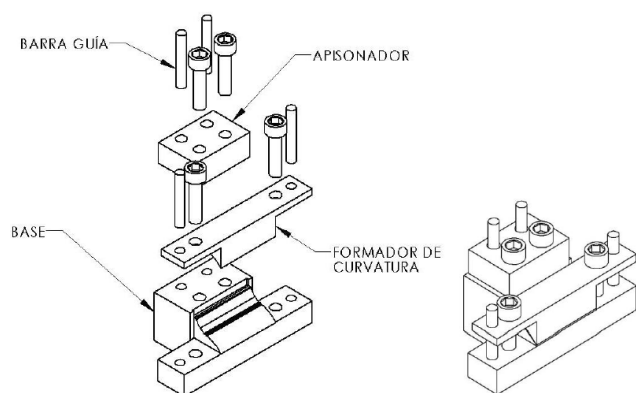


Figura 10. Estampador de la pestaña de sujeción

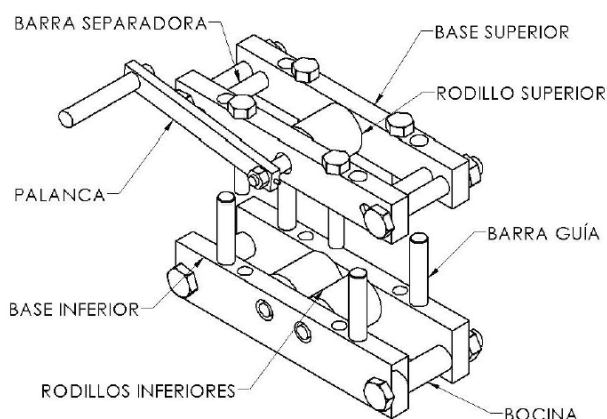


Figura 11. Calandra

La longitud de las láminas a partir de las que se fabrican el *top foil* y el *bump foil* deben ser de 98mm y 110mm, respectivamente.

DISEÑO DE DETALLE

El funcionamiento y ensamblaje de los dispositivos fue lo primero que se analizó. Es primordial siempre tener en consideración la configuración y dimensiones del banco de pruebas y cerciorarse de que el diseño se adapte.

Se hicieron modificaciones al diseño inicial sobre la base de los materiales disponibles y a la factibilidad de los procesos para su fabricación. La idea era que los elementos puedan elaborarse de la manera más sencilla y económica. Para efectos de este trabajo de utilizarán las siglas DO para referirse al diseño original y DA para el diseño actual (o definitivo).

Las dimensiones previstas para las barras guías y agujeros donde encajan, fueron modificadas debido a que las barras calibradas de acero inoxidable disponibles eran en medidas inglesas, 3/8" (9,525mm) y 3/16" (4,7625mm). Las Figuras 12 y 13 muestran las barras originales y las del diseño final. También se modificaron las dimensiones de las barras

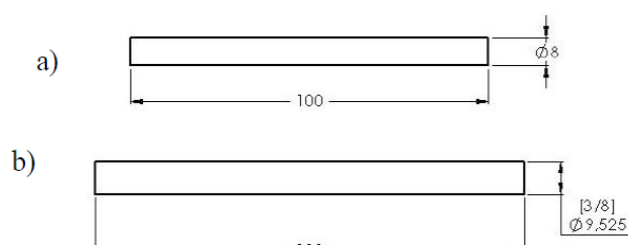


Figura 12. Barras guías de la conformadora de bumps: a) Diseño Original (DO), b) Diseño Actual (DA)

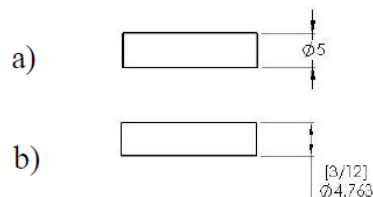


Figura 13. Barras guías del estampador de unión: a) DO, b) DA

separadoras y de las manillas, para que pudieran ser mecanizadas de la barra de 3/8" (9,525mm). En el DO poseían un diámetro exterior de 10mm, y la propuesta es que todas las piezas de dimensiones similares sean mecanizadas fácilmente de un solo tipo de barra. La Figura 14 muestra la modificación.

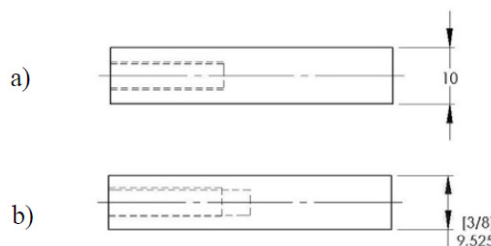


Figura 14. Manilla: a) DO, b) DA

Para las bases de la calandra y conformadora de *bumps* se partió de una pletina de 1/2" de espesor. Las dimensiones de las piezas mencionadas fueron modificadas de 10mm a 1/2" (12,7mm) como lo indica la Figura 15.

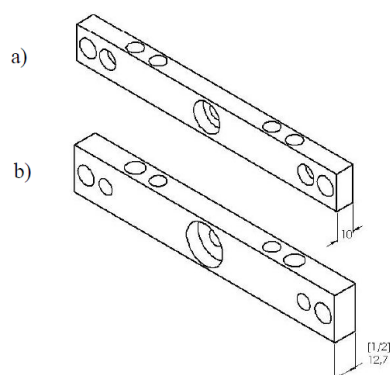


Figura 15. Modificación del espesor de la base superior de la calandra: a) DO, b) DA

El asiento de los rodamientos fue modificado, los del DO eran más pequeños en su diámetro interior y ancho, 16mm y 5mm respectivamente, y no se encontraban disponibles en el mercado. Los rodamientos del DA tienen un diámetro exterior de 22mm y un ancho de 7mm. Esto modificó las dimensiones en las bases del conformador de *bumps* y la calandra. Las Figuras 16, 17, 18, 19 y 20 muestran las modificaciones.

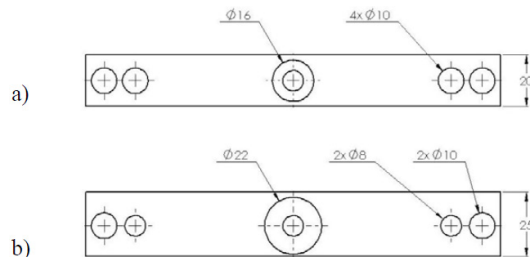


Figura 16. Modificación en la base superior de la calandra: a) DO, b) DA

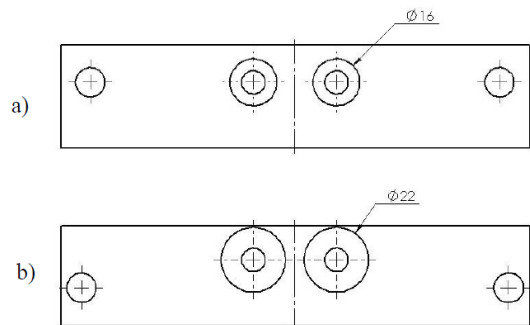


Figura 17. Modificaciones en la base inferior de la calandra: a) DO, b) DA

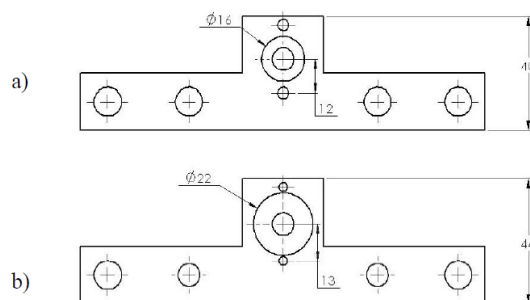


Figura 18. Modificaciones en la base superior del conformador de bumps: a) DO, b) DA

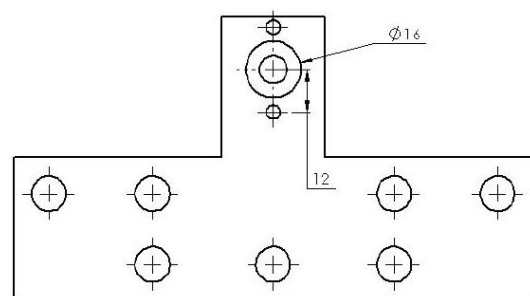


Figura 19. Modificaciones en la base inferior del conformador de bumps: DO

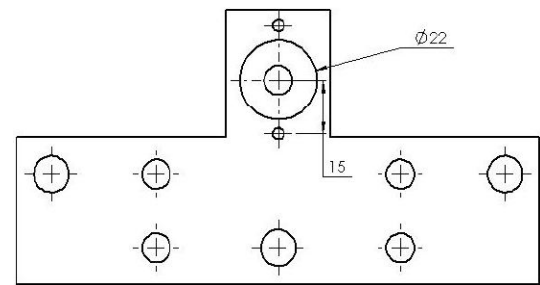


Figura 20. Modificaciones en la base inferior del conformador de bumps: DA

La carcasa fue modificada agregando tres lados planos. Estos lados planos son para colocar las celdas de carga del banco de pruebas. El ancho de los lados es de 16mm para coincidir con el ancho de la celda de carga con la que se realizarán las mediciones. El propósito de los lados planos es asegurar la posición exacta de las celdas. Se modificó adicionalmente la ubicación de la ranura de sujeción para de forma más práctica darle un ángulo entero respecto a un punto de referencia. En este caso se tomó un punto de colocación de celda de carga. La Figura 21 muestra estos cambios.

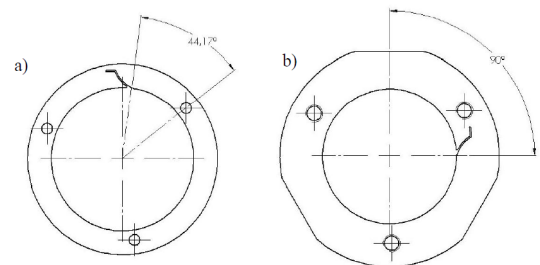


Figura 21. Carcasa del cojinete: a) DO, b) DA

El ensamblaje del estampador de unión también fue modificado, debido a lo difícil de realizar la fabricación del DO. La pieza contempla una ranura recta en la cual debe encajar otra pieza que inmoviliza la lámina (Figura 22). Esta ranura es imposible de mecanizar por medio de fresado, debido a sus esquinas rectas, así que se modificó convirtiendo esa pieza en dos piezas que se ensamblan y ajustan por medio de tornillos obteniendo una ranura rectangular (Figura 23).

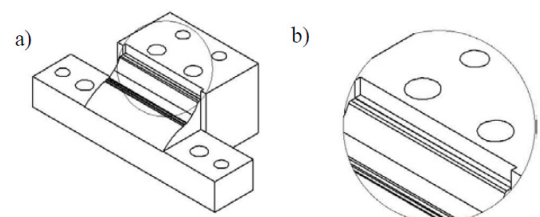


Figura 22. Pieza base estampador de unión DO: a) Pieza, b) Detalle

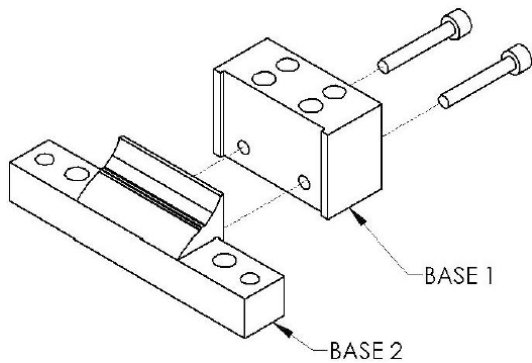


Figura 23. Pieza base estampador de unión DA

La rueda hembra también posee una ranura similar, por lo que modificó fabricando una pletina (denominada plantilla) con la forma de la ranura la cual se atornilla a la rueda hembra (Figura 24).

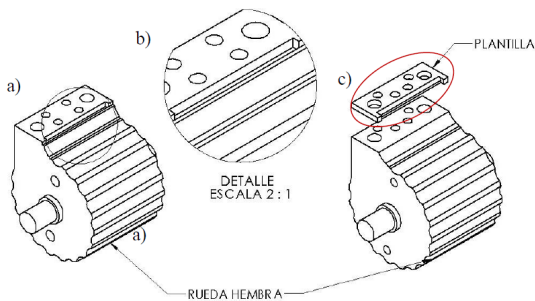


Figura 24. Hendidura de la rueda hembra: a) DO, b) Detalle DO, c) DA

Las piezas que tienen dimensiones muy pequeñas tienen inconvenientes para ser fabricadas, como piezas de 1mm de espesor, las cuales no se pueden mecanizar en la fresadora. Modificar el espesor de estas piezas para facilitar su fabricación causaría interferencia en el dispositivo, por lo que el apisonador de la lámina del cojinete se fabricó a partir de una pletina de 2mm de espesor. Esto significó incluir el conformado de láminas dentro de los procesos de fabricación. Se hicieron las modificaciones que se muestran en las Figuras 25 y 26. Hubo que reajustar las posiciones de los agujeros de la pletina al considerar el doblado de la misma. Al borde de la plantilla se le incorporó un chaflán para evitar interferencia con el doblez del sujetador (Figura 27).

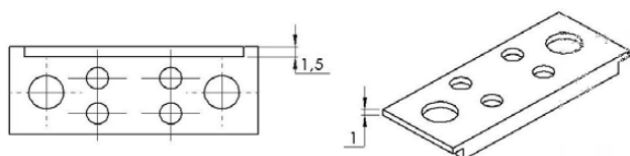


Figura 25. Sujetador de lámina rueda hembra DO

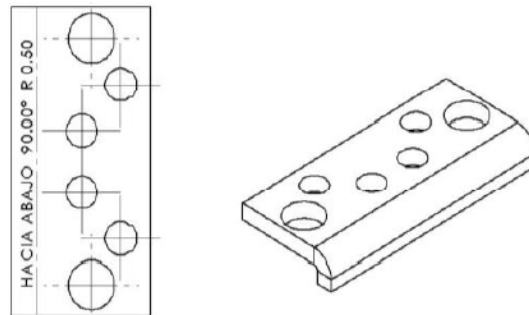


Figura 26. Sujetador de lámina rueda hembra DA

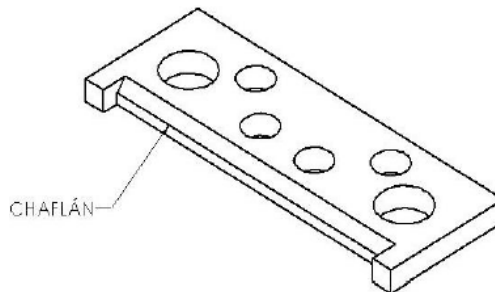


Figura 27. Plantilla DA

Se incrementó el espesor de otras piezas que debían ser mecanizadas por ser muy delgadas. Con el propósito de evitar la deformación al momento de sujetarla para su mecanizado, se aumentó el espesor de la pieza formador de curvatura de 1mm a 3mm (Figura 28) debido a que era el mínimo espesor permitido por el equipo de corte por electroerosión por hilo (WEDM) con la que se maquinó.

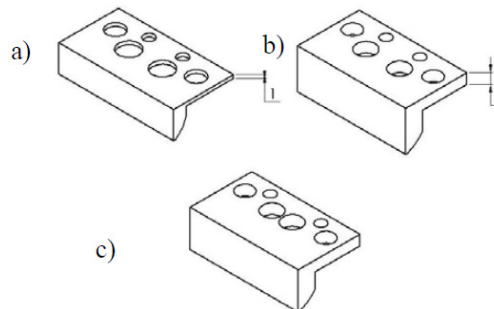


Figura 28. Formador de curvatura rueda hembra a) DO, b) Diseño Intermedio, c) DA

El espesor de 1mm de las cubiertas de los cojinetes también modificó a 3mm (Figura 28). Se mecanizaron cortándolas (tronzándolas) a partir de la carcasa ya mecanizada. Las manillas de la calandra y el conformador de *bumps* se modificaron de su diseño original por lo difícil de mecanizar un hueco de sección cuadrada en una pletina (Figura 29). Se decidió utilizar una unión roscada entre ambas piezas, mecanizando una rosca en el extremo del rodillo o rueda y luego apretar la manilla con una tuerca. La

Figura 30 muestra el ajuste de la manilla a la rueda macho del conformador de *bumps*, y de forma similar se ensambla a la calandra.

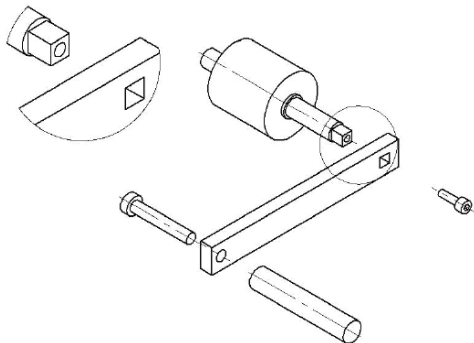


Figura 29. Unión de la manilla y palanca calandra DO

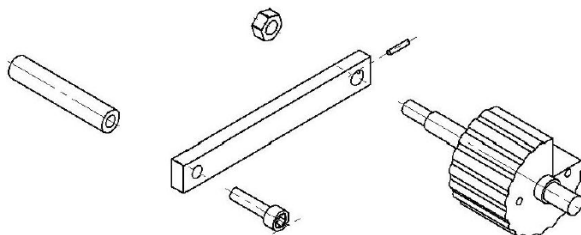


Figura 30. Unión de la manilla y palanca rueda macho DA

Para que no exista deslizamiento entre la palanca y mango del rodillo se agregó un prisionero de 2mm de diámetro. Debido a la dificultad de controlar con buena precisión la profundidad con el taladro o fresadora la profundidad (5mm) de los agujeros donde calzarían las barras separadoras, comprometiendo de esta manera el buen ensamblaje del dispositivo, las barras separadoras que originalmente eran lisas fueron modificadas. Se les realizó un cambio de sección en sus extremos, y estos calzan en unos agujeros pasantes. Fue más fácil mecanizar con precisión la longitud de las barras y su cambio de sección que el orificio de 5mm de profundidad. Las Figuras 31 y 32 muestran las vistas isométricas del DO y el DA, respectivamente, del ensamblaje de las bases del conformador de *bumps*.

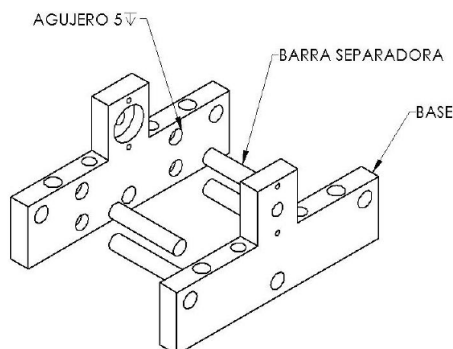


Figura 31. Vista isométrica de las bases del conformador de *bumps* con las barras separadoras DO

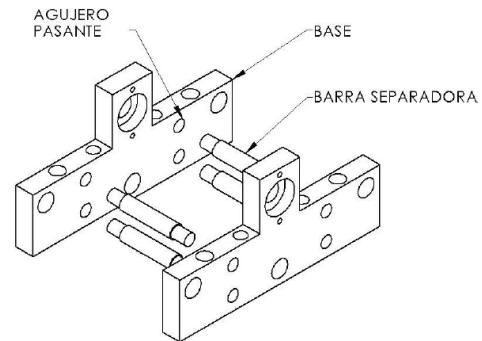


Figura 32. Vista isométrica de las bases del conformador de *bumps* con las barras separadoras DA

Para finalizar se seleccionaron los tornillos, considerando el ensamblaje de las piezas y la oferta en el mercado. Se elaboraron los planos para la fabricación de las piezas de los dispositivos. Los planos debían ser explícitos, con todas las medidas necesarias comprendidas, las tolerancias de fabricación y de ajustes de acuerdo con los recursos disponibles y de fácil lectura para los técnicos que manufacturaron las piezas.

El criterio de diseño especifica que el espesor de la lámina no puede ser superior a 0,2mm (De Stefano, 2007) y basado en se realizó la selección del material para su elaboración. Las opciones disponibles en el país tienen un espesor mínimo disponible es de 0,4mm, mientras que las opciones disponibles en el exterior se encuentran: acero inoxidable AISI 316, acero inoxidable AISI 317 e INCONEL® 600 de espesores variables y espesor mínimo 0,1mm. INCONEL® es el nombre comercial de una superaleación de níquel (Ni) y cromo (Cr) con valores particulares de su módulo de Young, esfuerzo último, dilatación térmica entre otros haciéndolo ideal para los cojinetes tipo *bump foil*. A pesar de su costo elevado en comparación a las otras opciones, por ser poca la cantidad a utilizar se adquirieron 2 láminas de 0,1mmx150mmx150mm.

Se utilizó aluminio AA2024, denominado comúnmente duraluminio, para las matrices del conformador de *bumps*. El duraluminio es una aleación de 4,4% cobre, 1,5% magnesio, 0,6% manganeso, que tiene alta resistencia mecánica, con una densidad menor a la del acero inoxidable. La carcasa del cojinete fue elaborada de una barra de acero inoxidable 304 de 2 ½" de diámetro al igual que los rodillos de la calandra. Las barras separadoras, barras guías y manillas fueron mecanizadas de una barra de acero inoxidable de 3/8" de diámetro y se utilizó una pletina de 2mm de espesor para la plantilla y el sujetador de lámina que se utilizan en la rueda hembra. Para las barras guías de los ensamblajes de la rueda hembra y el estampador de unión se utilizó una barra de acero inoxidable de diámetro 3/12". Las bases del

conformador y de la calandra están hechas en acero AISI 1045 debido a que no se requieren tolerancias estrictas.

LIMITACIONES EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN

La primera limitación fue la necesidad de mecanizar muchas de las piezas por electroerosión por hilo WEDM (Wire Electrical Discharge Machining). Esto debido a la estricta precisión y complicada geometría de piezas como la carcasa del cojinete, las matrices del conformador de *bumps*, el formador de curvatura y las piezas del sujetador del sujetador de lámina. Las piezas requirieron de un mecanizado previo al proceso de electroerosión. El formador de curvatura y la base del estampador de unión debieron llevarse hasta un paralelepípedo con la longitud de la pieza. Luego de electroerosión se fresaron algunas caras planas y se hicieron los agujeros roscados. Las matrices del conformador debieron ser maquinadas hasta el plano sobre el que se realizaría la electroerosión para solo realizar el corte. Los rodillos de la calandra fueron mecanizados en torno sin complicaciones, al igual que las manillas y las barras separadoras y barras guías. Para cortar las bases del conformador y la calandra se utilizó una cortadora por chorro de agua. Esto facilitó en gran medida la elaboración de esas piezas en costo y tiempo. Solo los asientos de los cojinetes y agujeros roscados de las bases fueron realizadas con fresadora y taladro de banco. Las láminas de del ensamblaje de la rueda hembra se dobló con una longitud mayor y luego se recortó con fresadora.

ENSAMBLAJE DE LOS DISPOSITIVOS

Luego de la fabricación de las piezas se realizó el montaje de los dispositivos: estampador de unión, calandra y conformador de *bumps*.

Las siguientes piezas conforman el estampador de unión. La Figura 33 muestra en sentido antihorario desde la esquina superior izquierda: (4) barras guías, (2) tornillos M3x20, (4) tornillos M5x30, formador de curvatura, la base 2, la

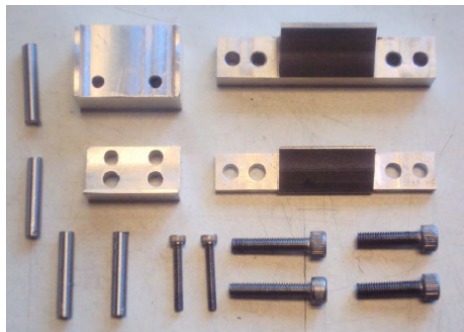


Figura 33. Conjunto de piezas del estampador de unión

base 1 y en el centro el sujetador de la lámina. La Figura 34 muestra el ensamblaje del estampador de unión.



Figura 34. Ensamblaje del estampador de unión

Las siguientes piezas conforman la calandra, que cumple el rol de conformar la lámina *top foil*. La Figura 35 muestra de izquierda a derecha en orden descendiente: (2) bases inferiores, (2) bases superiores, (2) rodillos inferiores, (4) barras separadoras, (1) rodillo superior, (4) tornillos M8x50, (4) tornillos M10x70 con sus tuercas, (1) tuercas M6, (1) tornillo M5x20 y la manilla.

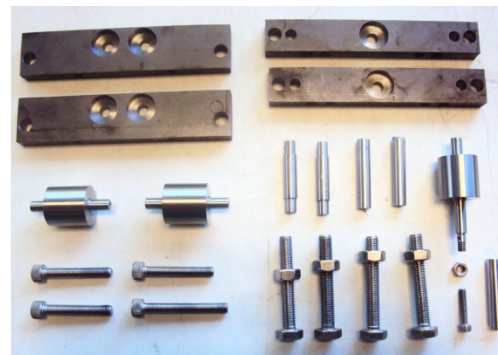


Figura 35. Ensamblaje del estampador de unión

La Figura 36 muestra el ensamblaje de la calandra.

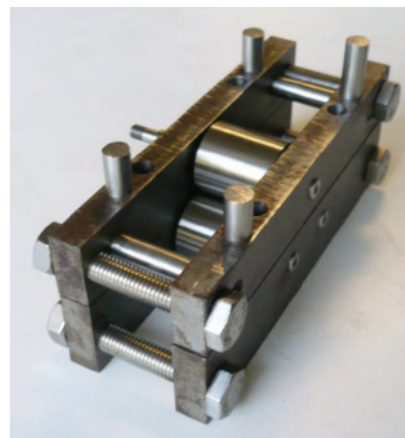


Figura 36. Ensamblaje de la calandra

Las siguientes piezas forman el conformador de *bumps*, que cumple el rol de doblar la lámina *bump foil*. La Figura 37 muestra de izquierda a derecha en orden ascendente: (4) tornillos M8x100, base inferior, (4) barras separadoras, base superior, rueda hembra, (4) tornillos M10x70 con sus tuercas, base inferior, rueda macho, (1) tuerca M6, la manilla y barras guías.

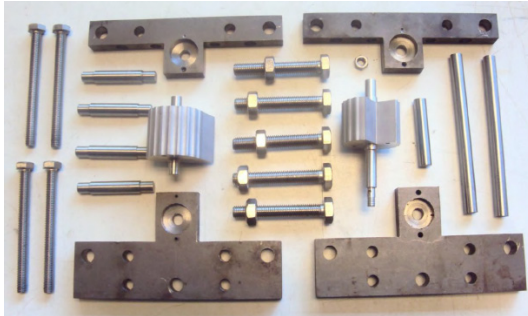


Figura 37. Conjunto de piezas del conformador de bumps

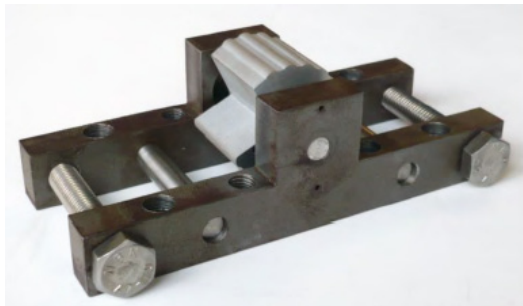


Figura 38. Ensamblaje parte superior del conformador de bumps



Figura 39. Ensamblaje parte inferior del conformador de bumps

Las siguientes piezas conforman el ensamblaje de la rueda hembra. La Figura 40 muestra de izquierda a derecha en orden descendente: rueda hembra, sujetador de lámina, plantilla, formador de curvatura, (2) barras guías y (4) tornillos M3x10.

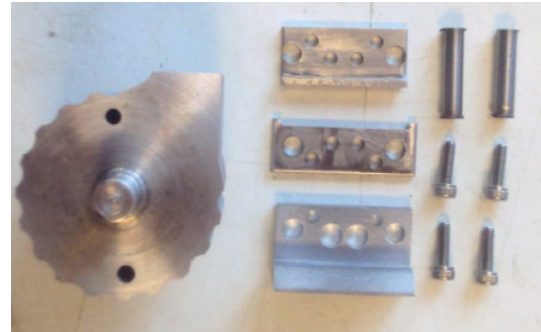


Figura 40. Conjunto de piezas de la rueda hembra

La carcasa y las cubiertas para ensamblar el cojinete se muestran en las Figuras 41 y 42. La Figura 42 muestra el montaje final de la carcasa, el *bump foil*, el *top foil* y las cubiertas atornilladas.



Figura 41. Carcasa y cubierta

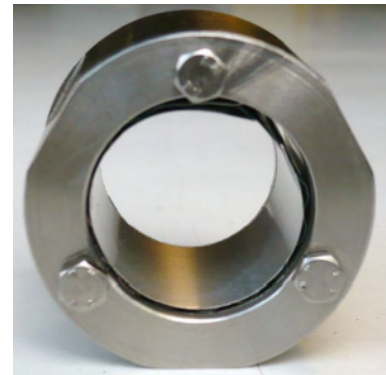


Figura 42. Montaje final del cojinete

Las pruebas realizadas mostraron que es importante al momento de estampar el *bump foil* la correcta alineación de las ruedas del dispositivo. Una pequeña desalineación produce una geometría irregular de los *bumps*.

CONCLUSIONES

Se revisó el diseño conceptual original para la construcción de los dispositivos para fabricar un cojinete *bump foil*.

Se investigaron los procesos de fabricación disponibles para completar el diseño preliminar y asegurar su factibilidad.

Se realizaron modificaciones para construir el prototipo la idea del diseño original.

Las modificaciones comprendieron cambios en geometría y dimensiones de las piezas para ser adaptadas a las limitaciones de los procesos de fabricación, la procura de materiales y simplificar la construcción.

Se construyeron los componentes del estampador de unión, calandra y conformador de *bumps*.

Los dispositivos contruidos son capaces de construir láminas con geometrías distintas, lo que significa distintos cojinetes.

Reemplazando las matrices hembra y macho por otras con diferente configuración de bump se tienen cojinetes diferentes.

Se realizaron pruebas con láminas de aluminio de aproximadamente 0,1mm.

Una leve desalineación en el conformador ocasiona que las láminas tengan una geometría defectuosa.

REFERENCIAS

- AGRAWAL, G. L. (1997). Foil Air/Gas Bearing Technology- An Overview. ASME International Gas Turbine & Air engine Congress, Florida, 97-GT-347.
- BELLABARBA, E., DIAZ, S., RASTELLI, V. (2005). A Test Rig for Air Bearings Rotordynamics Coefficients Measurement. Proceedings of GT2005-68804 ASME Turbo Expo 2005 Power for Land, Sea and Air, Reno-Tahoe, Nevada, E.E.U.U., 6-9.
- DE STEFANO, A. (2007). Diseño Conceptual de un Cojinete de Aire de Láminas Flexibles. Tesis de Pregrado. (Universidad Simón Bolívar, Caracas).
- DI LISCIA, M. H. (2007). Cálculo de Coeficientes Dinámicos en Cojinetes de Película de Gas. Tesis de Maestría. (Universidad Simón Bolívar, Caracas).
- DIAZ, V. (2010). Diseño de Detalle y Construcción de un Aparato de Conformado para Láminas de Cojinetes Flexibles. Tesis de Pregrado. (Universidad Simón Bolívar, Caracas).
- 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.
- MÜLLER-KARGER, C. (2004). Teoría de Lubricación. Guía de Clases del Curso de Cojinetes Hidrodinámicos. (Universidad Simón Bolívar, Caracas).
- 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.
- RUBIO, D. & SAN ANDRÉS, L. (2004). Bump-Type Foil Bearings Structural Stiffness: Experiments and Predictions. Proceedings of GT2004-53611 ASME Turbo Expo 2004 Power for Land, Sea and Air, Viena, Austria, 14-17.
- RUBIO, D. & SAN ANDRÉS, L. (2005). Structural Stiffness, Dry-Friction coefficient and Equivalent Viscous Damping in a Bump-Type Foil Gas Bearing. Proceedings of GT 2005-68384 ASME Turbo Expo 2005 Power for Land, Sea and Air, Reno-Tahoe, Nevada, E.E.U.U., 6-9.
- RUIZ, R. O., DI LISCIA, M. H., DIAZ, S. E., MEDINA, L. (2006). Experimental Measurement of a Three Lobe Air Bearing Rotordynamic Coefficients. Proceedings of GT2006 ASME TurboExpo 2006 Power for Land, Sea and Air, Barcelona, España, 8-11.
- RUIZ, R. (2007). Metodología para la Identificación Experimental de Coeficientes Dinámicos en Cojinetes de Película de Aire. Tesis de Maestría. (Universidad Simón Bolívar, Caracas).
- VALCO, M. J. & DELLACORTE, C. (2002). Emerging Oil-Free Turbomachinery Technology for Military Propulsion and Power applications. Proceedings of the 23rd U.S Army Science Conference, Fort Lauderdale, FL, E.E.U.U., 2-5.