



II CAIM 2010
Segundo Congreso Argentino
de Ingeniería Mecánica
San Juan - Noviembre 2010

Evaluación del comportamiento de un cojinete de empuje de zapatas oscilantes en condiciones de lubricación límite

Germán Keil, Américo Jurasics, Jorge Sánchez

*Departamento de Mecánica Aplicada – Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional del Comahue
Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén - Argentina*

*Tel/Fax: +54-2994422836 - E-mail: gkeil@uncoma.edu.ar - ajurasic@uncoma.edu.ar –
jorgeluissanchez@hotmail.com*

RESUMEN

Se presenta el desarrollo y pruebas, de un cojinete de empuje de zapatas oscilantes sin sistema de inyección de aceite. Las pruebas estuvieron orientadas a la evaluación del comportamiento bajo condiciones que contemplaron una serie de paradas con carga axial nominal sin inyección de aceite y de 1000 horas de duración total, a los efectos de verificar la conservación de la integridad de las superficies de las zapatas, empleando un aceite ISO VG 68, con un aditivo con compuestos de azufre, fósforo, aluminio, calcio y zinc.

La construcción surgió como consecuencia del requerimiento del operador de una central hidroeléctrica con turbinas con cojinetes de empuje del tipo de zapatas oscilantes, para evaluar su comportamiento en condiciones límites. Complementariamente la intención era visualizar si con la utilización del aditivo se podría llegar a operar el cojinete a mayor temperatura, para disminuir las pérdidas por fricción fluida, trasladando con menor riesgo, el punto de funcionamiento del cojinete hacia el óptimo.

En el cojinete de prueba, se empleó el mismo lubricante que en el cojinete de la turbina, con igual presión y velocidad tangencial en el centro del patín. Estos tres parámetros definen un número adimensional, que en función de datos experimentales permiten generalizar la performance.

El cojinete del prototipo fue seleccionado por catálogo, y provisto por una empresa especializada de los Estados Unidos.

Durante los ensayos comparativos, de los análisis del lubricante sin y con aditivo, se pudo visualizar la influencia en las características físico químicas del mismo, en el período inicial de aditivación, y a la finalización de cada prueba. También se pudo observar que con el aditivo, las zapatas están en condiciones de soportar paradas con plena carga axial, sin daños y con una reducción del coeficiente de rozamiento estático, para un arranque sin inyección de aceite.

Palabras Claves: Cojinetes de empuje, zapatas oscilantes, aditivos.

1. INTRODUCCIÓN

El propósito del trabajo fue evaluar en un modelo diseñado ad-hoc, el comportamiento de un cojinete axial, de zapatas oscilantes de características similares a los instalados en los turbogrupos de grandes centrales hidroeléctricas, cuya mecánica operacional está gobernada para situaciones normales por la teoría hidrodinámica de la lubricación, para dos condiciones con: a) Lubricante normal; b) Lubricante aditivado con un producto comercial.

En la figura 1 y a modo de generalización para cojinetes axiales [1], donde en lugar de computarse la relación huelgo - radio, se considera la excentricidad del apoyo respecto a la longitud del patín, se puede observar la variación del coeficiente de rozamiento en función del número de Sommerfeld. En los cojinetes, para condiciones normales, es de interés operar en la zona I.

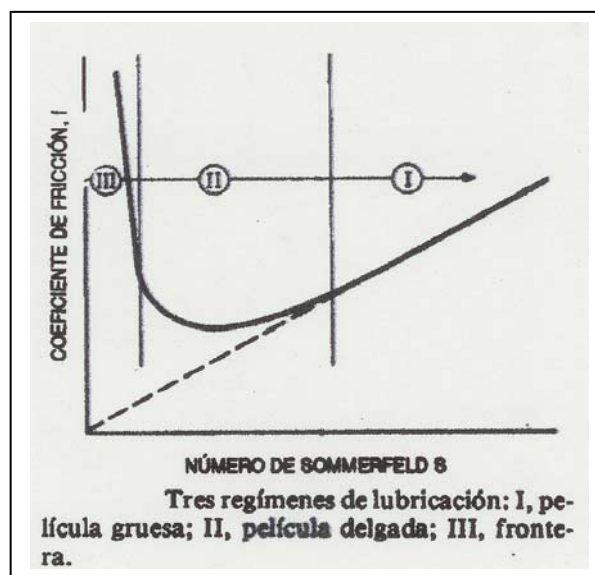


Fig. 1 Variación del coeficiente de rozamiento

Cuando se hace referencia al comportamiento, la mirada estuvo centrada en evaluar la compatibilidad físico química del aditivo cuya acción o performance se deseaba determinar, con los lubricantes empleados y especificados por el diseñador de los equipos mecánicos en cuestión, y analizar comparativamente los parámetros operativos con y sin aditivo para condiciones de operación normales y límite (Zona III – Fig. 1).

2. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO

En atención a los objetivos expuestos en el apartado precedente, el diseño del prototipo se ajustó a las condiciones de operación, del cojinete de empuje de un turbogrupo de de 200 MW de una central hidroeléctrica. Corresponde señalar que el soporte de las zapatas en dichas turbinas es el tipo Mitchell (flexibles).

Verificados los parámetros de diseño y operativos del cojinete axial de los turbogrupos indicados, a los fines de reproducir las mismas condiciones operativas desde el punto de vista hidrodinámico, se adoptaron para el prototipo los siguientes valores:

- Velocidad tangencial media del cojinete: $V_t = 11.74 \text{ m/seg}$
- Presión media en las zapatas: $P_m = 25 \text{ Kgr/cm}^2$
- Lubricante: Aceite Turbina ISO VG 68

3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

A los fines del cumplimiento de los objetivos generales de los ensayos, y las especificaciones expuestas precedentemente, se diseño, construyó y operó un prototipo cuyas características generales se describen a continuación.

Se dispone de un árbol vertical de 65 mm de diámetro de referencia y 600 mm de longitud, accionado a través de un acoplamiento flexible, por un motor eléctrico, comandado por un variador electrónico de velocidad.

El árbol se asienta sobre dos rodamientos de rodillos cilíndricos, que facilitan el libre desplazamiento axial del rotor, permitiendo la transmisión de las cargas radiales al bastidor.

Con referencia a las cargas axiales, se tiene un denominado cono de empuje, que por intermedio de un collar, asienta sobre las zapatas oscilantes del cojinete de empuje, cuyo soporte está montado sobre el bastidor del prototipo.

La carga axial sobre el sistema, se obtiene mediante el accionamiento de un tornillo, que por intermedio de una arandela cónica transmite la misma sobre la pista exterior de un rodamiento cónico, cuya pista interior desliza sobre el árbol del sistema. La misma a su vez apoya sobre la pista interior de un rodamiento cilíndrico también deslizante sobre el árbol, y que a su vez asienta sobre el cono de empuje soportado por el cojinete de zapatas oscilantes.

El diseño independiza la transmisión de las cargas radiales de las axiales en la interfase rotor – estator.

La presencia de una arandela cónica, con sus características particulares de relación carga – deformación, al quedar definido el punto de trabajo en la zona de invariabilidad aparente de dicha relación, permite mantener la carga constante para pequeñas deformaciones axiales por efecto térmico. En la figura 2 se presenta un esquema general del dispositivo de ensayo, identificándose los componentes principales.

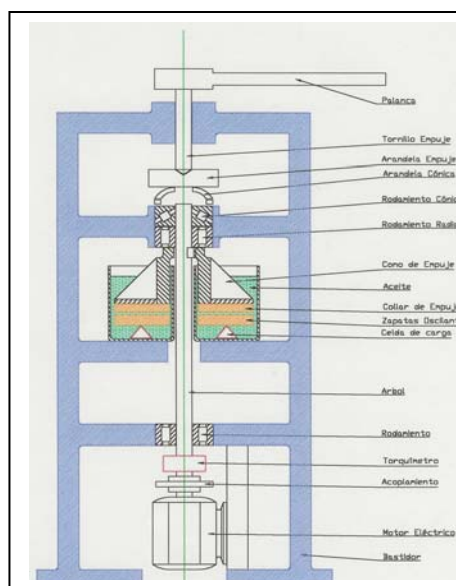


Fig. 2 Esquema general del dispositivo de ensayo

La refrigeración del rodamiento axial, se realiza mediante la circulación forzada de aire preenfriado, a través de dos mangas vinculadas a un equipo de refrigeración de aire de uso doméstico.

El cojinete axial de zapatas oscilantes, está contenido por la denominada cuba de aceite. Esta cuba está vinculada a través de ductos con un depósito auxiliar, que dispone de un sistema de refrigeración del lubricante [2]. La circulación del aceite caliente de la cuba al depósito de refrigeración se realiza mediante una pequeña bomba. El retorno se produce, por un proceso que combina la acción de una sobrepresión hidroestática del depósito respecto de la cuba, y el efecto de succión que genera el collar de empuje del cojinete. Tanto la cuba como el depósito, disponen en su parte más baja de orificios de drenaje con las correspondientes válvulas, para permitir su vaciado.

El bastidor que contiene al conjunto de mecanismos y sistemas descritos, está construido con perfiles de acero, y fijo al piso, constituido por una platea de hormigón alisado, por medio de anclajes químicos.

En las figuras 3 y 4 se pueden observar detalles sobre lo señalado.

Corresponde señalar que el cojinete de empuje de zapatas oscilantes, no dispone de una bomba de inyección de aceite para los arranques y paradas normales del sistema. Vista esta situación, para las pruebas en condiciones normales, los arranques y las paradas se realizaron sin carga axial sobre el sistema.

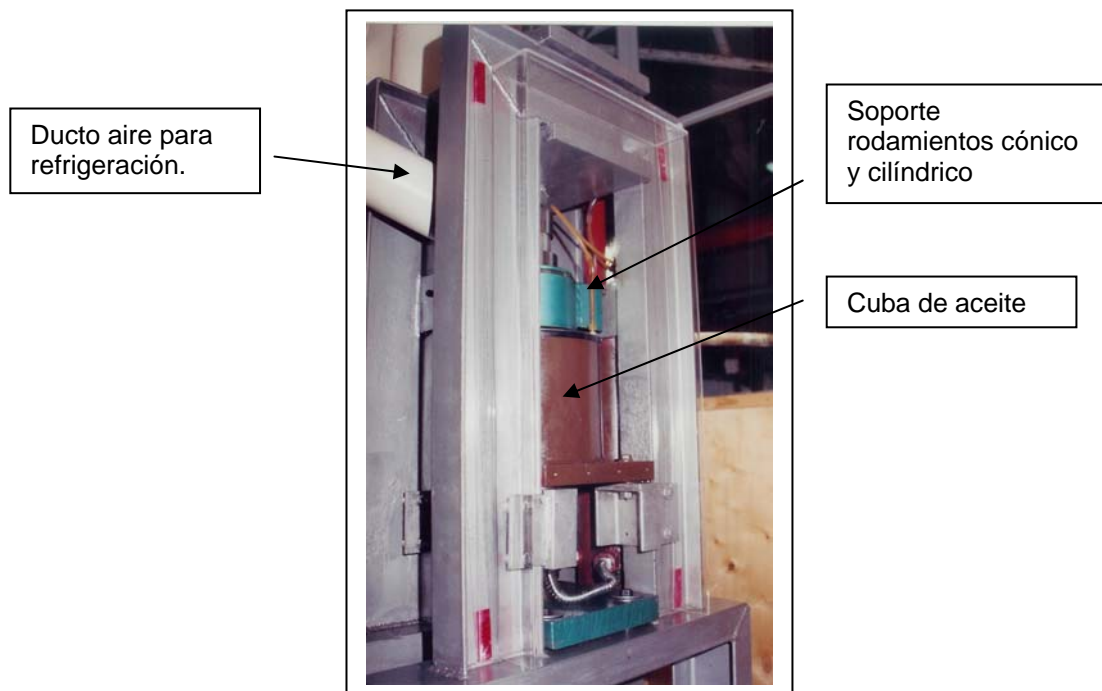


Fig. 3 Vista frontal del prototipo.

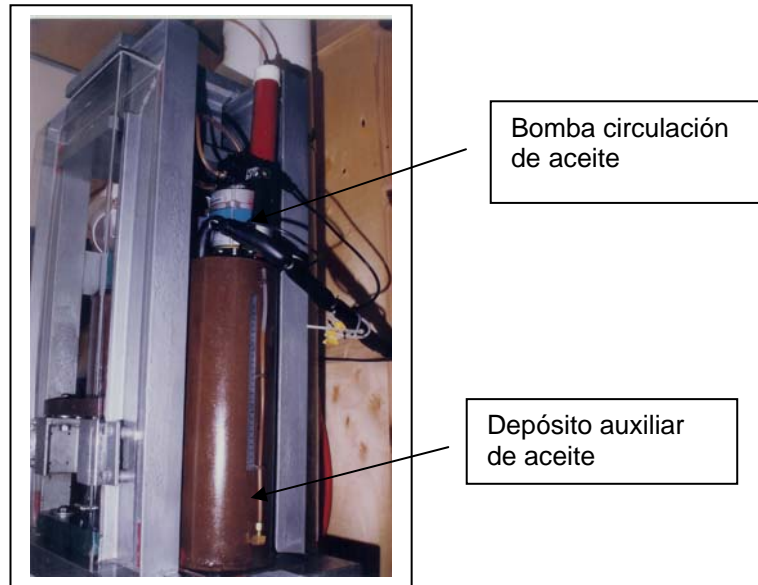


Fig. 4 Vista lateral del prototipo

En la figura 5, se puede observar una vista del cojinete axial de zapatas oscilantes, con apoyo basculantes, adquirido a la firma Waukesha de los E.E.U.U. previo a su instalación inicial en el prototipo para la realización de los ensayos. En la misma figura, en un segundo plano se puede apreciar el denominado collar de empuje.

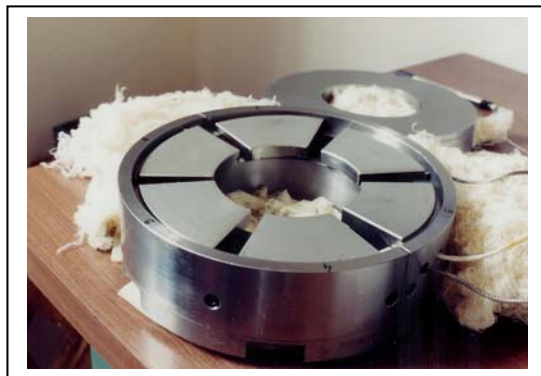


Fig. 5 Cojinete Axial

Se presentan a continuación a modo de síntesis, las especificaciones técnicas principales de los componentes del prototipo:

Motor Eléctrico: Marca: Siemens - Potencia: 4 CV - Velocidad nominal: 1.400 r.p.m.

Regulador electrónico de velocidad: Marca DANFOSS - Modelo: VLT 2000.

Cojinete de Empuje: Marca: WAUKESHA BEARINGS - Modelo: 208-601 (self leveling) - Número de zapatas: 6 - Carga máxima 17.000 lbs - Material Antifricción: Babbit (no especificado).

Cuba y Depósito Auxiliar: Volumen: 7.450 cm³.

Bomba de circulación de Aceite: Caudal: 1,5 lt/min.

Sistema de Refrigeración de aceite del cojinete de empuje: Refrigerador de unidad sellada con gas, y serpentín de cobre.

Sistema de Refrigeración del Rodamiento Axial: Capacidad: 1.500 Frig./Hora

Germán Keil; Américo Jurasics; Jorge Sánchez / Evaluación del comportamiento de un cojinete de empuje de zapatas oscilantes en condiciones de lubricación límite

Instrumentación: Celda de carga. Dos detectores de temperatura en patines RTD. Fototacómetro. Torquímetro. Vibraciones. Contador horario.

El lubricante empleado es un aceite tipo turbina Aceite Turbina ISO VG 68 con una viscosidad de 59.2 cSt a 40 °C.

En relación al aditivo, conforme a la información entregada por el comitente, se trata básicamente de un hidrocarburo halogenado, con compuestos de azufre, fósforo, aluminio, clacio y zinc. De acuerdo al proveedor este producto está categorizado como un elemento cuyo objetivo básico es el tratamiento de los metales constituyentes de las superficies entre las cuales hay un movimiento – deslizamiento relativo.

La acción físico química tiene lugar en forma múltiple, con gradualidad en el tiempo. Como disparador de la acción, debe haber un *flash* (pico) de temperatura, ocasionando la descomposición térmica del producto. El aumento de temperatura se produce por la interferencia (choques) entre crestas de la rugosidad superficial. Surge una capa lubricante químicamente absorbida por la superficie, consistente en haluros de hierro, proporcionando una película de corte fácil, reduciéndose el coeficiente de fricción, y las posibilidades de adhesión entre las superficies con deslizamiento relativo.

4. DESARROLLO DE LOS ENSAYOS

Tal lo señalado, se realizaron dos secuencias de ensayos: a) Con aceite Turbina ISO VG 68 sin aditivación, y b) con el mismo lubricante con un 10 % de agregado de aditivo tipificado precedentemente.

Independientemente de las características particulares de cada uno de los ensayos señalados, para cada uno de ellos se siguió la siguiente secuencia básica:

- Verificación del nivel de aceite en la cuba.
- Verificación de la correcta lubricación de rodamientos.
- Verificación del correcto funcionamiento del sistema de medición de cargas y temperatura.
- Puesta en marcha de la bomba de circulación de aceite.
- Puesta en marcha del motor, llevando al sistema a la velocidad de régimen.
- Aplicación de una ligera carga axial sobre el sistema.
- Mantenimiento de la marcha durante treinta minutos.
- Aplicación mediante un tornillo de fuerza, de la carga axial de ensayo de 47.400 N. (Ver figura 6).
- Presión media en las zapatas: 2.4 N/mm².
- Puesta en marcha del sistema de refrigeración de aceite.
- Monitoreo cada 30 minutos de los parámetros operacionales.
- Duración del ensayo, 1000 horas.
- Análisis físico químico del lubricante, caso de ensayo sin aditivo, previo y post ensayo.

Con el lubricante aditivado los análisis se realizaron para condición inicial, 200, 500 y 1000 horas. Corresponde señalar que estos ensayos se realizaron en el laboratorio de la Planta de Agua Pesada del ENSI – Arroyito (Prov. del Neuquén). Se determinó en cada uno de los análisis, la viscosidad cinemática a 40 y 100 °C, el T.A.N.(método de titulación potenciométrica), inhibidor de corrosión (espectrometría infrarroja), análisis de partículas y análisis de metales.

Para el caso de la prueba del lubricante con aditivo, a las 50, 175, 200, 500 y 1000 horas de servicio, se procedió a detener intencionalmente el sistema bajo la carga nominal, para luego accionar el tornillo de carga para liberar la misma.

En la condición planteada precedentemente, sobre el acoplamiento se aplicó con un sistema de palanca y celda de carga, un torque creciente hasta lograr el inicio de giro, realizándose los registros correspondientes.

Se controló la temperatura del medio ambiente, con un valor de referencia de 18.5 °C., con una temperatura media de la cuba de aceite 54 °C, y del depósito auxiliar de aceite de 32 °C.

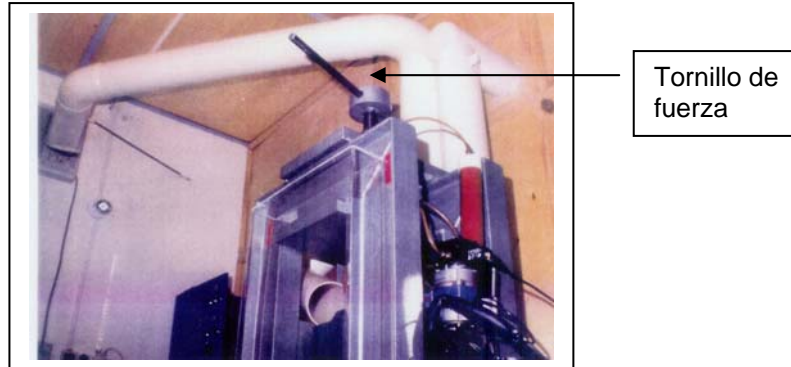


Fig.6 Vista superior prototipo.

5. ANALISIS Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS

En función de los resultados obtenidos de los ensayos realizados, con el lubricante normal aceite turbina ISO VG 68, y con el lubricante normal con el aditivo en una proporción del 10%, surgieron las siguientes conclusiones:

1. En régimen normal de operación, es decir cuando el cojinete operó en la denominada zona de película gruesa, gobernada por la teoría hidrodinámica de la lubricación (zona I Fig 1), el sistema tuvo un comportamiento adecuado, y análogo para ambas condiciones.
2. Para una condición particular de operación, como por ejemplo un arranque sin inyección de aceite, cuando el sistema no opera para condiciones de lubricación hidroestática, y/o gobernado por la teoría hidrodinámica de la lubricación, denominada condición de lubricación límite (zona III), se observa una sustancial reducción del torque de fricción estática para la condición de operación con aditivo respecto de cuando no se emplea. Para un tiempo de funcionamiento de 1.000 horas, el mencionado torque de fricción estática para la condición de operación con aditivo, fue de un 34.5% menor que para el caso de empleo de lubricante sin aditivo.
3. Al finalizar el ensayo con aceite con aditivo y durante el cual se generaron varias detenciones súbitas con carga nominal, no se visualizaron evidencias de desgaste, rayaduras, tal como se puede apreciar en la figura 7.

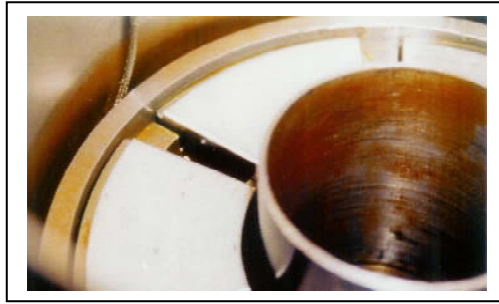


Fig.7 Vista zapatas cojinete de empuje.

4. Para mil horas de operación con el lubricante con aditivo, no surgieron variaciones singulares en los parámetros fisicoquímicos. En los sucesivos análisis, el hecho observable de interés es la disminución del T.A.N. Dicha disminución es previsible, tal lo indicado por Summers y Smith [3].

Concluidos los ensayos y en general a modo de síntesis, se puede afirmar que para el cojinete de empuje axial con zapatas oscilantes, el aditivo empleado, influyó favorablemente para las condiciones límites de operación; es decir cuando no se da una condición hidrodinámica, que permita una sustentación tal que separe completamente las superficies con deslizamiento relativo. En otros términos, cuando el espesor mínimo de película, no es compatible con la rugosidad máxima de las superficies indicadas.

De los valores obtenidos del ensayo, tomando como referencia la figura 8, se puede señalar un descenso del punto A, e inferir un corrimiento a la izquierda del punto B.

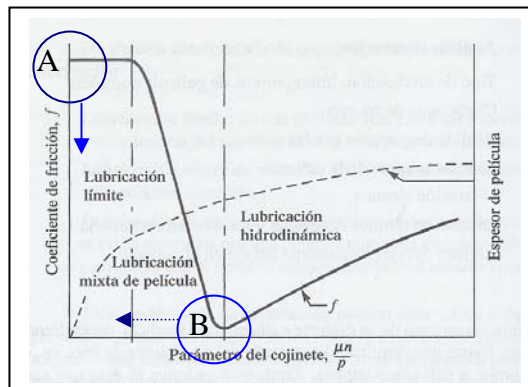


Fig.8 Variación del coeficiente de fricción [2]

Es de buena práctica, que los cojinetes de empuje se diseñen con un adecuado margen de seguridad, que en los hechos implica operar con un parámetro del cojinete, que tiene presente la viscosidad, velocidad y carga, de tres a cuatro veces el correspondiente al punto de mínima fricción (módulo de cojinete – punto B); ver figura 8.

No obstante lo indicado, para condiciones particulares y/o extraordinarias de operación real del cojinete de los turbogrupos de la central, ya sea por disminución de la velocidad, aumento de la temperatura y/o degradación del lubricante, o aumento circunstancial de la carga, o la no operación eventual del sistema de inyección, el cojinete puede operar en la zona de lubricación límite (frontera), que en realidad implica el

contacto de metal – metal, con riesgos de arrastre de material, plastificaciones locales, con un probable deterioro progresivo del cojinete, pudiendo comprometer su funcionalidad.

Si hay previsiones en cuanto a la mejora de las condiciones operativas del cojinete en la zona límite, por acción del aditivo para tratamiento de superficies, se plantearía la posibilidad de operar el cojinete con un determinado parámetro (viscosidad, velocidad, y carga) con menor coeficiente de seguridad, con la directa influencia en la disminución del coeficiente de fricción fluida y por consecuencia el aumento del rendimiento del equipo. Corresponde acotar que para un cojinete en operación, la viscosidad del lubricante es la única variable que se puede ajustar, ya que tanto la velocidad como la presión media están condicionados por el diseño del sistema.

6. REFERENCIAS

- [1] J. Shigley , C. Mischke, R. Budynas, *Mechanical Engineering*, Mac Graw Hill, New York, Año 2004.
- [2] R. L. Mott, *Diseño de elementos de máquinas*, Pearson Educación de México, México, Año 2006.
- [3] J.D. Summers-Smith, *An Introductory Guide to INDUSTRIAL TRIBOLOGY*, MEP, England, Año 1994.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer al Ing. Pablo Cocco, y a tornería SM del Ing. Daniel Maranghello de Neuquén capital, por la colaboración prestada para la fabricación de componentes, montajes y puesta a punto.