



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

TESIS DE DOCTOR EN INGENIERÍA

**COJINETES HIDRODINÁMICOS EN CONDICIONES
REALES DE USO. ESTUDIO TEÓRICO Y
VALIDACIÓN EXPERIMENTAL**

CLAUDIO ERNESTO MERELLI

BAHIA BLANCA

ARGENTINA

2020

PREFACIO

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Doctor en Ingeniería, de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el ámbito del Departamento de Ingeniería Química de la UNS y el Departamento de Mecánica de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, durante el período comprendido entre 2013 y 2020, bajo la dirección de la Doctora en Ingeniería Química Lidia María Quinzani y el Doctor en Ingeniería Industrial Daniel Oscar Barilá (UNPSJB).

Claudio E. Merelli



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR
Secretaría General de Posgrado y Educación Continua

La presente tesis ha sido aprobada el/...../....., mereciendo la calificación de (.....)

Esta tesis está dedicada para quienes me
brindan un apoyo especial todos los días:
Ariana, Emilia y Eugenia.

AGRADECIMIENTOS

Aunque aparezca un solo autor en la tapa, esta tesis solo pudo lograrse gracias al aporte de muchas personas necesarias.

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mis directores Lidia y Daniel por dejarme formar parte de este proyecto y depositar su confianza diariamente, quienes además de ser personas con capacidades asombrosas para trabajar y aconsejar, también me demuestran constantemente mucha sabiduría para temas de la vida que escapan del alcance de esta tesis. Logramos forjar una relación de amistad, lo cual es muy importante para mí.

A Carlos Rossit, que tuvo la amabilidad de aceptar ser supervisor de esta tesis desde el Dpto. de Ingeniería de la UNS.

A Gustavo Vignolo, quién me inició en el tema y es un permanente apoyo en todo lo estratégico de la tesis y en la vida. Un gran amigo, con una capacidad incansable. Un valor que sumé a mi vida, está tesis sin lugar a dudas tiene mucho de él. También quiero agradecer a su familia Elena, Gino y Valentina, hermosas personas que le debo a esta etapa.

A mi familia del Túnel: Federico Lecci, Germán Soria y Matías Bórquez. Por estar en el día a día y ser un apoyo constante, los mates, historias y trabajos compartidos son muy valiosos para mí.

A mis suegros Julio, Susana y mi sobrina Giuliana por ser partícipes necesarios en mi continuidad y de mí vuelta a Comodoro.

Quiero agradecer al CONICET, por haber sido fuente de financiamiento de mi tesis y permitirme realizar el doctorado y a PLAPIQUI, por recibirme durante mi estadía en Bahía Blanca y brindarme los cursos necesarios para formarme.

A mi esposa, amiga y compañera de la vida Ariana, a quién me gusta pelear y me aguanta a pesar de todo, sin vos no me hubiese animado a esto. Me dio a las personas más importantes, mis hijas Emilia y Eugenia. Gracias a ustedes, todo esto toma sentido.

RESUMEN

Los cojinetes hidrodinámicos (CH) son elementos de máquinas diseñados para producir un movimiento suave entre dos superficies sólidas: rotor y cojinete. La capacidad portante de este sistema la otorga el perfil de presión que se genera en el fluido lubricante cuando el rotor, al girar, lo impulsa hacia el espacio cuneiforme que se forma entre ambas piezas. Un punto en particular que hace al funcionamiento de los cojinetes es el hecho que las cargas a las que están sometidos son, en general, dinámicas, por lo que las propiedades de elasticidad y amortiguación del CH dominan el comportamiento de las máquinas que los empleen. Los avances realizados en cuanto a metodologías predictivas y de diseño de CHs se basan casi exclusivamente en técnicas numéricas, siendo escasas las herramientas que existen para el correcto dimensionamiento de los CHs. Incluso, la Ecuación de Reynolds que describe el flujo reptante, incompresible e isotérmico de un fluido Newtoniano en el CH, no tiene una solución analítica exacta. Son estas limitaciones las que motivan el desarrollo de la presente tesis, cuyo principal objetivo es crear herramientas de cálculo de CHs precisas pero de fácil implementación que abarquen diversas condiciones de operación, y contar con información experimental confiable para su verificación.

Así, en esta tesis se propone una modificación del método de perturbación regular (P&O) previamente desarrollado por el grupo, el cual es extendido a condiciones dinámicas. A través del método P&O se cuenta actualmente con expresiones analíticas sencillas, no sólo del perfil de presión y del número de Ocvirk, sino también de variables estáticas, como capacidad portante, ángulo de fase, caudal de lubricante y factor de fricción, y de los coeficientes dinámicos de CHs. Globalmente, el método es muy bueno para cojinetes cortos de L/D hasta cerca de uno y en un rango amplio de excentricidades, incluso donde los demás métodos analíticos suelen tener grandes errores y, sobre todo, conllevan a expresiones que son imposibles de utilizar sin recurrir al uso de métodos numéricos.

El estudio dinámico se completa con un análisis de estabilidad del sistema para los casos de rotor rígido y flexible. Se deriva una expresión matemática explícita de la frecuencia de

precesión del rotor ante una situación de inestabilidad y se simula la trayectoria que asume el rotor en un cojinete corto ante cargas por impacto, para explicar el fenómeno de inestabilidad.

Los resultados teóricos, analíticos y numéricos, que contemplan o no complejidades como transferencia de calor, cavitación o cargas dinámicas, requieren un contraste con resultados experimentales. Para ello se ha completado el diseño y construcción de un banco de ensayo propio que incluye un sistema de sellado de las tomas de presión mejorado, el instrumentado y puesto a punto de los sensores del equipo, y el diseño y fabricación de un sistema de carga capaz de reproducir una gran variedad de situaciones a las que se expone un cojinete. Hasta el momento se han obtenido perfiles de presión ante carga estática en cojinetes de diferentes L/D utilizando diversas cargas y velocidades. La buena coincidencia observada entre resultados teóricos y experimentales a bajas relaciones de aspecto otorga confiabilidad a la operación del banco de ensayo ensamblado. Por otro lado, las diferencias observadas a elevados L/D indican que los modelos contemplados van gradualmente perdiendo precisión. Sin embargo, se rescata que los cálculos isotérmicos resultan una buena estimación incluso hasta $L/D \cong 1$ (sobre todo a grandes excentricidades).

ABSTRACT

Hydrodynamic journal bearings (HJB) are machine elements designed to produce a smooth movement between two solid surfaces: shaft and bearing. The load capacity of this system is given by the pressure profile generated in the lubricating fluid when the rotor, as it rotates, drives it towards the cuneiform space that appears between the two solid pieces. A particular point related to the operation of HJB is the fact that the loads they are subjected to are, in general, dynamic. So, the elastic and damping properties of HJB dominate the behavior of the machines that use them. The advances made with respect to predictive and design methodologies for HJBs are based almost exclusively on numerical technics, being the existing tools for the correct sizing of HJB scarce. Even the Reynolds Equation, which describes the creeping, incompressible, and isothermal flow of a Newtonian fluid in HJBs, does not have an exact analytical solution. It is these limitations that motivate the development of this thesis, whose main objective is to create precise but easily implementable HJB calculation tools that cover diverse operating conditions, and to have reliable experimental information for verification.

Thus, in this thesis a modification of the regular P&O perturbation method previously developed by the group is proposed, and the model extended to dynamic conditions. Through the P&O method, simple analytical expressions are proposed, not only of the pressure profile and the Ocvirk number, but also of static variables, such as bearing capacity, phase angle, lubricant flow rate and friction factor, and the dynamic coefficients of HJBs. Overall, the method is very good for short bearings with L/D up to near one and in a wide range of eccentricities. It is good even where other analytical methods often have large error and, above all, lead to expressions that are impossible to use without employing numerical methods.

The dynamic study is completed through a stability analysis of the system, considering both rigid and flexible rotors. An explicit mathematical expression of the rotor precession

frequency is derived in the unstable situation and, to explain the instability phenomenon, the trajectory of the rotor in a short bearing is simulated under an impact load.

The theoretical results, whether analytical or numerical, that may or may not include complexities such as heat transfer, cavitation or dynamic loads, should be compared with experimental results. Consequently, the design and construction of our own test rig was completed. For that, an improved sealing system for the pressure sensors was added, all sensor were instrumented and tuned, and a new loading system was designed and manufactured capable of reproducing a wide variety of situations to which a bearing is normally exposed. So far, pressure profiles have been obtained under static loading on bearings of various L/D using different loads and speeds. The good matching observed between theoretical and experimental results at the lowest aspect ratio gives reliability to the operation of the assembled test rig. Then, the differences observed at higher aspect ratios suggest that the models gradually lose precision. Even so, it is found that the isothermal calculations give good estimations even near $L/D \cong 1$ (especially in the large range of eccentricities).