



**Facultad de Ingeniería Mecánica
Colectivo de Mecánica Aplicada
Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos”**

TRABAJO DE DIPLOMA

MÉTODO DE CÁLCULO DEL ÁRBOL DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA MULTITETÁPICA CONSIDERANDO LA ELASTICIDAD DE LOS APOYOS Y DE LAS EMPAQUETADURAS

Autor: Luis Ernesto Longoria Sánchez

Tutores: Dr. Rafael Antonio Goytisoló Espinosa (UCf)

Ing. Raúl Alfonso Rodríguez (UCf)

Ing. Giory Alemán González (PDV-CUPET S.A.)

Junio 2010

“Año 52 de la Revolución”

Declaración de autoridad.



Facultad de Ingeniería Mecánica.

Hago constar que el presente trabajo fue realizado en la Universidad de Cienfuegos, como parte de la culminación de los estudios en la especialidad de Ingeniería Mecánica; autorizando a que el mismo sea utilizado para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total, y además no podrá ser presentado en eventos ni publicado sin la aprobación de la Universidad de Cienfuegos.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido revisado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de esa envergadura, referido a la temática señalada.

Información Científico – Técnica, Firma

Firma del Vicedecano

Firma del Tutor

Sistema de Documentación y Proyectos

Pensamiento

“El hombre del futuro debe estar bien preparado en el dominio de la ciencia y la técnica, y nunca perder de vista el sentido crítico ante los fenómenos de la realidad.”

“Todos y cada uno de nosotros paga puntualmente su cuota de sacrificio consciente de recibir el premio en la satisfacción del deber cumplido, consciente de avanzar con todos hacia el Hombre Nuevo que se vislumbra en el horizonte”

Ernesto Ché Guevara.

Agradecimiento

Especialmente a mis padres que me apoyaron desde el inicio de mis estudios y me alertaron constantemente, para que pudiera llegar hasta donde estoy.

A mi familia y aquellas personas que considero como familia que me dieron su apoyo desde mucho antes del comienzo de este trabajo.

A mis tutores: Rafael Goytísolo, Giori y Raúl Alfonzo, gracias por su esmerada dedicación y entrega para conmigo.

A todos mis profesores durante toda la carrera, gracias por sus enseñanzas.

A mis compañeros de aula y a mis amigos.

A todos, ¡Muchas Gracias!

Dedicatoria

A mis padres que son los mejores del mundo, porque gracias a su educación, amor y entrega ha llegado hasta aquí.

A mi hermano por la ayuda que me ha brindado siempre.

A toda mi familia que de una manera y otra me apoyaron en los momentos difíciles.

A todas las personas que me han brindado su amor, respeto y cariño en especial a mis padres, mi hermano, mis primos y mis tías las cuales quiero mucho.

A todos los que de una forma u otra se preocuparon por mí.

Resumen

En el trabajo se aborda el método de cálculo del árbol de una bomba centrífuga multietápica considerando la elasticidad de los apoyos y de las empaquetaduras. En la introducción se describen los antecedentes y la situación problemática a resolver, se incluye además la hipótesis de trabajo, el objetivo general, los objetivos específicos y la tarea de investigación. El Capítulo I está dedicado a las particularidades constructivas de los árboles y cojinetes de las bombas centrífugas así como las características específicas de los soportes de los árboles de las máquinas en general. En el Capítulo II se desarrolló el método general de cálculo de los árboles de las bombas centrífugas, considerando los cojinetes de rodamientos como empotramientos parcialmente elásticos y las empaquetaduras como apoyos elásticos suplementarios. En el Capítulo III se aplica el nuevo método general de cálculo de los árboles de las bombas centrífugas dirigido a la evaluación de la resistencia del árbol de la bomba centrífuga de tres etapas contra incendio de la embarcación “6 de Junio”, con el objetivo de realizar un diagrama de momento flector más exacto, considerando todos los factores que actúan sobre el árbol de la bomba para posteriormente evaluar si el acero AISI 316 podía ser empleado en dicha aplicación. Por último se presentan las conclusiones y recomendaciones que se derivan del trabajo.

Índice

Introducción.....	1
Hipótesis.....	2
Objetivo General	2
Objetivos Específicos	2
Tareas de Investigación	3
Capítulo I: Particularidades constructivas de los árboles y cojinetes de las bombas centrífugas y características específicas de los soportes de los árboles de las máquinas en general.....	4
1.1 Partes estructurales principales de las bombas centrífugas. Materiales que se emplean.....	4
1.1.1. Características fundamentales de los cuerpos, arboles y apoyos de los árboles de las bombas centrífugas.	4
1.1.2. Empaquetaduras de las bombas centrífugas.	9
1.1.3. Álabes guías y conductos de aspiración y descarga.	14
1.1.4. Bases de cimentación.	14
1.2 Los soportes de los árboles de las máquinas.	15
1.3 Investigación experimental del coeficiente de rigidez de los cojinetes de rodamientos	18
1.4 Fuerzas axiales y radiales sobre los impelentes de las bombas centrífugas.....	22
1.4.1 Fuerzas axiales.....	22
1.5 Conclusiones del Capítulo.....	27
Capítulo II: Desarrollo del método general de cálculo de los árboles de las bombas centrífugas considerando los cojinetes de rodamientos como empotramientos parcialmente elásticos y las empaquetaduras como apoyos elásticos suplementarios. 28	
2.1 Utilización del Método de las Fuerzas en la solución de árboles hiperestáticos.....	28
2.2 Utilización del Método de las Fuerzas en el caso de apoyos linealmente elásticos.	30
2.3 Las empaquetaduras como apoyos linealmente elásticos.....	30

2.4 Esquema de Análisis del árbol de una bomba centrífuga multietápica considerando los dos cojinetes de apoyos como empotramientos parcialmente elásticos y las dos empaquetaduras como apoyos elásticos suplementarios.	33
2.5 Solución por el Método de las Fuerzas.	35
2.6 Conclusiones del Capítulo.	42
 Capítulo III: Aplicación del nuevo método general de cálculo de los árboles de las bombas centrífugas desarrollado a la evaluación de la resistencia del árbol de la bomba centrífuga de tres etapas contra incendio de la embarcación “6 de Junio”.	
3.1 Situación Problemática del árbol de la bomba de la embarcación “6 de Junio”.	43
3.2 Esquema de la bomba centrífuga objeto de estudio y de su árbol.	44
3.3 Esquema de análisis del árbol con apoyos elásticos y con empotramientos rígidos y sistema equivalente.	46
3.4 Solución del Sistema de Ecuaciones Canónicas, para hallar el momento M_D	48
3.5 Solución del Sistema de Ecuaciones Canónicas eliminando X_3 y considerando M_D como carga, para hallar X_1 y X_2 :	55
3.6 Construcción de diagramas de Fuerzas de Cortante y Momentos Flectores.	56
3.7 Cálculo de la potencia consumida por las bombas y el torque en el árbol.	58
3.7.1 Datos disponibles de las Bombas.	58
3.7.2 Cálculo del caudal, carga, potencia y momento torsor	60
3.8 Diagrama de momentos flectores y torsores sin considerar las empaquetaduras.	62
3.9 Comprobación de resistencia a la torsión y a la flexión.	63
3.10 Comprobación de las chavetas a cortante y a aplastamiento.	64
3.11 Cálculo del factor de seguridad a la fatiga del árbol sin considerar la elasticidad de los apoyos.	65
3.12 Diagramas de momento flectores y torsores considerando la rigidez de la caja de bolas radial de simple hilera y las empaquetaduras como apoyos elásticos suplementarios.	67

3.13 Cálculo del factor de seguridad a la fatiga del árbol considerando la elasticidad de los apoyos.	69
3.14 Conclusiones del Capítulo.	72
Conclusiones Generales	73
Recomendaciones.....	74
Referencias Bibliográficas	75
Bibliografía.....	77
Anexos.....	79

Introducción

A decorative L-shaped line in a dark blue color, consisting of a horizontal segment and a vertical segment that meet at a right angle in the bottom right corner of the page.

INTRODUCCIÓN

Los soportes de los árboles de las máquinas históricamente se han idealizado a través de tres esquemas de análisis típicos: el apoyo articulado móvil, el apoyo articulado fijo y el apoyo empotrado, sin embargo, estos esquemas idealizados se alejan en cierta medida de la realidad. Los apoyos articulados provocan en los mismos: fuerzas internas, tensiones, flechas y pendientes mucho mayores que los reales y los apoyos empotrados: fuerzas internas, tensiones, flechas y pendientes mucho menores que las que existen en la realidad. Estas insuficiencias de los esquemas de análisis se han asimilado históricamente a través del controvertido factor de seguridad, encargado de llevar sobre su espalda todas las imprecisiones e incertidumbres de los cálculos. En el presente trabajo se desarrolla una nueva metodología para el cálculo de árboles de bombas centrífugas utilizando un esquema de análisis con apoyos y empotramientos elásticos en el cual se consideran las empaquetaduras como apoyos elásticos suplementarios y se toma en cuenta la rigidez angular real de los cojinetes de rodamientos. La metodología desarrollada se aplicó en la evaluación de la resistencia de los árboles de las bombas centrífugas de tres etapas, de agua de mar, de la embarcación contra incendios “6 de Junio”, los cuales se habían deteriorado por la acción corrosiva y erosiva del agua de mar. El buque “6 de Junio” (Anexo B) del MININT es la única embarcación contra incendios del país, la cual después de 30 años de servicio fue sometida a una reparación general, pues su casco se había deteriorado sensiblemente mientras que las dos bombas contra incendios de la misma, debido a que su carcasa e impelentes son de bronce habían resistido bien el proceso corrosivo del agua de mar pero sus partes de acero (árbol, cojinetes, casquillos, etc.) habían sufrido durante todo ese tiempo serias afectaciones provocadas por la acción corrosiva y erosiva del agua de mar (Anexo C), que impedían su funcionamiento. Mientras que el trabajo de recuperación del casco fue llevado a cabo por el personal de la Empresa Nacional de Astilleros en el Varadero de “Punta Cotica”, el trabajo de recuperación de ambas bombas fue ejecutado por un grupo de especialistas y técnicos del Taller Central de la Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos” perteneciente a la Empresa PDV-CUPET S.A. (Alemán, 2010) y en paralelo el Colectivo de Mecánica Aplicada de la Universidad “Carlos Rafael

Rodríguez” de Cienfuegos realizó el presente trabajo, donde se creó un nuevo método de cálculo para comprobar el rediseño del árbol de las bombas con acero inoxidable a fin de impedir su deterioro en las condiciones reales de trabajo. (Goytisoló, 2010). En el presente trabajo se describe precisamente la creación del Nuevo Método para el Cálculo de Árboles, utilizando el Esquema de Análisis de Apoyos y Empotramientos Elásticos que permite evaluar la influencia de las empaquetaduras como apoyos elásticos complementarios y la elasticidad angular de los cojinetes de rodamientos empleados en la resistencia del árbol y precisar de esta manera la posibilidad de emplear un acero inoxidable de menor resistencia mecánica que el acero ferrítico-perlítico original, pero de gran resistencia a la corrosión, que había sido precisamente la causa de su deterioro.

Hipótesis

Ante esta **Situación Problemática** se formuló la Hipótesis que era posible, aplicando los nuevos conceptos sobre elasticidad angular de los cojinetes de rodamientos (Goytisoló, 2006, Hidalgo, 2009) y la consideración por primera vez en la práctica de las empaquetaduras de las bombas como apoyos elásticos complementarios (Goytisoló, 2010), desarrollar un procedimiento general de cálculo para árboles de bombas centrífugas, considerando el efecto favorable de estas influencias.

Objetivo General

Desarrollar un procedimiento general de cálculo del diagrama de momentos flectores en los árboles de las bombas centrífugas, contemplando la rigidez angular de los cojinetes de apoyo y las empaquetaduras como apoyos elásticos suplementarios.

Objetivos Específicos

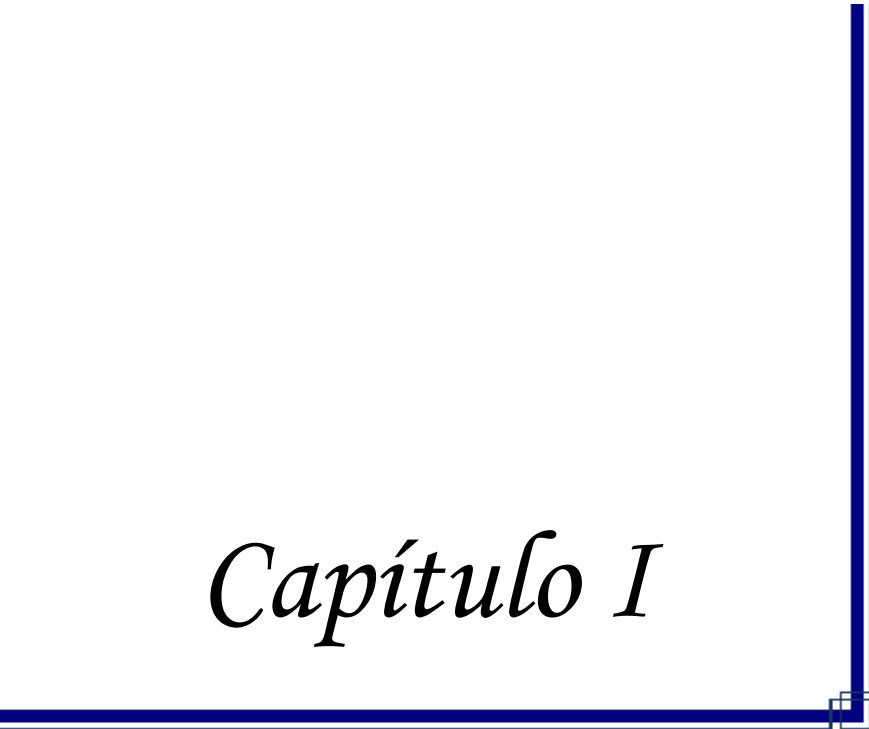
1. Aplicar el procedimiento elaborado de cálculo del diagrama de momentos flectores en los árboles de las bombas centrífugas al árbol de las bombas multietápicas BERLIET del buque “6 de Junio”.
2. Evaluar, basando los cálculos en el esquema de análisis más exacto propuesto, la posibilidad de utilizar en la fabricación de los árboles de las bombas BERLIET el

acero austenítico inoxidable AISI 316 en lugar del acero aleado ferrítico - perlítico al cromo – níquel – molibdeno original.

Tareas de Investigación

1. Profundizar en los aspectos constructivos y de funcionamiento de las bombas centrífugas y en particular en los aspectos relacionados con las fuerzas radiales y axiales en los impelentes y en la construcción y materiales de las empaquetaduras.
2. Profundizar en las características específicas constructivas de las bombas contra incendios “Berliet” del buque “6 de Junio”.
3. Aplicar el Método de las Fuerzas para resolver las ecuaciones canónicas que se crean al considerar los cojinetes de rodamientos como empotramientos parcialmente elásticos y las empaquetaduras como apoyos elásticos suplementarios.
4. Determinar analíticamente la constante de rigidez de las empaquetaduras en función de las dimensiones, su material y condiciones de carga.
5. Construir los diagramas de momentos flectores del árbol de la bomba del buque “6 de Junio” con el esquema de análisis clásico y el nuevo elaborado y evaluar la resistencia del árbol para ambos esquemas.

Capítulo I

A decorative L-shaped line in the bottom right corner, consisting of a horizontal line and a vertical line meeting at a right angle, with a small square at the intersection.

CAPITULO I: PARTICULARIDADES CONSTRUCTIVAS DE LOS ÁRBOLES Y COJINETES DE LAS BOMBAS CENTRÍFUGAS Y CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS DE LOS SOPORTES DE LOS ÁRBOLES DE LAS MÁQUINAS EN GENERAL.

1.1 Partes estructurales principales de las bombas centrífugas. Materiales que se emplean.

1.1.1 Características fundamentales de los cuerpos, arboles y apoyos de los árboles de las bombas centrífugas.

Las partes principales de una bomba centrífuga son: la rueda de trabajo o impelente, el árbol con las piezas de sujeción de las ruedas y de protección contra el desgaste con ayuda de prensaestopas y sus empaquetaduras, cojinetes, manguito de unión, cuerpo, dispositivos guías, tubuladuras de aspiración y de descarga, tornillos de apriete y de sujeción. Las ruedas de trabajo se fabrican de distintos tipos de hierro fundido, acero al carbón y aleados, aleaciones de metales no ferrosos y de materiales cerámicos. El empleo de uno u otro material se determina por las condiciones de trabajo, las dimensiones y la frecuencia de rotación, así por el género del líquido que se trasiega.

Las ruedas de las bombas pequeñas para agua pura y líquidos no agresivos de baja temperatura se funden de hierro gris para construcciones. Las bombas centrífugas para la alimentación de las calderas de alta presión tienen dimensiones considerables y alta frecuencia de rotación. Ellas suministran agua a cierta temperatura, por lo cual las ruedas de trabajo de estas bombas se confeccionan de acero al cromo-níquel. Las ruedas de las bombas para el desplazamiento de mezclas de tierra con escoria se hacen de fundición blanca. Las bombas para la industria tienen ruedas fabricadas de aleaciones especiales, de cerámica o de plásticos. Las bombas para el trasiego de agua de mar se hacen por ejemplo de bronce.

Capítulo I: Particularidades constructivas de los árboles y cojinetes de las bombas centrífugas y características específicas de los soportes de los árboles de las máquinas en general

Las ruedas de grandes dimensiones tienen un cubo de longitud considerable; esto dificulta su ajuste preciso sobre el árbol. Para facilitar el encaje el cubo se mandrina por dentro en dos diámetros, y se ajusta cada diámetro interior por separado, esto facilita el arme y desarme.

A las superficies fundidas de las ruedas se les plantean exigencias especiales: estas superficies deben poseer pequeña rugosidad para disminuir las pérdidas internas. Las superficies interiores y testas del cubo, así como las superficies de los anillos de empaquetaduras deben ser sometidas a tratamientos térmicos.

El árbol de la bomba es una pieza de gran importancia; en el caso de alta frecuencia de rotación él experimenta la acción de grandes fuerzas transversales. Al calcular la resistencia y la rigidez del árbol se toman en consideración las siguientes cargas exteriores: el momento torsor transmitido desde el motor, el propio peso del árbol y las piezas montadas sobre él, las fuerzas transversales, condicionadas por el suministro y la descarga asimétrica del líquido y la inexactitud del equilibrado de las ruedas. Los árboles se fabrican de productos laminados o forjados. En ambos casos se puede realizar o no tratamientos térmicos. Como material para los árboles sirven como regla los aceros al carbono para construcciones y aleados especiales.

El árbol con las piezas encajadas en él lleva el nombre de rotor de la bomba. Los rotores de las bombas centrífugas se equilibran, con la particularidad de que en las bombas pequeñas se realiza el equilibrio estático y el dinámico.

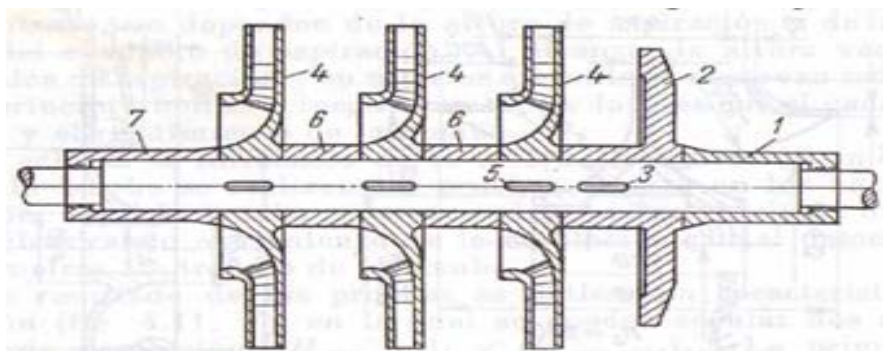


Fig. 1.1 Rotor de una bomba centrífuga multitápica.

En la Fig. 1.1 se muestra el corte longitudinal del rotor de una bomba de tres etapas con equilibrado de la fuera axial con la ayuda de un disco de descarga. El encaje de las piezas sobre el árbol se realiza aquí de la manera siguiente: en la rosca del extremo derecho del árbol se coloca el casquillo cilíndrico 1, que protege el árbol del desgaste con ayuda de una empaquetadura de prensaestopas. En el extremo izquierdo del casquillo 1 se apoya la superficie testal del disco de descarga 2. El cual se retiene contra el giro en el árbol con auxilio de la chaveta insertada 3. Directamente en el extremo izquierdo del cubo de este disco se apoya el extremo del cubo de la tercera rueda de trabajo 4. Esta última se fija en el árbol con ayuda de la chaveta insertada 5, calculada para transmitir del árbol a la rueda una potencia igual a la suma de la potencia interna de la rueda y la potencia de rozamiento del disco. Las ruedas de trabajo se separan una de otra con ayuda de los manguitos separadores 6. Con el cubo de la primera rueda de trabajo linda el casquillo de protección izquierdo 7, el cual, con ayuda del casquillo roscado 1, aprieta compactamente contra el árbol todas las piezas encajadas en él. El rotor armado de tal modo, al apretar fuertemente los casquillos queda como si fuera una sola pieza. El árbol como se aprecia queda prácticamente aislado del contacto con el líquido pero esto no lo exime de la posible erosión y corrosión del mismo. El tratamiento de las superficies testales de todas las piezas encajadas sobre el árbol debe ser especialmente preciso. De lo contrario, al apretar los casquillos 1 y 7 surge inevitablemente la flexión del árbol, que provoca el encorvamiento del rotor y la vibración de la bomba durante el servicio, producto de dicha deflexión.

Los cojinetes de las bombas centrífugas se seleccionan de distinta estructura. Las bombas de pequeña potencia, como regla, van dotadas de cojinetes radiales rígidos de bolas y soportes de modelos normales. El engrase de estos se realiza, habitualmente, con grasa consistente y, con menos frecuencia, con lubricante líquido del baño en el cuerpo del cojinete. Las bombas centrífugas de mayores dimensiones se construyen con el empleo de cojinetes de rodillos cilíndricos o cónicos. Las grandes bombas con gran caudal se hacen con cojinetes de deslizamiento. En unos casos se

Capítulo I: Particularidades constructivas de los árboles y cojinetes de las bombas centrífugas y características específicas de los soportes de los árboles de las máquinas en general

emplea la lubricación por aro, con ayuda de anillos que cuelgan libremente del árbol y que elevan el aceite lubricante al árbol desde el depósito en el cuerpo del cojinete; en otros casos el aceite lubricante se suministra a los cojinetes con ayuda de una bomba, por circulación. Se conocen casos cuando en las bombas centrífugas grandes se emplean cojinetes de deslizamiento segmentados.

Para acoplar los árboles de las bombas y motores lo más cómodo es el empleo de acoplamientos elásticos de distintas estructuras, que previenen la transmisión de las excentricidades y las vibraciones del árbol de la bomba al árbol del motor y viceversa. El acoplamiento elástico se debe encajar en los árboles de la bomba y el motor con la mayor precisión, sin apriete excesivo y deformaciones. Esto se exige porque en las superficies exteriores tratadas del acoplamiento durante el montaje se efectúan los ajustes de la coincidencia de los ejes geométricos de los árboles.

El cuerpo de la bomba se hace de dos formas constructivas principales: 1) En secciones, 2) Con acoplamiento horizontal. El cuerpo en secciones consta de varias secciones principales y dos de cierre, en las cuales se encuentran las tubuladuras de aspiración y de impulsión. La última etapa de presión se dispone ordinariamente en la sección de cierre, que lleva la tubuladura de impulsión de la bomba. Cada sección representa una envoltura cilíndrica de paredes gruesas de hierro colado, de fundición de acero o de metales no ferrosos, que incluye el diafragma separador, y también los dispositivos guía directo e inverso. En este caso varían solamente las dimensiones del árbol, de los tornillos de apriete y de la placa. Los defectos del cuerpo en secciones son la complejidad del montaje y el pequeño acceso en las ruedas de trabajo para su revisión. Para la inspección y reparación de las ruedas de una bomba en secciones es necesario retirar los tornillos de apriete y quitar sucesivamente todas las secciones, desmontando simultáneamente el rotor.

El cuerpo con desacoplamiento horizontal consta de dos mitades enteramente fundidas de hierro colado o acero, la inferior de las cuales lleva las tubuladuras de aspiración o de impulsión. La última a propósito, no es obligatoria, pese a que crea una gran comodidad durante el desmontaje y la reparación de la bomba.

En las bombas de etapas múltiples, en las mitades del cuerpo van montados los diafragmas y las paletas de los dispositivos guía directos e inversos y los anillos de empaquetaduras. A veces se encuentran bombas de múltiples etapas con un cuerpo que consta de dos mitades, con dispositivos guías sin paletas. En estos casos las mitades enteramente fundidas de los cuerpos se hacen con canales directrices espirales. Ambas mitades del cuerpo tienen bridas. Los planos de las bridas que lindan unos con otros están cepillados y bien rectificados. Los tornillos de sujeción aprietan las bridas con una junta fina o mástique colocado entre ellas. La gran comodidad del cuerpo de semejante construcción consiste en que al quitar la parte superior del cuerpo (la tapa), sin alterar las uniones de la bomba con las tuberías, se puede inspeccionar todas las ruedas de trabajo del rotor y sacar este último del cuerpo para su reparación. El cuerpo de la bomba dividida en el plano horizontal se muestra en corte transversal en la Fig. 1.2.

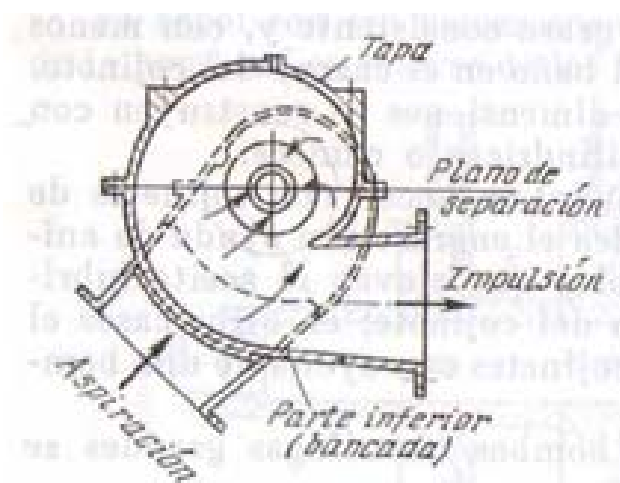


Fig. 1.2 Cuerpo de una bomba dividida en el plano horizontal.

Además de los dos cuerpos principales examinados, en la energética, en las industrias de elaboración del petróleo y químicas se emplean bombas de dos cuerpos. Estas bombas representan una estructura en secciones o con desacoplamiento en el plano meridional, encerrada en una envoltura de paredes gruesas forjadas de acero.

El empleo de semejantes estructuras está condicionado por las exigencias especiales en lo que se refiere a la fiabilidad y seguridad del servicio.

1.1.2 Empaquetaduras de las bombas centrífugas.

Al existir presión excesiva o vacío en las cavidades interiores de la bomba o los lugares por donde pasa el árbol a través de las paredes del cuerpo se emplean dispositivos especiales de empaquetadura, llamados a veces prensaestopas o empaquetaduras de rozamiento por contacto. Si no existen prensaestopas o estos están averiados tienen lugar las fugas del líquido desplazado por la bomba al exterior en la parte de impulsión o la succión del aire exterior hacia dentro de la bomba en la parte de aspiración.

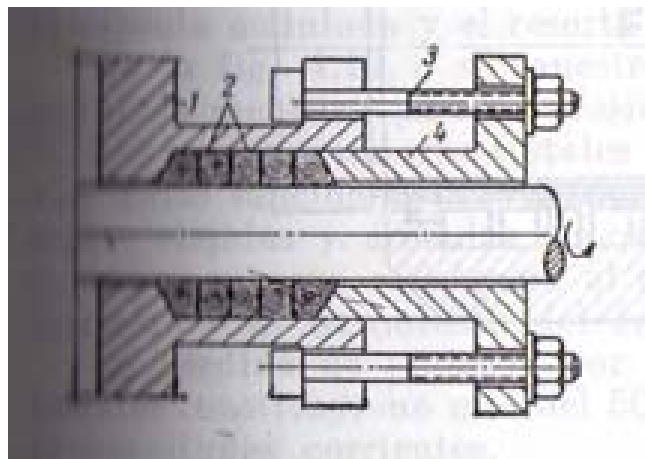


Fig. 1.3 Prensaestopas de una bomba centrífuga con empaquetaduras blandas.

En la Fig. 1.3 se representa la estructura elemental de un prensaestopas con relleno blando. El rebajo cilíndrico practicado en el metal de cuerpo 1 se llena de anillos de cordón 2 de material blando engrasado (algodón, cáñamo, asbesto). Apretando las tuercas, que son enroscadas en los tornillos 3, el casquillo 4 del prensaestopas se introduce completamente en la cavidad y, ensanchando la empaquetadura blanda hacia los lados, empaqueta el árbol, logrando el sellaje. Como consecuencia del rozamiento del árbol contra la empaquetadura durante el funcionamiento de la bomba se desprende cierta cantidad de calor. Para extraer este calor es necesario que el

prensaestopas deje pasar cierta cantidad de líquido, que luego se descarga a la canalización. Por la parte de la aspiración se emplean frecuentemente prensaestopas con empaquetaduras con agua (Fig. 1.4).

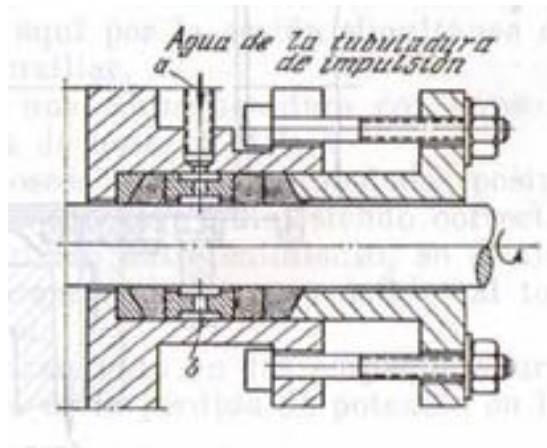


Fig. 1.4 Prensaestopas de una bomba centrífuga con empaquetaduras blandas y sello de agua.

En las bombas que suministran agua caliente se emplean empaquetaduras con refrigeración intensiva por agua. En la Fig. 1.5 se muestra la estructura de semejante empaquetadura, empleadas en bombas de alimentación de calderas. En la tapa de la bomba se instala un casquillo nervado de paredes finas 1, que se empaqueta con ayuda de un anillo de plástico termo resistente. La empaquetadura 2 se coloca en la cavidad anular, formada por el casquillo 1 y el casquillo protector 3, y se aprieta con el vaso 4. El agua pasa a la empaquetadura por la rendija anular con una dimensión radial de 0.3 mm, donde se enfría intensamente al hacer contacto con la superficie fría del casquillo 1. De este modo el casquillo y el árbol se protegen contra el recalentamiento.

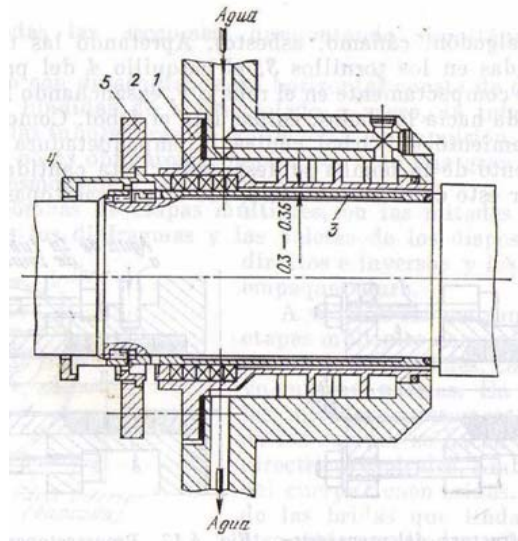


Fig. 1.5 Empaquetadura de prensaestopas del árbol de una bomba que suministra agua caliente.

En la construcción de bombas contemporáneas halla amplia aplicación las empaquetaduras frontales. En la Fig. 1.6 se muestran los tipos principales de semejantes empaquetaduras. En la Fig. 1.6 a) se puede ver una empaquetadura de anillos de goma para la presión de 10 MPa. En esta empaquetadura el par de rozamiento consta del anillo 1 y del anillo metálico de perfil 2. El mantenimiento de la empaquetadura se alcanza con la ayuda del resorte 3 y una parte con el anillo elástico interior 4. En la fig. 1.6 b), se representa una empaquetadura análoga, con la única diferencia de que el anillo plástico fluorocarbúrico 1 del par de rozamiento y el anillo de goma interior 4 se han confeccionado cónicos. Las empaquetaduras de este tipo se emplean para una presión de hasta 0.5 MPa para agua y líquidos agresivos. En la Fig. 1.6, c) se representa un empaquetadura con cápsula ondulada de plástico fluorocarbúrico o de propileno que se emplea para ácidos y álcalis para la presión de hasta 0.3 MPa. La apretura de la empaquetadura se crea aquí por la acción simultánea de la cápsula ondulada y el resorte auxiliar.

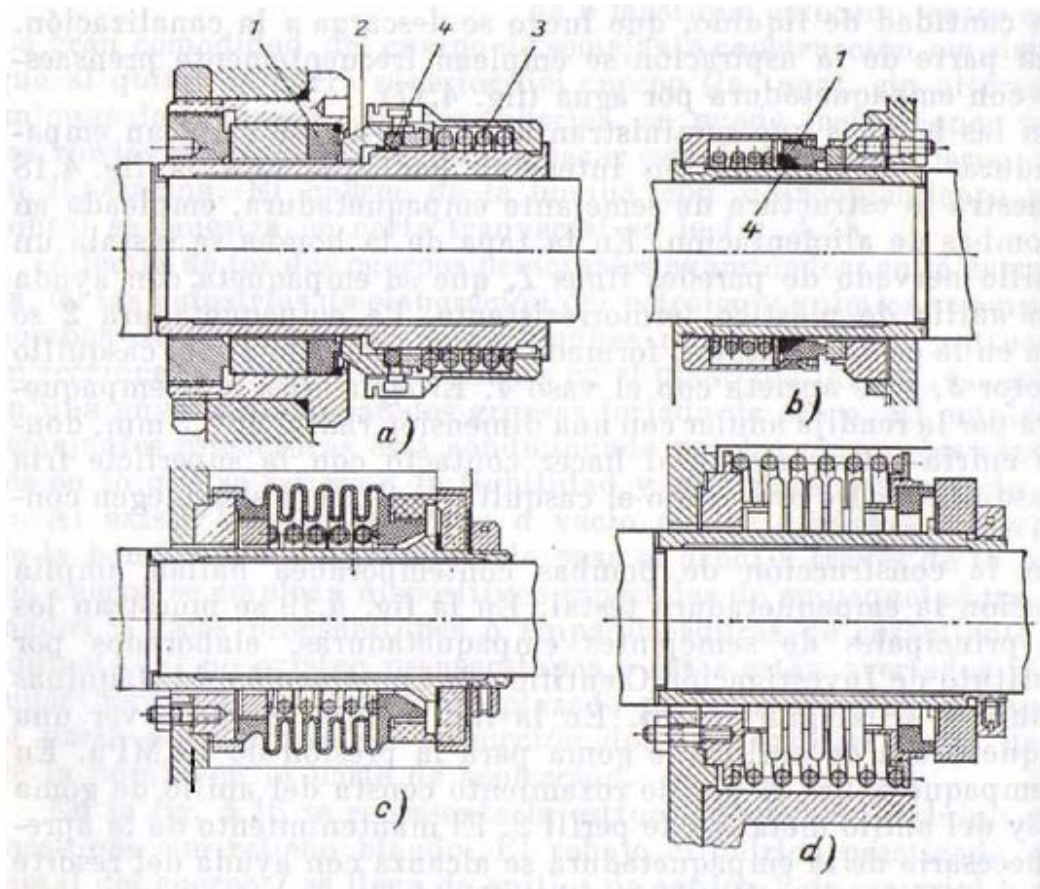


Fig. 1.6 Sistemas con empaquetaduras frontales.

Finalmente en la fig. 1.6, d) se muestra una empaquetadura con cápsula ondulada metálica para la presión de hasta 1 MPa. Las empaquetaduras frontales poseen muchas cualidades positivas. Ellas funcionan prácticamente con fugas nulas, si están correctamente seleccionadas y armadas no requieren mantenimiento, se distinguen por su gran resistencia al desgaste, son poco sensibles a las deformaciones y al batimiento del árbol. La pérdida de potencia por rozamiento en las empaquetaduras frontales constituye no más del 50% de la pérdida de potencia en los prensaestopas corrientes.

En las grandes bombas de alimentación contemporáneas se emplean empaquetaduras laberínticas de obstrucción sin relleno con el suministro del condensado frío para cierre hidráulico y su evacuación al salir de la empaquetadura al

recipiente del ciclo regenerativo (condensadores, deaireadores, tanques de vacío, etc.). Las empaquetaduras laberínticas pertenecen al tipo de empaquetaduras sin contacto y se emplean en las bombas grandes, el servicio de las cuales debe ser particularmente fiable en el caso de largos períodos entre reparaciones. Las empaquetaduras de este tipo no son herméticas, y la irrupción de líquido desplazado por la bomba se evita mediante la estrangulación de las fugas y el suministro de líquido frío de cierre hidráulico con la presión necesaria desde una fuente ajena. Están muy difundidas en las bombas de alimentación de los grandes bloques energéticos. En algunos casos las empaquetaduras de ranuras se combinan constructivamente con los prensaestopas de contactos.

En calidad de ejemplo examinemos una empaquetadura de ranura representada en la Fig. 1.7. El cuerpo de la empaquetadura 1 contiene cuatro cámaras A, B, C y D que comunican entre sí a través de angostas ranuras anulares, formada por los casquillos escalonados 2 y 3. El casquillo 2 va rígidamente encajado en el cuerpo 3, gira junto con el árbol. La cámara B se comunica con el reservorio de presión de evacuación, la D, con el reservorio sin presión, la C, con el condensador. El condensado frío de cierre hidráulico se suministra a la cámara A a presión algo mayor que en la cámara B y, pasando a través de los orificios del casquillo fijo 2, se propaga por la ranura anular en ambas direcciones. En el espacio anular entre los casquillos el condensado se mezcla con la infiltración a través del sector de la ranura a y se evacúa el reservorio de presión. La otra parte de condensado se dirige por el sector de la ranura b a la cámara C y luego al condensador. Una parte insignificante de condensado pasa a través del sector de la ranura c y se vierte el reservorio sin presión. Para disminuir las infiltraciones y el gasto de condensado de cierre hidráulico la dimensión radial de la ranura se hace no mayor de 0.3 mm.

Las pérdidas de potencia por las empaquetaduras de ranuras es considerablemente menor que en las empaquetaduras de contacto.

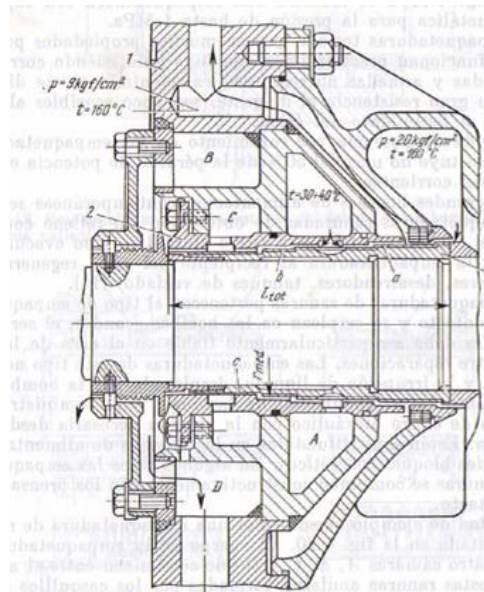


Fig. 1.7 Empaquetadura frontal de laberinto.

1.1.3 Álabes guías y conductos de aspiración y descarga.

Los dispositivos guías se hacen sin paletas o con paletas. En el primer caso ellos representan unos canales espirales en la fundición del cuerpo, y en el segundo, son piezas recambiables que se fijan en las cavidades de las secciones o en las mitades superior o inferior del cuerpo. En algunas estructuras el flujo pasa de etapa o de un grupo de etapas no por canales en el cuerpo de la bomba, sino por tubos de pasos especiales, ubicados fuera del cuerpo de la bomba. Las tubuladuras de aspiración y de impulsión forman ordinariamente una sola pieza con la mitad inferior del cuerpo de la bomba o con sus secciones. En casi todas las estructuras están hechas con una ligera inclinación hacia el cuerpo (con un ángulo de hasta 12^0).

1.1.4 Bases de cimentación.

Las bases de cimentación están destinadas para instalar y fijar a ellas la bomba y el motor, y en algunos casos solamente para sujetar la bomba. Ellas representan una estructura plana nervada fundida con salientes horizontales cepillados, en los cuales se apoyan y se fijan las patas del cuerpo de la bomba. Las bases de cimentación se

funden de hierro colado o se sueldan de perfiles laminados de acero. El empleo de las bases de cimentación crea grandes comodidades durante el montaje y los ajustes de las bombas y los motores. No obstante, en las grandes bombas las bases de cimentación comunes para la bomba y el motor a veces no se utilizan.

1.2 Los soportes de los árboles de las máquinas.

Los soportes de los árboles de las máquinas históricamente se han idealizado a través de tres esquemas de análisis típicos: el apoyo articulado móvil, el apoyo articulado fijo y el apoyo empotrado, sin embargo, estos esquemas idealizados se alejan en cierta medida de la realidad. Los apoyos articulados provocan en los mismos: fuerzas internas, tensiones, flechas y pendientes mucho mayores que los reales y los apoyos empotrados: fuerzas internas, tensiones, flechas y pendientes mucho menores que las que existen en la realidad. Estas insuficiencias de los esquemas de análisis se han asimilado históricamente a través del controvertido factor de seguridad, encargado de llevar sobre su espalda todas las imprecisiones e incertidumbres de los cálculos. Los esquemas de análisis de los apoyos rígidos clásicos utilizados en los sistemas planos en la literatura de Mecánica Teórica se muestran en las Fig. 1.8. En la literatura técnica se utilizan otros apoyos articulados que consideran las propiedades elásticas de los apoyos. Estos modelos se muestran en las Fig. 1.9. En la literatura de Mecánica Teórica (Bedford and Fowler, 2002; Beer and Johnston, 1884; Meriam, 2003) sólo se hace referencia a los apoyos rígidos clásicos, ningún autor hace referencia a ningún otro tipo de apoyo que contemple una rigidez intermedia entre los apoyos articulados y los empotrados.

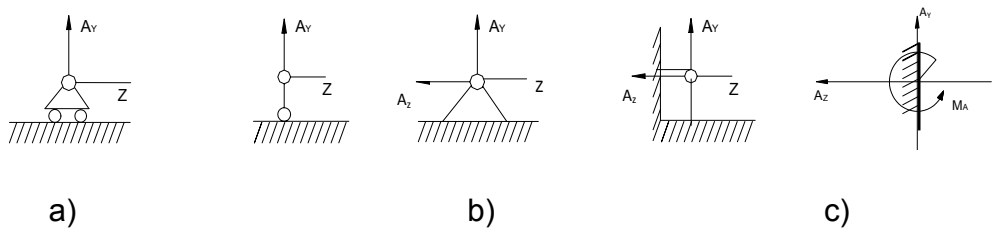


Fig. 1.8 Esquemas de Análisis Clásicos.

a) Apoyo Articulado Rígido Móvil.

b) Apoyo Articulado Rígido Fijo.

c) Empotramiento Rígido.

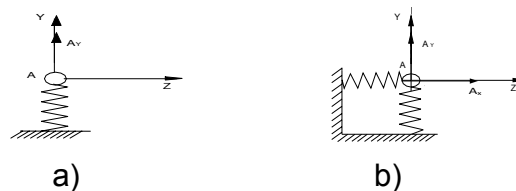


Fig. 1.9 Esquema de Análisis del Apoyo Articulado. a) Móvil Elástico. y b) Móvil fijo.

En la literatura de Mecánica de Materiales, la mayoría de los autores se refieren también exclusivamente a los apoyos rígidos clásicos, sin contemplar en ningún caso la elasticidad de los apoyos (Fitzgerald, 1996; Fogiel, 1988; Mott, 1996; Spiegel and Limbrunner, 1999). Otro grupo de autores trata de alguna manera los apoyos elásticos mencionados anteriormente (Birger, 1966; Feodosiev, 1985; Pisarenko, 1989) y sólo en (Olsen, 1965) se menciona la posibilidad de que los empotramientos no sean perfectamente rígidos, pero sin profundizar en las cualidades ni en el modelo físico – matemático de este tipo de Esquema de Análisis y mucho menos en los procedimientos de cálculo. En la literatura de Diseño de Elementos de Máquinas los autores se refieren en mayor medida a los aspectos vinculados con la rigidez de los apoyos y a los diferentes posibles Esquemas de Análisis al situar las reacciones en los mismos, así por ejemplo: (Wilson, 1999) al referirse a las reacciones en los elementos sometidos a flexión, señala que los soportes son usualmente idealizados con el objetivo de simplificar el análisis y añade que el soporte simple consiste en una fuerza concentrada resultante como reacción. Este tipo de soporte es utilizado para

representar: cajas de bolas, rolletes, cojinetes de deslizamiento y otros soportes que permiten alguna rotación o pendiente en el plano durante la deformación por flexión. Más adelante expresa: “Si el soporte de la viga no permite movimiento relativo a lo largo del eje de la misma, entonces surgirá una restricción adicional que provocará una fuerza axial como resultado de dicha restricción”. Este efecto axial se desprecia siempre en los problemas de Diseño de Máquinas y continúa diciendo: “El apoyo empotrado, proporciona como reacciones una fuerza y un momento que no permiten rotación alguna en el plano de la deflexión del elemento. La pendiente de la curva elástica del elemento es cero en el apoyo empotrado, los que son utilizados para representar soportes muy rígidos”. Cuando se refiere a las reacciones en los cojinetes en el diseño de árboles, explica que: “generalmente los mismos están soportados por dos cojinetes, como regla, los cuales son considerados como soportes simples o simple apoyos”. Al construir diagramas de momentos flectores, tanto en elementos sometidos a flexión como en el diseño de árboles, sólo se refiere a los apoyos clásicos y sus reacciones correspondientes. Los autores que abordan el Diseño por el Método de los Elementos Finitos (MEF) (Hawkes, 1989; Volmir, 1986; Wilson, 1997) emplean diferentes tipos de elementos que se diferencian por su forma, a través de las posiciones relativas de sus nodos y por los grados de libertad, es decir por las posibles direcciones del movimiento de cada nodo. Eligiendo adecuadamente estos elementos en las zonas de apoyo es posible modelar apoyos con diferente rigideces y lograr una mayor aproximación a la realidad que en los clásicos apoyos articulados y empotrados. Esta cualidad del Método de los Elementos Finitos puede ser utilizada en la práctica para lograr aproximaciones más exactas. El Colectivo de Mecánica Aplicada de la Universidad de Cienfuegos ha definido un Nuevo Tipo de Apoyo Elástico: El Empotramiento Elástico (Fig. 1.10 a) y el Empotramiento Parcialmente Elástico (Fig. 1.10 b) y ha determinado experimentalmente (Nodal, 2004; Goytisolo, 2006; Hidalgo 2009) el coeficiente de rigidez de los cojinetes de rodamientos más comunes al ser utilizados como apoyos en árboles. Una caja de bolas radial de doble hilera autoalineante se comporta a la flexión como una articulación rígida, además,

una caja de bolas radial rígida de simple hilera se comporta como un empotramiento parcialmente elástico con un coeficiente de rigidez $\phi = 0,346$.

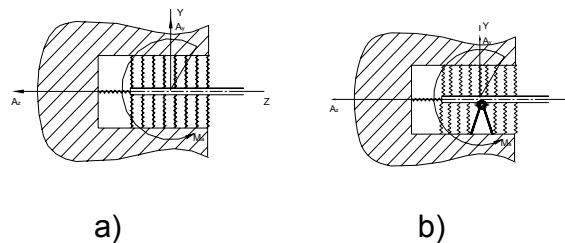


Fig. 1.10 a) Empotramiento Elástico. b) Empotramiento Parcialmente Elástico.

1.3 Investigación experimental del coeficiente de rigidez de los cojinetes de rodamientos.

Para la determinación de los desplazamientos reales que se producen en el centro de la luz en un árbol con diferentes cojinetes de rodamientos en los apoyos, se construyó la instalación experimental que se muestra en la Fig. 1.11 a) y b). Para aplicar carga se utilizó la prensa neumática de la Fig. 1.11 a) (Goytisoló, 2006; Hidalgo, 2009).

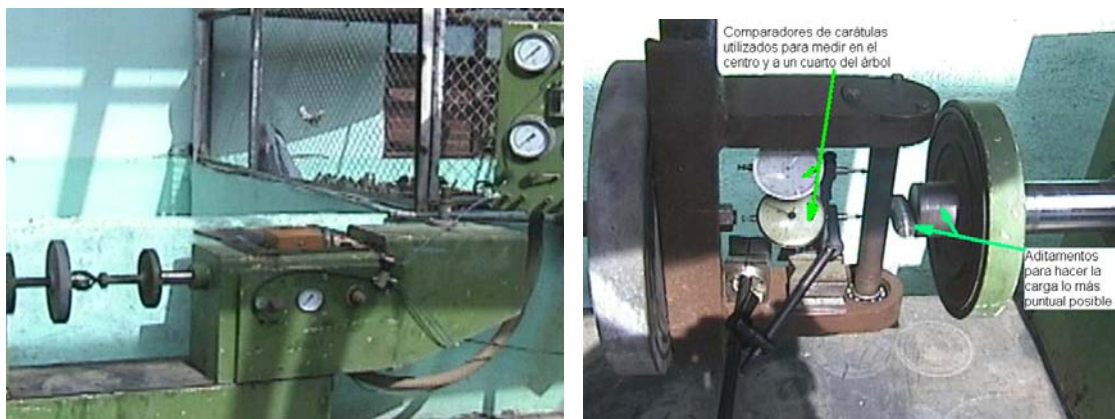


Fig. 1.11 Instalación Experimental. a) Prensa Neumática. b) Medición de las flechas.

Capítulo I: Particularidades constructivas de los árboles y cojinetes de las bombas centrífugas y características específicas de los soportes de los árboles de las máquinas en general

En la determinación experimental de la flecha real en árboles con apoyos con diferentes tipos de rodamientos se realizaron dos mediciones para cada valor de la carga y diez valores de carga por cada rodamiento. Utilizando la ecuación siguiente obtenida en el trabajo para la flecha en el centro de la luz en el caso de un árbol sobre empotramientos elásticos y los resultados de las mediciones, se determinó el coeficiente de rigidez despejándolo de la siguiente ecuación obtenida para la flecha:

$$\varphi = \left(\frac{y_{\frac{l}{2}} \cdot 48 \cdot E \cdot I_x}{P \cdot l^3} + 1 \right) \cdot \frac{P \cdot l}{6 \cdot M_{emp}}$$

Al aplicar esta ecuación hay que tener en cuenta que la flecha obtenida en la medición experimental $y_{l/2}$ es negativa por convenio de signos y hay que sustituirla en la ecuación con su correspondiente signo negativo. Los resultados se obtuvieron en una Hoja de Cálculo de EXCEL y se muestran en la Tabla 2.

Tabla 1.1. Valores del coeficiente φ de rigidez de los apoyos.

Caja de Bolas Radial de Simple Hilera	Caja de Bolas Radial de Doble Hilera	Rollete Cónico
0,314492907	0,711912932	0,45900928
0,30107353	0,703654853	0,447654422
0,345202637	0,625203108	0,421073732
0,361862163	0,599511309	0,418062974
0,347731673	0,590519179	0,421435023
0,355877141	0,581848197	0,397918268
0,355439213	0,543310497	0,395181215

Capítulo I: Particularidades constructivas de los árboles y cojinetes de las bombas centrífugas y características específicas de los soportes de los árboles de las máquinas en general

0,362850309	0,52959997	0,376190282
0,357847819	0,524041648	0,356815559
0,360256425	0,526931975	0,348695116
Media o promedio de los resultados		
0,34626338	0,59365337	0,40420359
Desviación promedio de los resultados		
0,01560421	0,05313375	0,0292435

En el siguiente gráfico se muestra el diagrama de P_v y obtenido, donde se aprecian, tal como era de esperar, que los desplazamientos medidos ocupan una posición intermedia entre los apoyos articulados y empotrados. La caja de bolas radial de simple hilera (6204) es el rodamiento menos rígido, le sigue el rollete cónico (7204) y el rodamiento con mayor coeficiente de rigidez es la caja de bolas radial de doble hilera rígida (2204).

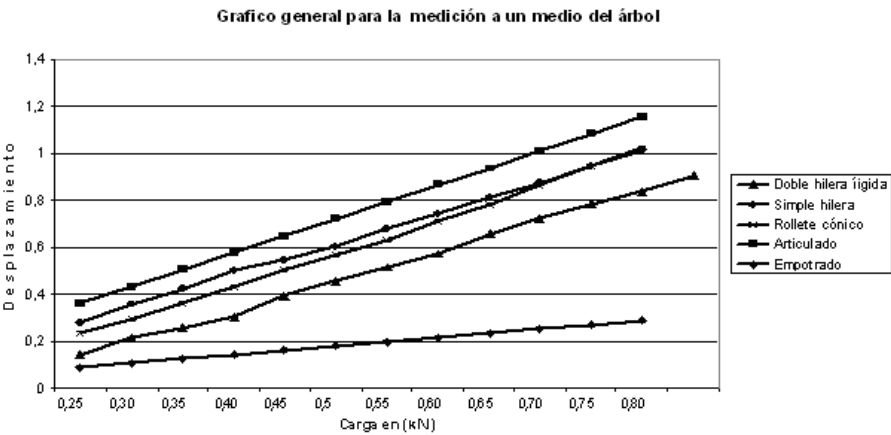


Fig. 1.12 Comportamiento experimental desplazamiento en el centro de la luz para diferentes cojinetes de rodamientos comparados con los apoyos idealizados articulado y empotrado.

Capítulo I: Particularidades constructivas de los árboles y cojinetes de las bombas centrífugas y características específicas de los soportes de los árboles de las máquinas en general

Los valores del coeficiente de rigidez para cada uno de los cojinetes investigados, obtenidos en los experimentos se muestran en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 Valores del coeficiente de rigidez		
Simple Hilera	Doble Hilera	Rollete Cónico
0,314492907	0,711912932	0,45900928
0,30107353	0,703654853	0,447654422
0,345202637	0,625203108	0,421073732
0,361862163	0,599511309	0,418062974
0,347731673	0,590519179	0,421435023
0,355877141	0,581848197	0,397918268
0,355439213	0,543310497	0,395181215
0,362850309	0,52959997	0,376190282
0,357847819	0,524041648	0,356815559
0,360256425	0,526931975	0,348695116

Los valores medios de los coeficientes de rigidez de los cojinetes investigados fueron:

1. Caja de bolas radial de simple hilera: $\varphi_{cbrsh} = 0,346$
2. Rollete cónico de simple hilera: $\varphi_{rcsh} = 0,404$
3. Caja de bolas radial de doble hilera rígida: $\varphi_{cbrdhr} = 0,60$

En los trabajos (Nodal, 2004; Goytisoló, 2006; Hidalgo 2009) se demuestra que el momento de reacción en un empotramiento elástico o en un empotramiento parcialmente elástico se puede calcular como el producto del coeficiente φ del cojinete correspondiente por el momento que surge en el empotramiento rígido correspondiente, o sea:

$$M_{\text{empotramiento. elástico}} = \varphi_{\text{cojinete}} \cdot M_{\text{empotramiento. rígido}}$$

1.4 Fuerzas axiales y radiales sobre los impelentes de las bombas centrífugas.

1.4.1 Fuerzas axiales.

Estas fuerzas surgen en las máquinas centrífugas como resultado de las presiones, de igual valor y dirección, que actúan sobre las ruedas de trabajo por los lados delantero (dirigido hacia la admisión) y trasero, además, la fuerza axial surge como resultado de la acción dinámica del flujo que entra entre las ruedas de trabajo. En las grandes máquinas centrífugas multietápicas las fuerzas axiales pueden alcanzar varias decenas de toneladas. Durante el cálculo de las fuerzas centrífugas que actúan sobre las superficies curvilíneas de la rueda de trabajo se deben examinar las proyecciones de estas superficies sobre un plano perpendicular al eje geométrico de la máquina. Supongamos que en la cavidad de entrada a la rueda de trabajo la presión es igual a p_1 , Fig. 1.13. Si existe la empaquetadura a en el diámetro de entrada de la rueda la presión final p_2 se propaga a través de las holguras a las cavidades b y c delante y detrás de la rueda. La presión axial real p en cualquier punto de la superficie exterior de la rueda, que se encuentra a una distancia arbitraria del centro, es el resultado de la acción de las presiones: P_1 y P_w , creada por la acción de las fuerzas centrífugas del líquido que gira en la cavidad entre la superficie exterior de la rueda y el cuerpo, es decir:

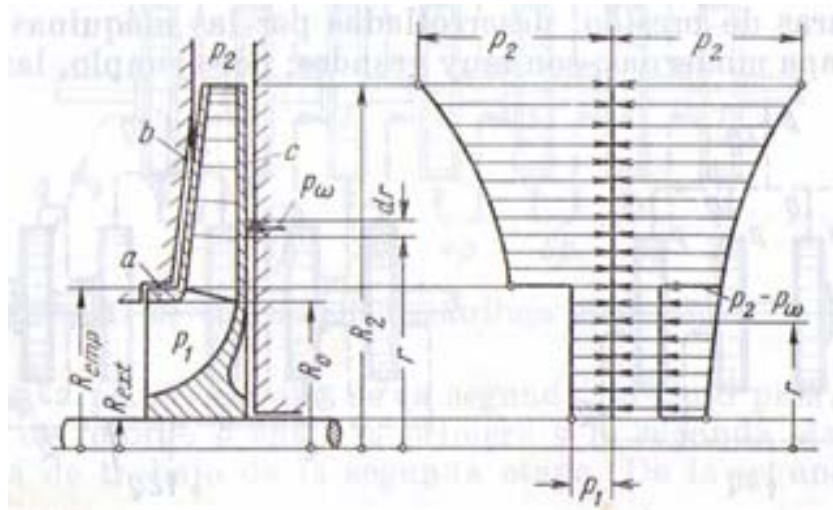


Fig. 1.13 Distribución de las presiones axiales por las superficies exteriores de la rueda de una máquina centrífuga.

$$P = P_2 - P_w$$

Por vía experimental se ha demostrado que en ausencia de gasto a través de las holguras la velocidad angular de la rueda del trabajo. A base de este razonamiento se puede calcular P_w .

Separemos en la cavidad c volumen angular del líquido con una anchura igual a la unidad, y los radios r y $r + dr$. Al girar este volumen anular con una velocidad angular $w/2$ en su superficie cilíndrica interior actúa la fuerza centrífuga del líquido.

$$dP_c = \rho * 2\pi r * dr * \frac{w^2}{4} r$$

La presión, condicionada por esta fuerza centrífuga, es:

$$dP_w = -\frac{dP_c}{2\pi r l} = -\rho \frac{w^2}{4} r *$$

El signo negativo de dP_w indica que bajo la influencia de la fuerza centrífuga del líquido en las secciones cilíndricas de la cavidad c surge rarificación (disminuye la presión):

Capítulo I: Particularidades constructivas de los árboles y cojinetes de las bombas centrífugas y características específicas de los soportes de los árboles de las máquinas en general

$$P_w = - \int_t^{R_2} \rho \frac{w^2}{4} r dr = - \rho \frac{w^2}{8} (R_2^2 - r^2)$$

De donde:

$$P = P_2 - \rho \frac{w^2}{8} (R_2^2 - r^2)$$

La empaquetadura hidráulica a la entrada en la rueda en la circunferencia de radio R_2 condiciona el equilibrio de las presiones exteriores sobre las ruedas de trabajo por los lados delantero y trasero. Entre los límites de R_{ext} a R_{emp} las presiones sobre la rueda no están equilibradas, puestos que por el lado posterior, la presión p , distribuida según la ley expresada por la fórmula (1.4). Evidentemente, la fuerza condicionada por estas presiones, que actúan sobre la rueda, es igual a:

$$P_p = \int_{R_{ext}}^{R_{emp}} 2\pi r dr \left[P_2 - \rho \frac{w^2}{8} (R_2^2 - r^2) - \pi (R_{emp}^2 - R_{ext}^2) * P_1 \right]$$

La integración y la transformación algebraica llevan a esta última ecuación a la forma:

$$P_p = \pi (R_{emp}^2 - R_{ext}^2) * (P_2 - P_1) - \frac{\pi \rho w^2}{8} (R_{emp}^2 - R_{ext}^2) \left[R_2^2 - 0.5 (R_{emp}^2 + R_{ext}^2) \right]$$

El flujo en la rueda de una máquina centrífuga radial cambia la dirección de movimiento. Al entrar en la dirección axial él abandona la rueda, moviéndose en los planos, perpendiculares al eje de la máquina, gracias a lo cual surge presión dinámica sobre la rueda. La fuerza condicionada por esta presión se puede determinar aplicando la ecuación de la cantidad de movimiento,

$$P_{din} \Delta t = \left(m_s c_o - m_s c_2 \cos \frac{\pi}{2} \right) \Delta t$$

Donde $\Delta t = 1$ s. Entonces:

$$P_{din} = \rho Q c_o$$

La dirección de acción de la fuerzas P_{din} corresponde a la dirección de la velocidad c_o a la entrada de la rueda de la máquina. La fuerza axial que actúa sobre una rueda de trabajo de la máquina centrífuga se obtiene por adicción algebraica de las fuerzas: P_p y P_{din} :

$$P'_{ax} = \pi(R_{emp}^2 - R_{ext}^2) * (P_2 - P_1) - \frac{\pi \rho w^2}{8} (R_{emp}^2 - R_{ext}^2) \left[R_2^2 - 0.5(R_{emp}^2 - R_{ext}^2) \right] - \rho Q c_o$$

Como se ven en la expresión, las fuerzas axiales dependen de distintos factores los principales de estos son: las dimensiones radiales de la rueda R_2 y R_{emp} , la frecuencia de rotación y la presión a la salida de la rueda. La fuerza axial es tanto mayor, cuanto menos cargada está la máquina, es decir, cuanto menor es la alimentación de la máquina, que se alcanza por estrangulación. El valor máximo de la fuerza axial es en marcha en vacío de la máquina (cierre total del estrangulador de regulación). Este se explica por la ausencia de la fuerza dinámica axial y la elevación de P_2 al disminuir la alimentación de la máquina.

La fórmula anterior se refiere a una etapa de la máquina centrífuga. Si la máquina centrífuga consta de i etapas iguales de presión, entonces la fuerza axial en el rotor será igual a:

$$P_{ax} = iP'_{ax}$$

En las condiciones reales, merced a las fugas a través de las empaquetaduras, los valores de la fuerza axial se diferencian algo de los calculados por las expresiones. La fuerza axial en las máquinas multietápicas puede alcanzar altos valores, y si es alta la frecuencia de rotación se soporta con dificultad por los cojinetes de empuje. Solamente en las máquinas de pequeñas dimensiones y con pequeño número de etapas se puede admitir que la fuerza axial sea soportada por los cojinetes de empuje.

Capítulo I: Particularidades constructivas de los árboles y cojinetes de las bombas centrífugas y características específicas de los soportes de los árboles de las máquinas en general

La causa principal del surgimiento de las fuerzas radiales es la asimetría del flujo a la salida de la rueda de trabajo, condicionada principalmente por la influencia del conducto de descarga (de evacuación). Al cambiar la velocidad en el conducto de evacuación según la ley de conservación de la energía tiene lugar la correspondiente variación de la presión proporcionan en total la fuerza radial que actúa sobre el rotor de la bomba. La presión en el conducto de evacuación en espiral es constante por la longitud únicamente en el régimen calculado de la bomba con la alimentación óptima Q_o . Naturalmente que regular la bomba siendo $Q \leq Q_o$ el conducto de descarga espiral trabajo como difusor, mientras que para $Q \geq Q_o$, como confusor, y la velocidad en el disminuye o aumenta respectivamente. De este modo, la fuerza radial surge únicamente al desviarse el régimen del óptimo. Sobre la base de las premisas y experimentos teóricos la fuerza radial en una bomba con conducto de descarga espiral se calcula valiéndose de la fórmula:

$$P_r = k_r \left(1 - \frac{Q}{Q_o} \right) \rho g H D_2 b_2$$

De la fórmula se desprende que el valor máximo de la fuerza radial $(P_r)_{\max} = k_r \rho g H D_2 b_2$ se alcanza siendo $Q = 0$, y el mínimo, cuando $Q = Q_o$.

Para las bombas con conducto de descarga anular se emplea la fórmula:

$$P_r = k_r \frac{Q}{Q_o} \rho g H D_2 b_2$$

En los cálculos aproximados se toma $k_r = 0.36$.

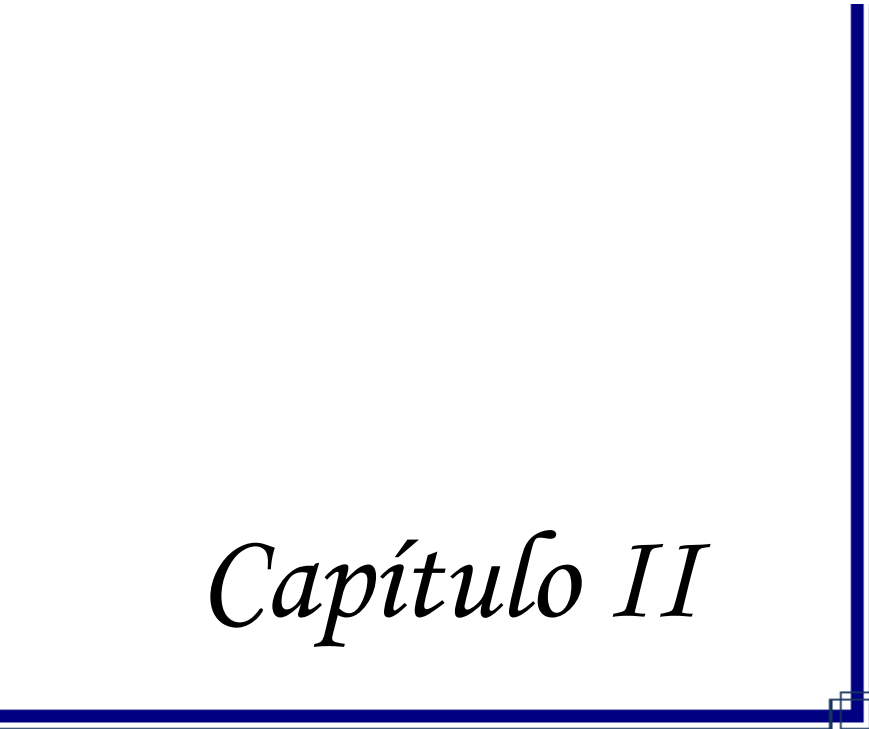
Las fuerzas radiales son originadas también por el desequilibrio estático y dinámico del rotor a causa de la inexactitud de la tecnología y el montaje de la bomba. Un procedimiento radical de disminución de la fuerza radial consiste en emplear en las bombas multietápicas canales difusores. En estos casos se puede despreciar la fuerza

radial originada por el líquido. Las fuerzas radiales se soportan por los cojinetes de la bomba e influyen esencialmente en su fiabilidad y duración.

1.5 Conclusiones del Capítulo.

1. Se profundizó en la estructura y en los detalles constructivos de las distintas partes de una bomba como son: cuerpo, árbol, cojinetes, empaquetaduras y base de cimentación, así como los materiales más comunes y de funcionamiento de las mismas y en particular en los aspectos relacionados con las fuerzas radiales y axiales en los impelentes.
2. Se profundizó en la literatura acerca de los apoyos clásicos empleados en los árboles de las máquinas y en el empleo de los esquemas de análisis con apoyos elásticos.
3. Se profundizó en los nuevos conceptos de empotramiento elástico y empotramiento parcialmente elástico y en los resultados precedentes obtenidos por el Colectivo de Mecánica Aplicada de la UCf acerca del comportamiento de los cojinetes de rodamientos como empotramientos parcialmente elásticos.
4. Se profundizó en las expresiones de cálculo de las fuerzas axiales y radiales de las bombas centrífugas y en particular el hecho de que en las bombas centrífugas multietápicas con difusores, las fuerzas radiales provocadas por el líquido se pueden despreciar.

Capítulo II

A decorative L-shaped line in the bottom right corner, consisting of a horizontal line and a vertical line meeting at a small square corner.

Capítulo II: Desarrollo del método general de cálculo de los árboles de las bombas centrífugas considerando los cojinetes de rodamientos como empotramientos parcialmente elásticos y las empaquetaduras como apoyos elásticos suplementarios.

CAPITULO II: DESARROLLO DEL MÉTODO GENERAL DE CÁLCULO DE LOS ÁRBOLES DE LAS BOMBAS CENTRÍFUGAS CONSIDERANDO LOS COJINETES DE RODAMIENTOS COMO EMPOTRAMIENTOS PARCIALMENTE ELÁSTICOS Y LAS EMPAQUETADURAS COMO APOYOS ELÁSTICOS SUPLEMENTARIOS.

2.1 Utilización del Método de las Fuerzas en la solución de árboles hiperestáticos.

El sistema que posee un número de ligaduras superior a las necesarias es un sistema hiperestático y el número de ligaduras suplementarias es igual al grado de hiperestaticidad. La hiperestaticidad puede ser exterior o interior en dependencia de que las ligaduras suplementarias sean exteriores o interiores. En los sistemas hiperestáticos con ligaduras exteriores suplementarias no es posible la determinación de las reacciones de apoyo mediante las ecuaciones de equilibrio y si la hiperestaticidad es interior no es posible determinar las fuerzas internas en las barras por el método de las secciones, de donde se puede definir un Sistema Hiperestático como (Feodosiev, 1985). Durante la solución de los sistemas hiperestáticos por el Método de las Fuerzas es necesario elegir un Sistema Base y conformar lo que se conoce como Sistema Equivalente. El Sistema Base es el sistema hiperestático dado en el cual se han eliminado todas las ligaduras suplementarias tanto exteriores como interiores y el Sistema Equivalente es el sistema base en el cual las ligaduras suplementarias eliminadas han sido sustituidas por las fuerzas que las representan. En un sistema equivalente dado, las fuerzas se designan por $X_1, X_2, \dots, X_n$.

Los desplazamientos originados por el sistema de fuerzas aplicado al Sistema Equivalente, en el caso de apoyos rígidos, en la dirección de cada una de las ligaduras eliminadas, tienen que ser cero. O sea:

Capítulo II: Desarrollo del método general de cálculo de los árboles de las bombas centrífugas considerando los cojinetes de rodamientos como empotramientos parcialmente elásticos y las empaquetaduras como apoyos elásticos suplementarios.

$$\delta_{1[X1, X2, X3, \dots, Xn, P, P1]} = 0$$

$$\delta_{2[X1, X2, X3, \dots, Xn, P, P1]} = 0$$

$$\vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots$$

$$\delta_{n[X1, X2, X3, \dots, Xn, P, P1]} = 0$$

Puesto que cada uno de los desplazamientos δ_{iXk} es proporcional a la fuerza correspondiente se puede escribir que:

$$\delta_{iXk} = \delta_{ik} \cdot X_k$$

Donde δ_{ik} es el desplazamiento en la dirección i provocada por una fuerza unitaria colocada en la posición de X_k . Las expresiones anteriores quedarán entonces escritas como:

$$\delta_{11} \cdot X_1 + \delta_{12} \cdot X_2 + \delta_{13} \cdot X_3 + \dots \quad \dots + \delta_{1n} \cdot X_n + \delta_{1P} = 0$$

$$\delta_{21} \cdot X_1 + \delta_{22} \cdot X_2 + \delta_{23} \cdot X_3 + \dots \quad \dots + \delta_{2n} \cdot X_n + \delta_{2P} = 0$$

$$\vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots$$

$$\delta_{n1} \cdot X_1 + \delta_{n2} \cdot X_2 + \delta_{n3} \cdot X_3 + \dots \quad \dots + \delta_{nn} \cdot X_n + \delta_{nP} = 0$$

Estas ecuaciones se conocen como ecuaciones canónicas del Método de las Fuerzas pues en las mismas las incógnitas son las fuerzas $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ y existirán tantas ecuaciones como fuerzas X_k desconocidas existan. Para resolver el sistema de ecuaciones es necesario hallar los desplazamientos δ_{ik} que constituyen los coeficientes de las incógnitas X_k y además los términos independientes de las diferentes ecuaciones δ_{iP} . Según el Método de Mohr (Feodosiev, 1985), para hallar el desplazamiento en una dirección i determinada es necesario colocar una fuerza unitaria en esa dirección y obtener las acciones interiores provocadas por dicha fuerza unitaria y después obtener la integral del producto de las acciones interiores provocadas por esta fuerza unitaria y las acciones originadas por las cargas que provocan el desplazamiento. Pero en este caso, como cada uno de los desplazamientos δ_{ik} es originado por una fuerza unitaria colocada en la posición X_k , el desplazamiento δ_{ik} es la integral del producto de dos funciones unitarias, una

Capítulo II: Desarrollo del método general de cálculo de los árboles de las bombas centrífugas considerando los cojinetes de rodamientos como empotramientos parcialmente elásticos y las empaquetaduras como apoyos elásticos suplementarios.

originada por una fuerza unitaria colocada en la dirección y la otra por una fuerza unitaria colocada en la dirección X_k . Los coeficientes δ_{ip} se hallan resolviendo las integrales correspondientes a los productos de la fuerza unitaria colocada en la dirección i , o sea, de las acciones interiores originadas por esta fuerza unitaria por las acciones interiores originadas por las cargas externas P .

Este Método de Solución de Sistemas Hiperestáticas se conoce como Método de las Fuerzas y es la Base Teórica de la casi totalidad de los Métodos de Solución de Árboles Hiperestáticas.

2.2 Utilización del Método de las Fuerzas en el caso de apoyos linealmente elásticos.

La diferencia esencial de un sistema hiperestático con apoyos rígidos con relación a uno con apoyos elásticos es que al plantear las ecuaciones canónicas del Método de las Fuerzas, en el caso de los apoyos rígidos, los desplazamientos resultantes en la dirección de cada una de las incógnitas es igual a cero, sin embargo en el caso de los apoyos elásticos el desplazamiento en la dirección de estos apoyos no es igual a cero sino será igual al desplazamiento que provoque la fuerza en dicho apoyo en el mismo, pues ya el apoyo no es rígido, sino elástico.

El desplazamiento general en la dirección del apoyo i será en general:

$$\delta_{i1} \cdot X_1 + \delta_{i2} \cdot X_2 + \delta_{i3} \cdot X_3 + \dots + \delta_{ip} = - X_i / C_{\text{apoyo elástico}}$$

2.3 Las empaquetaduras como apoyos linealmente elásticos.

En el caso de considerar las empaquetaduras de la bomba como apoyos lineales elásticos se necesita hallar la constante de rigidez de la empaquetadura. Para ello se parte de que la distribución de presiones que ejerce el árbol sobre la misma tiene una distribución sinusoidal tal como se muestra en la Fig. 2.1.

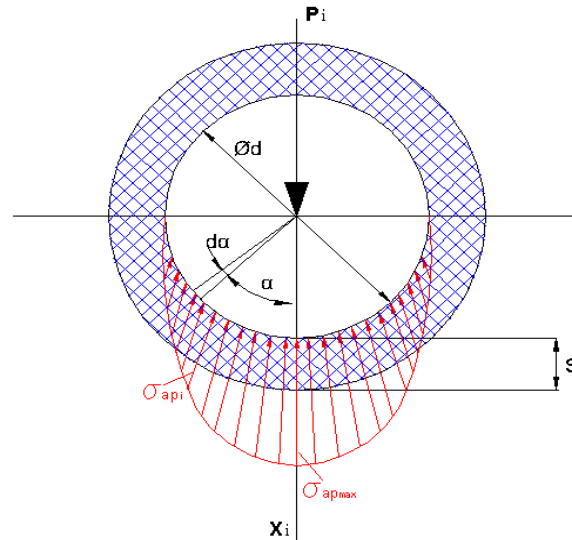


Fig. 2.1 Distribución de presiones en el contacto empaquetadura árbol.

Se cumple entonces que:

$$\sigma_{api} = \sigma_{ap\ max} \cdot \cos \alpha$$

Un diferencial de la reacción vertical X_i , o sea: d_{X_i} se puede escribir como sigue:

$$d_{X_i} = \sigma_{api} \cdot d \cdot A \cdot \cos \alpha = \sigma_{ap\ max} \cdot \cos \alpha \cdot \frac{d}{2} \cdot d \cdot \alpha \cdot l \cdot \cos \alpha$$

Integrando.

$$X_i = \int d_{X_i} = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sigma_{ap\ max} \cdot \frac{d}{2} \cdot l \cdot \cos^2 d \cdot \alpha$$

$$X_i = \sigma_{ap\ max} \cdot d \cdot l \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^2 d \cdot \alpha$$

$$X_i = \sigma_{ap\ max} \cdot d \cdot l \cdot \frac{\pi}{4}$$

Capítulo II: Desarrollo del método general de cálculo de los árboles de las bombas centrífugas considerando los cojinetes de rodamientos como empotramientos parcialmente elásticos y las empaquetaduras como apoyos elásticos suplementarios.

Despejando $\sigma_{ap\ max}$.

$$\sigma_{ap\ max} = \frac{4 \cdot X_i}{\pi \cdot d \cdot l}$$

Y el desplazamiento será igual a la variación del espesor de la empaquetadura, según la Ley de Hooke:

$$\delta_{emp_i} = \Delta S_{max} = \frac{\sigma_{ap\ max} \cdot S_{emp}}{E_{emp}}$$

$$\delta_{emp_i} = \frac{4 \cdot X_i \cdot S}{\pi \cdot d \cdot l \cdot E_{emp}}$$

Y como

$$\delta_{emp_i} = \frac{X_i}{C_{empi}}$$

Se deduce que

$$C_{empi} = \frac{\pi \cdot d \cdot l \cdot E_{emp}}{4 \cdot \delta_{emp_i}} \quad N/cm$$

d y l - Diámetro y longitud del árbol en la zona del árbol donde está la empaquetadura.

– cm

Semp – Espesor de la empaquetadura. – cm

Eemp – Módulo de elasticidad del material de la empaquetadura.- N/cm²

2.4 Esquema de Análisis del árbol de una bomba centrífuga multietápica considerando los dos cojinetes de apoyos como empotramientos parcialmente elásticos y las dos empaquetaduras como apoyos elásticos suplementarios.

En la Fig. 2.2 se muestra una bomba centrífuga cuya estructura será objeto de análisis para el desarrollo de un nuevo método de cálculo de los árboles de dichas bombas.

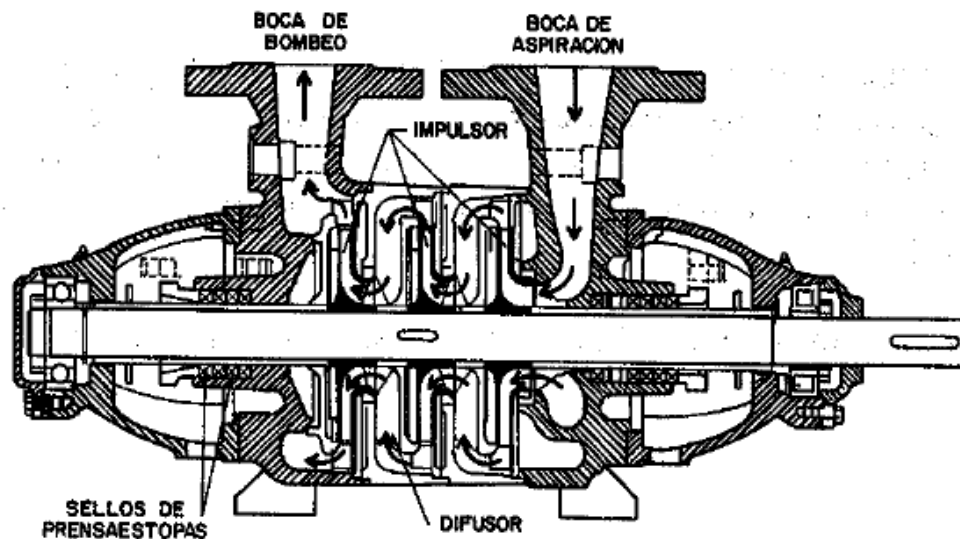


Fig. 2.2 Esquema de una bomba centrífuga similar a la de objeto de análisis.

Se trata de bombas centrífugas multietápicas, de hasta diez etapas, cuya estructura es tal que posee cojinetes de rodamientos en los puntos más exteriores del árbol, posee los impelentes ubicados en su parte central y posee empaquetaduras que limitan las fugas de líquido colocadas entre los cojinetes y los impelentes. Como se dijo anteriormente los cojinetes de rodamientos serán considerados como empotramientos parcialmente elásticos, cuyo coeficiente de rigidez angular ϕ fue investigado anteriormente (Goytisolo, 2006; Hidalgo 2009) y un nuevo elemento en el cálculo de estos árboles, la consideración de las empaquetaduras como apoyos elásticos suplementarios.

En la Fig. 2.3 se muestra el esquema de análisis del árbol, con los dos empotramientos parcialmente elásticos en la posición de los cojinetes de rodamientos y dos apoyos linealmente elásticos en la posición de las empaquetaduras.

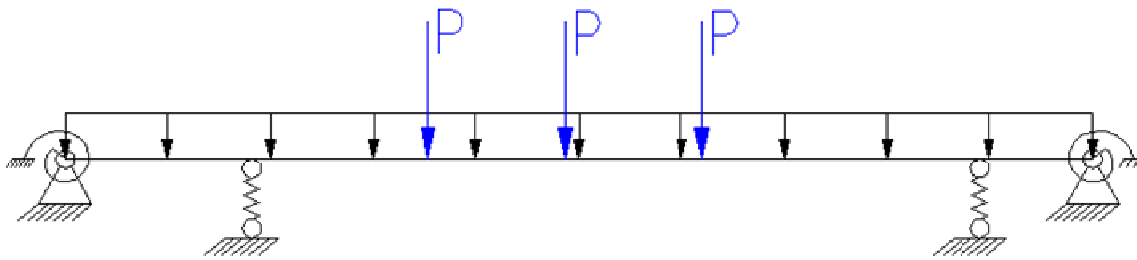


Fig. 2.3 Esquema de análisis del árbol de una bomba centrífuga Multietápica.

Para resolver este árbol hiperestático con empotramientos parcialmente elástico se hace necesario resolver el árbol hiperestático con empotramientos clásicos rígidos, ya que como se demostró en los trabajos (Nodal, 2004; Goytisolo, 2006; Hidalgo 2009) :

$$M_{\text{empotramiento elástico}} = \varphi \cdot M_{\text{empotramiento rígido}}$$

El esquema del árbol con empotramientos rígidos se muestra en la Fig. 2.4.

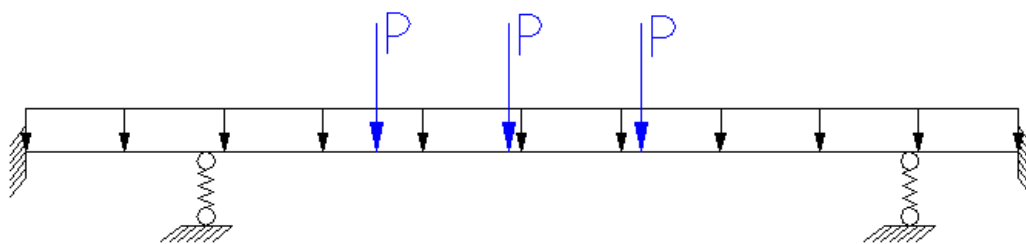


Fig. 2.4 Esquema del árbol de la bomba centrífuga con empotramientos rígidos.

El paso que viene a continuación es resolver el sistema hiperestático con empotramientos rígidos para hallar los momentos en los empotramientos y poder calcular entonces los momentos en los empotramientos parcialmente elásticos. El sistema equivalente del árbol con empotramientos rígidos se muestra en la Fig. 2.5.

Capítulo II: Desarrollo del método general de cálculo de los árboles de las bombas centrífugas considerando los cojinetes de rodamientos como empotramientos parcialmente elásticos y las empaquetaduras como apoyos elásticos suplementarios.

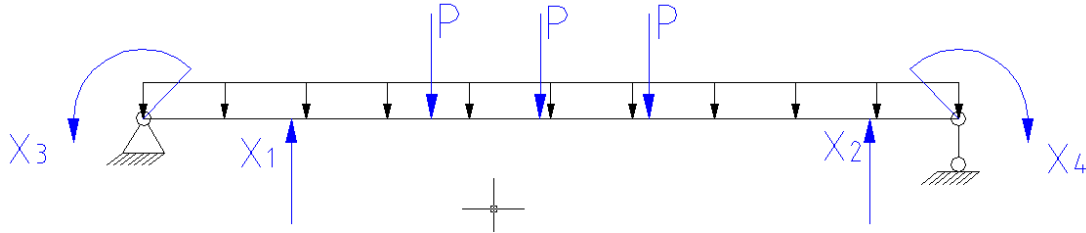


Fig. 2.5 Sistema Equivalente del árbol con empotramientos rígidos.

2.5 Solución por el Método de las Fuerzas.

La solución se llevará a cabo por el Método de las Fuerzas. El Sistema de Ecuaciones Canónicas para dicho Sistema Equivalente será:

$$\delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \delta_{13}X_3 + \delta_{14}X_4 + \delta_{1q} + \sum_{k=1}^n \delta_{1k}P_k = -\frac{X_1}{C_1}$$

$$\delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \delta_{23}X_3 + \delta_{24}X_4 + \delta_{2q} + \sum_{k=1}^n \delta_{2k}P_k = -\frac{X_2}{C_2}$$

$$\delta_{31}X_1 + \delta_{32}X_2 + \delta_{33}X_3 + \delta_{34}X_4 + \delta_{3q} + \sum_{k=1}^n \delta_{3k}P_k = 0$$

$$\delta_{41}X_1 + \delta_{42}X_2 + \delta_{43}X_3 + \delta_{44}X_4 + \delta_{4q} + \sum_{k=1}^n \delta_{4k}P_k = 0$$

La constante de rigidez de las empaquetaduras es:

$$C = \frac{\pi \cdot d \cdot l \cdot E_{emp}}{4 \cdot S_{emp}} \quad (\text{N/cm})$$

Capítulo II: Desarrollo del método general de cálculo de los árboles de las bombas centrífugas considerando los cojinetes de rodamientos como empotramientos parcialmente elásticos y las empaquetaduras como apoyos elásticos suplementarios.

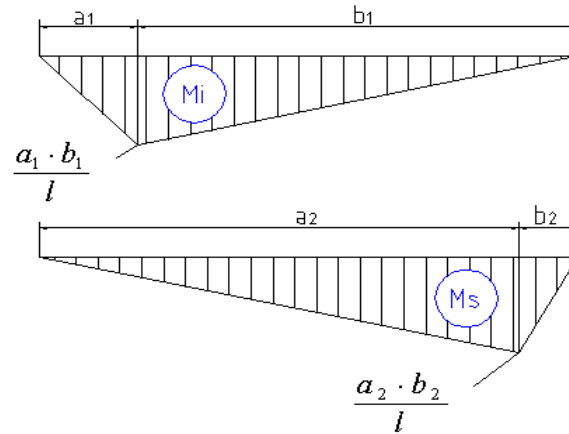


Fig. 2.6 Diagramas unitarios de las fuerzas X_1 y X_2 .

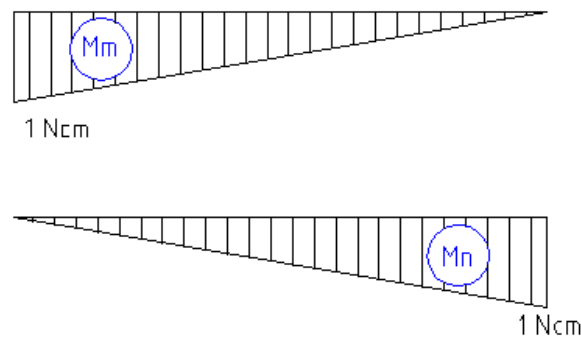


Fig. 2.7 Diagramas unitarios de las fuerzas X_3 y X_4 .

Los coeficientes de las incógnitas y términos independientes de las ecuaciones canónicas se calculan de acuerdo a la Regla de Vereschaguin (Pisarenko, 1989), como:

$$\delta_{ii} = \delta_{ss} = \frac{a_i^2 \cdot b_i^2}{3 \cdot l^2} \cdot l = \frac{a_i^2 \cdot b_i^2}{3 \cdot l}$$

$$\delta_{is} = \frac{a_1 \cdot b_2}{6 \cdot l^2} (2 \cdot a_1^2 \cdot b_1 + 2 \cdot a_2 \cdot b_2^2 + 2 \cdot a_1 \cdot b_1 \cdot C + a_1 \cdot b_2 \cdot C + a_2 \cdot b_1 \cdot C + 2 \cdot a_2 \cdot b_2 \cdot C)$$

Capítulo II: Desarrollo del método general de cálculo de los árboles de las bombas centrífugas considerando los cojinetes de rodamientos como empotramientos parcialmente elásticos y las empaquetaduras como apoyos elásticos suplementarios.

$$\delta_{nn} = \delta_{mm} = \frac{1}{3} \cdot 1 \cdot 1 \cdot l = \frac{l}{3}$$

$$\delta_{nm} = \frac{1}{6} \cdot 1 \cdot 1 \cdot l = \frac{l}{6}$$

$$\delta_{im} = \delta_{sn} = \frac{1}{6} \cdot \frac{a_1 \cdot b_1}{l} \cdot 1 \left(1 + \frac{b_1}{l}\right) \cdot l = \frac{a_1 \cdot b_1}{6} \left(\frac{l + b_1}{l}\right)$$

$$\delta_{in} = \delta_{sm} = \frac{1}{6} \cdot \frac{a_2 \cdot b_2}{l} \cdot 1 \left(1 + \frac{a_2}{l}\right) \cdot l = \frac{a_2 \cdot b_2}{6} \left(\frac{l + a_2}{l}\right)$$

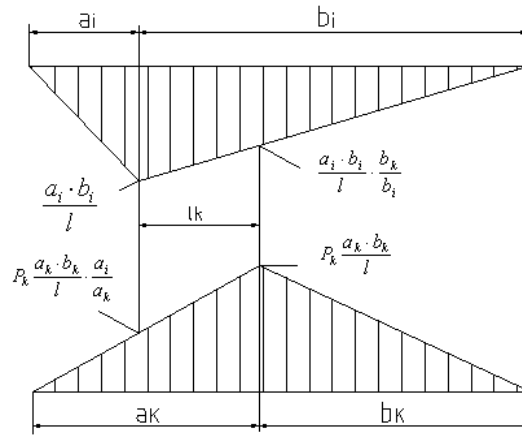


Fig. 2.8 Producto de Vereschaguin de la fuerza unitaria i y una carga P cuando la carga unitaria está a la izquierda de P.

La multiplicación de trapecio por trapecio de la parte central no aparece en la Tabla de Vereschaguin y se obtuvo en el presente trabajo y se da en el Anexos D.

$$\begin{aligned} \delta_{ipk} = & - \left\{ \frac{1}{3} \cdot P_k \cdot \frac{a_k \cdot b_k}{l} \cdot \frac{a_i}{a_k} \cdot \frac{a_i \cdot b_i}{l} \cdot a_i + \frac{1}{3} \cdot P_k \cdot \frac{a_k \cdot b_k}{l} \cdot \frac{a_i \cdot b_i}{l} \cdot \frac{b_k}{b_i} \cdot b_k + \right. \\ & \left. + \frac{1}{6} \left[P_k \cdot \frac{a_k \cdot b_k}{l} \cdot \frac{a_i}{a_k} \cdot \left(2 \cdot \frac{a_i \cdot b_i}{l} + \frac{a_i \cdot b_i}{l} \cdot \frac{b_k}{b_i} \right) \cdot l_k + P_k \cdot \frac{a_k \cdot b_k}{l} \cdot \left(\frac{a_i \cdot b_i}{l} + 2 \cdot \frac{a_i \cdot b_i}{l} \cdot \frac{b_k}{b_i} \right) \cdot l_k \right] \right\} \end{aligned}$$

Capítulo II: Desarrollo del método general de cálculo de los árboles de las bombas centrífugas considerando los cojinetes de rodamientos como empotramientos parcialmente elásticos y las empaquetaduras como apoyos elásticos suplementarios.

$$\delta_{ipk} = - \left\{ \frac{1}{3} \cdot \frac{P_k \cdot a_k \cdot b_k \cdot a_i \cdot b_i}{l^2} \cdot \frac{a_i^2}{a_k} + \frac{1}{3} \cdot \frac{P_k \cdot a_k \cdot b_k \cdot a_i \cdot b_i}{l^2} \cdot \frac{b_i^2}{b_k} + \right.$$

$$+ \frac{1}{6} \cdot \frac{P_k \cdot a_k \cdot b_k \cdot a_i \cdot b_i}{l^2} \cdot \frac{2 \cdot a_i \cdot l_k}{a_k} + \frac{1}{6} \cdot \frac{P_k \cdot a_k \cdot b_k \cdot a_i \cdot b_i}{l^2} \cdot \frac{a_i \cdot b_k \cdot l_k}{a_k \cdot b_i} + \frac{1}{6} \cdot \frac{P_k \cdot a_k \cdot b_k \cdot a_i \cdot b_i}{l^2} \cdot l_k + \frac{1}{6} \cdot \frac{P_k \cdot a_k \cdot b_k \cdot a_i \cdot b_i}{l^2} \cdot \frac{2 \cdot b_k \cdot l_k}{b_i} \left. \right\}$$

$$\delta_{ipk} = - \frac{1}{6} \cdot \frac{P_k \cdot a_k \cdot b_k \cdot a_i \cdot b_i}{l^2} \left[\frac{2 \cdot a_i^2}{a_k} + \frac{2 \cdot b_i^2}{b_k} + \frac{2 \cdot a_i \cdot l_k}{a_k} + \frac{a_i \cdot b_k \cdot l_k}{a_k \cdot b_i} + l_k + \frac{2 \cdot b_k \cdot l_k}{b_i} \right]$$

$$\delta_{ipk} = - \frac{1}{6} \cdot \frac{P_k \cdot a_k \cdot b_k \cdot a_i \cdot b_i}{l^2} \cdot \left[\frac{2 \cdot a_i^2 \cdot b_i + 2 \cdot a_k \cdot b_k^2 + 2 \cdot a_i \cdot b_i \cdot l_k + a_i \cdot b_k \cdot l_k + a_k \cdot b_i \cdot l_k + 2 \cdot a_k \cdot b_k \cdot l_k}{a_k \cdot b_i} \right]$$

$$\delta_{ipk} = - \frac{P_k \cdot a_i \cdot b_k}{6 \cdot l^2} (2a_i^2 \cdot b_i + 2a_k \cdot b_k^2 + 2a_i \cdot b_i \cdot l_k + a_i \cdot b_k \cdot l_k + a_k \cdot b_i \cdot l_k + 2 \cdot a_k \cdot b_k \cdot l_k)$$

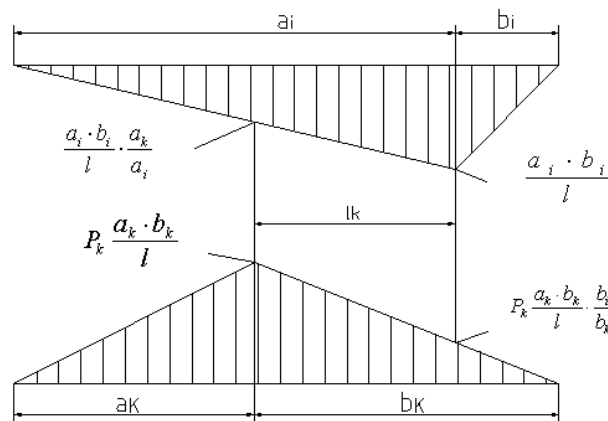


Fig. 2.9 Producto de Vereschaguin de la fuerza unitaria i y una carga P cuando la carga unitaria está a la derecha de P .

Capítulo II: Desarrollo del método general de cálculo de los árboles de las bombas centrífugas considerando los cojinetes de rodamientos como empotramientos parcialmente elásticos y las empaquetaduras como apoyos elásticos suplementarios.

$$\begin{aligned}\delta_{spk} = & -\left\{\frac{1}{3} \cdot P_k \cdot \frac{a_k \cdot b_k}{l} \cdot \frac{a_i \cdot b_i}{l} \cdot \frac{a_k}{a_i} \cdot a_k + \frac{1}{3} \cdot P_k \cdot \frac{a_k \cdot b_k}{l} \cdot \frac{b_i}{b_k} \cdot \frac{a_i \cdot b_i}{l} \cdot b_i + \right. \\ & + \frac{1}{6} \left[\frac{a_i \cdot b_i}{l} \cdot \frac{a_k}{a_i} \cdot \left(2 \cdot P_k \cdot \frac{a_k \cdot b_k}{l} + \frac{P_k \cdot a_k \cdot b_k}{l} \cdot \frac{b_i}{b_k} \right) \cdot s_k + \right. \\ & \left. \left. + \frac{a_i \cdot b_i}{l} \left(P_k \cdot \frac{a_k \cdot b_k}{l} + 2 \cdot P_k \cdot \frac{a_k \cdot b_k}{l} \cdot \frac{b_i}{b_k} \right) \cdot s_k \right\}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\delta_{spk} = & -\left\{\frac{1}{3} \cdot \frac{P_k \cdot a_k \cdot b_k \cdot a_i \cdot b_i}{l^2} \cdot \frac{a_k^2}{a_i} + \frac{1}{3} \cdot \frac{P_k \cdot a_k \cdot b_k \cdot a_i \cdot b_i}{l^2} \cdot \frac{b_i^2}{b_k} + \right. \\ & + \frac{1}{6} \cdot \frac{P_k \cdot a_k \cdot b_k \cdot a_i \cdot b_i}{l^2} \cdot 2 \cdot \frac{a_k \cdot s_k}{a_i} + \frac{1}{6} \cdot \frac{P_k \cdot a_k \cdot b_k \cdot a_i \cdot b_i}{l^2} \cdot \frac{a_k \cdot b_i}{a_i \cdot b_k} \cdot s_k + \\ & \left. + \frac{1}{6} \cdot \frac{P_k \cdot a_k \cdot b_k \cdot a_i \cdot b_i}{l^2} \cdot s_k + \frac{1}{6} \cdot \frac{P_k \cdot a_k \cdot b_k \cdot a_i \cdot b_i}{l^2} \cdot 2 \cdot \frac{b_i}{b_k} \cdot s_k \right\}\end{aligned}$$

$$\delta_{spk} = -\frac{1}{6} \cdot \frac{P_k \cdot a_k \cdot b_k \cdot a_i \cdot b_i}{l^2} \left[2 \frac{a_k^2}{a_i} + 2 \frac{b_i^2}{b_k} + 2 \frac{a_k \cdot s_k}{a_i} + \frac{a_k \cdot b_i \cdot s_k}{a_i \cdot b_k} + s_k + 2 \frac{b_i}{b_k} \cdot s_k \right]$$

$$\delta_{spk} = -\frac{1}{6} \cdot \frac{P_k \cdot a_k \cdot b_k \cdot a_i \cdot b_i}{l^2}$$

$$\left[\frac{2 \cdot a_k^2 \cdot b_k + 2 \cdot a_i \cdot b_i^2 + 2 \cdot a_k \cdot b_k \cdot s_k + a_k \cdot b_i \cdot s_k + a_i \cdot b_k \cdot s_k + 2 \cdot a_i \cdot b_i \cdot s_k}{a_i \cdot b_k} \right]$$

$$\delta_{spk} = -\frac{P_k \cdot a_k \cdot b_i}{6 \cdot l^2} (2a_k^2 \cdot b_k + 2a_i \cdot b_i^2 + 2a_k \cdot b_k \cdot s_k + a_k \cdot b_i \cdot s_k + a_i \cdot b_k \cdot s_k + 2a_i \cdot b_i \cdot s_k)$$

Capítulo II: Desarrollo del método general de cálculo de los árboles de las bombas centrífugas considerando los cojinetes de rodamientos como empotramientos parcialmente elásticos y las empaquetaduras como apoyos elásticos suplementarios.

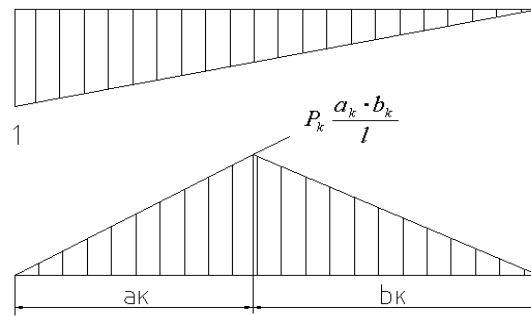


Fig. 2.10 Producto de Vereschagin de la fuerza unitaria de X_3 por la fuerza P .

$$\delta_{mpk} = -\frac{a_k \cdot P_k \cdot b_k}{6 \cdot l} \cdot (l + b_k)$$

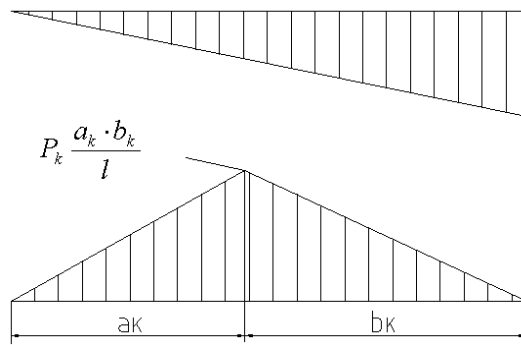


Fig. 2.11 Producto de Vereschagin de la fuerza unitaria de X_4 por la fuerza P .

$$\delta_{npk} = -\frac{a_k \cdot P_k \cdot b_k}{6 \cdot l} \cdot (l + a_k)$$

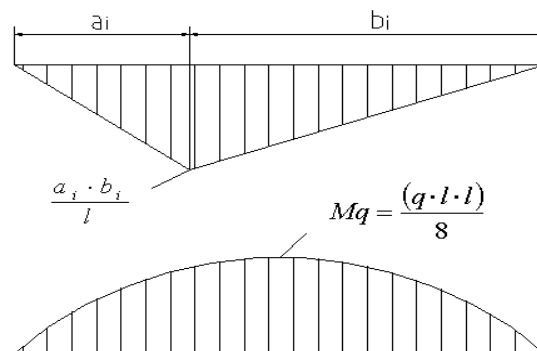


Fig. 2.12 Producto de Vereschagin de la fuerza unitaria de X_1 o X_2 por la carga distribuida q .

Capítulo II: Desarrollo del método general de cálculo de los árboles de las bombas centrífugas considerando los cojinetes de rodamientos como empotramientos parcialmente elásticos y las empaquetaduras como apoyos elásticos suplementarios.

$$\delta_{iq} = \delta_{sq} = -\frac{1}{3} \left(1 + \frac{a_i}{l} + \frac{b_i}{l} \right) \frac{q \cdot l^2}{8} \cdot \frac{a_i \cdot b_i}{l} \cdot l$$

$$\delta_{iq} = \delta_{sq} = -\frac{1}{3} \left(\frac{l^2 \cdot a_i \cdot b_i}{l^2} \right) \frac{q \cdot l^2}{8} \cdot a_i \cdot b_i$$

$$\delta_{iq} = \delta_{sq} = -\frac{q}{24} \cdot a_i \cdot b_i (l^2 \cdot a_i \cdot b_i)$$

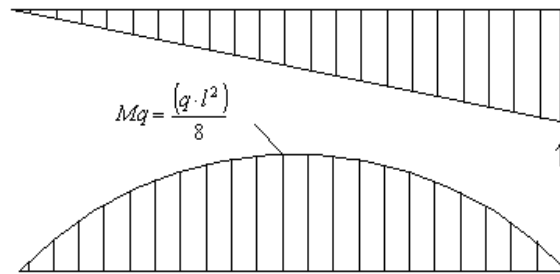


Fig. 2.13 Producto de Vereschaguin de la fuerza unitaria de X_3 o X_4 por la carga distribuida q .

$$\delta_{mq} = \delta_{nq} = -\frac{1}{3} \cdot \frac{q \cdot l^2}{8} \cdot l$$

$$\delta_{mq} = \delta_{nq} = -\frac{q \cdot l^3}{24}$$

Para resolver el sistema de ecuaciones con los coeficientes numéricos obtenidos se elaboró un Programa en MatLab mediante el cual se pueden hallar los coeficientes y resolver las ecuaciones canónicas para un número de impelentes de hasta diez y con cualquier variación en las dimensiones. Dicho programa será aplicado en el próximo capítulo a la bomba de tres etapas del buque “6 de Junio”.

Capítulo II: Desarrollo del método general de cálculo de los árboles de las bombas centrífugas considerando los cojinetes de rodamientos como empotramientos parcialmente elásticos y las empaquetaduras como apoyos elásticos suplementarios.

2.6 Conclusiones del Capítulo.

En el Capítulo se desarrolló una metodología de solución del sistema complejo hiperestático de apoyos del árbol de una bomba centrífuga considerando los cojinetes de rodamientos como empotramientos parcialmente elásticos y la las empaquetaduras como apoyos suplementarios elásticos.

Capítulo III

Capítulo III: Aplicación del nuevo método general de cálculo de los árboles de las bombas centrífugas desarrollado a la evaluación de la resistencia del árbol de la bomba centrífuga de tres etapas contra incendio de la embarcación “6 de Junio”.

CAPITULO III: APLICACIÓN DEL NUEVO MÉTODO GENERAL DE CÁLCULO DE LOS ÁRBOLES DE LAS BOMBAS CENTRÍFUGAS DESARROLLADO A LA EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL ÁRBOL DE LA BOMBA CENTRÍFUGA DE TRES ETAPAS CONTRA INCENDIO DE LA EMBARCACIÓN “6 DE JUNIO”.

3.1 Situación Problemática del árbol de la bomba de la embarcación “6 de Junio”.

La única embarcación contra incendios del país el buque “6 de Junio” del MININT después de 30 años de servicio fue sometida a una reparación general, pues su casco se había deteriorado sensiblemente y las dos bombas contra incendios de la misma habían sufrido deterioros provocadas por la acción corrosiva y erosiva del agua de mar que impedían su funcionamiento. La Bomba Objeto de Estudio es de tres etapas con difusores destinada a combatir incendio en los buques de abasto de petróleo crudo a la Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos” de la ciudad de Cienfuegos, en los muelles de atraque de la misma o en cualquier otra instalación próxima al mar. La misma es completamente de bronce, pues bombea agua de mar, sin embargo, el árbol estaba fabricado de un acero aleado ferrítico - perlítico al cromo – níquel – molibdeno con buenas propiedades mecánicas y anticorrosivas en general, pero no era inoxidable. La corrosión después de un período prolongado de trabajo atacó íntegramente la superficie del mismo en las zonas de contacto con el agua de mar, destruyó casi todas las piezas de acero existente en la misma y se provocó definitivamente la avería del árbol mediante un proceso agresivo de corrosión bajo tensión. Se plantea analizar la posibilidad de construir el árbol (Anexo A) de acero AISI 316, cuya resistencia a la tracción es inferior a la resistencia máxima del acero del cual estaba construido el mismo. Para poder precisar los cálculos se plantea la necesidad de utilizar un esquema de análisis más exacto incluyendo las cualidades como empotramientos elásticos de los cojinetes de apoyo y las cualidades como apoyos

elásticos de las empaquetaduras y poder precisar la posibilidad de emplear dicho acero inoxidable de menor resistencia mecánica pero de gran resistencia a la corrosión que había sido precisamente la causa de su deterioro. Mientras que el trabajo de recuperación del casco fue llevado a cabo por el personal de la Empresa Nacional de Astilleros en el Varadero de “Punta Cotica”, la recuperación de ambas bombas era ejecutada por un grupo de especialistas de la Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos” perteneciente a la Empresa PDV-CUPET S.A y los obreros de su Taller Central. y simultáneamente se desarrollaba el presente trabajo en la Universidad “Carlos Rafael Rodríguez” de Cienfuegos en el cual se desarrollaba un nuevo esquema de análisis y un nuevo método de cálculo de los árboles de las bombas centrífugas que permitiría evaluar con mucho más rigor y exactitud la resistencia del árbol de dicha bomba fabricado de acero AISI 316, con relación al cálculo realizado durante la reparación. En el presente Capítulo se describe la aplicación de dicho Esquema de Análisis con Apoyos y Empotramientos Elásticos que considera la influencia favorable de las empaquetaduras y la elasticidad angular de los cojinetes de rodamientos empleados, en la resistencia del los árbol y poder precisar la posibilidad de emplear el acero inoxidable de menor resistencia mecánica pero de gran resistencia a la corrosión que había sido precisamente la causa de su deterioro.

3.2 Esquema de la bomba centrífuga objeto de estudio y de su árbol.

En la Fig. 3.1 se muestra el esquema de la bomba centrífuga multietápica objeto de estudio. Se puede apreciar la ubicación de los cojinetes de apoyo y la ubicación de las empaquetaduras, las cuales serán consideradas como apoyos elásticos complementarios.

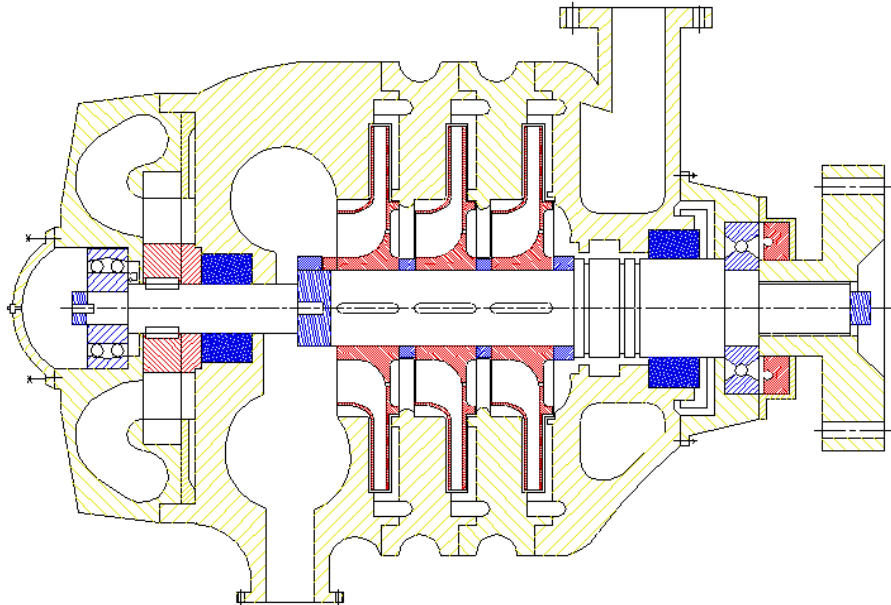


Fig. 3.1 Disposición de los apoyos y empaquetaduras en la bomba centrífuga multietápica con difusores objeto de estudio.

En la Fig. 3.2 se muestra el esquema del árbol, los cojinetes de apoyo y las empaquetaduras.

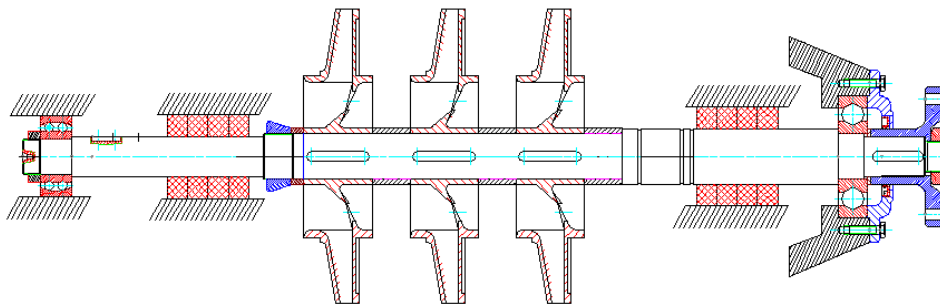


Fig. 3.2 Esquema del árbol con los tres impelentes, las empaquetaduras y los tipos de cojinetes de rodamientos en cada apoyo en cada apoyo.

Las bombas centrífugas con difusores tienen la particularidad que las fuerzas radiales provocadas por el fluido en los impelentes se pueden despreciar y considerar exclusivamente las fuerzas originadas por el propio peso de los impelentes y la fuerza distribuida que representa el peso propio del árbol.

3.3 Esquema de análisis del árbol con apoyos elásticos y con empotramientos rígidos y sistema equivalente.

En la Fig. 3.3 se muestra el Esquema de Análisis del Árbol con las cargas P que representa el peso propio $P = 62 \text{ N}$ de cada uno de los tres impelentes, el peso propio $Q = 116 \text{ N}$ del árbol considerado como una carga uniformemente distribuida $q = 1,49 \text{ N/cm}$, las empaquetaduras consideradas como articulaciones móviles elásticas, la caja de bolas radial de doble hilera autoalineante de la izquierda considerada como una articulación móvil rígida (coeficiente de rigidez $\phi = 0$ y la caja de bolas radial rígida de la derecha considerada como un empotramiento parcialmente elástico. Para resolver este sistema con apoyos elásticos en las empaquetaduras y empotramiento parcialmente elástico en la caja de bolas radial de simple hilera del apoyo derecho primero hay que resolver el sistema hiperestático con los apoyos rígidos para hallar el momento flector que surge en el empotramiento rígido ya que en los Empotramientos Parcialmente Elásticos el Momento Flector se halla como $M_f = \phi \cdot M_{\text{emp}}$, donde ϕ es el coeficiente de rigidez del empotramiento elástico y para una caja de bolas radial rígida de simple hilera $\phi = 0,346$ (Goytisoló, 2006, Hidalgo, 2009). El esquema de análisis con apoyos rígidos aplicando el Método de las Fuerzas se da en la Fig. 3.3.

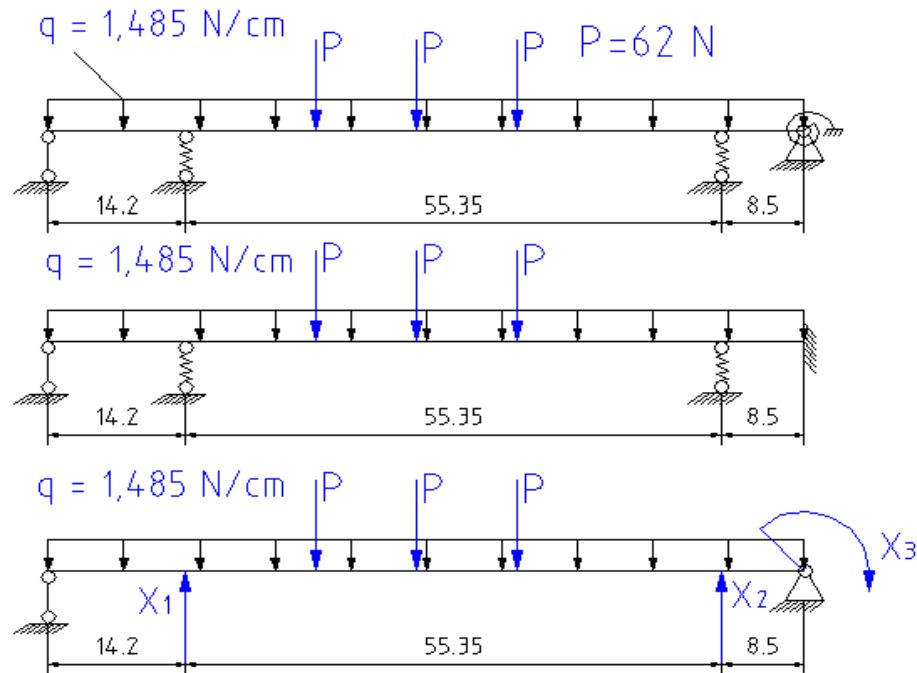


Fig. 3.3 Esquema de Análisis con empotramiento parcialmente elástico en el cojinete de rodamientos, con empotramiento rígido y sistema equivalente para el caso de empotramiento rígido.

El Sistema Equivalente según el Método de las Fuerzas se obtiene eliminando las ligaduras suplementarias y sustituyéndolas por el momento flector X_3 y las reacciones X_1 y X_2 como se muestra en la Fig.3.3. Las Ecuaciones Canónicas del Método de las Fuerzas para el caso analizado que se trata de un sistema hiperestático con tres grados de hiperestaticidad son:

$$\delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \delta_{13}X_3 + \delta_{1q} + \sum_{k=1}^n \delta_{1P_k} = -\frac{X_1}{C_1}$$

$$\delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \delta_{23}X_3 + \delta_{2q} + \sum_{k=1}^n \delta_{2P_k} = -\frac{X_2}{C_2}$$

$$\delta_{31}X_1 + \delta_{32}X_2 + \delta_{33}X_3 + \delta_{3q} + \sum_{k=1}^n \delta_{3P_k} = 0$$

3.4 Solución del Sistema de Ecuaciones Canónicas, para hallar el momento M_D .

Para hallar los coeficientes de las ecuaciones es necesario construir los diagramas unitarios de las incógnitas, los de las cargas concentradas P y el diagrama de la carga distribuida q . Los diagramas unitarios de las incógnitas se dan en la Fig. 3.4.

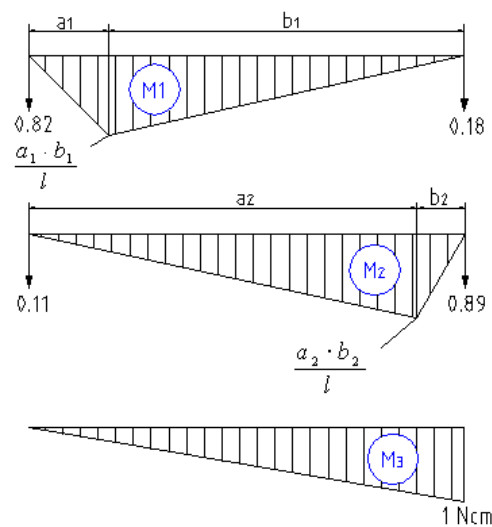


Fig. 3.4. Diagramas unitarios de las incógnitas $X_1 = 1$, $X_2 = 1$ y $X_3 = 1$.

Los coeficientes de las ecuaciones se obtuvieron por la Regla de Vereschaguin.

$$\delta_{ii} = \frac{a_i^2 \cdot b_i^2}{3 \cdot l^2} \cdot l = \frac{a_i^2 \cdot b_i^2}{3 \cdot l}$$

$$\delta_{11} = \frac{14.2^2 \cdot 63.85^2}{3 \cdot 78.05} = 3510.8 \text{ cm}$$

$$\delta_{22} = \frac{69.55^2 \cdot 8.5^2}{3 \cdot 78.05} = 1492.6 \text{ cm}$$

$$\delta_{nn} = \frac{1}{3} \cdot 1 \cdot 1 \cdot l = \frac{l}{3}$$

$$\delta_{33} = \frac{78.05}{3} = 26.02 \text{ cm}$$

$$\delta_{ni} = \frac{a_1 \cdot b_1}{6} \left(\frac{l + a_1}{l} \right)$$

$$\delta_{13} = \frac{14.2 \cdot 63.85}{6} \left(\frac{78.05 + 14.2}{78.05} \right) = 178.6 \text{ cm}$$

$$\delta_{23} = \frac{69.55 \cdot 8.5}{6} \left(\frac{78.05 + 69.55}{78.05} \right) = 186.4 \text{ cm}$$

$$\delta_{12} = \frac{a_1 \cdot b_2}{6 \cdot l^2} (2 \cdot a_1^2 \cdot b_1 + 2 \cdot a_2 \cdot b_2^2 + 2 \cdot a_1 \cdot b_1 \cdot C + a_1 \cdot b_2 \cdot C + a_2 \cdot b_1 \cdot C + 2 \cdot a_2 \cdot b_2 \cdot C)$$

$$\delta_{12} = \frac{14.2 \cdot 8.5}{6 \cdot 78.05^2} (2 \cdot 14.2^2 \cdot 63.85 + 2 \cdot 69.55 \cdot 8.5^2 + 2 \cdot 14.2 \cdot 63.85 \cdot 55.35 + 14.2 \cdot 8.5 \cdot 55.35 + 69.55 \cdot 63.85 \cdot 55.35 + 2 \cdot 69.55 \cdot 8.5 \cdot 55.35)$$

$$\delta_{12} = 1499.5 \text{ cm}$$

Las constantes de rigidez de las empaquetaduras

$$C = \frac{\pi \cdot d \cdot l \cdot E_{emp}}{4 \cdot S_{emp}}$$

Donde:

$$E = 2 \cdot 10^7 \text{ N/cm}^2$$

$$E_{emp} = 400000 \text{ N/cm}^2$$

$$S_{emp} = 2.1 \text{ cm}$$

$$d_1 = 4 \text{ cm}$$

$$d_2 = 5.5 \text{ cm}$$

Capítulo III: Aplicación del nuevo método general de cálculo de los árboles de las bombas centrífugas desarrollado a la evaluación de la resistencia del árbol de la bomba centrífuga de tres etapas contra incendio de la embarcación “6 de Junio”.

$$l = 8 \text{ cm}$$

$$C_1 = \frac{\pi \cdot 4 \cdot 8 \cdot 400000}{4 \cdot 2.1}$$

$$C_2 = \frac{\pi \cdot 5.5 \cdot 8 \cdot 400000}{4 \cdot 2.1}$$

$$C_1 = 4787188.8 \text{ N/cm}$$

$$C_2 = 6582384.6 \text{ N/cm}$$

$$I = 0.05 \cdot d^4 = 0.05 \cdot 4^4$$

$$I = 0.05 \cdot d^4 = 0.05 \cdot 5.5^4$$

$$I_1 = 12.8 \text{ cm}^4$$

$$I_2 = 45.7 \text{ cm}^4$$

$$\delta_{11} + \frac{E \cdot I_1}{C_1} = 3510.8 + \frac{2 \cdot 10^7 \cdot 12.8}{4786666.7} = 3564.3$$

$$\delta_{11} + \frac{E \cdot I_1}{C_1} = 3564.3 \text{ cm}$$

$$\delta_{22} + \frac{E \cdot I_2}{C_2} = 1492.6 + \frac{2 \cdot 10^7 \cdot 47.5}{6586666.7} = 1631.4$$

$$\delta_{22} + \frac{E \cdot I_2}{C_2} = 1631.4 \text{ cm}$$

$$\delta_{1pk} = -\frac{P_k \cdot a_i \cdot b_k}{6 \cdot l^2} (2a_i^2 \cdot b_i + 2a_k \cdot b_k^2 + 2a_i \cdot b_i \cdot l_k + a_i \cdot b_k \cdot l_k + a_k \cdot b_i \cdot l_k + 2 \cdot a_k \cdot b_k \cdot l_k)$$

$$\delta_{1pk} = \delta_{1pk1} + \delta_{1pk2} + \delta_{1pk3}$$

$$\delta_{1pk1} = -\frac{P_k \cdot a_i \cdot b_k}{6 \cdot l^2} (2a_i^2 \cdot b_i + 2a_k \cdot b_k^2 + 2a_i \cdot b_i \cdot l_k + a_i \cdot b_k \cdot l_k + a_k \cdot b_i \cdot l_k + 2 \cdot a_k \cdot b_k \cdot l_k)$$

$$\delta_{1pk1} = -\frac{62 \cdot 14.2 \cdot 50.45}{6 \cdot 78.05^2} (2 \cdot 14.2^2 \cdot 63.85 + 2 \cdot 27.6 \cdot 50.45^2 + 2 \cdot 14.2 \cdot 63.85 \cdot 10.4 +$$

$$\delta_{1pk1} = -317254.6 \text{ cm}$$

$$\delta_{1pk2} = -\frac{62 \cdot 14.2 \cdot 40.05}{6 \cdot 78.05} (2 \cdot 14.2^2 \cdot 63.85 + 2 \cdot 38 \cdot 40.05^2 + 2 \cdot 14.2 \cdot 63.85 \cdot 23.8 +$$

$$+ 14.2 \cdot 40.05 \cdot 23.8 + 38 \cdot 63.85 \cdot 23.8 + 2 \cdot 38 \cdot 40.05 \cdot 23.8)$$

$$\delta_{1pk2} = -322721 \text{ cm}$$

$$\delta_{1pk3} = -\frac{62 \cdot 14.2 \cdot 29.65}{6 \cdot 78.05} (2 \cdot 14.2^2 \cdot 63.85 + 2 \cdot 48.4 \cdot 29.65^2 + 2 \cdot 14.2 \cdot 63.85 \cdot 34.2 +$$

$$+ 14.2 \cdot 29.65 \cdot 34.2 + 48.4 \cdot 63.85 \cdot 34.2 + 2 \cdot 48.4 \cdot 29.65 \cdot 48.4)$$

$$\delta_{1pk3} = -279324 \text{ cm}$$

$$\delta_{1pk} = \delta_{1pk1} + \delta_{1pk2} + \delta_{1pk3}$$

$$\delta_{1pk} = -317254.6 - 322721 - 279324$$

$$\delta_{1pk} = -919299.42 \text{ cm}$$

$$\delta_{2pk} = -\frac{P_k \cdot a_k \cdot b_i}{6 \cdot l^2} (2a_k^2 \cdot b_k + 2a_i \cdot b_i^2 + 2a_k \cdot b_k \cdot s_k + a_k \cdot b_i \cdot s_k + a_i \cdot b_k \cdot s_k + 2a_i \cdot b_i \cdot s_k)$$

$$\delta_{2pk} = \delta_{2pk1} + \delta_{2pk2} + \delta_{2pk3}$$

$$\delta_{2pk1} = -\frac{62 \cdot 38 \cdot 8.5}{6 \cdot 78.05^2} (2 \cdot 27.6^2 \cdot 50.45 + 2 \cdot 69.55 \cdot 8.5^2 + 2 \cdot 27.6 \cdot 50.45 \cdot 10.4 + 27.6$$

$$\cdot 8.5 \cdot 10.4 + 69.55 \cdot 50.45 \cdot 10.4 + 2 \cdot 69.55 \cdot 8.5 \cdot 10.4)$$

$$\delta_{2pk1} = -163304.8 \text{ cm}$$

$$\delta_{2pk2} = -\frac{62 \cdot 38 \cdot 8.5}{6 \cdot 78.05^2} (2 \cdot 38^2 \cdot 40.05 + 2 \cdot 69.55 \cdot 8.5^2 + 2 \cdot 38 \cdot 40.05 \cdot 23.8 + 38 \cdot 8.5 \cdot 23.8$$

$$+ 69.55 \cdot 40.05 \cdot 23.8 + 2 \cdot 69.55 \cdot 8.5 \cdot 23.8)$$

$$\delta_{2pk2} = -195665 \text{ cm}$$

Capítulo III: Aplicación del nuevo método general de cálculo de los árboles de las bombas centrífugas desarrollado a la evaluación de la resistencia del árbol de la bomba centrífuga de tres etapas contra incendio de la embarcación “6 de Junio”.

$$\delta_{2pk3} = -\frac{62 \cdot 48.4 \cdot 8.5}{6 \cdot 78.05^2} (2 \cdot 348.48^2 \cdot 29.65 + 2 \cdot 69.55 \cdot 8.5^2 + 2 \cdot 48.4 \cdot 29.65 \cdot 34.2 + 48.4 \cdot 8.5 \cdot 34.2 + 69.55 \cdot 29.65 \cdot 34.2 + 2 \cdot 69.55 \cdot 8.5 \cdot 34.2)$$

$$\delta_{2pk3} = -200274 \text{ cm}$$

$$\delta_{2pk} = \delta_{2pk1} + \delta_{2pk2} + \delta_{2pk3}$$

$$\delta_{2pk} = -163304.8 - 195665 - 200274$$

$$\delta_{2pk} = -559244.01 \text{ cm}$$

$$\delta_{3pk} = -\frac{a_k \cdot P_k \cdot b_k}{6 \cdot l} \cdot (l + a_k)$$

$$\delta_{3pk1} = -\frac{a_{k1} \cdot P_k \cdot b_{k1}}{6 \cdot l} \cdot (l + a_{k1})$$

$$\delta_{3pk1} = -\frac{27.6 \cdot 62 \cdot 50.45}{6 \cdot 78.05} \cdot (78.05 + 27.6)$$

$$\delta_{3pk1} = -19476.3 \text{ cm}$$

$$\delta_{3pk2} = -\frac{a_{k2} \cdot P_k \cdot b_{k2}}{6 \cdot l} \cdot (l + a_{k2})$$

$$\delta_{3pk2} = -\frac{62 \cdot 38 \cdot 40.05}{6 \cdot 78.05} \cdot (78.05 + 38)$$

$$\delta_{3pk2} = -23382.9 \text{ cm}$$

$$\delta_{3pk3} = -\frac{a_{k3} \cdot P_k \cdot b_{k3}}{6 \cdot l} \cdot (l + a_{k3})$$

$$\delta_{3pk3} = -\frac{48.4 \cdot 62 \cdot 29.65}{6 \cdot 78.05} \cdot (78.05 + 48.4)$$

Capítulo III: Aplicación del nuevo método general de cálculo de los árboles de las bombas centrífugas desarrollado a la evaluación de la resistencia del árbol de la bomba centrífuga de tres etapas contra incendio de la embarcación “6 de Junio”.

$$\delta_{3pk3} = -24024.6 \text{ cm}$$

$$\delta_{3pk} = \delta_{3pk1} + \delta_{3pk2} + \delta_{3pk3}$$

$$\delta_{3pk} = -19476.3 - 23382.9 - 24024.6$$

$$\delta_{3pk} = -66883.8 \text{ cm}$$

$$\delta_{1q} = -\frac{q}{24} \cdot a_i \cdot b_i (l^2 \cdot a_i \cdot b_i)$$

$$\delta_{1q} = -\frac{1.485}{24} \cdot 14.2 \cdot 63.85 (78.05 l^2 \cdot 14.2 \cdot 63.85)$$

$$\delta_{1q} = -392615.8 \text{ cm}$$

$$\delta_{2q} = -\frac{1.485}{24} \cdot 69.55 \cdot 8.5 (78.05 l^2 \cdot 69.55 \cdot 8.5)$$

$$\delta_{2q} = -244456.3 \text{ cm}$$

$$\delta_{3q} = -\frac{q \cdot l^3}{24}$$

$$\delta_{3q} = -\frac{q \cdot l^3}{24} = -\frac{14.85 \cdot 78.05^3}{24}$$

$$\delta_{3q} = -29419.3 \text{ cm}$$

$$\delta_{1p} = \delta_{1pk} + \delta_{1q} = -919299.42 - 392615.8$$

$$\delta_{1p} = -1311915.2 \text{ cm}$$

$$\delta_{2p} = \delta_{2pk} + \delta_{2q} = -559244.01 - 244456.3$$

$$\delta_{2p} = -803700.33 \text{ cm}$$

$$\delta_{3p} = \delta_{3pk} + \delta_{3q} = -66883.8 - 29419.4$$

Capítulo III: Aplicación del nuevo método general de cálculo de los árboles de las bombas centrífugas desarrollado a la evaluación de la resistencia del árbol de la bomba centrífuga de tres etapas contra incendio de la embarcación “6 de Junio”.

$$\delta_{3p} = -96303.2 \text{ cm}$$

Sustituyendo en las ecuaciones canónicas:

$$\left(\delta_{11} + \frac{E \cdot I_1}{C_1} \right) + \delta_{12} X_2 + \delta_{13} X_3 + \delta_{1p} = 0$$

$$\delta_{21} X_1 + \left(\delta_{22} + \frac{E \cdot I_2}{C_2} \right) + \delta_{23} X_3 + \delta_{2p} = 0$$

$$\delta_{31} X_1 + \delta_{32} X_2 + \delta_{33} X_3 + \delta_{3p} = 0$$

$$3564.3 \cdot X_1 + 1499.5 \cdot X_2 + 178.6 \cdot X_3 = 1311915.2 \quad /:(-3564.3)$$

$$1499.5 \cdot X_1 + 1631.4 \cdot X_2 + 186.3 \cdot X_3 = 803700.33 \quad /:(1499.5)$$

$$178.6 \cdot X_1 + 186.3 \cdot X_2 + 26.02 \cdot X_3 = 96303.2 \quad /:(178.6)$$

$$-X_1 - 0.42 \cdot X_2 - 0.05 \cdot X_3 = -368.07 \quad (3.1)$$

$$X_1 + 1.088 \cdot X_2 + 0.124 \cdot X_3 = 535.97 \quad (3.2)$$

$$X_1 + 1.043 \cdot X_2 + 0.146 \cdot X_3 = 539.20 \quad (3.3)$$

Sumando (3.1) con (3.2).

$$0.667 \cdot X_2 + 0.074 \cdot X_3 = 167.90 \quad /:(-0.667)$$

$$-X_2 - 0.111 \cdot X_3 = -251.62 \quad (3.4)$$

Sumando (3.1) con (3.3).

$$0.623 \cdot X_2 + 0.096 \cdot X_3 = 171.12 \quad /:(0.623)$$

$$X_2 + 0.153 \cdot X_3 = 274.88 \quad (3.5)$$

Sumando (3.4) con (3.5).

$$0.0423 \cdot X_3 = 23.26$$

$$X_3 = 548.97 \text{ N} - \text{cm}$$

Capítulo III: Aplicación del nuevo método general de cálculo de los árboles de las bombas centrífugas desarrollado a la evaluación de la resistencia del árbol de la bomba centrífuga de tres etapas contra incendio de la embarcación “6 de Junio”.

$$M_d = X_3 \cdot \varphi = 548.97 \cdot 0.346$$

$$M_d = 189.94 \text{ N-cm}$$

3.5 Solución del Sistema de Ecuaciones Canónicas eliminando X_3 y considerando M_D como carga, para hallar X_1 y X_2 .

$$\delta_{im} = \frac{a_i \cdot b_i}{6} \left(\frac{l + a_i}{l} \right) M_d$$

$$\delta_{1m} = \frac{a_1 \cdot b_1}{6} \left(\frac{l + a_1}{l} \right) M_d = \frac{14.2 \cdot 63.85}{6} \left(\frac{78.05 + 14.2}{78.05} \right) 189.94$$

$$\delta_{1m} = 33924.6 \text{ cm}$$

$$\delta_{2m} = \frac{a_2 \cdot b_2}{6} \left(\frac{l + a_2}{l} \right) M_d = \frac{69.55 \cdot 8.5}{6} \left(\frac{78.05 + 96.55}{78.05} \right) 189.94$$

$$\delta_{2m} = 35391.7 \text{ cm}$$

$$\delta_{1p} = \delta_{1pk} + \delta_{1q} + \delta_{1m} = -919299.42 - 392615.8 + 33924.6$$

$$\delta_{1p} = -1244065.9 \text{ cm}$$

$$\delta_{2p} = \delta_{2pk} + \delta_{2q} + \delta_{2m} = -559244.01 - 244456.3 + 35391.7$$

$$\delta_{2p} = -732916.8 \text{ cm}$$

$$\left(\delta_{11} + \frac{1}{C_1} \right) X_1 + \delta_{12} \cdot X_2 + \delta_{1p} = 0$$

$$\delta_{21} \cdot X_1 + \left(\delta_{22} + \frac{1}{C_2} \right) X_2 + \delta_{2p} = 0$$

$$3564.3 \cdot X_1 + 1499.5 \cdot X_2 = 1244066 \quad /: (-3564.3)$$

$$1499.5 \cdot X_1 + 1631.4 \cdot X_2 = 732916.8 \quad /: (1499.5)$$

Capítulo III: Aplicación del nuevo método general de cálculo de los árboles de las bombas centrífugas desarrollado a la evaluación de la resistencia del árbol de la bomba centrífuga de tres etapas contra incendio de la embarcación “6 de Junio”.

$$-X_1 - 0.42 \cdot X_2 = -349.04$$

$$X_1 + 1.088 \cdot X_2 = 488.77$$

$$0.667 \cdot X_2 = 139.7$$

$$X_2 = 209.4 \text{ N}$$

$$X_1 + 1.088 \cdot X_2 = 488.7$$

$$X_1 = 488.7 - 1.088 \cdot 209.4$$

$$X_1 = 260.9 \text{ N}$$

3.6 Construcción de diagramas de Fuerzas de Cortante y Momentos Flectores.

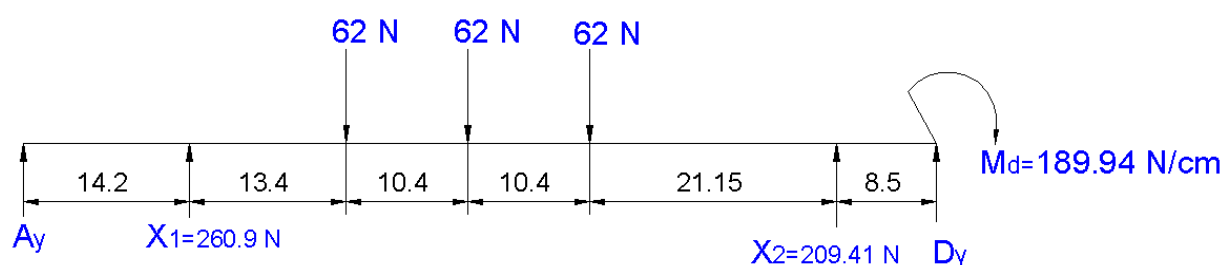


Fig. 3.5 Diagrama de Fuerza de Cortante y Momentos Flectores.

$$\sum Md = 0$$

$$A_y \cdot 78.05 + X_1 \cdot 63.85 - 62 \cdot 50.45 - 62 \cdot 40.05 - 62 \cdot 29.65 + X_2 \cdot 8.5 - 1.485 \cdot 78.05 = 0$$

$$A_y = \frac{-X_1 \cdot 63.85 + 62 \cdot 50.45 + 62 \cdot 40.05 + 62 \cdot 29.65 - X_2 \cdot 8.5 + 1.485 \cdot 78.05}{78.05}$$

$$A_y = -85.31 \text{ N}$$

Capítulo III: Aplicación del nuevo método general de cálculo de los árboles de las bombas centrífugas desarrollado a la evaluación de la resistencia del árbol de la bomba centrífuga de tres etapas contra incendio de la embarcación “6 de Junio”.

$$\sum F_y = 0$$

$$-A_y - X_1 + 62 \cdot 3 - X_2 - D_y = 0$$

$$D_y = A_y + X_1 - 62 \cdot 3 + X_2 + D_y$$

$$D_y = 85.31 + 260.9 - 62 \cdot 3 + 209.41 + 1.485 \cdot 78.05$$

$$D_y = 83.13 \text{ N}$$

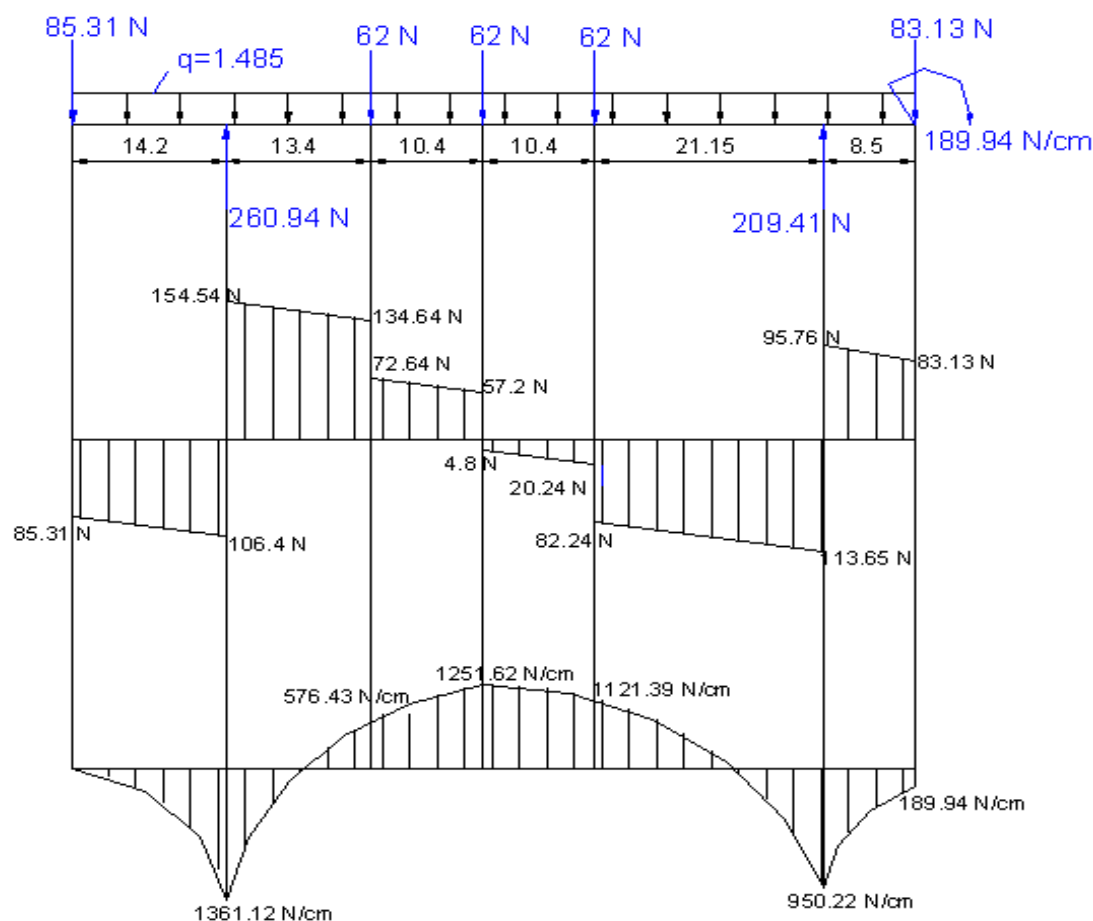


Fig. 3.6 Diagramas de Fuerzas de Cortante y Momentos Flectores del árbol considerando la influencia favorable de la rigidez de la caja de bolas radial de simple hilera rígida de la derecha y la influencia de las empaquetaduras como apoyos elásticos suplementarios.

3.7 Cálculo de la potencia consumida por las bombas y el torque en el árbol.

3.7.1 Datos disponibles de las Bombas.

Del motor de las bombas se conoce que es de fabricación rusa, Modelo YAV 206 (Fig. 3.7), pero no se dispone de documentación técnica sobre el mismo. Debido a la no existencia de documentación alguna sobre el motor de estas bombas, ni datos sobre las curvas características de las bombas se hizo necesario calcular analíticamente sus parámetros. Se conocen las dimensiones, cantidad y geometría de sus impelentes Fig. 3.7. Se procede a realizar un cálculo de ingeniería inversa aplicando las ecuaciones clásicas para el diseño de bombas y así poder determinar el momento torsor a que estará sometido el árbol durante su funcionamiento.



Fig. 3.7 Vista del Motor YAV 206 de las Bombas

En la Fig. 3.7 se muestra una vista del impelente con sus dimensiones fundamentales y a continuación se dan los parámetros conocidos.

Capítulo III: Aplicación del nuevo método general de cálculo de los árboles de las bombas centrífugas desarrollado a la evaluación de la resistencia del árbol de la bomba centrífuga de tres etapas contra incendio de la embarcación “6 de Junio”.

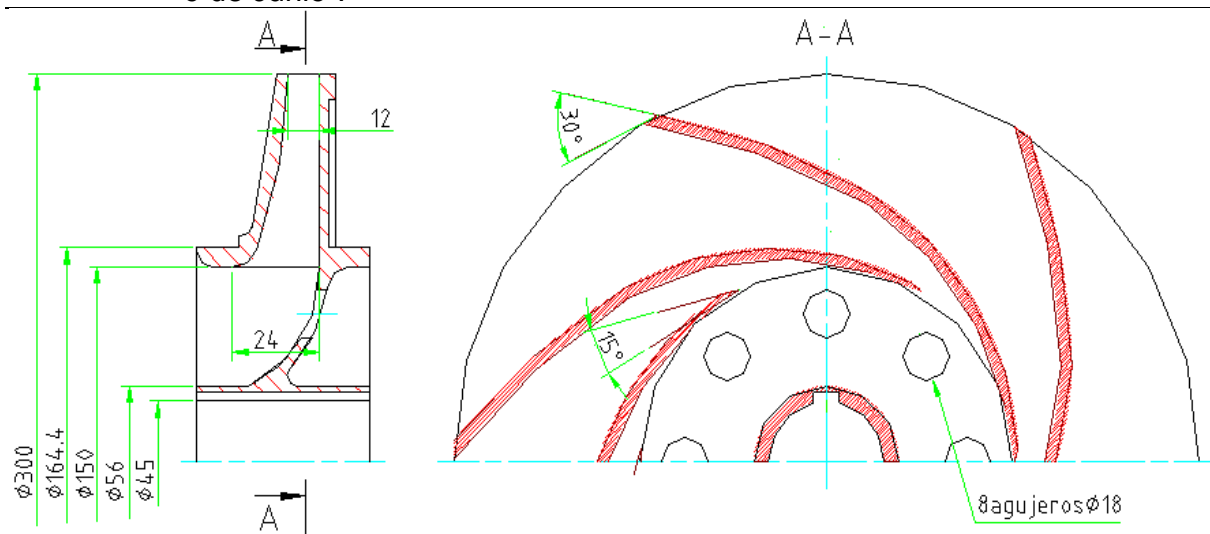


Fig. 3.8 Geometría y dimensiones de uno de los impelentes de la bomba.

Datos:

$Q = ?$Caudal entregado por la bomba. (m^3/s)

$H = ?$ Carga de impulsión, (m)

$N_{eje} = ?$Potencia mecánica a transmitir, (kW)

$M_t = ?$Momento torsor a transmitir, N-m

$n = 1750$Velocidad de giro, r/min.

$\beta_1 = 15^\circ$ Inclinación a la entrada del alabe.

$\beta_2 = 30^\circ$ Inclinación a la salida del alabe.

$D_1 = 150mm$ ϕ del ojo de succión.

$D_2 = 300mm$ ϕ exterior del impelente.

$b_1 = 24mm$Ancho a la entrada del canal.

$b_2 = 12mm$Ancho a la salida del canal.

$\delta = 3mm$Espesor de los alabes.

$Z = 3$No. de impelentes.

$\alpha = 90^\circ$No posee aparato de regulación a la entrada.

$z = 7$ No. de alabes por impelente.

Nota: Cada vez que se refiera a la entrada, o al ojo de succión del impelente se utilizará el subíndice 1 y 2 para la zona de descarga del impelente.

3.7.2 Cálculo del caudal, carga, potencia y momento torsor.

Caudal a través del ojo de succión (Q_1).

$$Q_1 = A_1 \cdot c_{1R} \quad (3.6)$$

Área real en la sección de entrada del impelente (A_1).

$$A_1 = \pi \cdot D_1 \cdot b_1 \cdot \left(1 - \frac{Z \cdot \delta}{\pi \cdot D_1 \cdot \sin \beta_1} \right) \quad (3.7)$$

Componente de velocidad tangencial (u_1).

$$u_1 = \frac{\pi \cdot n \cdot D_1}{60} \quad (3.8)$$

Componente de velocidad radial (c_{1R}).

$$c_{1R} = u_1 \cdot \tan \beta_1 \quad (3.9)$$

Evaluando en la ecuación 3.6 y 3.7, luego sustituyendo en 3.9 y 3.6 se obtiene:

$$A_1 = \pi \cdot 0.150 \cdot 0.024 \cdot \left(1 - \frac{7 \cdot 0.003}{\pi \cdot 0.150 \cdot \sin 15} \right) = 0.0094 m^2$$

$$u_1 = \frac{\pi \cdot 1750 \cdot 0.150}{60} = 13.7 m/s$$

$$c_{1R} = 13.7 \cdot \tan 15^\circ = 3.68 m/s$$

$$Q_1 = 0.0094 \cdot 3.68 = 0.035 m^3 / s$$

Área real en la sección de descarga del impelente (A_2).

$$A_2 = \pi \cdot D_2 \cdot b_2 \cdot \left(1 - \frac{Z \cdot \delta}{\pi \cdot D_2 \cdot \sin \beta_2} \right) \quad (3.10)$$

$$A_2 = \pi \cdot 0.3 \cdot 0.012 \cdot \left(1 - \frac{7 \cdot 0.003}{\pi \cdot 0.3 \cdot \sin 30} \right) = 0.0062 m^2$$

Aplicando la ecuación de continuidad se obtiene que $Q_1 = Q_2 = Q = A_2 \cdot c_{2R}$

Capítulo III: Aplicación del nuevo método general de cálculo de los árboles de las bombas centrífugas desarrollado a la evaluación de la resistencia del árbol de la bomba centrífuga de tres etapas contra incendio de la embarcación “6 de Junio”.

Componente de velocidad radial (c_{2R}).

$$c_{R2} = \frac{Q}{A_2} = \frac{0.0035}{00062} = 0.56m/s \quad (3.11)$$

Componente de velocidad tangencial (u_2).

$$u_2 = \frac{\pi \cdot 1750 \cdot 0.3}{60} = 27.5m/s \quad (3.12)$$

Componente de velocidad relativa (c_{2u}).

$$c_{2u} = u_2 - \frac{c_{2R}}{\tan \beta_2} = 27.5 - \frac{0.56}{\tan 30^\circ} = 26.5m/s \quad (3.13)$$

Carga de impulsión teórica ($H_{t\infty mx}$).

$$H_{t\infty mx} = \frac{u_2 \cdot c_{2u}}{g} = \frac{26.5 \cdot 22}{9.81} = 74.28m \quad (3.14)$$

Carga de impulsión real del impelente (H_{real}).

$$H_{real} = \mu_{Z \neq \infty} \cdot H_{t\infty mx} \cdot \eta_h = 0.8 \cdot 0.8 \cdot 74.28 = 47.53 \approx 48m$$

Dado que la bomba es de múltiples etapas la carga de impulsión aumenta en proporción con la cantidad de impelentes por lo que:

$$H_{real\ bomba} = 48m \cdot 3 = 144m$$

Potencia necesaria para lograr su accionamiento (N_{aje}).

Donde:

$\gamma = 9810kG/m^2$ --peso específico del agua.

$\eta_b = 0.7$ --rendimiento más bajo de bombas.

$$N_{aje} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{1000 \cdot \eta_b} \quad (3.15)$$

$$N_{aje} = \frac{9810kG/m^2 \cdot 0.035m^3/h \cdot 144m}{1000 \cdot 0.7} = 70.63 \approx 70kW$$

Momento torsor o torque a transmitir por el árbol (M_{torsor}).

$$M_{torsor} = \frac{9549 \cdot N_{aje}(kW)}{n(rpm)} = \frac{9549 \cdot 70kW}{1750rpm} = 381.96Nm \quad (3.16)$$

3.8 Diagrama de momentos flectores y torsores sin considerar las empaquetaduras.

Para obtener estos diagramas de momentos flectores y torsores se consideran solamente las siguientes cargas: la carga que representa el peso propio de cada uno de los tres impelentes $P = 62 \text{ N}$, el peso propio $Q = 116 \text{ N}$ del árbol como una carga uniformemente distribuida $q = 1,48 \text{ N/cm}$, y un momento torsor máximo $M_{t\max} = 381.96 \text{ N-cm}$ que equivale a la suma de los torques generados por los tres impelentes.

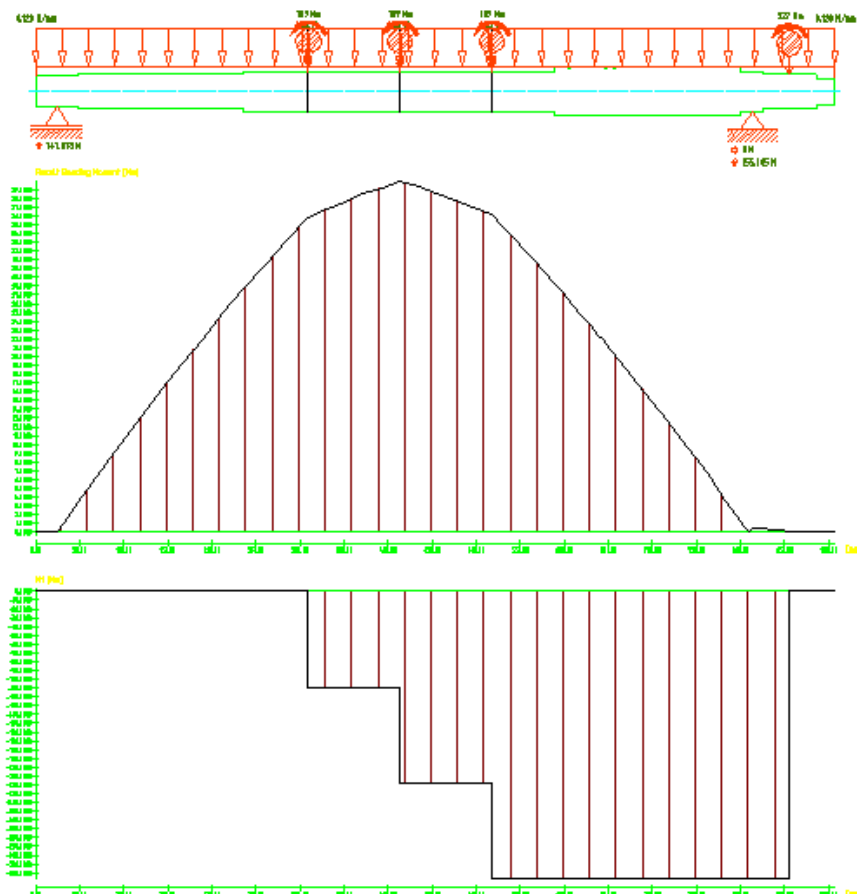


Fig. 3.9 Cálculo de Diagramas de Momento Flector y Momento torsor según Software MTD-6.

En la figura se muestra el diagrama de momentos flectores y el diagrama de momentos torsores respectivamente, siendo el momento flector máximo $M_{f\max} = 36 \text{ N/cm}$ en la sección que coincide aproximadamente con la posición ocupada por el

segundo impelente y el momento torsor se distribuye escalonadamente desde el motor hasta el tercer impelente.

3.9 Comprobación de resistencia a la torsión y a la flexión.

Se evaluó la sección más crítica correspondiente a la fijación del cubo del segundo impelente, donde el momento flector es máximo y el torque es alto, se tiene que:

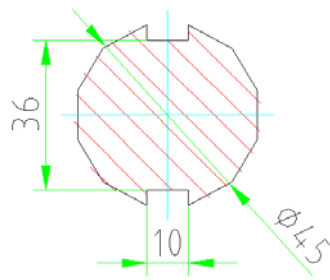


Fig. 3.10. Sección del árbol en la zona del cubo del impelente.

Módulo de la sección a torsión:

$$W_{torsion} = \frac{\pi \cdot d^3}{16} - \frac{b \cdot t \cdot (d - t)^2}{d} = 16114,5 mm^3 \quad (3.17)$$

Modulo de la sección a flexión:

$$W_{flexión} = \frac{\pi \cdot d^3}{32} - \frac{b \cdot t \cdot (d - t)^2}{d} = 716839 mm^3 \quad (3.18)$$

Las tensiones en dicha sección serán:

$$\sigma_{flexión} = \frac{M_{Flector}}{W_{flexión}} = \frac{36000 Nmm}{7168,3 mm^3} = 5,02 Mpa \leq [\sigma_f] \quad (3.19)$$

$$\tau_{torsion} = \frac{M_{torsor}}{W_{torsion}} = \frac{254640 Nmm}{16114,5 mm^3} = 15,8 Mpa \leq [\tau_{torsion}] \quad (3.20)$$

En la Tabla 3.1 se dan las propiedades del acero inoxidable AISI 316 en barras en estado normalizado y los factores de seguridad del árbol con relación a la fluencia.

Capítulo III: Aplicación del nuevo método general de cálculo de los árboles de las bombas centrífugas desarrollado a la evaluación de la resistencia del árbol de la bomba centrífuga de tres etapas contra incendio de la embarcación “6 de Junio”.

Tabla 3.1 Propiedades del material AISI - 316, factores de seguridad obtenidos.

Límite de fluencia	Resistencia máxima	Modulo de Elasticidad	Tensión real generada	Factor de seguridad
$\sigma_f = 205 MPa$	$\sigma_u = 515 MPa$	$E = 2 \times 10^5 MPa$	$\sigma = 4.8 MPa$	$n = \frac{\sigma_f}{\sigma} = \frac{205}{4.8} = 42.7$
$\tau_f = 0.5 \cdot \sigma_f$ $\tau_f = 102.5 MPa$	$\tau_u = 257.5 MPa$		$\tau = 20.2 MPa$	$n = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{102.5}{20.2} = 5$

Evaluando la resistencia combinada, aplicando la Cuarta Hipótesis de Resistencia. Se tomara $[\sigma_t] = 100 MPa$, un factor de seguridad poco mayor que 2 con relación a la fluencia.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 4 \cdot \tau^2} \leq$$

$$\sqrt{4.8^2 + 4 \cdot 20.2^2} = 41 MPa \leq 100 MPa$$

La sección cumple con la condición de resistencia estática.

3.10 Comprobación de las chavetas a cortante y a aplastamiento.

Evaluando la sección del cubo del impelente donde $M_{tmax} = 381.9 N\cdot m$, $l = 60 mm$, se obtiene:

Tensión admisible al aplastamiento:

$$[\sigma]_{Aplast} = 2 \cdot [\sigma]_t = 2 \cdot 205 = 410 MPa$$

Fuerza transmitida a través de cada chaveta, son dos chavetas:

$$T = \frac{M_{torsor}}{d} = \frac{381960 Nmm}{45mm} = 8488 N$$

Condición de resistencia al aplastamiento:

Capítulo III: Aplicación del nuevo método general de cálculo de los árboles de las bombas centrífugas desarrollado a la evaluación de la resistencia del árbol de la bomba centrífuga de tres etapas contra incendio de la embarcación “6 de Junio”.

$$\sigma_{Aplast} = \frac{M_{t\max} / d}{2 \cdot h \cdot l} \leq [\sigma]_{Aplast}$$

Condición de resistencia al cortante:

$$\tau = \frac{M_{t\max} / d}{b \cdot l} \leq [\tau]$$

Evaluando se obtiene:

$$\sigma_{Aplast} = \frac{381.96 / 45}{2 \cdot 4.5 \cdot 60} = 1.5 \cdot 10^{-2} MPa \leq 410 MPa \quad \text{Cumple la condición de resistencia.}$$

$$\tau = \frac{381.96 / 45}{10 \cdot 60} = 1.4 \cdot 10^{-2} MPa \leq 1025 MPa \quad \text{Cumple la condición de resistencia.}$$

3.11 Cálculo del factor de seguridad a la fatiga del árbol sin considerar la elasticidad de los apoyos.

Según (Dobrovolski, 1970), se recomienda: como valor mínimo admisible del factor de seguridad a la fatiga en árboles $n=1.3 \div 1.5$, si las cargas y las tensiones se determinan exactamente. En otras condiciones $n=1.5 \div 2.5$ y más, según sea el grado de importancia de la construcción. Partiendo que el árbol durante el funcionamiento de la bomba estará expuesto a un ciclo de variación de tensiones simétrico $r = -1$ (tensiones de flexión), y producto de la torsión a un ciclo del tipo constante $r = 1$ (para las tensiones tangenciales). Conociendo las propiedades del material AISI-316 se determinará el factor de seguridad a la fatiga en la sección más crítica.

Evaluando la resistencia del árbol a la fatiga en la sección que corresponde al cubo donde se aloja el segundo impelente, posición donde el momento flector es máximo y el torque es alto, además se encuentra el concentrador de tensiones correspondiente a los dos chaveteros.

Capítulo III: Aplicación del nuevo método general de cálculo de los árboles de las bombas centrífugas desarrollado a la evaluación de la resistencia del árbol de la bomba centrífuga de tres etapas contra incendio de la embarcación “6 de Junio”.

Datos:

$\sigma_{\max} = \sigma_a = 4.8 \text{ MPa}$ Tensión normal máxima existente en la sección.

$\tau_{\max} = 15.80 \text{ MPa}$ Tensión tangencial máxima existente en la sección.

$\sigma_{-1} = 0.43 \cdot \sigma_u = 0.43 \cdot 515 \text{ MPa} = 221.5 \text{ MPa}$ Límite de fatiga bajo ciclo simétrico.

- Factor de seguridad a la fatiga para las tensiones normales:

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{K_{\sigma} \cdot \sigma_a}{\varepsilon \cdot \beta} + \left(\frac{2 \cdot \sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0} \right) \cdot \sigma_m}$$

Como $r = -1$, la tensión media ($\sigma_m = 0$), se transforma en

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1} \cdot \varepsilon \cdot \beta}{K_{\sigma} \cdot \sigma_a} \quad \text{Factor de seguridad a la fatiga para las tensiones normales. (3.21)}$$

Donde:

$\varepsilon = 0.6$ Factor de tamaño para $d = 45 \text{ mm}$ y acero aleado con concentrador, según (Pisarenko, 1989).

$\beta = 0.9$ Factor de estado de la superficie, para $\sigma_u = 515 \text{ MPa}$, y un torneado fino, (Pisarenko, 1989).

$K_{\sigma} = 1.6$ Coeficiente efectivo de concentración de tensiones, para $\sigma_u = 515 \text{ MPa}$, (Pisarenko, 1989).

Evaluando en la ecuación (3.21) obtenemos:

$$n_{\sigma} = \frac{221.5 \text{ MPa} \cdot 0.6 \cdot 0.9}{1.6 \cdot 4.8 \text{ MPa}} = 14.89$$

Posee una buena reserva de resistencia a la fatiga por las tensiones normales.

- **Factor de seguridad a la fatiga para las tensiones tangenciales:**

$$n_{\tau} = \frac{\tau_f}{\tau_{MAX}} = \frac{102.5 MPa}{20,2 MPa} = 5 \quad (3.22)$$

- **Evaluando el factor de seguridad a la fatiga se obtiene:**

$$n = \frac{n_{\sigma} \cdot n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}} = \frac{14,89 \cdot 5}{\sqrt{14,89^2 + 5^2}} \cong 5 \quad (3.23)$$

La sección evaluada posee elevada reserva de resistencia a la fatiga.

3.12 Diagramas de momento flectores y torsores considerando la rigidez de la caja de bolas radial de simple hilera y las empaquetaduras como apoyos elásticos suplementarios.

El diagrama de momentos flectores fue obtenido anteriormente y el de momentos torsores es el mismo que en el caso anterior. En la Fig. 3.10 se muestran ambos diagramas.

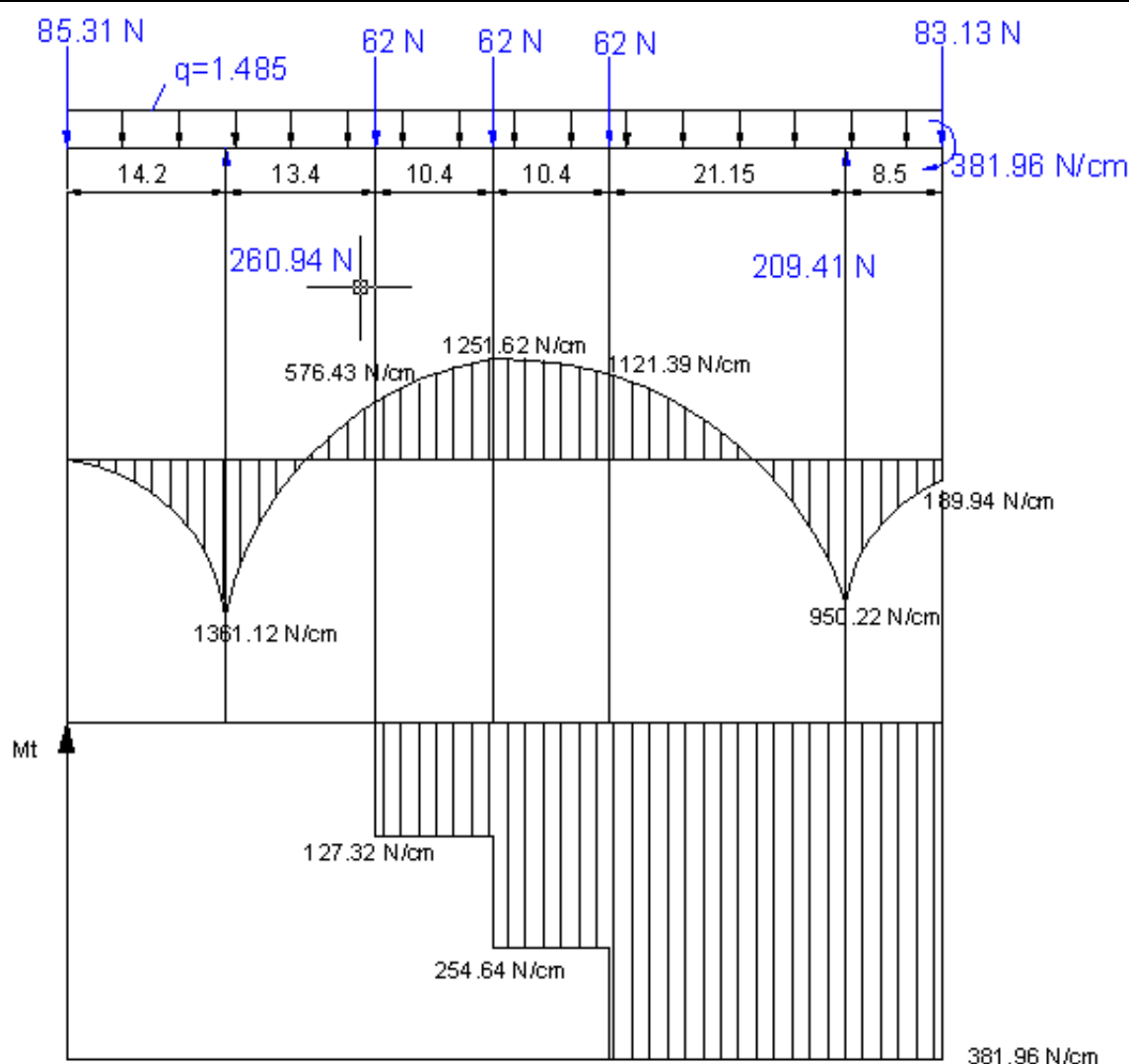


Fig. 3.11 Diagramas de momento flectores y torsores considerando la rigidez de la caja de bolas radial de simple hilera y las empaquetaduras como apoyos elásticos suplementarios.

El momento flector $M_{f_{max}} = 1251.62$ N-cm en la sección que coincide aproximadamente con la posición ocupada por el segundo impelente y el momento torsor en dicha sección es $M_t = 254.64$ N-cm.

Las tensiones:

$$\sigma_f = \frac{M_f}{W} = \frac{12516 \text{ N} \cdot \text{mm}}{7168,3 \text{ mm}^3} = 1.75 \text{ MPa} \quad (3.19)$$

$$\tau = \frac{M_t}{W_t} = \frac{254640 \text{ N} \cdot \text{mm}}{16114.5 \text{ mm}^3} = 15.8 \text{ MPa} \quad (3.20)$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 4 \cdot \tau^2} \leq [\sigma_t]$$

$$\sqrt{1.75^2 + 4 \cdot 15.8^2} = 31.6 \text{ MPa} \leq 100 \text{ MPa}$$

La sección cumple con la condición de resistencia.

3.13 Cálculo del factor de seguridad a la fatiga del árbol considerando la elasticidad de los apoyos.

Evaluando la resistencia del árbol a la fatiga en la sección que corresponde al cubo donde se aloja el segundo impelente, posición donde el momento flector es máximo y el momento torsor es alto, además se encuentra el concentrador de tensiones correspondiente a los dos chaveteros.

Datos:

$$\sigma_{\max} = 1.75 \text{ MPa} \quad \text{Tensión normal máxima existente en la sección.}$$

$$\tau_{\max} = 15.80 \text{ MPa} \quad \text{Tensión tangencial máxima existente en la sección.}$$

$$\sigma_{-1} = 0.43 \cdot \sigma_u = 0.43 \cdot 515 \text{ MPa} = 221.5 \text{ MPa} \quad \text{Límite de fatiga bajo ciclo simétrico.}$$

- Factor de seguridad a la fatiga para las tensiones normales:

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1} \cdot \varepsilon \cdot \beta}{K_\sigma \cdot \sigma_a} \quad \text{Factor de seguridad a la fatiga para las tensiones normales.}$$

Donde:

$$\sigma_a = 1.75 \text{ MPa} \quad \text{Tensión amplitud.}$$

Capítulo III: Aplicación del nuevo método general de cálculo de los árboles de las bombas centrífugas desarrollado a la evaluación de la resistencia del árbol de la bomba centrífuga de tres etapas contra incendio de la embarcación “6 de Junio”.

$\varepsilon = 0.6$ Factor de tamaño para $d = 45 \text{ mm}$ y acero aleado con concentrador, según (Pisarenko, 1989).

$\beta = 0.9$ Factor de estado de la superficie, para $\sigma_u = 515 \text{ Mpa}$, y un torneado fino, (Pisarenko, 1989).

$K_\sigma = 1.6$ Coeficiente efectivo de concentración de tensiones, para $\sigma_u = 515 \text{ Mpa}$, (Pisarenko, 1989).

$$n_\sigma = \frac{221.5 \text{ Mpa} \cdot 0.6 \cdot 0.9}{1.6 \cdot 1.75 \text{ Mpa}} = 42.7$$

- **Factor de seguridad a la fatiga para las tensiones tangenciales:**

$$n_\tau = \frac{\tau_f}{\tau_{MAX}} = \frac{102.5 \text{ Mpa}}{15.08 \text{ Mpa}} = 6.48$$

- **Evaluando el factor de seguridad a la fatiga resultante:**

$$n_\tau = \frac{n_\sigma \cdot n_\tau}{\sqrt{n_\sigma^2 + n_\tau^2}} = \frac{42.7 \cdot 6.48}{\sqrt{42.7^2 + 6.48^2}} = 6.4$$

La sección evaluada posee elevada reserva de resistencia a la fatiga.

Comprobación la seguridad a la fatiga en la sección de la empaquetadura donde se encuentra el momento flector máximo. En esa sección existe un momento flector $M_{f_{max.}} = 1361.12 \text{ N-cm}$ y no existe momento torsor. El árbol tampoco tiene concentración de tensiones en esa sección.

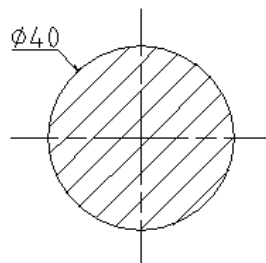


Fig. 3.12 Sección del árbol en la sección de la empaquetadura.

Modulo de la sección a flexión:

Capítulo III: Aplicación del nuevo método general de cálculo de los árboles de las bombas centrífugas desarrollado a la evaluación de la resistencia del árbol de la bomba centrífuga de tres etapas contra incendio de la embarcación “6 de Junio”.

$$W = \frac{\pi \cdot d^3}{32} = 136112 \text{ mm}^3$$

Las tensiones normales en la sección:

$$\sigma_f = \frac{M_f}{W} = \frac{13611.2 \text{ N} \cdot \text{mm}}{628 \text{ mm}^3} = 2.17 \text{ MPa}$$

• **Factor de seguridad a la fatiga para las tensiones normales:**

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1} \cdot \varepsilon \cdot \beta}{K_\sigma \cdot \sigma_a} \quad \text{Factor de seguridad a la fatiga para las tensiones normales.}$$

$$\sigma_a = 2.17 \text{ MPa}$$

$\varepsilon = 0.62$ Factor de tamaño para $d = 40 \text{ mm}$ y acero aleado con concentrador, según (Pisarenko, 1989).

$\beta = 0.9$ Factor de estado de la superficie, para $\sigma_u = 515 \text{ MPa}$, y un torneado fino, (Pisarenko, 1989).

$K_\sigma = 1.6$ Coeficiente efectivo de concentración de tensiones, para $\sigma_u = 515 \text{ MPa}$, (Pisarenko, 1989).

$$n = n_\sigma = \frac{221.5 \text{ MPa} \cdot 0.6 \cdot 0.9}{1.6 \cdot 2.17 \text{ MPa}} = 35.59$$

El factor de seguridad a la fatiga para las tensiones normales en esa sección disminuye pero sigue siendo elevado.

3.14 Conclusiones del Capítulo.

1. Se aplicó el Esquema de Análisis y el Método de Cálculo de los árboles de las bombas centrífugas desarrollado al árbol de la bomba centrífuga de tres etapas contra incendios de la embarcación “6 de Junio”, con vistas a comparar los resultados con el método clásico empleado durante la reparación y evaluar si el acero AISI 316 podía ser empleado en dicha aplicación.
2. Los resultados confirman que el acero AISI 316 puede ser empleado con una reserva de resistencia a la fatiga elevada.

Conclusiones



CONCLUSIONES GENERALES

1. En el trabajo se desarrolló un nuevo esquema de Análisis y la Metodología de Cálculo del árbol de las bombas centrífugas de simples a de múltiples etapas que considera la influencia favorable de la rigidez angular de los cojinetes de rodamientos y las empaquetaduras como apoyos elásticos suplementarios.
2. El esquema de Análisis desarrollado es mucho más exacto que el clásico pues contempla aspectos que nunca habían sido considerados, que influyen decisivamente en las fuerzas internas en los árboles.
3. El método fue aplicado a la evaluación de la resistencia del árbol de la bomba Multietápica contra incendios del buque “6 de Junio” y comprueba que el Momento Flector Máximo con el nuevo Esquema de Análisis es más exacto empleado, es sólo de un 38 % del momento flector calculado con el Esquema de Análisis Clásico lo que permitió garantizar que el árbol fabricado de acero inoxidable no sólo tiene asegurada su resistencia, sino que dada la mayor resistencia a la corrosión del acero AISI 316 tendrá una mayor durabilidad.

Recomendaciones

A decorative L-shaped line in a dark blue color, consisting of a horizontal segment at the bottom and a vertical segment on the right, meeting at a small square corner.

RECOMENDACIONES

Se recomienda incorporar en el Programa elaborado otros esquemas de bombas centrífugas, con otra disposición de las empaquetaduras.

Referencia
Bibliográfica

A decorative blue L-shaped line is positioned in the bottom right corner of the page, consisting of a vertical line and a horizontal line that meet at a right angle.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aleman, Rediseño y Recuperación de dos Bombas Multietapas Marca Berliet Pertenecientes a la Embarcación “6 de Junio” del Departamento de Bomberos de la Provincia de Cienfuegos. XVII Forum de ciencia y técnica, Refinería de petróleo Camilo Cienfuegos, 5 de Marzo 2010 – 25 p.
2. Bedford A., Fowler W. Engineering Mechanics. Statics. Third Edition, New Jersey: Prentice Hall, 2002.--583 p.
3. Beer F.P., Jonhston E.R. Mecánica Vectorial para Ingenieros. 2T. México: Mc Graw – Hill, 1984.—972 p.
4. Birger I.A., Shorr B.F., Shneiderovich R.M. Cálculo de Resistencia de Piezas de Máquinas. Moscú: Editorial Mashinostroenie, 1966.-- 616 p.
5. Dobrovolski V. Elementos de Máquinas. Moscú: Editorial MIR, 1970.--692 p.
6. Feodosiev V.I. Resistencia de Materiales. Moscú: Editorial MIR, 3ª Ed.1985.—583 p.
7. Fitzgerald F. Mecánica de Materiales. México: Editorial Alfaomega S.A. de C.V., 1996.-- 560 p.
8. Fogiel M. Problem solver in Strength of Materials and Mechanics of Solids. New Jersey: Editorial REA, 1988.—1140 p.
9. Goytisol R 2010
10. Goytisol R.; Hidalgo C.; Nodal F.; Noa J.G. Estudio teórico y experimental del coeficiente de rigidez de los apoyos en árboles con diferentes cojinetes de rodamientos. Memorias del Tercer Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica y Primero de Mecatrónica, Bogotá, Colombia, 20 al 22 de Septiembre del 2006.
11. Hawkes B. Cadcam. Madrid: Paraninfo S.A., 1989.—336 p.
12. Hidalgo Meizoso, Carlos. Estudio teórico y experimental del coeficiente de rigidez de los apoyos en árboles con diferentes tipos de cojinetes de rodamientos. Tesis en opción del Título de Master en Ciencias Técnicas. Dr. Rafael Goytisol Espinosa, Tutor.2009.
13. Mott R.L. Resistencia de Materiales Aplicada. México: Editorial Prentice- Hall Hispanoamericana S.A. 3ª. Ed. 1996.—640 p.
14. Nodal Ordoñez, Fernando. Estudio teórico y experimental del Empotramiento Elástico. Tesis en opción del Título de Master en Ciencias Técnicas. Dr. Rafael Goytisol Espinosa, Tutor.2004.
15. Olsen G.A. Elements of Mechanics of Materials. La Habana: Editora de la Asociación de Estudiantes de Ingeniería, 1962.—536 p.

Referencias Bibliográficas

16. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.K. Manual de Resistencia de Materiales. Moscú: Editorial MIR, 1989,— 693 p.
17. Spiegel L., Limbrunner G.F. Applied Statics and Strength of Materials. Third Edition. New Jersey: Prentice Hall, 1999.—644 p.
18. Volmir A. Problemas de Resistencia de Materiales. Moscú; Editorial MIR, 1986.—477 p.
19. Wilson Ch. Compute Integred Machine Design. New Jersey: Prentice Hall, 1999.- 646p.

Bibliografía

A decorative L-shaped line in the bottom right corner, consisting of a horizontal line and a vertical line meeting at a right angle, with a small square at the intersection.

BIBLIOGRAFÍA

Aleman, Rediseño y Recuperación de dos Bombas Multietapas Marca Berliet Pertenecientes a la Embarcación “6 de Junio” del Departamento de Bomberos de la Provincia de Cienfuegos. XVII Forum de ciencia y técnica, Refinería de petróleo Camilo Cienfuegos, 5 de Marzo 2010 – 25 p.

Bedford A., Fowler W. Engineering Mechanics. Statics. Third Edition, New Jersey: Prentice Hall, 2002.--583 p.

Beer F.P., Jonhston E.R. Mecánica Vectorial para Ingenieros. 2T. México: Mc Graw – Hill, 1984.—972 p.

Birger I.A., Shorr B.F., Shneiderovich R.M. Cálculo de Resistencia de Piezas de Máquinas. Moscú: Editorial Mashinostroenie, 1966.-- 616 p.

Cherkasski V.M. Bombas Ventiladores y Compresores. Moscú. Editorial MIR, 1986.—372 p.

Dobrovolski V. Elementos de Máquinas. Moscú: Editorial MIR, 1970.--692 p.

Faires V.M./ Diseño de Elementos de Máquinas. México : Editorial UTEHA, 1985.-- 802 p.

Feodosiev V.I. Resistencia de Materiales. Moscú: Editorial MIR, 3ª Ed.1985.—583 p.

Fernández Levy, Gilda S. Resistencia de Materiales. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1983.—511p.

Fitzgerald F. Mecánica de Materiales. México: Editorial Alfaomega S.A. de C.V., 1996.-- 560 p.

Fogiel M. Problem solver in Strength of Materials and Mechanics of Solids. New Jersey: Editorial REA, 1988.—1140 p.

Goytisoló R. Diseño de Elementos de Máquina. Las Villas: Editado por el Dpto. Mecánica Teórica y Aplicada. UCLV, 1973.--188p.

Goytisoló R.; Hidalgo C.; Nodal F.; Noa J.G. Estudio teórico y experimental del coeficiente de rigidez de los apoyos en árboles con diferentes cojinetes de rodamientos. Memorias del Tercer Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica y Primero de Mecatrónica, Bogotá, Colombia, 20 al 22 de Septiembre del 2006.

Goytisoló R., Cabello J.J. Hernández R. y otros. Análisis de la falla del Trunium de salida del Molino No. 1 de crudo de la Empresa de Cemento "Karl Marx". Trabajo presentado en el XI Forum Nacional de Ciencia y Técnica, 1996.—69 p.

Grahan Kelly S. Fundamentals of Mechanical Vibrations. New York: Mc Graw Hill, Inc, 1993.—643 p.

Hidalgo Meizoso, Carlos. Estudio experimental del coeficiente de rigidez de los apoyos en árboles con diferentes tipos de cojinetes de rodamientos.trabajo de Diploma. Dr. Rafael Goytisoló Espinosa, Tutor.2004.

Hidalgo Meizoso, Carlos. Estudio teórico y experimental del coeficiente de rigidez de los apoyos en árboles con diferentes tipos de cojinetes de rodamientos. Tesis en opción del Título de Master en Ciencias Técnicas. Dr. Rafael Goytisoló Espinosa, Tutor.2009.

Mott R.L. Resistencia de Materiales Aplicada. México: Editorial Prentice- Hall Hispanoamericana S.A. 3ª. Ed. 1996.—640 p.

Mukanov K. Design of metal structures. Moscú: Editorial MIR, 1968. --- 517p

Nodal Ordoñez, Fernando. Estudio teórico y experimental del Empotramiento Elástico. Tesis en opción del Título de Master en Ciencias Técnicas. Dr. Rafael Goytisoló Espinosa, Tutor.2004.

Bibliografía

Olsen G.A. Elements of Mechanics of Materials. La Habana: Editora de la Asociación de Estudiantes de Ingeniería, 1962.—536 p.

Partón V.Z. Mecánica de la Destrucción. Moscú : Editorial MIR, 1990.--415 p.

Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.K. Manual de Resistencia de Materiales. Moscú: Editorial MIR, 1989,-- 693 p.

Reshetov, D. Elementos de Máquinas. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1985.—830p.

Shigley, J. E.; Mitchell, L. D./ Diseño en Ingeniería Mecánica./ México: Editorial Mc Graw Hill, 1985. -- 915 p.

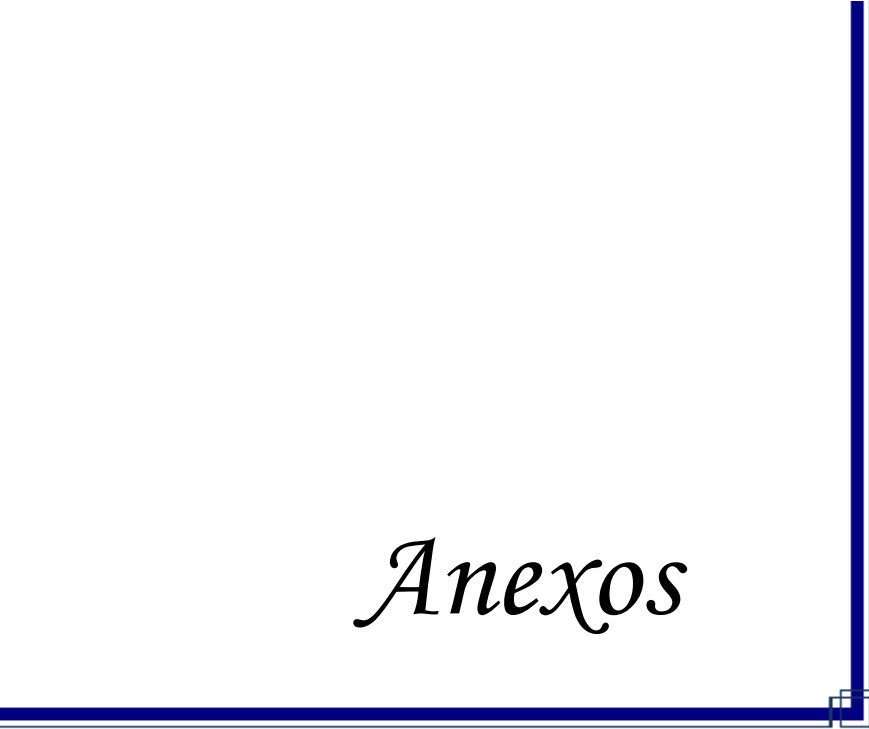
Timoshenko S. Teoría de la Estabilidad Elástica. Buenos Aires: Editorial EDIAR,1961.—549 p.

Timoshenko S. Resistencia de Materiales. Moscú : Editorial Nauka, 1965.—480p.

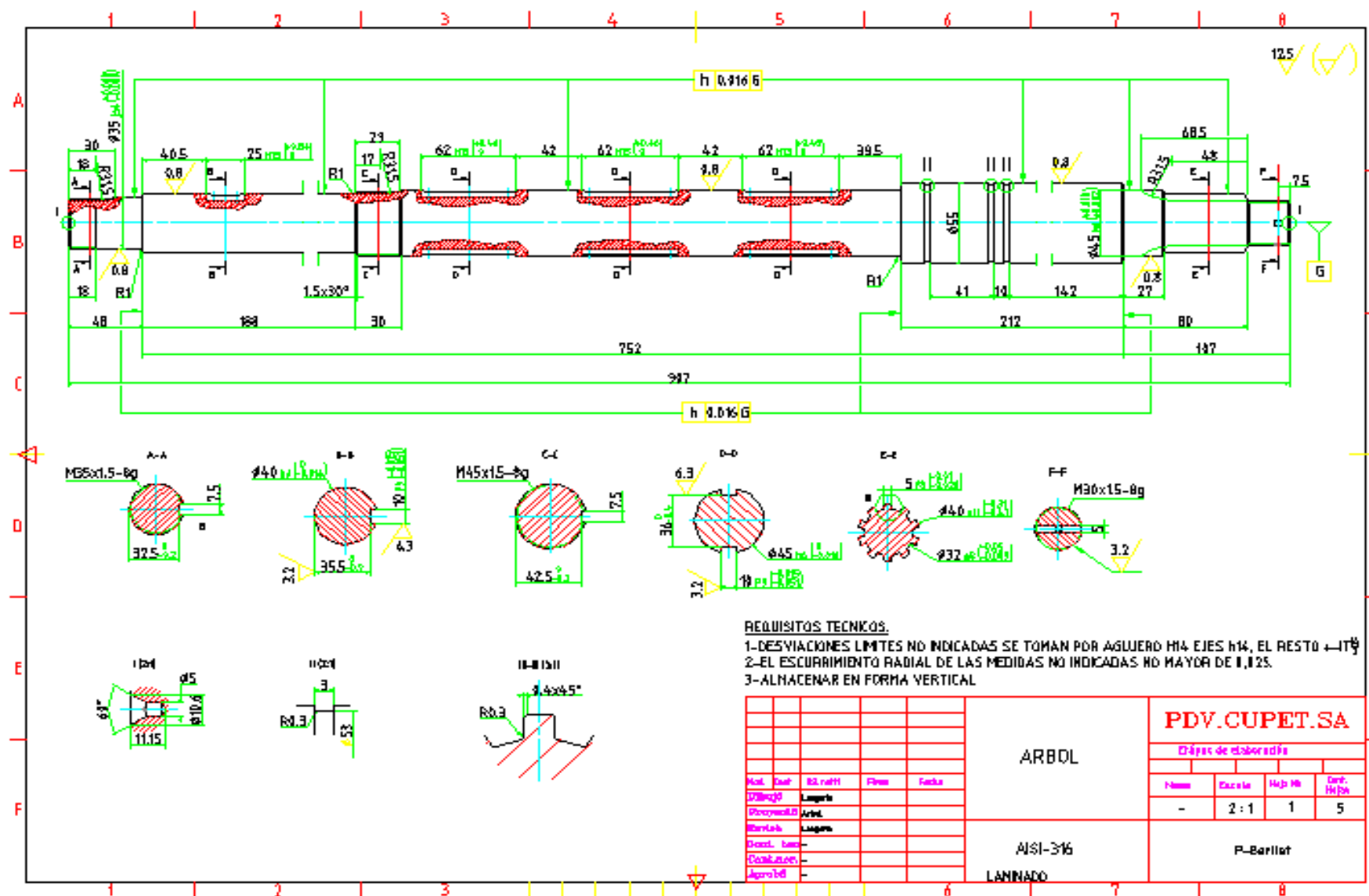
Volmir A. Problemas de Resistencia de Materiales. Moscú; Editorial MIR, 1986.—477 p.

Wilson Ch. Computer Integred Machine Design. New Jersey: Prentice Hall, 1999.—646 p.

Anexos

A decorative L-shaped line in the bottom right corner, consisting of a horizontal line and a vertical line meeting at a right angle, with a small square at the intersection.

ANEXOS A: Plano del árbol rediseñado.



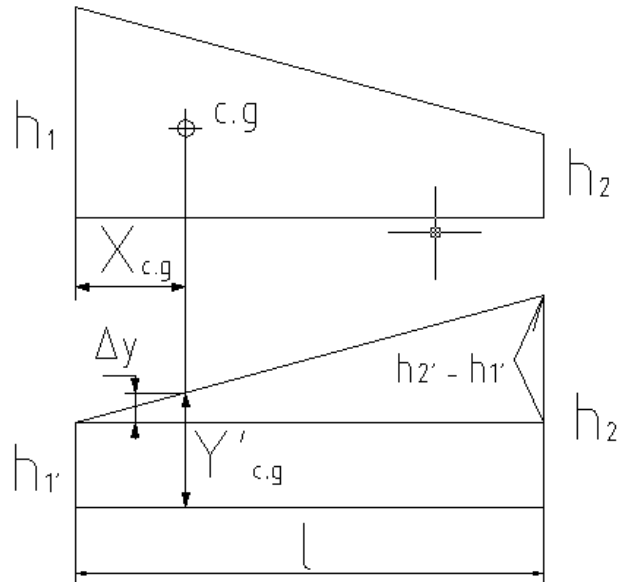
Anexo B: Embarcación "6 de Junio"



Anexo C: Estado del árbol y otras piezas de acero antes de la reparación.



Anexo D. Multiplicación de Trapecio por Trapecio



$$A = \frac{h_1 + h_2}{2} \cdot l$$

$$\frac{h_2' - h_1'}{l} = \frac{\Delta y}{X_{c.g.}}$$

$$X_{c.g.} = \frac{l(h_1 + 2 \cdot h_2)}{3(h_1 + h_2)}$$

$$Y'_{c.g.} = h_1' + \frac{(h_2' - h_1')}{l} \cdot \frac{l(h_1 + 2 \cdot h_2)}{3(h_1 + h_2)}$$

$$Y'_{c.g.} = \frac{3 \cdot h_1' \cdot (h_1 + h_2) + (h_2' - h_1') \cdot (h_1 + 2 \cdot h_2)}{3(h_1 + h_2)}$$

$$Y'_{c.g.} = \frac{3 \cdot h_1' \cdot h_1 + 3 \cdot h_1' \cdot h_2 + h_2' \cdot h_1 + 2 \cdot h_2' \cdot h_2 - h_1' \cdot h_1 - 2 \cdot h_1' \cdot h_2}{3(h_1 + h_2)}$$

$$Y'_{c,g} = \frac{2 \cdot h'_1 \cdot h_1 + h'_1 \cdot h_2 + h'_2 \cdot h_1 + 2 \cdot h'_2 \cdot h_2}{3(h_1 + h_2)}$$

$$\delta_{i',i'} = \left[\frac{h'_1(2 \cdot h_1 + h_2) + h'_2(h_1 + 2 \cdot h_2)}{6} \right]_l$$