



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS  
VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948

**Facultad de Ingeniería Mecánica.**

**Departamento de Ingeniería Mecánica.**

## **TRABAJO DE DIPLOMA**

**Título:** Estudio de fallas en los rodamientos de la máquina VIBRACOM.

**Autor:** Antonio Carrillo Fontaine.

**Tutor:** DrC. Idalberto Mendoza Díaz.

Santa Clara, 2013

**CON SU ENTRAÑABLE TRANSPARENCIA**



## **Dedicatoria:**

*A mis padres y demás familiares, amigos y profesores; por apoyarme a lo largo de toda la carrera.*

## **Resumen:**

En el presente trabajo de diploma se realiza un estudio sobre las fallas en los rodamientos de la máquina para la fabricación de bloques de hormigón, VIBRACOM. La máquina usa rodamientos 11206E, del catálogo MRC, que sirven de apoyo a dos excéntricas que al girar producen las vibraciones necesarias para compactar el hormigón. Estos rodamientos operan a 2563 rpm soportando las reacciones en los apoyos debido a la fuerza de inercia (generada por el giro de las excéntricas), bajo estas condiciones la vida nominal de estos rodamientos es de 102 h, por lo se selecciona una unidad UC PG 206 D1 donde se inserta el rodamiento UC 206 D1 del fabricante NTN, recomendado para soportar las vibraciones y con aproximadamente el doble de la vida útil que el rodamiento anterior.

## **Abstract:**

Presently diploma work is carried out a study on the flaws in the bearing of the machine for the production of concrete blocks, VIBRACOM. The machine uses bearing 11206E, of the catalogue MRC that serve from support to two eccentrics that produce the necessary vibrations for compact the concrete when rotating. These bearing operates to 2563 rpm supporting the reactions in the supports due to the force of inertia (generated by the turn of the eccentrics), I lower these conditions the nominal life of these bearing it is of 102 h, for it is selected it an unit UC PG 206 D1 where the bearing UC 206 D1 of the manufacturing NTN is inserted, recommended to support the vibrations and with approximately double the useful life that the previous bearing.

# Índice:

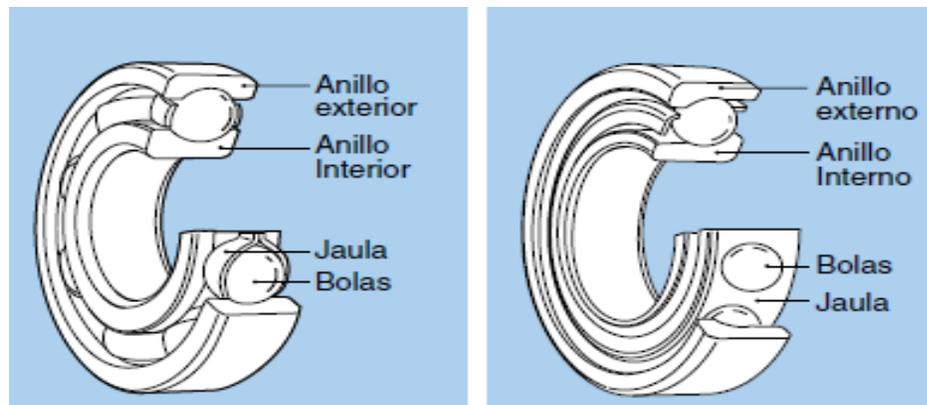
<b>Introducción:</b> .....	<b>1</b>
<b>Capítulo I: Estudio de fallas en cojinetes de rodamientos y métodos para el diagnóstico y monitoreo de estos.</b> .....	<b>6</b>
1.1 Introducción del capítulo: .....	6
1.2 Causas de fallas en cojinetes de rodamiento:.....	6
1.2.1 Mal manejo de los rodamientos: .....	7
1.2.2 Lubricación deficiente:.....	7
1.2.3 Operaciones inadecuadas: .....	7
1.2.4 Contaminación:.....	8
1.3 Principales fallas en rodamientos:.....	8
1.3.1 Fatiga a consecuencia de rodadura sobre cuerpos extraños: .....	10
1.3.2 Fatiga a consecuencia de sobrecarga estática: .....	11
1.3.3 Fatiga a consecuencia de deficiente lubricación:.....	12
1.3.4 Desgaste:.....	13
1.3.5 Oxidación:.....	14
1.3.6 Corrosión: .....	15
1.3.7 Sobre calentamiento:.....	15
1.4 Métodos para el diagnóstico y monitoreo de cojinetes de rodamiento:.....	17
1.4.1 Método basado en la franja de temperatura de trabajo del rodamiento:.....	17
1.4.2 Método por análisis de vibraciones: .....	18
1.4.3 Método por análisis de lubricantes: .....	23
1.5 Conclusiones del capítulo: .....	23
<b>Capítulo II: Chequeo de los rodamientos y sus soportes en la máquina VIBRACOM.</b> .....	<b>24</b>
2.1 Introducción del capítulo: .....	24
2.2 Principio de funcionamiento de la mesa vibratoria . .....	24
2.3 Análisis cinemático de las transmisiones de la máquina:.....	25
2.3.1 Cálculo de las velocidades de giro de las excéntricas: .....	25
2.3.2 Cálculo de las potencias en las excéntricas: .....	25

2.4	Cálculos de las fuerzas que actúan sobre los rodamientos y sus soportes: ....	26
2.5	Cálculo de las deformaciones angulares en los apoyos: .....	28
2.6	Conclusiones del capítulo: .....	32
<b>Capítulo III: Especificaciones de operación de los rodamientos de la máquina...</b>		<b>33</b>
3.1	Introducción del capítulo: .....	33
3.2	Montaje de los rodamientos de la máquina:.....	33
3.2.1	Preparación de la instalación del rodamiento:.....	33
3.2.2	Montaje del rodamiento:.....	34
3.3	Lubricación:.....	35
3.3.1	Lubricación con aceite:.....	35
3.3.2	Lubricación con grasa: .....	36
3.3.3	Selección del tipo de lubricación para los rodamientos en estudio:.....	37
3.4	Selección de un nuevo rodamiento: .....	44
3.5	Montaje de las poleas: .....	45
3.6	Conclusiones del capítulo: .....	45
<b>Conclusiones:</b> .....		<b>46</b>
<b>Recomendaciones:</b> .....		<b>47</b>
<b>Bibliografía:</b> .....		<b>48</b>

## Introducción:

Los cojinetes son elementos de máquinas que tienen como finalidad dirigir el movimiento de rotación y soportar las cargas que actúan sobre los árboles y ejes que giran en el espacio. Según la clase de fricción se clasifican en cojinetes de deslizamiento (fricción) y de rodamiento.

Los cojinetes de deslizamiento trabajan en condiciones de deslizamiento relativo de la superficie del gorrón sobre la superficie del cojinete, mientras los cojinetes de rodamientos utilizan elementos rodantes intermedios y trabajan a base de rozamiento por rodadura. Las partes fundamentales de los rodamientos pueden apreciarse en la figura 1, básicamente ellas son: anillos exterior e interior, elementos rodantes (bolas o rodillos) y las jaulas.



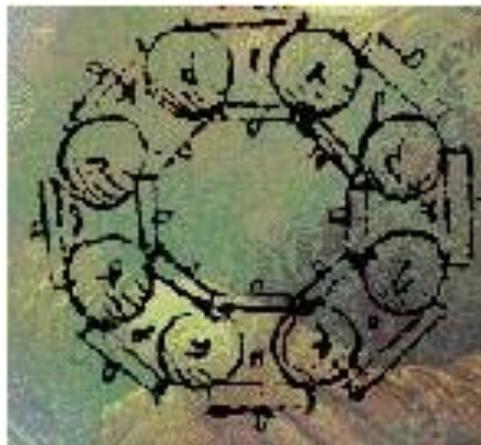
**Figura 1. Rodamiento rígido de bolas y rodamiento de bolas a contacto angular.**

### a) Historia del rodamiento:

El rodamiento debe su nombre y origen a los cuerpos rodantes, tales como al rodillo de madera utilizados por los egipcios en la época de los faraones; también se inspiró mucho en la rueda, ya que es el principio de rotación quien los une, pues ambos giran sobre un eje. Al estudiar ambos elementos surgió un problema a solucionar: luchar contra la fricción por la rotación, aumentando la velocidad.

Existe evidencia de que el remplazo de la fricción de deslizamiento por la rodadura data de civilizaciones antiguas:

- Ciertos bajos relieves egipcios representan el transporte de enormes bloques de piedra, destinados a la construcción de monumentos, que la gente hacía deslizar sobre troncos de árboles que servían de rodillos.
- Los restos de una plataforma giratoria que proviene de un barco del emperador Calígula, encontrados en el fondo del lago Nemi en los años 1930, son los testigos de los rodamientos rudimentarios que se utilizaban desde la antigüedad. Se puede considerar esta plataforma como uno de los primeros ejemplos de rodamiento de tope, es decir, de un rodamiento dedicado a soportar cargas directas y en rotación sobre su eje.
- En el siglo XV, Leonardo da Vinci descubrió el principio del rodamiento. Este último se dio cuenta de que la fricción sería menos importante si las bolas no se tocaran, entonces, desarrolló separadores que permitían a las bolas evolucionar libremente. Se inventó otra vez este mecanismo durante el siglo XVIII cuando se patentó, en Inglaterra, un eje para coches de caballos equipados con una corona de bolas en rotación en gargantas de sección semicircular realizadas en el eje. El dibujo de da Vinci se muestra en la figura 2. [1]



**Figura 2. Croquis de da Vinci**

No fue hasta la revolución industrial que el rodamiento alcanzó su verdadero auge, contribuyendo en el desarrollo técnico y de la industria.

b) Principal fabricante:

La compañía más grande del mundo en la fabricación de rodamientos es SKF (Svenska Kullagerfabriken), es una empresa sueca fundada en 1907. La compañía se dedica al diseño y provisión de rodamientos, sellos y sistemas de lubricación, productos y sistemas para mantenimiento, productos mecatrónicos, productos para transmisión de potencia y otros servicios relacionados a nivel global.

Para 1912, SKF tenía representaciones en 32 países y para 1930, sumaba más de 21.000 empleados en 12 fábricas localizadas por el mundo.

En la década de 1970 SKF se lanzó a un plan masivo de racionalización de la producción en Europa. Se comenzó a implementar un proyecto visionario denominado, "Concepto de Producción para la década de 1980" su objetivo era que los turnos de trabajo nocturnos se pudieran llevar a cabo prácticamente sin necesidad de trabajadores. Para aumentar la productividad y resguardar la calidad del producto, era necesario contar con un flujo automático continuo de anillos de rodamientos. Esta es la razón que llevó al desarrollo de Flexlink; un sistema de cinta plástica multipropósito de transporte. La empresa mantuvo sus derechos sobre FlexLink hasta 1997.

Sven Wingquist fue fundador, gerente general y presidente de SKF por varios años pero trascendió por inventar los rodamientos auto entrantes de gran importancia para la ingeniería mecánica.

En 1899 Sven Wingquist fue contratado como ingeniero jefe por una industria textil donde se interesó especialmente por los problemas de fricción que presentaban las máquinas de la empresa, que resultaban en costosas y largas reparaciones.

Se cuenta que en una ocasión un telar se recalentó por la fricción y ocasionó un pequeño incendio dentro de la fábrica. Este incidente lo inspiró en el desarrollo de un rodamiento de metal en lugar de madera, que era el material del cual se fabricaban en la época. Existían también, desde 1869, rodamientos que se aplicaban en la fabricación de ruedas de bicicleta, pero eran inaplicables en la industria por su fragilidad. Wingqvist diseñó un rodamiento de metal compuesto por un anillo interior que se ajustaba en un eje, con un doble canal exterior; y un anillo exterior ajustado a una carcasa. Entre ambos iba una serie doble de esferas

colocadas entre el doble canal del anillo interior y el anillo exterior. Las esferas tenían una cualidad auto entrante, es decir una holgura o juego, que reducía la carga al mínimo, con un resultado de larga duración y mínimo desgaste.

En la actualidad, las más diversas máquinas emplean en sus apoyos cojinetes de rodamiento. Una amplia estandarización de tipos y una variada gama de dimensiones, junto a otras ventajas como: menor pérdida por rozamiento durante la puesta en marcha, menor generación de calor, reducción del consumo de lubricantes y simplicidad de servicio técnico, constituyen los fundamentos de este incremento en su uso.

Los principales inconvenientes de este elemento de máquina son: elevadas dimensiones diametrales, altas tensiones por contacto y menor capacidad de amortiguación de las vibraciones.

Debido al amplio campo de aplicaciones en las máquinas industriales, es de vital importancia el estudio de las fallas en los rodamientos, ya que la rotura o el mal trabajo de estos, pueden causar importantes pérdidas por concepto de paradas no planificadas y por reparaciones. Un ejemplo de ello se aprecia en las máquinas empleadas para la fabricación de bloques de hormigón.

Problema científico de la investigación: Se desconocen las causas que producen el deterioro, antes de la fecha establecida como vida útil, de los cojinetes de rodamientos que soportan las excéntricas de la máquina empleada para la fabricación de bloques huecos de hormigón, VIBRACOM.

Tomando como base una revisión bibliográfica previa y el problema científico expuesto anteriormente, se plantea la siguiente Hipótesis:

“Es posible, mediante el estudio de las condiciones de trabajo de la VIBRACOM y una revisión bibliográfica profunda relacionada con las fallas en los rodamientos, establecer las causas que provocan el rápido deterioro de los rodamientos que soportan las excéntricas en este tipo de máquina”.

Para corroborar la hipótesis se plantea como objetivo general, identificar las causas que provocan las roturas de los rodamientos empleados como soportes de las excéntricas de las máquinas utilizadas para la fabricación de bloques, VIBRACOM.

**Objetivos específicos:**

- 1- Desarrollar un estudio sobre las fallas en los cojinetes de rodamientos, así como los métodos para determinar dichas fallas.
- 2- Estudiar las condiciones en que trabajan los rodamientos empleados en las máquinas utilizadas para la fabricación de bloques, VIBRACOM.
- 3- Definir las causas que provocan las roturas de los rodamientos objeto de análisis.
- 4- Proponer soluciones para minimizar posibilidad de deterioro de los rodamientos en estudio.

# Capítulo I: Estudio de fallas en cojinetes de rodamientos y métodos para el diagnóstico y monitoreo de estos.

## 1.1 Introducción del capítulo:

Los rodamientos son elementos de máquinas de amplio uso y aplicación en la industria. Estos tienen como finalidad dirigir el movimiento de rotación y soportar las cargas que actúan sobre los árboles y ejes que giran en el espacio. Debido al amplio campo de aplicaciones en las máquinas industriales es de vital importancia el estudio de las principales fallas de los rodamientos, así como los métodos para su detección, ya que la rotura o el mal trabajo de estos pueden causar importantes gastos por concepto de reparaciones no planificadas durante la producción.

El objetivo de este capítulo es realizar una búsqueda bibliográfica de las principales fallas que se presentan en los rodamientos así como en los métodos usados para el monitoreo y la detección de fallas prematuras en cojinetes de rodamientos.

## 1.2 Causas de fallas en cojinetes de rodamiento:

Existen diversas causas que conllevan a una falla prematura en los cojinetes de rodamientos y saber identificarlas permite tomar medidas correctivas para que estas no se presenten nuevamente.

Por este motivo los principales fabricantes de rodamientos cuentan con estadísticas que indican que cerca del 16% de las fallas en los rodamientos son el resultado del mal manejo de estos, el 36% son el resultado de una lubricación deficiente, el 34% son el resultado de la operación inadecuada y el 14% de las fallas son debidas a la contaminación [2]. En la figura 1.1 se muestra esquemáticamente esta relación estadística.

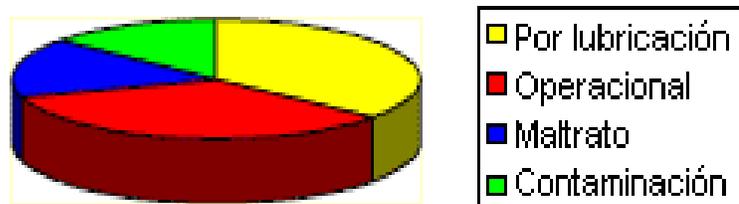


Figura 1.1 Principales causas de fallas en rodamientos.

### **1.2.1 Mal manejo de los rodamientos:**

El almacenamiento, la transportación y el montaje de los rodamientos son tareas que se deben realizar siguiendo varias precauciones, ya que estos son elementos de alta precisión y aunque sean rodamientos de alta calidad, la vida esperada y su desempeño no son obtenidos si se manipulan inadecuadamente.

Es necesario prevenir la entrada de polvo y suciedades en los rodamientos, por ello deben ser almacenados en lugares limpios; su manejo debe ser cuidadoso ya que choques o impactos fuertes pueden causar rajaduras, resultando en posibles fallas en servicio. El montaje de estos se realizará siempre con las herramientas adecuadas y es importante protegerlos contra la corrosión.

### **1.2.2 Lubricación deficiente:**

La lubricación es un factor importante para el correcto funcionamiento del rodamiento ya que esta debe garantizar que exista una capa límite de lubricante entre los elementos en contacto del rodamiento (la viscosidad es la propiedad del lubricante que permite separar las superficies del rodamiento) con el fin de reducir la resistencia al movimiento de los elementos rodantes y minimizar el desgaste, este también actúa como barrera para impedir la entrada de contaminantes y como fuente de disipación del calor producido durante el servicio.

Los métodos de lubricación de rodamientos están divididos en dos categorías: La lubricación con grasa y lubricación con aceite. Se debe elegir el método de lubricación según las condiciones de aplicación y del propósito de la aplicación para alcanzar el mejor desempeño del rodamiento. Los principales fabricantes cuentan con catálogos donde se recomiendan los lubricantes a usar así como los sistemas de lubricación, esta selección se basa principalmente en el comportamiento de la viscosidad del lubricante a una temperatura de trabajo del rodamiento.

### **1.2.3 Operaciones inadecuadas:**

Los rodamientos operan inadecuadamente durante el servicio cuando son sometidos a vibraciones y/o sobrecargas que generalmente se producen por errores en el montaje como son los casos del desbalance y desalineamiento de ejes y mal montaje de poleas o por una

selección inadecuada de estos, es decir, que el rodamiento no cumpla las condiciones de diseño.

- a) Desbalance de ejes: Todos los elementos rotativos son siempre fuentes potenciales de vibraciones mecánicas, a pesar de que las tolerancias de fabricación sean muy estrictas, ya que la homogeneidad del material no es absoluta, las masas en desequilibrio generan una fuerza centrífuga perturbadora que ocasiona vibraciones en las máquinas.
  
- b) Desalineamiento de ejes: Produce una precarga en los rodamientos. Una pequeña sobrecarga puede tener un efecto estabilizante de la cuña de aceite. No obstante, la sobrecarga puede ocasionar la ruptura de la película de aceite con el consiguiente riesgo de la falta de lubricante en la zona de carga. En general, cualquier sobrecarga por desalineamiento reduce la vida útil de un rodamiento [3].
  
- c) Mal montaje de poleas: Es importante una correcta alineación de las poleas y de la tensión de las correas ya que un exceso de tensión sobrecarga los rodamientos, mientras una tensión reducida trae como consecuencia desgaste en correas y poleas.

#### **1.2.4 Contaminación:**

Se produce por la entrada de suciedad que está presente en el momento del ensamble o reparación de la máquina, o que ingresa a través de: filtros de aire, sellos defectuosos o mantenimientos. En los rodamientos también ingresan partículas generadas por el desgaste de piezas móviles. Aún bajo la mejor lubricación, las superficies metálicas se desgastan con el tiempo.

#### **1.3 Principales fallas en rodamientos:**

Los rodamientos, aunque operen en condiciones normales de trabajo, están constantemente sometidos a esfuerzos repetitivos en el tiempo que causan descascarillado de las superficies de contacto (pistas y elementos rodantes), este fenómeno es producto de la fatiga del material y causa la falla del rodamiento.

La vida efectiva o útil de los rodamientos se define usualmente en términos del número total de revoluciones que puede ejecutar antes de que se presente el descascarillado de las pistas o de los elementos rodantes [4]. Según el principal fabricante de rodamientos, SKF, la vida útil está determinado por la carga y la velocidad de giro a la que se encuentra sometido y se calcula mediante la expresión I:

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60*n} * \frac{C}{P}^p \quad (I)$$

Dónde:

$L_{10h}$ , vida nominal en horas de servicio.

n- velocidad de giro en revoluciones por minuto.

C- capacidad de carga dinámica en N.

P- carga dinámica equivalente en N.

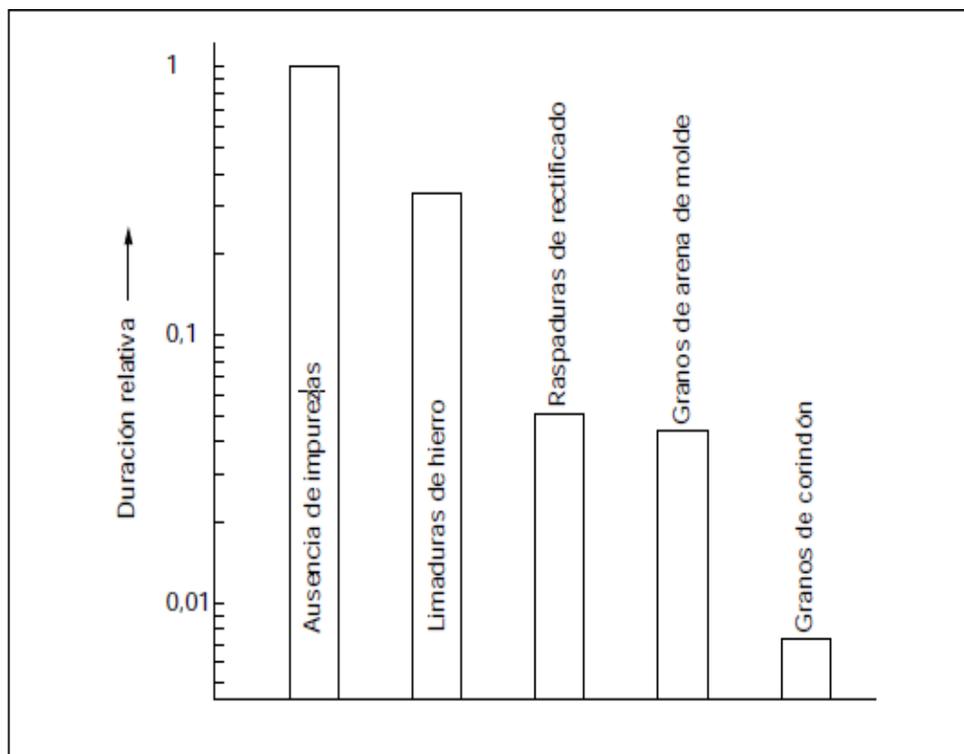
p- exponente de la ecuación de vida.  $p= 3$  para rodamientos de bolas,  $p= 10/3$  para rodillos.

Esta falla por fatiga, donde al principio aparece una grieta por debajo de la superficie del material que se propaga hacia la superficie a la vez que se someten a esfuerzos cíclicos en el tiempo, es muy difícil que ocurra en la práctica. Investigaciones de los principales fabricantes concluyen que solo el 9 % de los rodamientos alcanzan su vida útil debido a que las principales fallas que se presentan son:

- Fatiga a consecuencia de rodadura sobre cuerpos extraños.
- Fatiga a consecuencia de sobrecarga estática.
- Fatiga a consecuencia de deficiente lubricación.
- Desgaste.
- Corrosión.
- Oxidación.
- Sobrecalentamiento.

### 1.3.1 Fatiga a consecuencia de rodadura sobre cuerpos extraños:

En presencia de elevada contaminación en el rodamiento se produce una notable reducción de la vida útil. El efecto perjudicial de los cuerpos extraños en cada caso concreto depende de su dureza, tamaño y cantidad, así como del tamaño del rodamiento. En lo que respecta a la fatiga, los rodamientos de bolas reaccionan a la contaminación de forma más sensible que los rodamientos de rodillos, mientras que los rodamientos con elementos rodantes pequeños son más sensibles que los equipados con elementos rodantes grandes. En las incrustaciones de cuerpos extraños resultan críticos los alabeos del borde que se forman en el proceso. En las subsiguientes rodaduras, estos alabeos son sometidos a una sollicitación especialmente intensa, y junto a ellos se forman las primeras grietas incipientes. El gráfico de la figura 1.2 muestra el efecto de algunas impurezas en la duración de los rodamientos. [5]



**Figura 1.2 Disminución de la vida útil del rodamiento a causa de diversas impurezas.**

Los daños por este tipo de fatiga se caracterizan por desprendimiento del material, donde ocurre un ensanchamiento en forma de V (pitting en V) detrás de la incrustación del cuerpo extraño en el sentido de rodadura, como se muestra en la figura 1.3.



**Figura 1.3 Evolución de falla por fatiga producto a rodadura sobre cuerpos extraños.**

### **1.3.2 Fatiga a consecuencia de sobrecarga estática:**

La sobrecarga estática elevada de un rodamiento da lugar a indentaciones de los elementos rodantes, cuyos alabeos marginales son las principales causas de fallos. En la fase más temprana se observan indentaciones a distancia uniforme del borde y con la misma separación que los elementos rodantes como se muestra en la figura 1.4, de las cuales parten roturas que a menudo están limitadas a una parte del perímetro. En algunas ocasiones este fenómeno sólo se presenta en un aro, habitualmente de forma asimétrica con respecto al centro del camino de rodadura. [5]

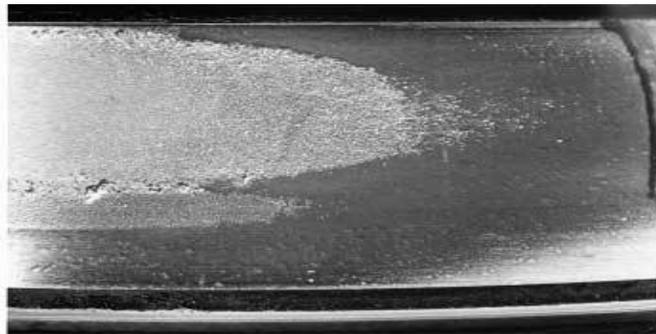


**Figura 1.4 Indentaciones producidas por las bolas en un rodamiento rígido de bolas.**

### 1.3.3 Fatiga a consecuencia de deficiente lubricación:

La lubricación es un factor determinante para el correcto funcionamiento en servicio del rodamiento, en el caso de una mala lubricación pueden producirse diversos cuadros de daños que conllevan a la falla por fatiga dependiendo de la carga.

- a) Mala lubricación en presencia de carga relativamente baja y existencia simultánea de deslizamientos: se producen roturas superficiales minúsculas. Como estas roturas aparecen en gran número, tienen el aspecto de manchas sobre el camino de rodadura, denominadas punteado gris o micropittings, ver figura 1.5. [5]
- b) Lubricante diluido en presencia de carga muy elevada: se forman también pittings poco profundos en forma de concha como se muestra en la figura 1.6. [5]
- c) En el caso de sollicitaciones muy elevadas y estado de lubricación deficiente al mismo tiempo: se pueden producir zonas de calentamiento en el camino de rodadura, en las cuales se forman fisuras superficiales por el paso de los elementos rodantes. [5]



**Figura 1.5 Micropittings.**



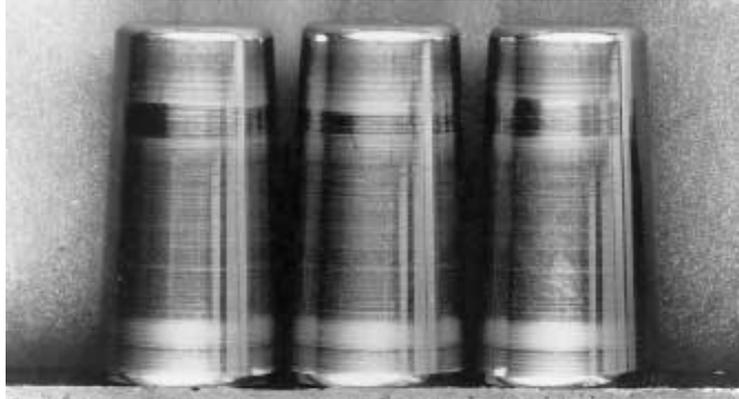
**Figura 1.6 Fatiga en forma de concha.**

### 1.3.4 Desgaste:

El desgaste usualmente se refiere a la aparición de rugosidades en las pistas y elementos rodantes y por consiguiente pérdida de material; generalmente se produce en presencia de partículas abrasivas, problemas de lubricación y problemas de vibración en los momentos de reposo de la máquina. Ver figura 1.7. En la tabla 1.1 aparecen datos con respecto a la apariencia de la falla y la causa que la origina. [3]

**Tabla 1.1 Tipos de desgaste, descripción y causas.**

Tipo de desgaste	Por partículas abrasivas	Por problemas de lubricación	Por problemas de vibración
Descripción	Pequeñas indentaciones alrededor de las pistas y bolas. Fuerte rallado y grasa color verde opaco.	Desgastado, frecuentemente igual que un espejo, superficie; en fase final decoloración café azulada.	Marcas en las pistas. Estas marcas son rectangulares en rodamientos de rodillos y circulares en rodamientos de bolas. El fondo de las marcas puede ser brillante u opaco y oxidado.
Causa	Falta de limpieza antes y durante el montaje del rodamiento. Sellado imperfecto, lubricante contaminado por partículas abrasivas provenientes de la jaula.	Falta de lubricante o lubricante que ha perdido sus propiedades.	El rodamiento ha sido expuesto a vibración externa en los períodos de detención de la máquina.



**Figura 1.7 Huellas de desgaste en la superficie de elementos rodantes.**

### **1.3.5 Oxidación:**

La formación de óxido ocurre cuando el lubricante no es capaz de crear una capa protectora que impida la interacción del oxígeno con las superficies metálicas del rodamiento. El óxido carcomerá gradualmente la superficie hasta inutilizarla provocando la falla catastrófica.

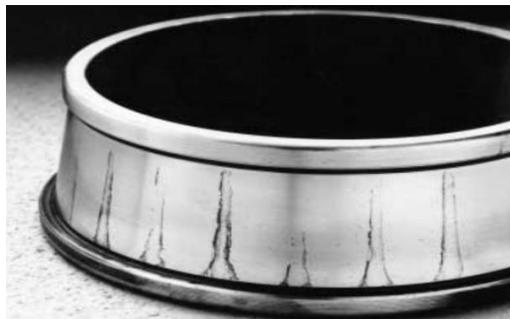
Generalmente este daño se produce debido a la humedad y se caracteriza por una decoloración marrón en las superficies de rodadura y en las superficies exteriores, generalmente distribuida no uniformemente en forma de excoriaciones aisladas como se muestra en la figura 1.8. [5]



**Figura 1.8 Oxidación en el aro exterior de un rodamiento rígido de bolas.**

### **1.3.6 Corrosión:**

Se identifica por la formación de una capa de óxido oscura delgada producto al ataque de agentes corrosivos como ácidos que corroen el acero rápidamente. Las sales que están presentes en el agua fresca constituyen, juntamente con el agua, un electrolito, el cual causa corrosión galvánica (corrosión electroquímica), por este motivo el agua salada, como el agua de mar, es altamente peligrosa para el rodamiento. La figura 1.9 muestra daños superficiales en un rodamiento debido a la corrosión.



**Figura 1.9 Daños superficiales producto a la acción de medios agresivos.**

### **1.3.7 Sobre calentamiento:**

En este tipo de daños se observa una decoloración intensa en las piezas del rodamiento y grandes deformaciones plásticas de los caminos de rodadura o de los elementos rodantes. Un aumento repentino de la temperatura suele, en ocasiones, bloquear el rodamiento como se muestra en la figura 1.10.



**Figura 1.10 Bloqueo de un rodamiento de rodillos cilíndricos producto a un sobre calentamiento por fricción.**

Es difícil identificar la causa cuando esta falla ocurre, es posible que se deba a:

- Insuficiente juego interno en el servicio del rodamiento, sobre todo en el caso de rodamientos de elevada velocidad de giro.
- Lubricación inadecuada.
- Precarga radial por calentamiento exterior.
- Frenado del giro por rotura de la jaula.

Según investigaciones realizadas por los principales fabricantes, los rodamientos operan el 80 % de su vida útil sin defectos y cuando la falla ocurre, generalmente estos se encuentran en algunas de las 4 diferentes etapas de fallas que se muestran a continuación.

**Etapas 1:** Las fallas de los elementos rodantes normalmente se producen por debajo de la superficie de las pistas de rodadura. Comienzan generalmente a 4 o 5 milésimas de pulgada (0.1 a 0.125 mm) por debajo de la superficie de la pista de rodadura. En este momento se estima que tienen de un 10 a 20% de vida útil restante.

**Etapas 2:** Conforme la falla progresa, huellas microscópicas (<40 micras) se producen en la superficie del componente averiado. Esto es considerado como Etapa 2 y se estima que tienen entre el 5 y 10% de vida útil restante.

**Etapas 3:** El desarrollo de las fallas va más allá de las causas iniciales, como son el agrietamiento y/o desprendimiento de metal, que normalmente están asociadas a las fallas de los rodamientos. La vida útil en este momento se ve limitada del 1 al 5%.

**Etapas 4:** Cuando se presenta desgaste, grietas múltiples o desprendimientos excesivos, podemos decir que estamos en la Etapa 4 y etapa final en la falla del rodamiento. Muchas veces los rodamientos comienzan a deformarse y la jaula puede desintegrarse o romperse. Sólo queda el 1% de la vida útil o tal vez una revolución. [2]

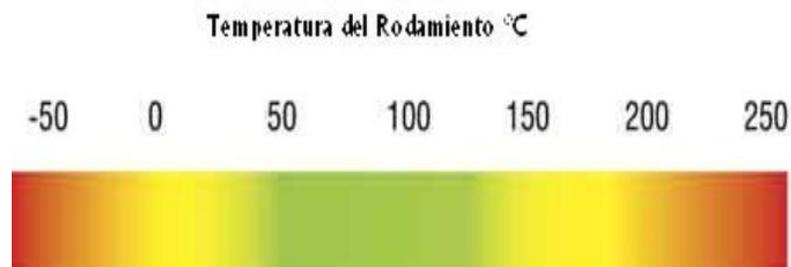
#### 1.4 Métodos para el diagnóstico y monitoreo de cojinetes de rodamiento:

Los rodamientos en un equipo son monitoreados generalmente por análisis de vibraciones y análisis de aceite. Estos métodos nos permiten comparar un estado actual contra un histórico o tendencia y, de forma efectiva, valorar la vida útil del rodamiento en el equipo. Por esta causa estos métodos son usados principalmente como herramientas para el mantenimiento predictivo, ya que nos permiten identificar una falla prematura y su evolución en los rodamientos, determinando así el momento oportuno para realizar el cambio del rodamiento, sin que ocurra en este una falla catastrófica.

Desafortunadamente, en muchas ocasiones no es posible la aplicación de estas técnicas en ambientes hostiles de producción, cualquier ambiente donde el personal o técnicos de estas áreas no pueden acceder de manera segura sin cortar la corriente del equipo, o acceder a la máquina debido a condiciones peligrosas; esto hace que dichos métodos sean imposibles de realizar o sean muy costosos. En estas condiciones se justifica el uso de métodos no tan fiables como el basado en la franja de temperatura de trabajo del rodamiento para determinar el estado y la expectativa de vida del rodamiento.

##### 1.4.1 Método basado en la franja de temperatura de trabajo del rodamiento:

Los principales fabricantes han realizado numerosos estudios sobre la influencia de la temperatura de operación de los rodamientos en la vida útil de este por lo que se han diseñado fórmulas para calcular rangos de temperatura adecuadas de funcionamiento, los resultados arrojan rangos de temperatura a los cuales el lubricante y el rodamiento operan a su máximo desempeño con el mínimo esfuerzo.



**Figura 1.11 Franja de temperaturas de operación de los rodamientos.**

En la figura 1.11 se muestra el rango típico de temperaturas del elemento rodante de un rodamiento, la zona verde muestra el rango ideal de operación para el rodamiento y el lubricante. Operar en la zona amarilla reducirá la vida útil del rodamiento y del lubricante y en la zona roja se espera un fallo prematuro del rodamiento.

Es válido aclarar que existen diferentes franjas de temperaturas para diferentes combinaciones de rodamientos – lubricantes, pero en general seguirá la misma indicación en cuanto al rango de temperaturas óptimo de operación.

El método basado en la franja de temperatura de trabajo del rodamiento, usando la técnica de termografía, solo se practica cuando no es posible aplicar el análisis de vibraciones y análisis de aceite; ya que ha sido considerada no tan confiable debido a la inclusión de demasiadas variables tales como: temperatura ambiente, velocidad, carga y tiempo de funcionamiento las cuales tienen una marcada influencia en la temperatura del rodamiento.

Un ejemplo donde es utilizado este método es en trenes subterráneos, donde no hay lugares adecuados para llevar a cabo el monitoreo utilizando las técnicas señaladas con anterioridad, debido a que se están moviendo, además de que no son métodos prácticos para monitorear todas las ruedas de los trenes en un tiempo adecuado debido al gran número de ellos en uso, el único método práctico para detectar una falla próxima del rodamiento es usando las llamadas detectores de “cajas calientes”, las cuales no son más que sensores infrarrojos localizado a lo largo de las vías los cuales detectan altas temperaturas en los rodamientos de las ruedas mientras el tren pasa. Esta técnica es extremadamente limitada y solo puede detectar fallas de rodamientos en una etapa no. 4 en la cual una falla catastrófica es inminente. [6]

#### **1.4.2 Método por análisis de vibraciones:**

Según la norma ISO 2041, una vibración es la variación en el tiempo de una magnitud que describe el movimiento o la posición de un sistema mecánico cuando esta magnitud es alternativamente mayor o menor que cierto valor promedio o de referencia. Los rodamientos son elementos generadores de vibraciones en las máquinas debido a la variación de la distribución de la carga en los elementos rodantes a medida que estos giran sobre las pistas.

El paso de los elementos rodantes sobre un defecto en el rodamiento, produce impactos o pulsaciones que se detectan usando el método de análisis de vibraciones en rodamientos.

Los rodamientos dañados generan vibraciones en al menos cuatro frecuencias, conocidas como frecuencias de fallos: frecuencia de paso de la jula (FTF), frecuencia de paso por el aro exterior (BPFO), frecuencia de paso por el aro interior (BPFi), frecuencia de paso de los elementos rodantes (BSF); las cuales se calculan mediante las siguientes expresiones, ver figura 1.12.

El método de análisis de vibraciones estudia las frecuencias de fallas en los rodamientos basándose en varias técnicas que se dividen en dos grandes grupos: técnicas basadas en el análisis de parámetros simplificados y técnicas basadas en el análisis espectral y de la onda en el tiempo. Se debe tener en cuenta, que en la mayoría de los rodamientos, las frecuencias de fallas no serán números enteros, por lo que la vibración dominante generada por un defecto será asincrónica, es decir, no coincidente con armónicos de la frecuencia de giro, por tanto, cuando un rodamiento este dañado distinguiremos en el espectro de frecuencias la frecuencia fundamental del elemento del rodamiento dañado, acompañada siempre de un armónico.

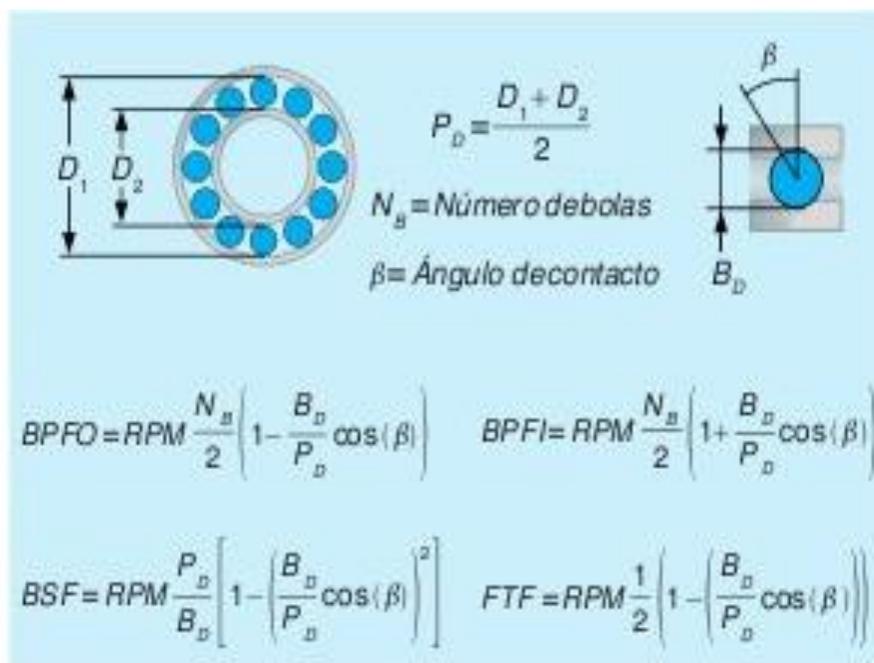


Figura 1.12 Frecuencias de fallas en un rodamientos de bolas. [7]

Las técnicas basadas en el análisis de parámetros simplificados estudian la zona de altas frecuencias para la detección de fallas prematuras y se basan en la excitación de la frecuencia natural del sensor utilizado (sobre una banda de frecuencias prefijadas) y entregan un valor global que se relaciona con la severidad del defecto. Estas técnicas son:

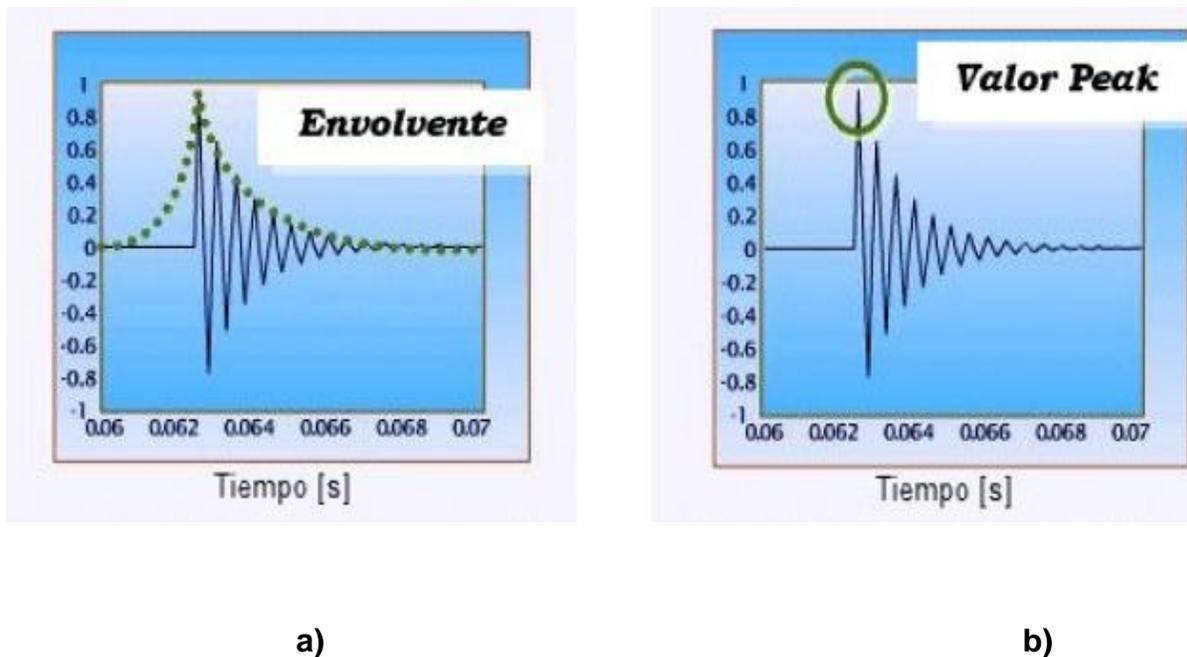
- Valor global de vibración RMS o Pico.
- Factor de cresta: relación entre el valor de pico y el valor RMS.
- Kurtosis: es un parámetro estadístico calculado de la onda en el tiempo y que informa de los picos que tiene la onda.
- Skewness: es un parámetros estadístico calculado a partir de la onda en el tiempo, dando información sobre cómo es de simétrica la señal con respecto a su valor medio.
- Banda variable a alta frecuencia, definida entre 1 kHz y 20 kHz.
- HFD o banda a alta frecuencia (entre 5 y 30 kHz) en aceleración.
- Spike-energy o banda a alta frecuencia (entre 5 y 60 kHz).
- SPM o Impulsos de choque que mide la vibración a alta frecuencia (entre 30 y 40 kHz).
- Detección acústica de fisuras/IFD. Banda entre 80 y 120 kHz.
- Emisión acústica, banda con un rango superior a los 200 kHz.

Estas técnicas son incapaces de diferenciar entre problemas de rodamientos y otros problemas en las máquinas que generan vibraciones a altas frecuencias, pero son usadas ya que los rodamientos al inicio de la falla generan vibraciones en componentes de alta frecuencia, generalmente mayores a 5 kHz; pueden detectar fallas en la etapa 1 (Ver etapas de evolución de fallas).

A medida que la falla evoluciona las vibraciones se generan a frecuencias bajas y medias, esto se debe a que las superficies en contacto sufren un acomodo en las rugosidades superficiales generado por el desgaste lo que lleva a la necesidad del uso de las técnicas basadas en el análisis espectral y de la onda en el tiempo que buscan detectar zonas excitadas o moduladas por fuerzas de impacto periódicas, cuya frecuencia permite localizar en que elemento del rodamiento se encuentra el defecto y su amplitud nos da una medida de la severidad de este. Las técnicas de Demodulación o envolvente y la técnica del Peakvue

son las más usadas dentro de este grupo y se desarrollan un rango de frecuencias de 1-5 kHz.

Estas técnicas se diferencian en la forma de procesar la señal de vibración tomada por el sensor; para obtener la envolvente de la señal de vibración se aplica un filtrado (filtro pasa alto o pasa banda) para aislar zonas resonantes de alta frecuencia, luego se rectifica la señal y se filtra a través de un filtro pasa bajo lográndose eliminar las vibraciones que no provengan de problemas asociados a los rodamientos. La técnica de Peakvue usa también filtros digitales para aislar las frecuencias altas, pero se diferencia en que en la etapa final se utiliza una frecuencia de muestreo alta (100 kHz) para obtener el valor peak para cada intervalo de tiempo de muestreo normal; ambas técnicas entregan como resultado la frecuencia de repetición de los impactos.

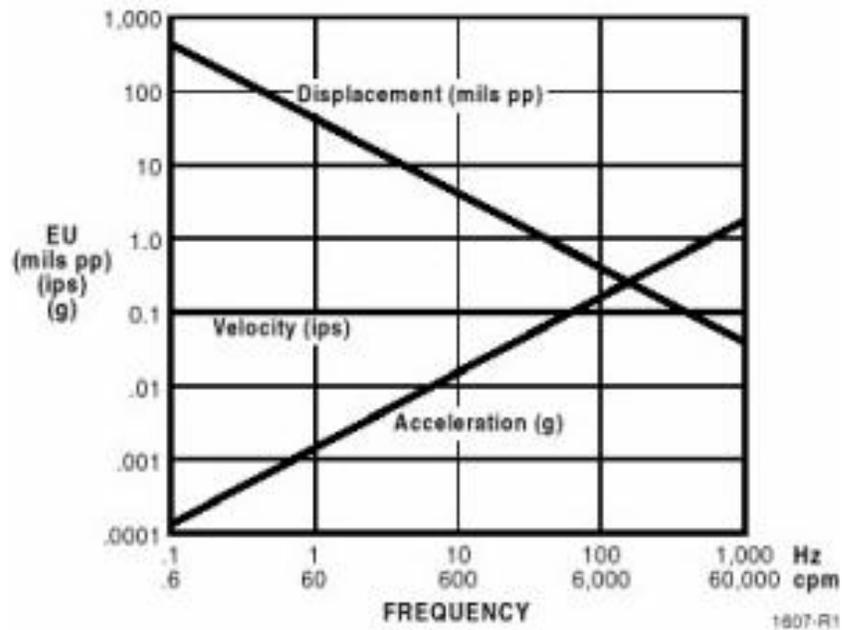


**Figura 1.13 Análisis de las vibraciones de impacto. a) Envolvente. b) Detección del valor Peak.**

Para la aplicación de estas técnicas se debe tener en cuenta la selección de un sensor adecuado, es decir, se debe elegir medir desplazamiento, velocidad o aceleración. Los acelerómetros son sensores para medir la aceleración de las vibraciones y son los más usados en la práctica ya que si podemos integrar observamos los datos en unidades de

velocidad, al realizar este proceso se puede perder mucha información útil para una correcta medición.

El gráfico de la figura 1.14 muestra la relación entre desplazamiento, velocidad y aceleración para un nivel de vibración fijo. Los ejes están en escala logarítmica. El eje **y** indica el nivel de vibración mientras el eje **x** indica la frecuencia. Se observa que a baja frecuencia se produce muy poca vibración en aceleración, mientras que la amplitud del desplazamiento es mucho mayor. Ocurre lo contrario a mayores frecuencias.



**Figura 1.14 Aceleración, velocidad y desplazamiento para un nivel de vibración de 2.54mm/s.**

También se observa que la velocidad tiene una buena respuesta para todo el rango de frecuencia y al integrar de aceleración a velocidad o de velocidad a desplazamiento la información de bajas frecuencias se amplifica, mientras la de altas frecuencias se reduce; por tal motivo se recomienda medir desplazamiento para máquinas con un régimen de trabajo lento y aceleración para máquinas más rápidas.

### **1.4.3 Método por análisis de lubricantes:**

La aplicación de este método permite detectar principalmente el inicio de la falla en los rodamientos y se basa en el estudio de las propiedades del lubricante realizando diversas pruebas como son:

- Viscosidad
- Numero de Neutralización (AN y BN)
- Punto de inflamación
- Análisis de elementos por emisión atómica
- FTIR – Análisis infrarrojo
- Conteo de partículas
- Análisis de humedad
- Densidad ferrosa o partículas ferrosas
- Ferrografía analítica
- Resistencia a la oxidación
- Pruebas de membrana y gota

Si existe contaminación debido a partículas producidas por el desgaste o por agentes externos, si existe degradación del lubricante o de sus aditivos el rodamiento no alcanzará la vida útil para el cual fue diseñado.

### **1.5 Conclusiones del capítulo:**

- Las principales causas de fallos en rodamientos son: lubricación deficiente, excesiva vibración, contaminación, sobrecarga y montaje deficiente.
- La fatiga, el desgaste, la oxidación y la corrosión son las principales fallas en rodamientos, que en la mayoría de los casos no permiten que estos alcancen su vida útil.
- Los métodos más usados para el diagnóstico y monitoreo de rodamientos son el método basado en la franja de temperatura de trabajo del rodamiento, por análisis de lubricantes y por análisis de vibraciones, siendo este último el de mayor aplicación.

## Capítulo II: Chequeo de los rodamientos y sus soportes en la máquina VIBRACOM.

### 2.1 Introducción del capítulo:

Los rodamientos son elementos mecánicos que no son recomendados para operar sometidos a considerables vibraciones, esto se debe a que las vibraciones por lo general causan en los rodamientos diversos daños que resultan en fallas prematuras. La máquina VIBRACOM basa su principio de funcionamiento en la generación de vibraciones, lo que conlleva a que se produzcan con mucha frecuencia fallas en los rodamientos.

El objetivo de este capítulo es estudiar las condiciones de trabajo (carga, deformaciones, etc.) en las que funcionan los rodamientos utilizados como apoyos en las excéntricas de la máquina para la fabricación de bloques, VIBRACOM.

### 2.2 Principio de funcionamiento de la mesa vibratoria de la máquina VIBRACOM.

La máquina transmite el movimiento desde un motor eléctrico de potencia 1,9 kW y 3600 rpm de velocidad, por medio de una transmisión por correas, a la mesa vibratoria (donde se fijan los moldes). Las vibraciones se generan por medio de las fuerzas de inercia producidas por el movimiento de giro de dos excéntricas, lográndose el asentamiento del hormigón. En la figura 2.1 se muestra el plano superior y el isométrico de la mesa vibratoria, 5 y 6 son las excéntricas que producen las vibraciones.

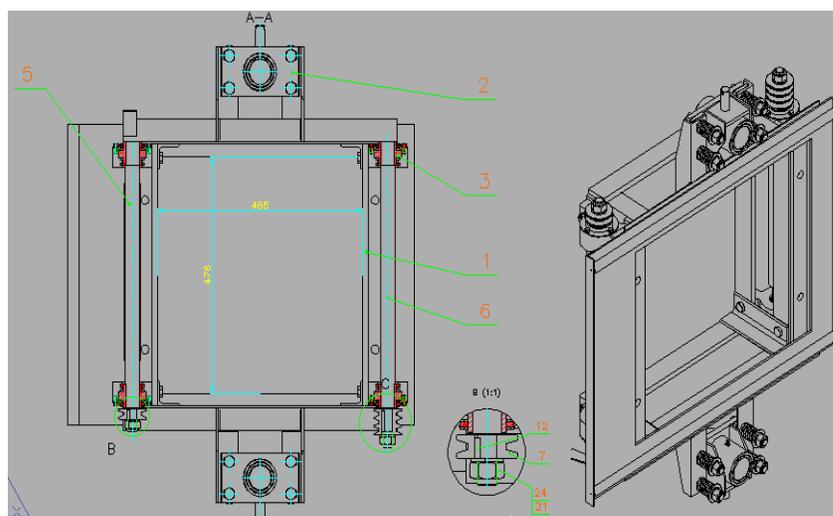


Figura 2.1 Mesa vibratoria.

### 2.3 Análisis cinemático de las transmisiones de la máquina:

Según los planos de taller la máquina cuenta con un motor de potencia 1.9 kW a 3600 rpm; que transmite el movimiento a la excéntrica 6 (ver figura 2.1) por medio de una transmisión por correas. El movimiento de 6 a 5 es transmitido por una transmisión por correas con relación de transmisión,  $i= 1$ .

Datos:

- Motor:  $N= 1.9 \text{ kW}$ ,  $n_m = 3600 \text{ rpm}$
- Transmisión por correa: ( Ver anexo II)  
 $D_2 = 56.4 \text{ mm}$   
 $D_1 = 82.4 \text{ mm}$
- Relación de transmisión de excéntrica 6 a excéntrica 5:  $i=1$

#### 2.3.1 Cálculo de las velocidades de giro de las excéntricas:

Relación de transmisión del motor a excéntrica 6:

$$i = \frac{D_2}{D_1} = \frac{n_m}{n_6} = \frac{56.4}{82.4} = 0.684$$

$$n_6 = \frac{n_m}{0.684} = \frac{3600 \text{ rpm}}{0.684} = 5263.16 \text{ rpm}$$

De la expresión anterior podemos decir que las excéntricas giran a 5263 rpm ya que  $n_6 = n_5$  ( $i=1$ )

#### 2.3.2 Cálculo de las potencias en las excéntricas:

Se supone un rendimiento de 0.93 para una transmisión por correas. [9]

$$N_6 = N * \eta_c = 1.9 \text{ kW} * 0.93 = 1.77 \text{ kW}$$

$$N_5 = N_6 * \eta_c = 1.77 \text{ kW} * 0.93 = 1.64 \text{ kW}$$

Como se observa la máquina se diseñó para transmitir bajas potencias a altas velocidades.

## 2.4 Cálculos de las fuerzas que actúan sobre los rodamientos y sus soportes:

Según lo planteado en los planos de diseño, los rodamientos que sirven de apoyo a las excéntricas 5 y 6 mostradas en la figura 2.1 son del tipo 11206E seleccionados del catálogo MRC [8], este es un cojinetes de bolas a rotulas con aro interior prolongado con  $\theta_{max} = 2.5^\circ = 0.04 \text{ rad}$ . La tabla 2.1 muestra los datos del rodamiento tomados del catálogo, este se encuentran insertados en un soporte de acero ASTM A36 con cuerpo (pieza 1) y tapa (pieza 2) mostrado en la figura 2.3.

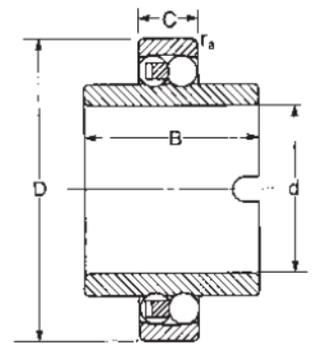


Tabla 2.1: Principales dimensiones del rodamiento.

Numeración, MRC	d (mm)	D (mm)	C (mm)	B (mm)	Capacidad de carga dinámica (N)	Capacidad de carga estática (N)	Velocidad permisible (rpm)
11206E	30	62	16	48	15600	4650	6700

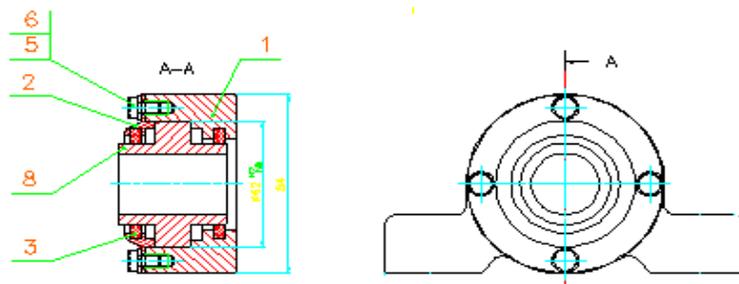


Figura 2.2 Plano frontal y lateral del soporte del rodamiento 11206E.

Las principales fuerza a considerar, actuando sobre los rodamientos, son las reacciones que se generan durante la rotación de la excéntrica, es decir la fuerza de inercia. Esta se podrá calcular mediante la expresión II.

$$F_i = m * e * \omega^2 \quad (II)$$

Donde:

m- masa de la excéntrica

e- excentricidad

$\omega$ - velocidad angular.

La masa de la excéntrica se calcula mediante la siguiente expresión:

$$m = V * \rho = \frac{\pi * d^2}{4} * b * \rho \quad (1)$$

Donde:

d= 38 mm -diámetro de la parte excéntrica del eje. (Ver anexo I)

b= 355 mm -longitud de la parte excéntrica del eje. (Ver anexo I)

$\rho=7850 \text{ kg/m}^3$  -densidad del material (acero).

Sustituyendo los valores en 1:

$$m = V * \rho = \frac{\pi * 0.038m^2}{4} * 0.355m * 7850 \frac{kg}{m^3} = 3.16 \text{ kg}$$

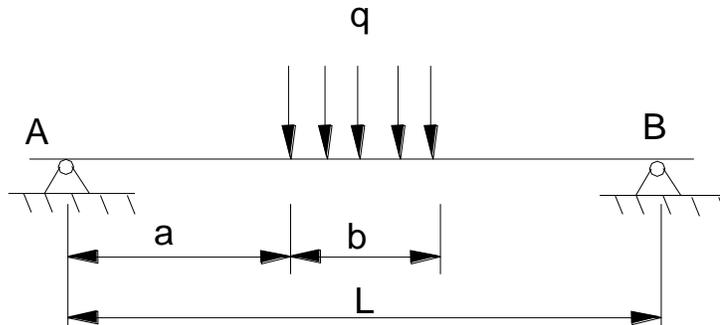
Según los planos de diseño  $e = 0.01m$  y la velocidad angular fue calculada previamente siendo  $\omega = n_6 = 5263rpm = 551.14 \text{ rad/s}$

Sustituyendo estos valores en (II) obtenemos:

$$F_i = m * e * \omega^2 = 3.16 * 0.01 * 551.14^2 = 9598.67 \text{ N}$$

La fuerza se representará actuando sobre el árbol como muestra el esquema de cargas de la figura 2.3. Siendo (A) y (B) los apoyos del árbol y (q) la fuerza de inercia considerando que se distribuye uniformemente a lo largo de la sección excéntrica. Las reacciones en los apoyos se podrán calcular usando las ecuaciones de equilibrio mostradas a continuación:

$$\sum M_A = 0; \quad \sum M_B = 0$$



**Figura 2.3 Esquema de cargas en las excéntricas.**

La fuerza distribuida tiene un valor de:

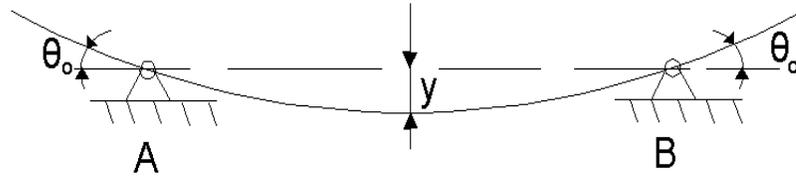
$$q = \frac{F_i}{b} = \frac{9598.67}{0.355 \text{ m}} = 27038.51 \text{ N/m}$$

Se deducen las distancias  $a = 0.072 \text{ mm}$ ,  $b = 0.355 \text{ mm}$  y  $L = 0.488 \text{ mm}$  de los planos de diseño. (Ver anexo I)

Aplicando  $\sum M_A = 0$  en el apoyo (A) se obtiene la reacción en el apoyo (B)  $B_y = 4907.52 \text{ N}$  y Aplicando  $\sum M_B = 0$  en el apoyo (B) se obtiene la reacción en el apoyo (A)  $A_y = 4691.15 \text{ N}$ .

## 2.5 Cálculo de las deformaciones angulares en los apoyos:

La acción de la fuerza (q) sobre el árbol causa un desplazamiento lineal y por consiguiente una deformación angular en los apoyos ( $\theta_0$ ) como se muestra en la figura 2.4; esta deformación angular puede afectar el correcto funcionamiento de los rodamientos y se puede calcular usando la ecuación de la curva elástica que la relaciona con el desplazamiento lineal del árbol (y).



**Figura 2.4 Desplazamiento lineal y deformación angular en los apoyos del árbol.**

**a) Considerando carga estática:**

Asumiendo el esquema de carga mostrado en la figura 2.3 y aplicando las ecuaciones de la curva elástica.

$$E * I * \theta_0 * L = -A_y * \frac{L^3}{6} - q * \frac{L-a^4}{24} + q * \frac{L-a-b^4}{24} \quad (III)$$

Siendo:

E- Módulo de Elasticidad del material de la excéntrica.

I- Momento de segundo orden.

A<sub>y</sub>- Componente vertical de la Fuerza de reacción en el apoyo A.

- Para acero:

$$E = 2 * 10^{11} Pa.$$

- Para secciones circulares y utilizando el menor diámetro de árbol (d=30mm):

$$I = \frac{\pi * d^4}{64} = \frac{\pi * (0.03m)^4}{64} = 3.97 * 10^{-8} m^4$$

Sustituyendo estos valores en (III) obtenemos:

$$2 * 10^{11} * 3.97 * 10^{-8} * \theta_0 * 0.488 = -4691.15 * \frac{0.488^3}{6} - 27038.51 * \frac{0.488-0.072^4}{24} + 27038.51 * \frac{0.488-0.072-0.355^4}{24} \theta_0 = -0.016 rad$$

**b) Considerando carga dinámica:**

La deformación lineal en el centro del árbol (y) se relaciona con la angular en el apoyo ( $\theta_0$ ) mediante la ecuación IV:

$$E * I * y = E * I * \theta_0 * \frac{L}{2} + A_y * \frac{\frac{L}{2}^3}{6} + q * \frac{\frac{L}{2} - a}{24} - q * \frac{\frac{L}{2} - a - b}{24} \quad (IV)$$

La deformación lineal (y) en el centro del árbol se puede calcular teniendo en cuenta el efecto de la vibración generada por la fuerza de inercia mediante la siguiente expresión:

$$y = \frac{e}{\left(\frac{p}{\omega}\right)^2 - 1}$$

Donde (p) es la frecuencia natural del sistema y se calcula como se muestra a continuación:

$$p = \frac{\sqrt{3 * E * I * L}}{m * l_1^2 * (L - l_1)^2}$$

Para  $d=38$  mm,  $I = 10.23 * 10^{-8}$  Pa

Si  $l_1 = \frac{L}{2}$  (Distancia del centro del árbol al apoyo), entonces:

$$p = \frac{\sqrt{3 * 2 * 10^{11} * 10.23 * 10^{-8} * 0.488}}{3.16 * 0.244^2 * (0.488 - 0.244)^2} = 1635.31 \text{ rad}$$

Por lo tanto:

$$y = \frac{0.01}{\left(\frac{1635.31}{551.14}\right)^2 - 1} = 0.0013 \text{ m}$$

Tomando en cuenta el valor negativo de (y) y sustituyendo en la ecuación (III) obtenemos:

$$2 * 10^{11} * 10.23 * 10^{-8} * 0.0013 = 2 * 10^{11} * 10.23 * 10^{-8} * \theta_0 * 0.244 + 4691.15 * \frac{0.244^3}{6} + 27038.51 * \frac{0.244 - 0.072}{24} - 27038.51 * \frac{0.244 - 0.072 - 0.355}{24}$$

$$\theta_0 = -0.0075 \text{ rad}$$

Para cojinetes de bolas la deformación máxima permisible es  $\theta_0 = -0.008rad$  y para cojinetes de rodillos  $\theta_0 = -0.05rad$ . [9]

Teniendo en cuenta la recomendación anterior y los datos del catálogo MRC para un cojinete del tipo 11206E donde  $\theta_{max} = 0.04 rad$ , se considera la deformación admisible en los apoyos.

Al estudiar las recomendaciones del catálogo MRC no se hace referencia, a favor ni en contra, del uso de este tipo de rodamientos en presencia de considerables vibraciones, sin embargo, los principales fabricantes no recomiendan usarlos en estas condiciones ya que las vibraciones generan micro movimientos en los lugares de contacto de las partes que intervienen en la rodadura, originando marcas en las superficies de las pistas a la distancia de los cuerpos rodantes. Este daño se conoce como Falso Brinelling y se muestra en la figura 2.5. También las vibraciones ocasionan roturas en las jaulas de los rodamientos.



**Figura 2.5 Falso Brinelling en un rodamiento de bolas.**

El motivo más importante por el cual no se recomienda exponer los rodamientos a considerables vibraciones es que estas afectan la lubricación del rodamiento rompiendo la capa límite del lubricante necesario para separar las superficies en contacto; una deficiente lubricación representa el 36% de las causas de fallas en rodamientos (ver figura 1.1).

Al identificar la lubricación deficiente como principal causa de falla en los rodamientos de la máquina se pueden presentar diversos cuadros de daños como son marcas en las pistas y elementos rodante producto a la fatiga del material (ver epígrafe 1.3.1), marcas brillante producto al desgaste (ver epígrafe 1.3.4), sobrecalentamiento (ver epígrafe 1.3.7) y superficie en presencia de óxido (ver epígrafe 1.3.5).

## 2.6 Conclusiones del capítulo:

- La deformación angular máxima calculada en los cojinetes es  $\theta_0 = -0.0075 \text{ rad}$ . Este valor es inferior al admisible planteado en los textos,  $\theta_{\max} = -0,008 \text{ rad}$  para cojinetes de bolas y  $\theta_{\max} = -0,05 \text{ rad}$  para rodillos. También es inferior al valor máximo establecido por el catálogo para el rodamiento 11206E, donde  $\theta_{\max} = 0,04 \text{ rad}$ .
- Los principales fabricantes no recomiendan este tipo de rodamientos para aplicaciones donde existan considerables vibraciones.
- La lubricación deficiente es la principal causa de falla en los rodamientos de la máquina.

## **Capítulo III: Especificaciones de operación de los rodamientos de la máquina.**

### **3.1 Introducción del capítulo:**

El montaje de los rodamientos y su lubricación es vital para que estos desempeñen su función correctamente y alcancen su vida útil. En el caso de la máquina VIBRACOM, los rodamientos están sometidos a tareas para las cuales no fueron diseñados (resistir considerables vibraciones) por lo que estos parámetros serán decisivos para alargar su vida útil.

### **3.2 Montaje de los rodamientos de la máquina:**

Al ser los rodamientos elementos de alta precisión se deben manejar con mucho cuidado para preservar su exactitud y confiabilidad, por esta razón se deben seguir las especificaciones indicadas por el fabricante para el almacenamiento, montaje y desmontaje del rodamiento.

#### **3.2.1 Preparación de la instalación del rodamiento:**

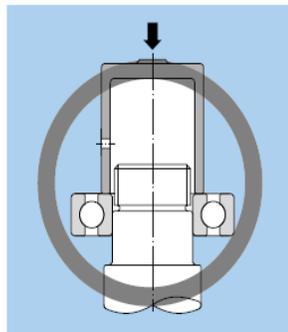
El área de trabajo del rodamiento debe ser limpia y seca, ajena a partículas contaminantes ya que estas afectarán grandemente su rendimiento. Para lograr una correcta instalación se recomienda:

- Remover toda la rebaba, polvo o partículas de metal del eje, alojamiento y de las herramientas a utilizar para el montaje.
- Revisar las superficies de asentamiento del eje y alojamiento para asegurarse que la precisión dimensional, la rugosidad y las dimensiones están dentro de los límites de tolerancias permitidos.
- Desempacar el rodamiento en el momento del montaje.
- Lavar y secar el rodamiento si el empaque se ha dañado o si existe una probabilidad de que el rodamiento se halla contaminado. (Los rodamientos con tapas de protección a ambos lados y los sellados nunca deben ser lavados.)

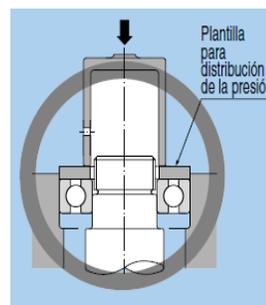
### 3.2.2 Montaje del rodamiento:

Al realizar el montaje de cualquier rodamiento sobre ejes o alojamientos, sus anillos nunca deben ser golpeados con un martillo o cincel porque esto puede causar daños al rodamiento, cualquier fuerza aplicada al rodamiento debe ser siempre distribuida equitativamente alrededor de toda la cara del anillo. También cuando se monten los dos anillos de manera simultánea debe evitarse aplicar presión sobre un solo anillo ya que esto puede provocar indentaciones de los elementos rodantes en las pistas.

Los rodamientos con diámetro interior cilíndrico, como los de la máquina, generalmente se monta golpeando la cara del anillo interior con un cilindro o manguito y un martillo como muestra la figura 3.1. En muchos casos es imposible separar el eje del cubo donde será alojado el rodamiento, por lo que se debe usar una plantilla para distribuir la presión de montaje uniformemente en los dos anillos como se muestra en la figura 3.2.



**Figura 3.1 Presión de montaje contra el diámetro interior.**



**Figura 3.2 Presión de montaje contra el anillo interior y exterior de manera simultánea.**

Para el caso específico de la máquina el rodamiento será acoplado al eje como se muestra en la figura 3.1, después se acopla el anillo exterior en el cuerpo mostrado en la figura 2.2.

Los rodamientos suelen ser desmontados con mucha frecuencia como parte de un procedimiento de revisión o para su reemplazo por lo que tanto: ejes, alojamientos y partes relacionadas a estos deben diseñarse para evitar daños durante el proceso de desmontaje y deben utilizarse las herramientas adecuadas para el desmontaje.

### **3.3 Lubricación:**

En el capítulo II se identificó como principal causa de fallas en los rodamientos de la máquina la deficiente lubricación, por tal motivo una correcta selección del tipo de lubricación y del sistema de lubricación en los rodamientos de la máquina es de vital importancia para el correcto funcionamiento de estos. En general existen dos tipos de lubricación para rodamientos: lubricación con grasa y con aceite; ambos métodos tienen como propósito:

- Reducir la fricción y el desgaste.
- Eliminar el calor generado por la fricción.
- Prolongar la vida del rodamiento.
- Prevenir la oxidación.
- Evitar la entrada de agentes contaminantes.

#### **3.3.1 Lubricación con aceite:**

Este tipo de lubricación es usado cuando se requiere que el calor generado por el rodamiento o aplicado al rodamiento desde otras fuentes deba ser extraído al exterior, los principales métodos para la lubricación con aceite son:

- a) Por baño de aceite: en aplicaciones con velocidades de rotación que van desde baja hasta a moderadas.
- b) Por salpicadura de aceite: se puede usar a velocidades considerablemente altas.
- c) Por goteo: se utiliza a velocidades relativamente altas para aplicaciones con cargas ligeras a moderadas.

- d) Por circulación de aceite: utilizado para el enfriamiento del rodamiento o para sistemas de abastecimiento automático en los cuales el suministro de aceite está centralizado.
- e) Por niebla: adecuado para aplicaciones a altas velocidades.
- f) Por chorro de aceite: confiable para aplicaciones a altas temperaturas, altas velocidades y condiciones severas de trabajo.

Estos métodos son efectivos siempre que sea usado el aceite adecuado para soportar las condiciones de trabajo. Los principales fabricantes brindan la información necesaria relacionada con la selección del aceite y de la cantidad de aceite a utilizar en dependencia de la aplicación a la que serán sometidos los rodamientos.

### **3.3.2 Lubricación con grasa:**

La lubricación con grasa es el método más utilizado en los rodamientos debido a que las grasas lubricantes son relativamente fáciles de manejar y requieren los más simples elementos para el sellado.

Las grasas lubricantes están compuestas por un aceite base (mineral o sintético) al que se le añade un agente espesante y otros aditivos, las propiedades de las grasas estarán determinadas por estos elementos. Debido a que el mismo desempeño y características de funcionamiento de un mismo tipo de grasa varían entre un fabricante y otro, es necesario asegurarse de los datos que proporciona el fabricante cuando se esté seleccionando una grasa.

Aceite base: Las propiedades de las grasas son determinadas principalmente por las propiedades del aceite base. Las grasas con aceite base de baja viscosidad son apropiadas para aplicaciones de baja temperaturas y altas velocidades mientras las que se componen por aceites base de alta viscosidad se usan a altas temperaturas y altas cargas.

Agentes espesantes: Los espesantes se combinan con el aceite base para mantener el estado semisólido de la grasa y determinan las características especiales de esta como: rango de temperatura permisible, estabilidad mecánica, resistencia al agua, etc. En general hay dos tipos de agentes espesantes; metálicos y no metálicos.

Aditivos: Estos son incorporados para mejorar algunas propiedades y la eficiencia de las grasas. Para rodamientos sujetos a altas cargas y/o cargas de impacto deben usarse aditivos de alta presión, para aplicaciones a altas temperaturas o en los cuales no se pueda reaprovisionar la grasa por largos periodos de tiempo se deben usar aditivos estabilizadores de oxidación.

Consistencia: Indica la rigidez o la fluidez de la grasa, mientras sea mayor el número, mayor es la rigidez de dicha grasa.

### **3.3.3 Selección del tipo de lubricación para los rodamientos en estudio:**

Para los rodamientos de la máquina es más conveniente seleccionar el sistema de lubricación por grasa debido al fácil manejo de las grasas y teniendo en cuenta que no se requiere disipar el calor generado por los rodamientos al exterior. Las grasas tienen como ventaja sobre el aceite que evita la entrada de polvo y suciedades al rodamiento debido a su mayor densidad.

Estudiando el catálogo de rodamientos del fabricante NTN podemos plantear una metodología para aplicar el método de lubricación con grasa.

1. Seleccionar el tipo de grasa: Para realizar la selección nos basamos en las características de operación de los rodamientos de la máquina, estos están sometidos a una velocidad relativamente alta y a considerables vibraciones.
2. Calcular la cantidad de grasa: Como indicador, los rodamientos deben llenarse entre 30% a 40% de su espacio libre y los alojamientos entre 30% a un 60% del espacio libre, el espacio interior del rodamiento puede ser calculado mediante:

$$V = K * W$$

Donde:

V- cantidad de espacio libre. ( $cm^3$ )

K- factor de espacio del rodamiento. K=61 para rodamientos de bolas. [4]

W- masa del rodamiento. (kg)

3. Determinar el intervalo de reabastecimiento de la grasa: Al rodamiento se le debe suplir de grasa nueva a intervalos adecuados de tiempo, este periodo depende del tipo de rodamiento, sus dimensiones, velocidad de rotación, temperatura del rodamiento y tipo de grasa. El intervalo de reabastecimiento se puede calcular fácilmente usando el diagrama para el intervalo de relubricación con grasa mostrado en la figura 3.3 y los gráficos de las figuras 3.4 y 3.5.

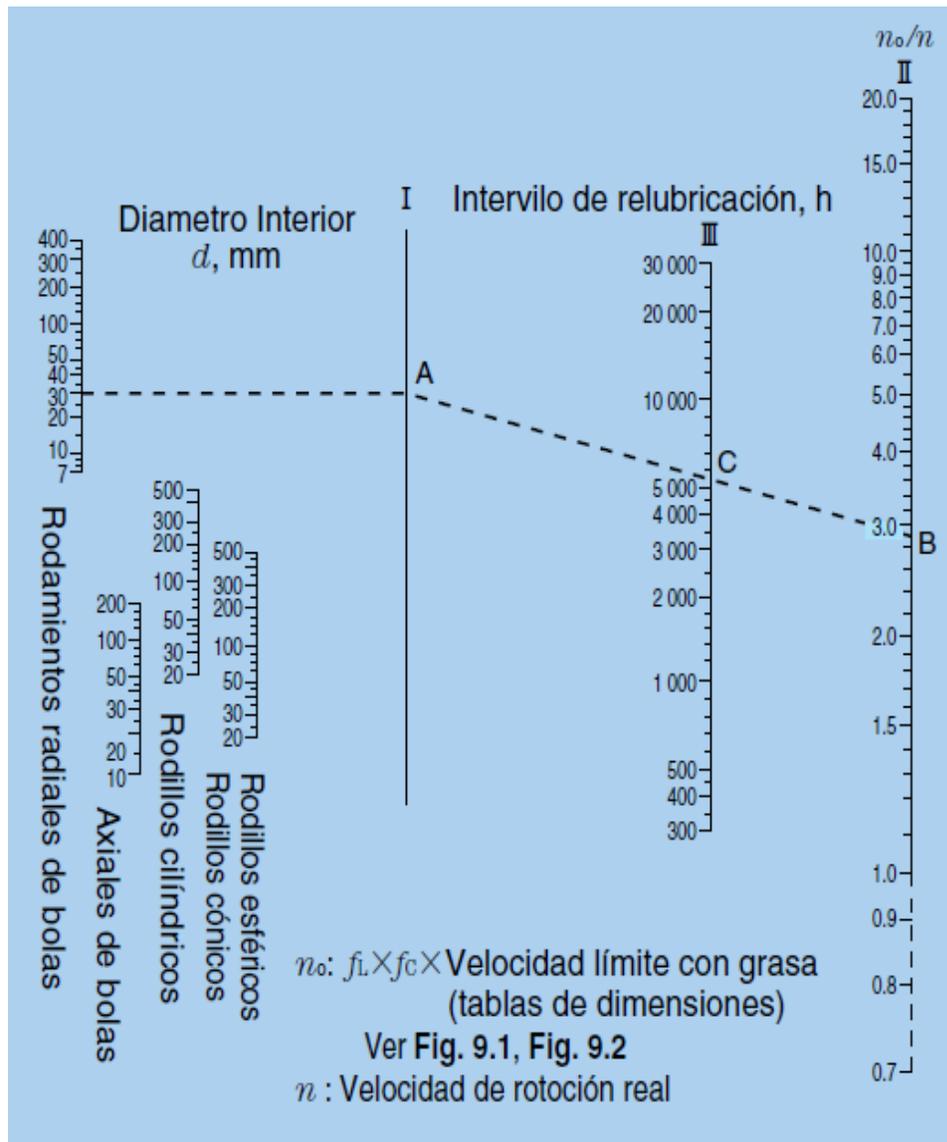


Figura 3.3 Diagrama para el intervalo de relubricación con grasa. [4]

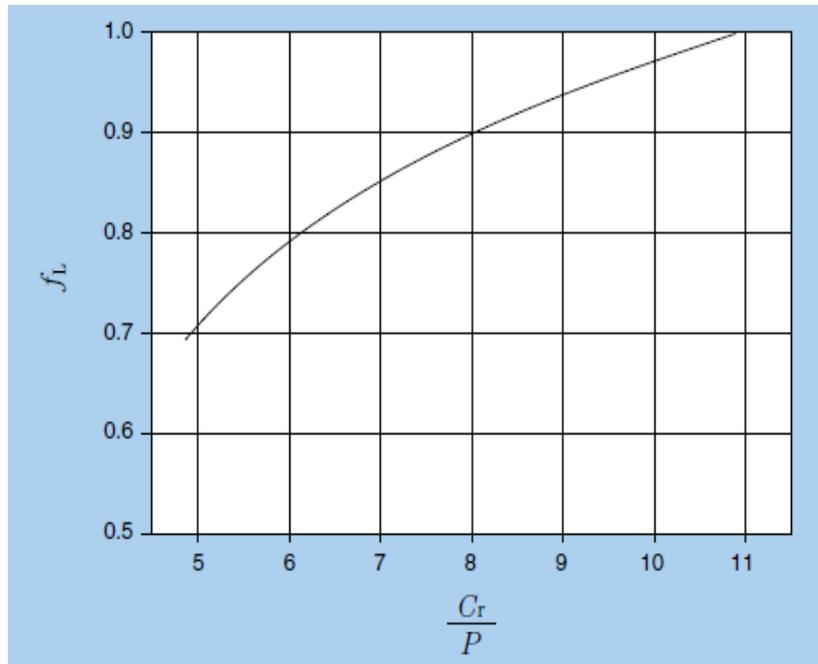


Figura 3.4 Valor del factor de ajuste según la carga del rodamiento. [4]

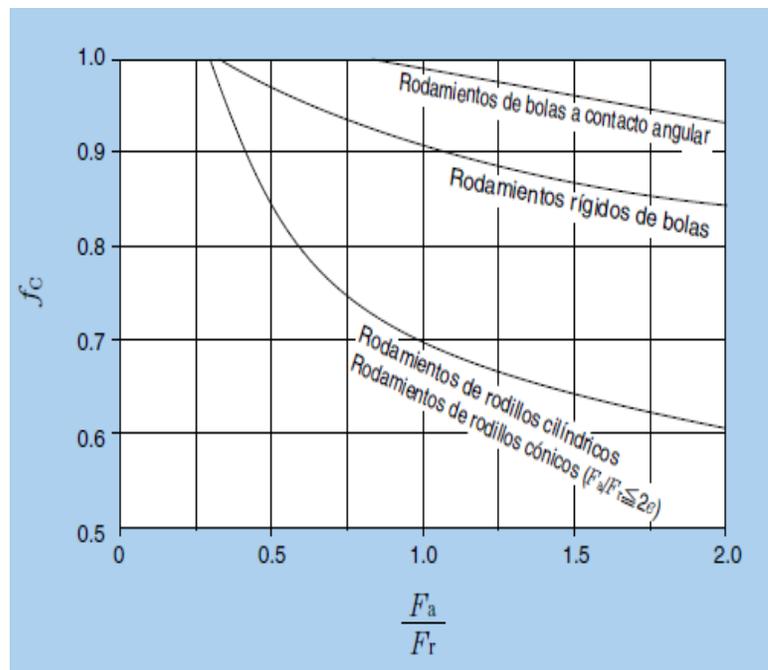


Figura 3.4 Valor del factor de ajuste para cargas combinadas. [4]

Por otra parte, el fabricante SKF plantea una metodología para el cálculo del intervalo de relubricación ( $t_f$ ) para rodamientos insertados en arboles horizontales en condiciones normales y se calcula usando el diagrama mostrado en la figura 3.5, donde  $t_f$  es función de:

- El factor de velocidad (A) multiplicado por el factor de rodamiento ( $b_f$ ).

$A = n * d_m$  Donde:

n- velocidad de rotación. (rpm)

$d_m$ - diámetro medio del rodamiento. (mm)  $d_m = 0.5 * (D + d)$

El factor de rodamiento depende del tipo de rodamiento y de las condiciones de carga.

$b_f = 1$  Para rodamientos autoalineables de bolas. [10]

- La relación de cargas: C/P

C- capacidad de carga dinámica en N.

P- carga dinámica equivalente en N.

El uso de este diagrama es válido para rodamientos que operan a una temperatura de trabajo de 70°C usando grasa de buena calidad con aceite mineral base y espesante de litio. Cuando las condiciones de operación son diferentes el intervalo de relubricación se ajusta en dependencia de la información brindada en el catálogo general de rodamientos, SKF, en la sección titulada: "Deviating operating conditions and bearing types".

Luego de estimar el intervalo de relubricación se calcula la cantidad de grasa a usar mediante las siguientes formulas:

$G_p = 0.005 * D * B$  Si la relubricación se realiza por el lado del rodamiento, ver figura 3.6.

$G_p = 0.002 * D * B$  Si la relubricación se realiza por el encima del rodamiento, ver figura 3.7.

Donde:

$G_p$ - cantidad de grasa. (g)

D- diámetro exterior. (mm)

B- ancho. (mm)

Relubrication Intervals at operating temperatures of 70 °C

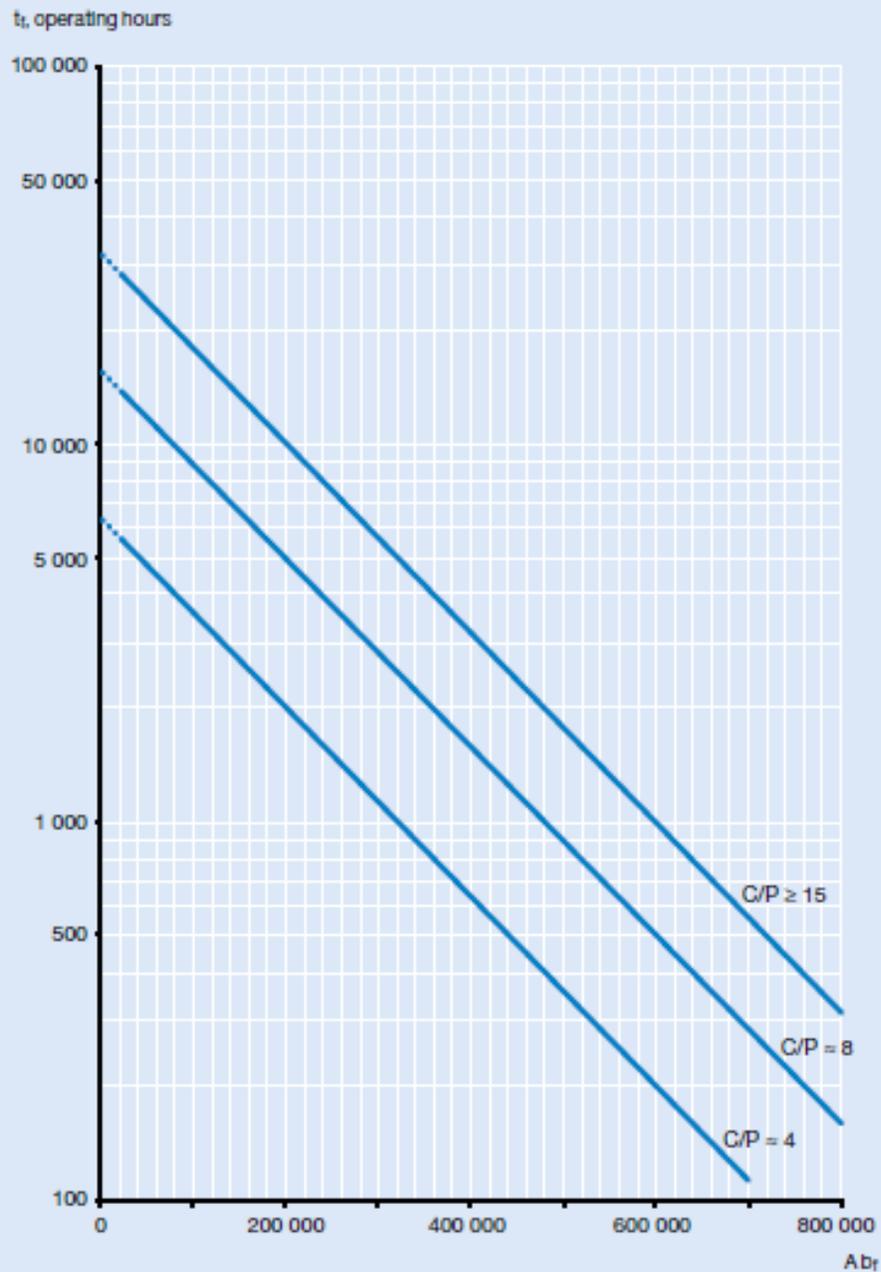
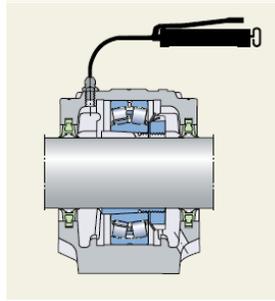
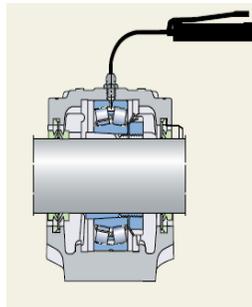


Figura 3.5 Diagrama para el cálculo del intervalo relubricación con grasa. [10]



**Figura 3.6 Lubricación con grasa por el lado del rodamiento.**



**Figura 3.7 lubricación con grasa por encima del rodamiento.**

Aplicando el método de lubricación con grasa planteado por el fabricante SKF tenemos:

Dimensiones del rodamiento:

$d = 30 \text{ mm}$

$D = 62 \text{ mm}$

$B = 48 \text{ mm}$

$C = 15600N$

- Cálculo de  $A \cdot b_f$ :

$$A = n \cdot d_m = 5263 \cdot 0.5 \cdot 62 + 30 = 242098 \text{ mm/min}$$

$b_f = 1$  Para rodamiento auto-alineable de bolas.

$$A * b_f = 242098$$

- Cálculo de C/P:

P= reacción en el apoyo tomando el mayor valor.

$$\frac{C}{P} = \frac{15600}{4907.52} = 3.18$$

Usando el diagrama 4 del anexo II se puede estimar  $t_f = 800 h$ .

Si la lubricación es realizada al lado del rodamiento (en el caso de la máquina se realizará a la hora del montaje ya que el cuerpo donde esta insertado el rodamiento no presenta ningún orificio para su lubricación) usamos:

$$G_p = 0.005 * D * B = 0.005 * 62 * 48 = 15 g$$

El catálogo recomienda usar una grasa con buena estabilidad mecánica cuando los rodamientos están sometidos a considerables vibraciones, por lo que recomienda usar la grasa del tipo LGHB 2 que puede operar a altas temperaturas (+ 120°C), a altas cargas y sometida a considerables vibraciones, además de ser resistente al agua.

Para el caso de la máquina se solicita una grasa resistente a vibraciones considerables, por lo que al seleccionar la LGHB 2 podríamos sub-utilizarla, por lo que se selecciona una grasa LGMT 2 sin tantas propiedades mecánicas que la anterior, pero recomendada en casos de que existan vibraciones.

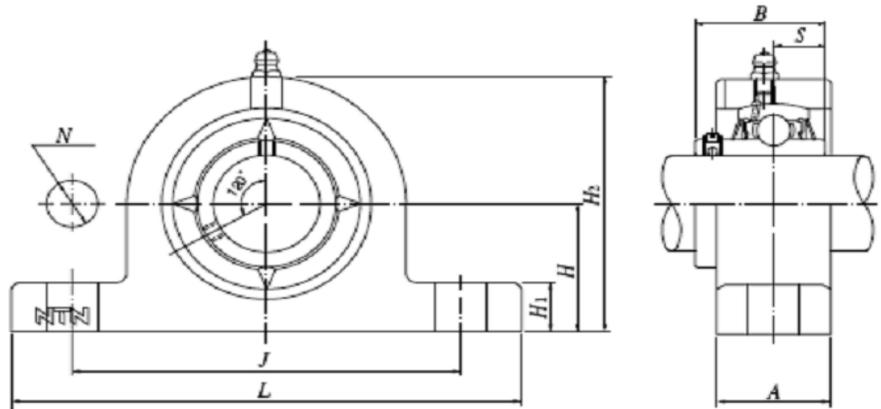
Al calcular la vida útil del rodamiento en horas de operación mediante la ecuación I:

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 * n} * \frac{C}{P}^p = \frac{10^6}{60 * 5263} * \frac{15600}{4907.52}^3 = 102 h$$

Se observa que los rodamientos en estas condiciones de trabajo, aún lubricados correctamente, fallarán con mucha frecuencia debido a que su vida útil es muy corta. Es recomendable seleccionar otro rodamiento con una capacidad de carga dinámica mayor y que sea recomendado para soportar considerables vibraciones.

### 3.4 Selección de un nuevo rodamiento:

Profundizando en las recomendaciones para la selección de rodamientos del catálogo NTN, mostradas en el anexo III, los rodamientos de bolas no son recomendados para soportar vibraciones (en particular los autoalineables). Por otra parte el catálogo de chumaceras NTN asegura que la unidad UC PG 206 D1 es resistente a las cargas dinámicas y vibraciones, esta tiene un rodamiento de bolas de una hilera. Los datos de la unidad y del rodamiento se muestran en la tabla 3.1 y 3.2 respectivamente.



**Tabla 3.1 Dimensiones de la unidad. (mm)**

Diámetro del eje	numeración	H	L	J	A	N	H1	H2	B1	S	Tamaño del perno
30	UCPG206D1	42.9	165	121	35	17	17	83	38.1	15.9	M14

**Tabla 3.2 Dimensiones del rodamiento.**

Número del rodamiento	Capacidad de carga dinámica. $C_r$ (kN)	Capacidad de carga estática. $C_{0r}$ (kN)
UC206D1	19.5	11.3

Como se observa, las dimensiones de la unidad no difieren mucho de las del cuerpo donde están insertados los rodamientos 11206E, por lo que los cambios en el diseño de la máquina no serán significativos.

Aplicando la ecuación I, este rodamiento tiene una vida útil de 200 h, aproximadamente el doble de vida que el anterior, bajo las mismas condiciones de operación.

### **3.5 Montaje de las poleas:**

Las poleas acopladas a las excéntricas pueden causar daños en los rodamientos (ver epígrafe 1.2.3 c), del capítulo I) por lo que se recomienda tener en cuenta el montaje, la tensión y la alineación de estas.

Las poleas se acoplan a las excéntricas por medio de chavetas y se impide el movimiento axial usando una unión roscada; el montaje debe ser preciso evitando la desalineación de estas. Las correas pocas o demasiado tensadas sufren con frecuencia un deterioro prematuro, además, un exceso de tensión causa sobrecargas en los rodamientos resultando en posibles fallas. La transmisión por correas requiere de un seguimiento continuo debido a que está sometida a las vibraciones que genera la mesa vibratoria, esto puede producir un giro de las poleas y por consiguiente una pérdida de alineación.

### **3.6 Conclusiones del capítulo:**

- La lubricación con grasa es el método más usado en los rodamientos debido a que las grasas son fáciles de manejar y tiene como ventaja sobre el aceite que evita la entrada de polvo y suciedades al interior del rodamiento.
- Los rodamientos 11206E serán lubricados con grasa LGMT 2, adecuada para operar bajo considerables vibraciones.
- Los rodamientos 11206E del catálogo MRC, bajo las condiciones de trabajo de la máquina, se le estima una vida útil de 102 h, a pesar de ser lubricados correctamente, lo que justifica la selección de la unidad UC PG 206 D1 donde se inserta el rodamiento UC 206 D1 del fabricante NTN, recomendado para soportar las vibraciones y con aproximadamente el doble de la vida útil que el rodamiento anterior.

## Conclusiones:

- Las principales fallas que se presentan en rodamientos son la fatiga, el desgaste, la oxidación, la corrosión y el sobrecalentamiento, cuyas principales causas de que ocurran son: deficiente lubricación, contaminación, maltrato del rodamiento y operaciones inadecuadas. Estas fallas reducen al máximo la vida útil de los rodamientos. Existen diferentes métodos de diagnóstico para la detección prematura de dichas fallas, el más usado entre ellos es el análisis de vibraciones debido a que los rodamientos son generadores de vibraciones producto a la variación de la distribución de la carga en los elementos rodantes a medida que estos giran sobre las pistas.
- Los rodamientos operan a 5263 rpm soportando una carga radial máxima de 4907.52 N y sometidos a una deformación angular de  $-0.0075$  rad, esta deformación es menor que la indicada en el catálogo por lo que se considera admisible.
- Los rodamientos 11206E del catálogo MRC, bajo las condiciones de trabajo de la máquina, se le estima una vida útil de 102 h, a pesar de ser lubricados correctamente y no son recomendados por los principales fabricantes para aplicaciones donde existan considerables vibraciones lo que justifica la selección de la unidad UC PG 206 D1 donde se inserta el rodamiento UC 206 D1 del fabricante NTN.

## **Recomendaciones:**

- Seguir profundizando en el estudio de las afectaciones que se generan en los rodamientos debido a las vibraciones.
- Valorar el uso de los cojinetes de fricción para esta aplicación.

## Bibliografía:

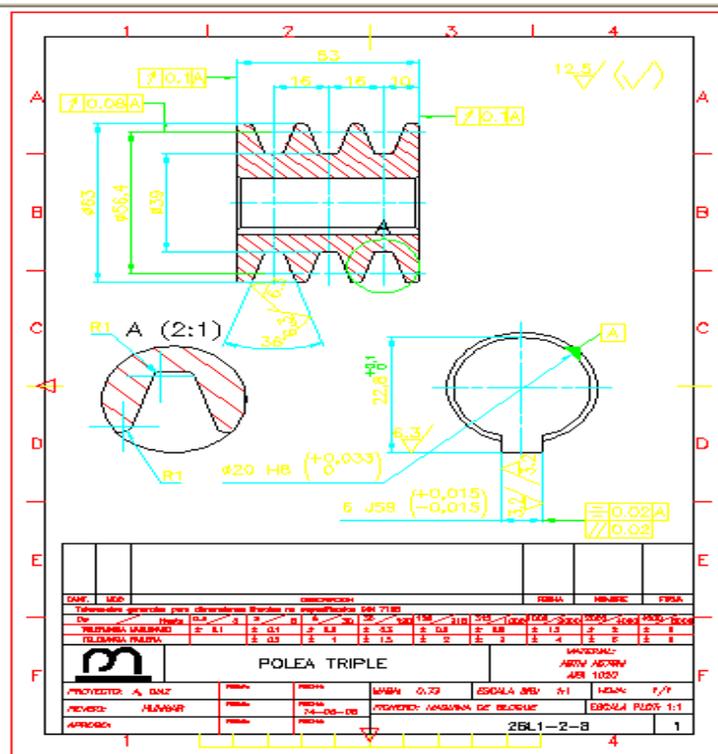
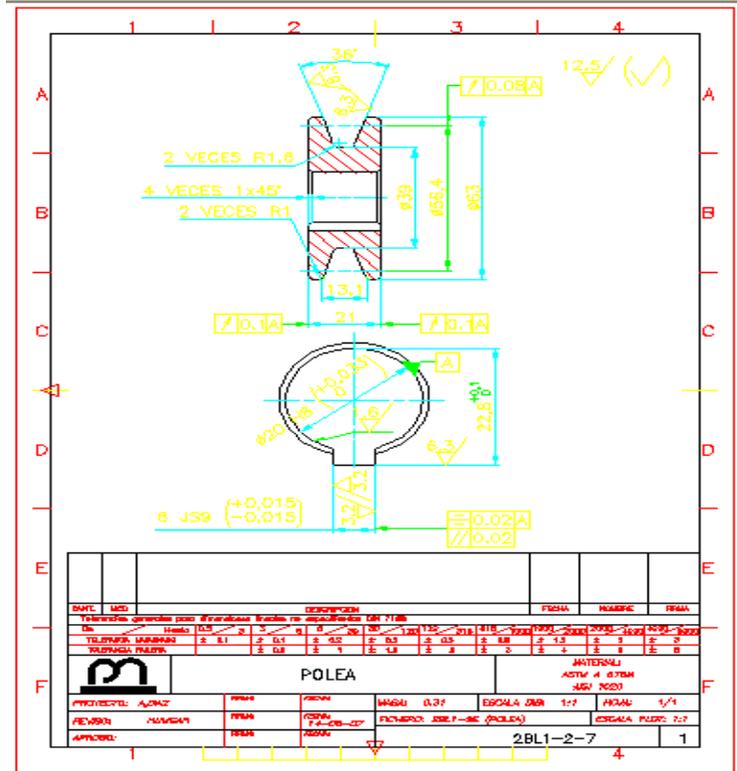
1. NTN. 2013 [citado 3/2/2013]; disponible en: [www.ntn.com](http://www.ntn.com).
2. Kruger, W., Detectando fallas en rodamientos utilizando métodos de pruebas eléctricos y mecánicos de vibraciones. 2009: p. 14.
3. Marino, C.M.M., Estudio de fallas comunes en rodamientos rígidos de una hilera de bolas mediante análisis dentro del dominio del tiempo y del la frecuencia. 2002, Universidad Austral de Chile: Valdivia. p. 111.
4. NTN, Rodamientos de Bolas y de Rodillos. Publicación 2202-VII/S. 2004. 436.
5. FAG, Averías en los rodamientos. Publicación WL 82 102/2 SB. 2002. 75.
6. Detectando Fallas Prematuras en Rodamientos. WAL Engineering: p. 5.
7. Sianis Ingeniería. 2013 [citado 03/02/2013]; disponible en: [www.sianis.es/Recursos/Curso\\_vibraciones/Rodamiento](http://www.sianis.es/Recursos/Curso_vibraciones/Rodamiento).
8. MRC Services Bearing, Engineering Handbook. Publicación M190-730. 2005. 397.
9. Dobrovolski, Elementos de Máquinas. Ediciones MIR. 1980.
10. SKF, General Catalogue. Catalogue 5000-E. 2003. 1120.
11. NSK, Diagnóstico Rápido de Fallas en Rodamientos. 36.
12. Marín, E.P., Elementos de medición y análisis de vibraciones en máquinas rotativas. 2000. 221.
13. Marín, D.E.P., La medición y el análisis de vibraciones en el diagnóstico de máquinas rotativas. 1997. 113.
14. Vera, J., Algunos tipos de vibraciones. 2000: p. 7.
15. Reydezal, Aplicación y Análisis Comparativo de los Criterios de Diseño Mecánico por Resistencia a Esfuerzos, Rigidez y Modos de Vibración. Científica, 2007. 11: p. 9.

16. Marín, R.S., Análisis de Filtros para la Detección de Fallos en Rodamientos Industriales a partir de su Señal de Vibración, Depateamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid. p. 93.

17. Dobrovolski, Elementos de Máquinas.Ediciones MIR. 198



## Anexo II Poleas.



## Anexo III: Recomendaciones para la selección de rodamientos, del catálogo de rodamientos NTN.

### Tipos de rodamientos y comparación de su desempeño.

Tipos de rodamientos	Rodamientos rígidos de bolas	Rodamientos de bolas a contacto angular	Rodamientos de doble hilera de bolas a contacto angular	Rodamientos de bolas a contacto angular apareados	Rodamientos autoalineables de bolas	Rodamientos de rodillos cilíndricos	Rodamientos de rodillos cilíndricos de una sola pestaña	Rodamientos de rodillos cilíndricos de doble pestaña	Rodamientos de doble hilera de rodillos cilíndricos	Rodamientos de agujas
Características										
Capacidad de manejo de carga										
Alta velocidad <sup>①</sup>	☆☆☆☆	☆☆☆☆	☆☆	☆☆☆	☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆
Alta precisión rotacional <sup>①</sup>	☆☆☆☆	☆☆☆☆	☆☆	☆☆☆		☆☆☆	☆☆	☆	☆☆☆	
Bajo ruido/vibración <sup>①</sup>	☆☆☆☆	☆☆☆☆		☆		☆	☆	☆	☆	☆
Bajo torque friccional <sup>①</sup>	☆☆☆☆	☆☆☆☆		☆☆	☆	☆				
Alta rigidez <sup>①</sup>			☆☆	☆☆		☆☆	☆☆	☆☆	☆☆☆	☆☆
Resistencia a los choques/vibración <sup>①</sup>			☆		★	☆☆	☆☆	☆☆	☆☆	☆☆
Desalineamiento permitido para anillos int./ext. <sup>①</sup>	☆				☆☆☆	☆				
Fijo en la dirección axial <sup>②</sup>	⊙	○	⊙	⊙ Para arreglos DB y DF	⊙		○	⊙		
Movible en la dirección axial <sup>②</sup>	○		○	○ Para arreglos DB	○	⊙			⊙	⊙
Anillos interior/exterior separables <sup>④</sup>						○	○	○	○	○
Diámetro interior cónico en el anillo interior <sup>⑤</sup>					○	○			○	
Comentarios		Para arreglos apareados				Tipo NU, N	Tipo NJ, NF	Tipo NUP, NP, NH	Tipo NNU, NN	Tipo NA
Página de referencia	B-5	B-43	B-74	B-43	B-79	B-91	B-91	B-91	B-116	E-2

- ① ☆ El número de estrellas indica el grado al cual ese rodamiento en particular, muestra esta determinada característica.  
★ No se aplica para este tipo de rodamiento.
- ② ⊙ Indica dirección dual. ○ Indica movimiento axial en una sola dirección.
- ③ ⊙ Indica que el movimiento axial es posible para la superficie de la pista, ○ Indica que el movimiento en la dirección axial es posible para las superficies de ajuste de los anillos interior y exterior.
- ④ ○ Indica que ambos anillos, el interior y el exterior son separables.
- ⑤ ○ Indica que este rodamiento puede fabricarse con agujero cónico.

