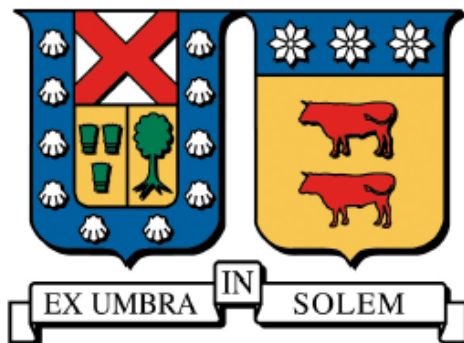


**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO - CHILE**



**ANÁLISIS, DETERMINACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE FALLA EN
RODAMIENTOS UTILIZADOS EN LA CADENA CINEMÁTICA DE UN
FILTRO DE BANDA Y PROPUESTA DE APLICACIÓN PARA UN PLAN
CORRECTIVO E IMPLEMENTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS DE
LUBRICACIÓN.**

ALEJANDRO SMILOVIC LARRONDO

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL MECÁNICO**

PROFESOR GUÍA:

RAFAEL MENA Y.

PROFESOR CORREFERENTE:

MARIO TOLEDO.

MARZO-2017

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

El presente trabajo de título permite identificar una problemática que acontece a un filtro de banda horizontal, perteneciente a una minera en Antofagasta. El problema radica en la prematura falla de múltiples rodamientos de la cadena cinemática del filtro. Tras investigar y analizar el modo de falla, se determina que la causa raíz es la corrosión por medios agresivos, provocada por el ingreso de contaminantes sólidos y fluidos líquidos ácidos, pertenecientes al concentrado de mineral que es filtrado, los que caen por gravedad sobre los soportes que contienen los rodamientos; provocando reiteradas fallas.

Mediante una extensa investigación sobre la base teórica de rodamientos y la ciencia de la lubricación, se proponen tres alternativas de solución, seleccionado entre ellas, instalar nuevos rodamientos que usan como lubricante: grasa sólida. Esta tercera alternativa de lubricación, además de la convencional grasa y aceite, posee ciertas características que son propicias en situaciones donde existe gran cantidad de contaminación sólida y líquida. Asimismo, elimina la necesidad de re lubricación.

El plan correctivo incluye un detallado procedimiento de instalación, donde se especifica el control dimensional previo de las tolerancias, la metodología de desmontaje y del montaje de los nuevos rodamientos. Finalmente, se agrega una guía rápida de instalación, a modo de ser un apoyo para quienes desarrollen esta acción.

En suma, se lograron las expectativas del departamento de mantenimiento de Minera Meridian, dado que los rodamientos han funcionado correctamente a la fecha sin detenciones. Es decir, los rodamientos de grasa sólida son adecuados, según su criterio, para esta aplicación donde existen altos niveles de corrosión. En consecución, la confiabilidad y disponibilidad del rodillo intervenido con esta tecnología de lubricación, aumentó. Además, se disminuyeron las horas hombre necesarias en el mantenimiento del equipo, limitándose sólo a inspeccionar visualmente.

ABSTRACT

The present work allows identifying an issue which occurs in a horizontal band filter, installed in a mine company located in Antofagasta, Chile. The problem lies in the premature failure of multiple bearings in the kinematic chain of the filter. After researched and analyzed the failure, was determined that the cause is corrosion by aggressives agents, caused by the entry of solid contaminants and liquid fluids, becoming from the concentrate of minerals that leak and fall by gravity on the plumber blocks which contain the bearings; promoting repeated failures.

Throughout an a extensive research on the theoretical basis of bearings and the science of lubrication, there are three alternative solutions, selected among them, install new bearings which use as lubricant: solid grease. This alternative of lubrication, in addition to the conventional one; grease and oil, has some peculiarities that are appropriate in contexts where there is a lot of solid and liquid pollution, avoiding the need for re-lubrication as well.

The corrective plan includes a detailed installation procedure, which specifies the dimensional previous tolerance control, disassemblys and assemblys methodology of new bearings. Finally, a quick installation guide is added meant as a support for those who will develop this action.

As a conclusion, the prospection of Minera Meridian's maintenance department were met, since the bearings have been working well to date without detention. That means, solid grease bearings are suitable, according to their standards, for this application where there are high levels of corrosion. As a result, the reliability and availability of the roller operated with this lubrication technology has increased. In addition, workers hours were reduced in the maintenance of the equipment, being limited only to visually inspect.

GLOSARIO

SNL: Soporte de pie, cuyas dimensiones son en unidades milimétricas.

SAF: Soporte de pie, cuyas dimensiones son en unidades imperiales.

FRB: Anillos de fijación.

TSN: Obturación.

ISO: Organización internacional de normalización.

d: diámetro interior nominal del rodamiento.

D: diámetro exterior nominal del rodamiento.

B: ancho nominal del rodamiento

ppm: partes por millón.

HRc: dureza, medida en escala Rockwell C.

Km: kilómetros, unidad de distancia.

oz: onza, unidad de masa.

kg: kilogramo, unidad de masa.

tpd: toneladas por día.

kW: kilo watts, unidad de potencia eléctrica.

kPa: kilo pascales, unidad de presión.

m: metros, unidad de longitud.

m²: metros cuadrados, unidad de área.

msnm: metros sobre el nivel del mar.

°C: grados Celsius, unidad de temperatura.

EA: Diseño de rodamiento reforzado, con mayor capacidad de carga.

K: conicidad, 1:12.

CAM: sufijo NSK que indica jaula de bronce mecanizado.

C3: Juego radial interno C3, mayor al normal.

E4: Aro exterior posee 4 agujeros de lubricación.

H: Sufijo que representa rodamientos de acero inoxidable.

DD: sufijo que emplea sellos de goma en ambos lados del rodamiento.

L11: rodamiento lubricado por grasa sólida para bajas velocidades.

L12: rodamiento lubricado por grasa sólida para altas velocidades.

H310: Manguito de fijación, para eje de 45 [mm].

KM10: tuerca de fijación, para manguito H310.

MB10: arandela de retención, para manguito H310.

kN: kilo Newton, unidad de fuerza.

TPE: elastómero de poliéster.

Rpm: revoluciones por minuto, unidad de frecuencia.

HN10: llave de gancho, para tuerca KM10.

JRI: juego radial interno.

PAO: polímero de alfa olefinas.

EP2: aditivo de extrema presión, consistencia grado NLGI 2.

NLGI: Instituto Nacional de Grasas Lubricantes.

Nm: Newton-metro, unidad de torque.

M10: perno métrico, diámetro nominal de 10 milímetros.

M12: perno métrico, diámetro nominal de 12 milímetros.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO	1
1.1. Rodamientos	1
1.1.1 Componentes de un rodamientos	3
1.1.2 Tipos de rodamientos	10
1.1.3 Soportes de pie	22
1.1.4 Obturaciones	25
1.2. Lubricación	29
1.2.1 Tipos de lubricantes	30
1.2.2 Métodos de lubricación tradicionales	89
1.3. Modos de fallas de rodamientos	94
1.3.1 Estadística de fallas	95
1.3.2 Clasificación modos de fallas ISO	96
1.4. Montaje y desmontaje	119
1.4.1 Consideraciones previas	119
1.4.2 Montaje	120
1.4.3 Desmontaje	129
1.4.4 Juego radial interno	133
CAPÍTULO 2: DESARROLLO	137
2.1. Empresa	137
2.2. Equipo a intervenir	138
2.2.1 Funcionamiento	140
2.2.2 Componentes a intervenir	143
2.2.3 Diagrama rodillos filtro de banda	144
2.2.4 Problemática	145
2.2.5 Soporte y rodamiento a reemplazar	147
2.3. Diagnóstico de falla	149
2.3.1 Información General	149
2.3.2 Inspección	149
2.3.3 Análisis y descripción del daño del rodamiento	154

2.3.4	Análisis y comentarios.....	164
2.4.	Propuestas de solución.....	166
2.4.1	Lubricación tradicional	166
2.4.2	Grasas hidrórepelentes	167
2.4.3	Rodamientos de rodillos esféricos sellados	169
2.4.4	Rodamientos lubricados por grasa sólida	170
2.5.	Procedimientos de montaje y desmontaje.....	173
2.5.1	Consideraciones previas: Tolerancias.....	173
2.5.2	Procedimiento	181
2.5.3	Guía rápida de reemplazo	233
CAPÍTULO 3:	CONCLUSIONES	240
CAPÍTULO 4:	Bibliografía	242
CAPÍTULO 5:	ANEXOS	244

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Propiedades químicas y mecánicas del acero	6
Tabla 1.2 Desalineación angular permisible	20
Tabla 1.3 Criterios de selección para los distintos tipos de obturaciones.....	26
Tabla 1.4 Comparativa entre lubricación por grasa y aceite.....	31
Tabla 1.5 Clasificación de viscosidad según ISO 3448	35
Tabla 1.6 Grado NLGI de consistencia y sus aplicaciones respectivas.....	36
Tabla 1.7 Principales propiedades de grasas lubricantes.....	41
Tabla 1.8 Viscosidad adecuada a temperatura de funcionamiento para cada tipo de rodamientos.....	50
Tabla 1.9 Guía referencia grado viscosidad aceite lubricante.....	50
Tabla 1.10 Velocidades límites para cada tipo de rodamiento y su respectivo tipo de grasa.....	75
Tabla 1.11 Temperaturas límites para la grasa sólida.....	76
Tabla 1.12 Condiciones de pruebas para rodamiento 6000 H DD.....	83
Tabla 1.13 Condiciones de prueba para rodamiento 6305DDU.....	85
Tabla 1.14 : Aspecto, causas y soluciones para fallas por corrosión por humedad o medios agresivos.....	117
Tabla 1.15 Aspecto, causas y soluciones para fallas por corrosión por humedad o medios agresivos.....	118
Tabla 1.16 Tipos de juegos radiales internos.....	135
Tabla 1.17 Juegos radiales internos para rodamientos de rodillos esféricos con agujero cónico.....	136
Tabla 2.1 Características grasa complejo de aluminio.....	167
Tabla 2.2 Clasificación calidad de grasa complejo de aluminio.....	168
Tabla 2.3 Condiciones de giro y carga.....	174
Tabla 2.4 Tolerancia para rodamientos de rodillos esféricos, montados sobre manguitos.....	176
Tabla 2.5 Ajuste de rodamientos radiales con alojamientos.....	177
Tabla 2.6 Magnitudes tolerancias para ejes.....	178
Tabla 2.7 Magnitud tolerancias para alojamientos.....	179
Tabla 2.8 Tolerancia de forma cilíndrica, grados IT.....	180

Tabla 2.9 Especificaciones soporte de pie SNL 510-608.	186
Tabla 2.10 Especificaciones técnicas obturación TSN tipo G.	193
Tabla 2.11 velocidades de rotación correspondientes a las velocidades periféricas.	194
Tabla 2.12 Control dimensional eje rodillo nuevo.	196
Tabla 2.13 Extracto tabla juego radial interno, en rodamiento de rodillos esféricos con agujero cónico y juego C3.	199
Tabla 2.14 Reducción juego radial para diámetro agujero 50 [mm].	201
Tabla 2.15 Repuestos.	233
Tabla 2.16 Herramientas e insumos.	234
Tabla 2.17 Insumos.	235

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Rodamientos	2
Figura 1.2 Vista en corte de un rodamiento de bolas.....	4
Figura 1.3 Contenido de oxígeno del acero	5
Figura 1.4 Jaula de chapa de acero	8
Figura 1.5 Jaulas mecanizadas de latón.	9
Figura 1.6 Jaulas de poliamida.....	10
Figura 1.7 Tipos de rodamientos	10
Figura 1.8 Ángulo de contacto “ α ”	11
Figura 1.9 Tipos de rodamientos de rodillos cilíndricos.....	13
Figura 1.10 Cubeta a la izquierda y cono a la derecha	13
Figura 1.11 Rodamiento de rodillos esféricos	14
Figura 1.12 Rodamiento de rodillos toroidales.....	15
Figura 1.13 Rodamiento axial de rodillos esféricos.....	16
Figura 1.14 Componentes de un rodamiento de rodillos esféricos	17
Figura 1.15 Series de rodamientos de rodillos esféricos.....	18
Figura 1.16 Desalineamiento angular producido por deflexión de un eje.	19
Figura 1.17 Soporte de pie	22
Figura 1.18 Anillos de fijación	23
Figura 1.19 Soporte libre a la izquierda y soporte fijo a la derecha.	24
Figura 1.20 Tipos de obturaciones admitidos por soportes de pie.....	25
Figura 1.21 Obturaciones de cuádruple labio	27
Figura 1.22 Medición de consistencia.	36
Figura 1.23 Intervalos de rellenado para rodamientos de bolas y de rodillos cilíndricos.	44
Figura 1.24 Intervalos de rellenado para rodamientos de rodillos cilíndricos y esféricos.	45
Figura 1.25 Estimación de la viscosidad cinemática mínima v_1 a la temperatura de funcionamiento.	53
Figura 1.26 Conversión a la viscosidad cinemática v a la temperatura de referencia de 40°C.....	54

Figura 1.27 Película lubricante.	55
Figura 1.28 Régimen de lubricación total.....	56
Figura 1.29 Lubricación hidrodinámica parcial.....	57
Figura 1.30 Lubricación límite	58
Figura 1.31 Relación entre el factor de viscosidad Kappa y la vida del rodamiento..	59
Figura 1.32 Curva de Stribeck	63
Figura 1.33 Duración del aceite respecto a un aumento en la temperatura.	64
Figura 1.34 Rodamiento con grasa sólida.....	65
Figura 1.35 Vista microscópica grasa sólida.	66
Figura 1.36 Micro burbujas de aceite lubricante.	66
Figura 1.37 Comparativa cantidad de aceite base entre dos lubricantes.....	68
<i>Figura 1.38 Composición de dos tipos de lubricantes.....</i>	<i>72</i>
Figura 1.39 Grasa sólida para alta velocidad y para uso general.....	73
Figura 1.40 A-B: Temperatura ambiente v/s Factor de velocidad.....	77
Figura 1.41 C-D : Temperatura ambiente v/s Factor de velocidad.....	79
Figura 1.42 Banco de pruebas.....	82
Figura 1.43 Duración de los dos tipos de grasas.....	84
Figura 1.44 Resultados obtenidos tras prueba de durabilidad.	86
Figura 1.45 Torque de arranque de distintos tipos de grasas.....	88
Figura 1.46 Lubricación por baño de aceite.....	90
Figura 1.47 Lubricación por circulación de aceite.....	91
Figura 1.48 Lubricación por goteo de aceite.	92
Figura 1.49 Lubricación por inyección de aceite.....	93
Figura 1.50 Lubricación por aire y aceite.	94
Figura 1.51 Estadística modos de fallos prematuros.	96
Figura 1.52 Fractura desarrollada bajo la pista de rodadura.....	97
Figura 1.53 Fatiga superficial inicia con el contacto metal - metal.	98
Figura 1.54 Desgaste abrasivo en jaula de un rodamiento de rodillos cilíndricos.....	99
Figura 1.55 Desgaste adhesivo en aro exterior de un rodamiento de rodillos esféricos.	100
Figura 1.56 Cráteres causados por paso de corriente eléctrica.	101
Figura 1.57 Marca típica ondulada causada por una fuga de corriente.	102

Figura 1.58 Marcas de montaje, equidistantes a la distancia de los elementos rodantes.	103
Figura 1.59 Múltiples indentaciones por contaminación, en un aro interior.	104
Figura 1.60 Fractura en el hombro del aro interior.	105
Figura 1.61 Fractura de fatiga en un aro exterior de un rodamiento de rodillos esféricos.	106
Figura 1.62 Fracturas perpendiculares al deslizamiento de las superficies.	106
Figura 1.63 Aro interior rodamiento rodillos esféricos.	108
Figura 1.64 Rodillo esférico con daño medio.	109
Figura 1.65 Rodillo esférico con daño severo.	110
Figura 1.66 Aro interior y rodillo esférico.	111
Figura 1.67 Grabado de agua en las pistas de rodadura.	112
Figura 1.68 Generación de partículas de óxido debido al movimiento relativo entre las superficies metálicas.	113
Figura 1.69 Aro interior de un rodamiento de rodillos cilíndricos.	114
Figura 1.70 Aro exterior rodamiento de rodillos esféricos.	115
Figura 1.71 Aro interior rodamiento rodillos cónicos.	116
Figura 1.72 Montaje en frío mediante prensa hidráulica.	121
Figura 1.73 Casquillo de montaje.	121
Figura 1.74 Casquillo de montaje doble.	122
Figura 1.75 Baño de aceite.	123
Figura 1.76 Calentador de inducción.	124
Figura 1.77 Montaje directo sobre asiento cónico en el eje.	125
Figura 1.78 Montaje sobre un manguito de fijación.	126
Figura 1.79 Montaje sobre un manguito de desmontaje.	126
Figura 1.80 Llave de gancho a la izquierda, y llave de impacto a la derecha.	127
Figura 1.81 Montaje en asiento cónico utilizando una tuerca hidráulica.	128
Figura 1.82 Montaje sobre manguito de fijación (izquierda) y desmontaje (derecha) en asiento cilíndrico, utilizando tuerca hidráulica.	128
Figura 1.83 Desmontaje mecánico, utilizando un extractor mecánico.	129
Figura 1.84 Desmontaje hidráulico, utilizando inyección de aceite.	130
Figura 1.85 Desmontaje mediante un extractor mecánico.	131

Figura 1.86 Desmontaje sobre un manguito de fijación.	131
Figura 1.87 Desmontaje mediante inyección de aceite, sobre un eje cónico.....	132
Figura 1.88 Desmontaje mediante inyección de aceite, sobre un manguito de fijación.	133
Figura 1.89 Juego radial interno en un rodamiento de rodillos esféricos.	134
Figura 1.90 Reducción del juego radial interno por dilatación térmica.....	134
Figura 2.1 Vista satelital minera Meridian, Yamana Gold.	138
Figura 2.2 Vista panorámica sector filtros de banda.....	139
Figura 2.3 Esquema funcionamiento filtro de banda horizontal de vacío.	142
Figura 2.4 Alta cantidad de soportes y rodamientos utilizados en el filtro horizontal de banda.	143
Figura 2.5 Zoom: polea de cola	144
Figura 2.6 Diagrama rodillos filtro de banda N°4.....	145
Figura 2.7 Zona inferior del filtro, donde se ubica un rodamiento.	146
Figura 2.8 Zona superior del filtro de banda, con alta contaminación de partículas sólidas pertenecientes al proceso de filtrado.....	147
Figura 2.9 Soporte de rodamiento a intervenir, perteneciente al rodillo 11T.	148
Figura 2.10 Alta contaminación presente en todo el filtro de banda horizontal de vacío.	150
Figura 2.11 Contaminación sólida completamente adherida al soporte.	151
Figura 2.12 Rodamiento cubierto con grasa descompuesta.....	152
Figura 2.13 Rodamiento completamente desarmado tras su desmontaje.	153
Figura 2.14 Rodamiento, manguito y arandela de retención sin limpiar.	154
Figura 2.15 Vista general del rodamiento y su manguito limpios.	155
Figura 2.16 Aro interior del rodamiento.	156
Figura 2.17 Zoom revela fractura en el aro interior.....	158
Figura 2.18 Aro exterior.	159
Figura 2.19 Zoom revela micro cráteres en la pista de rodadura del aro exterior. ...	160
Figura 2.20 Rodillos esféricos llenos de micro cráteres.	161
Figura 2.21 Jaula del rodamiento.....	163
Figura 2.22 Rodamiento de rodillos esféricos sellado.	169
Figura 2.23 Diseño del sello obturante.	170

Figura 2.24 Deflección de los sellos laterales obturantes.	171
Figura 2.25 Grados de tolerancias ISO más utilizados en rodamientos.	175
Figura 2.26 Conjunto soporte de pie, rodamiento y accesorios.	182
Figura 2.27 Rodamiento 22210 EAKE4 C3 L11, lubricado por grasa sólida.	183
Figura 2.28 Dimensiones rodamiento 22210 EAK E4 C3 L11	184
Figura 2.29 Soporte de pie, SNL 510-608.	185
Figura 2.30 Manguito de fijación, H310.	187
Figura 2.31 Dimensiones manguito de fijación, H310.	188
Figura 2.32 Tuerca de fijación, KM10.	188
Figura 2.33 Dimensiones tuerca de fijación, KM10.	189
Figura 2.34 Arandela de retención, MB10.	190
Figura 2.35 Dimensiones arandela de retención, MB10.	190
Figura 2.36 Anillo de fijación, FRB 9/90.	191
Figura 2.37 Obturación TSN 510 G.	192
Figura 2.38 Obturación de cuádruple labio dentro de un soporte.	193
Figura 2.39 Llave de gancho, HN 10.	195
Figura 2.40 Correcto control dimensional de un eje cilíndrico.	195
Figura 2.41 Medición del diámetro del eje, mediante un micrómetro de exteriores.	197
Figura 2.42 Medición JRI inicial mediante galga de espesores.	199
Figura 2.43 Ángulo de medición del juego radial interno inicial.	200
Figura 2.44 Ángulo distribución de carga es mayor a la derecha, debido a un mayor ajuste de interferencia.	202
Figura 2.45 Inspección del eje a utilizar.	203
Figura 2.46 Imagen referencial: Montaje de un manguito de fijación mediante un desatornillador.	204
Figura 2.47 Apriete de la tuerca de fijación por medio de llave de gancho.	206
Figura 2.48 Medición del JRI del rodamiento en la zona descargada.	206
Figura 2.49 Juego radial interno residual correspondiente a 0.03 [mm].	207
Figura 2.50 Lengüeta doblada de la arandela asegura el bloqueo de la tuerca de fijación.	208
Figura 2.51 Comprobación de la distancia correcta de montaje.	209
Figura 2.52 Conjunto armado y posicionado en el eje.	211

Figura 2.53 Soporte y rodamiento lleno de grasa sintética.	212
Figura 2.54 Ambas obturaciones partidas instaladas en la tapa del soporte.	213
Figura 2.55 Apriete de pernos tapa soporte.	214
Figura 2.56 Soporte lado fijo del rodillo número 11T.	215
Figura 2.57 Extracción del rodillo hacia arriba mediante un tecla.	216
Figura 2.58 Rodamiento lleno de grasa descompuesta.	217
Figura 2.59 Eje del rodillo tras desmontaje del rodamiento dañado.	218
Figura 2.60 Rodamiento completamente desarmado tras desmontaje.	219
Figura 2.61 Rodamiento nuevo sobre una superficie limpia.	220
Figura 2.62 Juego radial interno del nuevo rodamiento es 0.06 [mm].	221
Figura 2.63 Eje libre de impurezas tras ser lijado.	222
Figura 2.64 Manguito de fijación montado sobre el eje a la distancia correcta.	223
Figura 2.65 Medición del juego radial interno residual en la zona descargada del rodamiento.	224
Figura 2.66 Lengüetas de arandela de retención hacia el exterior.	225
Figura 2.67 Lengüeta de arandela de retención doblada asegura la fijación de la tuerca.	226
Figura 2.68 Inspección del estado del alojamiento de la base del soporte.	227
Figura 2.69 Inspección del estado del alojamiento de la tapa del soporte.	228
Figura 2.70 Montaje de obturaciones partidas en el soporte y posterior engrase.	229
Figura 2.71 Montaje de obturaciones partidas en la tapa del soporte y posterior engrase.	230
Figura 2.72 Montaje de anillos de fijación.	231
Figura 2.73 Soporte tapado.	232

INTRODUCCIÓN

Desde fines de 2014 los precios de los *commodities* han descendido abruptamente, lo que ha afectado de forma crítica la situación económica de Chile, que se caracteriza por una alta dependencia de la extracción de minerales. Es por esta razón, que todas las empresas ligadas a la minería han tenido que adoptar drásticos cambios para disminuir sus costos, con el fin de afrontar esta inminente baja de precios, que según se estima se extenderá un par de años más; como mínimo.

No obstante, estos tiempos de crisis son una buena instancia para la búsqueda de nuevas soluciones ingenieriles, que permitan aumentar la eficiencia de los procesos productivos insertos en una faena minera. Una forma de disminuir los costos relacionados al mantenimiento de los equipos, es la implementación de nuevas tecnologías asociadas a componentes o repuestos que deben ser sustituidos con una mayor frecuencia, tal como los rodamientos.

Los rodamientos están presentes en todas las industrias, y son los encargados de transmitir la carga y el movimiento de innumerables máquinas. Siendo reiteradas veces protagónicos como elementos críticos dentro de un equipo. Su vida útil depende en gran medida de la calidad de su lubricación. Cuando falla la lubricación, cualquier rodamiento falla, sin importar su nivel de calidad de fabricación. Por consiguiente, lo anterior se traducirá en una inmediata disminución de la disponibilidad y confiabilidad de los equipos; perjudicando las metas de producción.

Teniendo en cuenta la situación anterior, es que el presente trabajo de título se enfoca en entregar una propuesta de mejora frente a las reiteradas fallas prematuras que presentan ciertos rodamientos. El proyecto ha sido desarrollado tomando en cuenta específicamente los antecedentes de un equipo de filtrado de la minera Meridian, ubicada en Antofagasta, perteneciente a Yamana Gold.

El siguiente documento incluye un completo análisis de la causa raíz de falla de los rodamientos, la implementación de rodamientos que utilizan una nueva tecnología de lubricación, y un acabado procedimiento de montaje y desmontaje de éstos.

El desarrollo expuesto a continuación se realizó empleando una estrategia de investigación documental, recopilando fuentes de información bibliográficas e iconográficas. A su vez, se efectuó una investigación de campo, asistiendo a la faena anteriormente mencionada.

Una de la particularidades de la presente investigación es que no solo se enfoca en un equipo en particular, sino que puede ser aplicado en un filtro que posea el mismo diagnostico de falla, independiente del rubro en el cual este inserto.

OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo de título es llevar a cabo el análisis y determinación del modo de falla de los rodamientos que se utilizan en un filtro de banda horizontal de vacío, en minera Meridian. Se busca elaborar y proponer la aplicación de un plan correctivo mediante la implementación de una tecnología de lubricación en rodamientos.

Dentro de los objetivos específicos se encuentran:

- Realizar un estudio del estado del arte sobre los tipos de rodamientos, los métodos de lubricación y sus modos de fallas.
- Desarrollar una descripción del equipo a intervenir, filtro de banda horizontal de vacío “Delkor”, señalando los componentes a modificar.
- Identificación y análisis de la causa raíz de falla (RCA) de los rodamientos de rodillos esféricos, que utilizan los rodillos del filtro de banda.
- Proponer una solución mediante la implementación de rodamientos que utilizan como lubricante, grasa sólida.
- Elaborar un procedimiento de desmontaje de los rodamientos originales del equipo, y de montaje de los nuevos rodamientos, incluyendo la instalación in situ, en minera Meridian, Yamana Gold, planta el Peñon.
- Conclusiones y recomendaciones de seguimiento.

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

1.1. Rodamientos

Los rodamientos, derivados de los cojinetes, son elementos mecánicos que permiten el libre movimiento entre dos componentes de una máquina, a través de un eje de rotación común, permitiendo que un componente pueda girar respecto al otro. De ésta forma, transmiten con la menor fricción, la carga entre dos superficies en movimiento.

Diseñados, a diferencia de los cojinetes, para que los rozamientos originados durante el giro no sean de deslizamiento, si no de rodadura.

Según sea la aplicación, existen distintos tipos y clases de rodamientos. La correcta elección de un rodamiento dependerá en primer lugar de los esfuerzos involucrados; los cuales pueden ser radiales, axiales o una combinación de éstos.

Los rodamientos, en su forma actual, se desarrollaron a finales del siglo XIX cuando eran fabricados a mano. Hoy en día se fabrican en serie y su principio esencial de funcionamiento no ha cambiado. Sin embargo, las mejoras en el diseño de sus componentes, calidad de los aceros y/o aleaciones más refinadas, han sido constantes a través de los años hasta la actualidad. La Figura 1.1 muestra dos rodamientos típicos.



Figura 1.1 Rodamientos

En suma, los rodamientos están diseñados para cumplir las siguientes funciones:

- ✓ Transferir el movimiento, es decir, apoyan y guían los componentes que giran entre sí.
- ✓ Son elementos de transmisión de potencia, es decir, conducen la fuerza y además soportan cargas radiales, axiales, e inclusive combinación de estas.

Ventajas sobre cojinetes

- El par de fricción es menor y la diferencia entre el par inicial y el de funcionamiento es mínima en el caso de los rodamientos.
- Son elementos estandarizados bajo normas internacionales, por lo que son fácilmente intercambiables.
- La mayor parte de los rodamientos pueden soportar cargas tanto radiales como axiales de forma simultánea o independiente.
- Se pueden utilizar en una amplia gama de temperaturas.

- Se pueden precargar para conseguir holguras negativas, consiguiendo una mayor rigidez.

Las desventajas son principalmente un costo mayor frente a los cojinetes y su montaje es más complejo, además debe existir un cuidado mayor en la manipulación de estos, ya que son elementos de precisión; la contaminación es el primer enemigo de los rodamientos.

1.1.1 Componentes de un rodamientos

Los elementos básicos que conforman los rodamientos son:

- Aro exterior.
- Aro interior.
- Elementos Rodantes.
- Jaula o Canastillo.

La Figura 1.2 muestra un rodamiento de bolas en corte, donde se especifican sus elementos, y sus dimensiones típicas: diámetro interior, diámetro exterior y ancho.

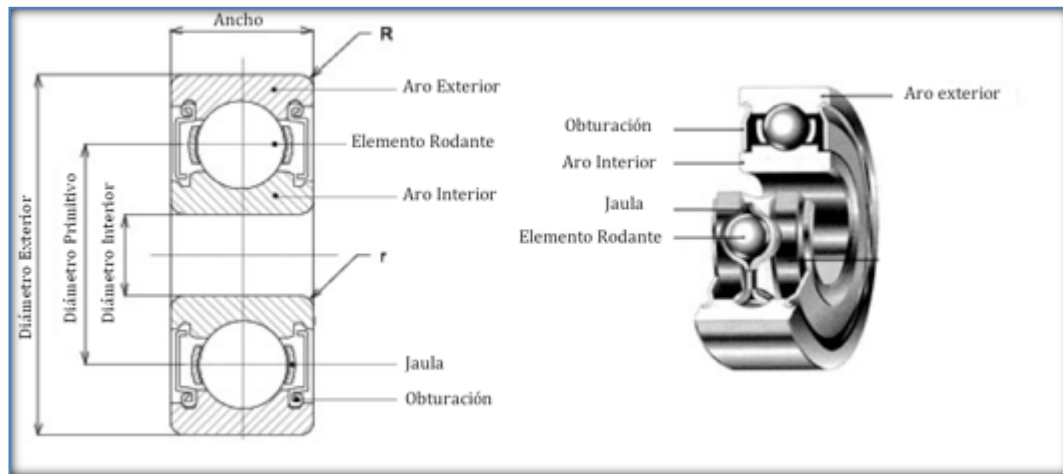


Figura 1.2 Vista en corte de un rodamiento de bolas

Los rodamientos pueden incluir componentes extras que mejoran su rendimiento y vida útil, tales como obturaciones laterales de gomas o blindajes metálicos, seguros exteriores, entre otros. A modo de ejemplo, el rodamiento de la Figura 1.2 tiene dos obturaciones, que se ubican entre el aro exterior e interior del rodamiento, dichos sellos evitan la entrada de contaminantes al interior del rodamiento.

Materiales utilizados

- Elementos Rodantes y Aros:

Para elementos rodantes y aros exteriores e interiores se utiliza generalmente acero al cromo endurecido. Si los componentes deben resistir cargas de impacto, los rodamientos se fabrican con aceros cementados en la superficie, como acero al cromo-molibdeno o acero al níquel-cromo-molibdeno. La ventaja de estos aceros es que ofrecen un núcleo más suave que absorbe las fuerzas y una superficie que posee una mayor resistencia al desgaste.

Lo que se busca en un acero de buena calidad es que posea una baja cantidad de impurezas, es decir, compuestos de oxígeno, nitrógeno e hidrógeno. La obtención de un acero de calidad se obtiene refinándolo al vacío, sumado a un posterior tratamiento térmico se obtendrá como resultado un aumento en el rendimiento del rodamiento y una mayor vida útil.

El Figura 1.3 muestra cómo ha ido disminuyendo el contenido de oxígeno en PPM a lo largo de los años; el valor actual asciende aproximadamente a 5 [ppm]. No obstante siempre existen alternativas especiales que poseen valores aun menores.

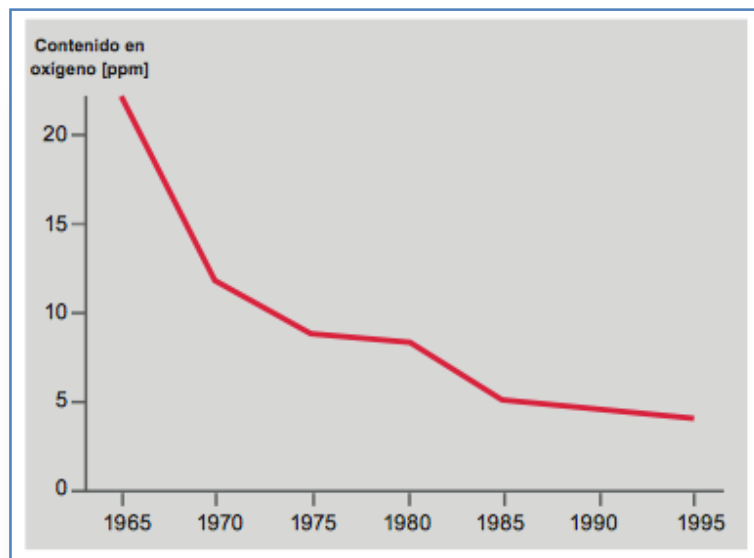


Figura 1.3 Contenido de oxígeno del acero

(NTN-SNR, 2010)

El Tabla 1.1 muestra los valores, para aplicaciones estándar, de las principales características de los elementos rodantes, aros interiores y exteriores.

Tabla 1.1 Propiedades químicas y mecánicas del acero

Exigencias	Propuestas												
▶ gran resistencia a la fatiga y al desgaste ▶ puede aceptar una dureza idéntica entre interior y la superficie	▶ 100Cr6 (AFNOR): acero al cromo con alto contenido en carbono. Este acero, muy frecuentemente empleado, presenta numerosas ventajas: limpieza, aptitud al temple sin carburación, flexibilidad del tratamiento térmico. Nuestro seguimiento de calidad continuo de los materiales nos ha permitido aumentar de forma importante la duración de este tipo de acero.												
	<table><tr><td>▶ Composición química</td><td>C</td><td>de 0,98 a 1,10 %</td></tr><tr><td></td><td>Si</td><td>de 0,15 a 0,35 %</td></tr><tr><td></td><td>Mn</td><td>de 0,25 a 0,45 %</td></tr><tr><td></td><td>Cr</td><td>de 1,30 a 1,60 %</td></tr></table>	▶ Composición química	C	de 0,98 a 1,10 %		Si	de 0,15 a 0,35 %		Mn	de 0,25 a 0,45 %		Cr	de 1,30 a 1,60 %
	▶ Composición química	C	de 0,98 a 1,10 %										
	Si	de 0,15 a 0,35 %											
	Mn	de 0,25 a 0,45 %											
	Cr	de 1,30 a 1,60 %											
▶ Características mecánicas	<table><tr><td>Coefficiente de dilatación</td><td>: $C1=12 \times 10^{-6} \text{ mm/mm/}^{\circ}\text{C}$</td></tr><tr><td>Módulo de elasticidad</td><td>: $E = 205\,000 \text{ N/mm}^2$</td></tr><tr><td>Coefficiente de Poisson</td><td>: $\eta = 0,3$</td></tr></table>	Coefficiente de dilatación	: $C1=12 \times 10^{-6} \text{ mm/mm/}^{\circ}\text{C}$	Módulo de elasticidad	: $E = 205\,000 \text{ N/mm}^2$	Coefficiente de Poisson	: $\eta = 0,3$						
Coefficiente de dilatación	: $C1=12 \times 10^{-6} \text{ mm/mm/}^{\circ}\text{C}$												
Módulo de elasticidad	: $E = 205\,000 \text{ N/mm}^2$												
Coefficiente de Poisson	: $\eta = 0,3$												

(NTN-SNR, 2010)

Destacar que otra característica mecánica importante es la dureza de los rodamientos, todos los componentes a excepción de las jaulas deben tener una dureza superior a los 62 HRc.

- Jaulas

Las jaulas tienen la función de mantener separados los elementos rodantes, evitando el contacto de éstos se logrará una mínima generación de calor y una baja fricción.

En segundo lugar deben mantener los elementos rodantes a una misma distancia entre ellos, de esta forma la carga se distribuirá uniformemente. Además la jaula guiará su rodadura en las zonas descargadas del rodamiento. Cuando los rodamientos son del tipo separables (aro interior del exterior), la jaula cumple la función de retener los elementos rodantes.

Las jaulas están sometidas a tensiones debidas a la fricción, a las fuerzas de tracción-compresión y a tensiones por inercia. Por las razones anteriores, los materiales que se utilizan deben poseer las siguientes propiedades: alta resistencia mecánica, alta estabilidad dimensional y alta resistencia al desgaste. Contrariamente a los elementos rodantes y los aros exteriores e interiores, no es necesaria una alta resistencia a la fatiga ni una dureza muy alta.

Los materiales que se utilizan comúnmente son acero, latón y polímero. Las formas constructivas típicas son las jaulas embutidas y las mecanizadas. Las jaulas embutidas están hechas de chapa de acero, en algunos casos especiales se fabrican de chapa de latón. Las principales ventajas que presentan estas jaulas son un menor peso, y ofrecen un mayor espacio en el interior del rodamiento, lo que facilita la entrada del lubricante.

1. Acero:

- **Chapa de Acero:** Jaulas ligeras con un bajo contenido de carbono, tienen una resistencia relativamente alta, bajo peso y su superficie puede ser tratada mediante tratamiento térmico (templar) para reducir la fricción y el desgaste. Se utilizan en los rodamientos de tamaño medio y pequeño. La Figura 1.4 muestra 3 tipos constructivos de jaula de chapa.

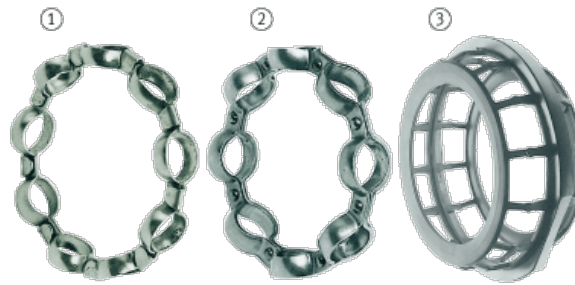


Figura 1.4 Jaula de chapa de acero

- **Acero Mecanizado:** Jaula utilizada en rodamientos de gran tamaño o en aplicaciones donde existe riesgo de que se produzca rotura por corrosión de algún químico, en este caso se debe usar acero y no latón. Con la finalidad de mejorar sus características se pueden temprar superficialmente por carbonitruración.

2. Latón.

La principal ventaja del latón, el cual es una aleación entre cobre y zinc, es que tiene un coeficiente de conducción térmico superior al acero, es decir, con éste material el calor generado en el rodamiento se extrae con mayor rapidez.

- **Chapa de Latón:** Se utilizan en rodamientos de tamaño medio y pequeño, aunque la mayoría son del tipo mecanizado en material forjado o fundido.
- **Latón Mecanizado:** Se utiliza en rodamientos de grandes dimensiones, ya que los requerimientos de resistencia mecánica son mayores, así como las altas temperaturas y las grandes fuerzas de inercias. La Figura 1.5 muestra 3 tipos de jaulas macizas de latón.



Figura 1.5 Jaulas mecanizadas de latón.

3. Polímero:

El material más utilizado es la Poliamida 6.6 reforzada con fibra de vidrio, la cual es moldeada por inyección, la que puede incluir refuerzos de fibra de vidrio. Se caracteriza por una buena relación entre resistencia y elasticidad. Las favorables características de deslizamiento del polímero sobre las superficies de acero lubricadas, resultan en un bajo rozamiento de la jaula, traduciéndose en una baja generación de calor y desgaste del rodamiento. Además, al ofrecer un menor peso específico la inercia es menor comparada a una jaula de acero o latón. Se utilizan en rodamientos pequeños y medianos. La Figura 1.6 muestra 2 tipos de jaulas macizas de poliamida reforzada con fibra de vidrio.

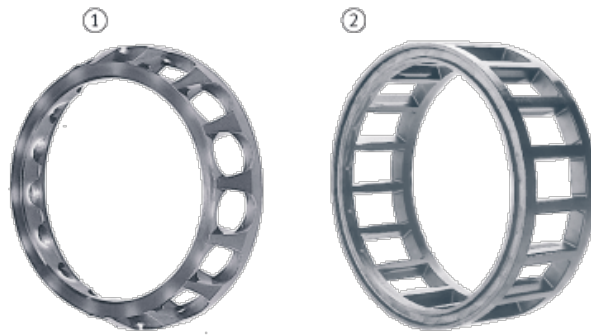


Figura 1.6 Jaulas de poliamida

1.1.2 Tipos de rodamientos

Se clasifican en rodamientos radiales o rodamientos de empuje (axiales), dependiendo de la dirección de la carga. Además, según sea el tipo de elementos rodantes, se dividen en rodamientos de bolas o rodillos, y se sub-dividen más en función de sus diferencias en el diseño o uso específico.

La Figura 1.7 muestra una vista en corte de los tipos de rodamientos existentes.

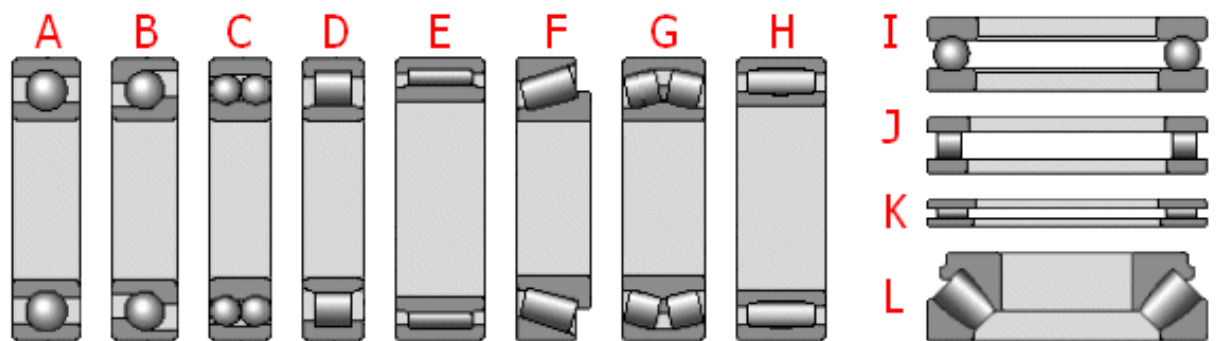


Figura 1.7 Tipos de rodamientos

A continuación, se detallan las características esenciales de los tipos de rodamientos existentes, en el orden respectivo a la Figura 1.7.

A. Rígidos de Bolas: Son el tipo de rodamiento más popular. Diseño no desarmable, soportan cargas radiales y una parte pequeña de cargas axiales, y dependiendo de las variaciones en el diseño, se pueden fijar axialmente. Debido a su bajo par de rozamiento, son altamente recomendables en usos que requieren altas velocidades y bajas pérdidas de potencia.

B. Bolas Contacto Angular: Los rodamientos de este tipo soportan cargas radiales y axiales en una dirección. Disponibles en 4 tipos de ángulos de contacto: 15°, 25°, 30° y 45° (ver Figura 1.8), cuanto mayor sea el ángulo de contacto, mayor será la carga axial que pueden soportar. No obstante, a mayor ángulo de contacto, menor será la velocidad que pueden alcanzar. Generalmente se usan dos rodamientos, en parejas, con el fin de soportar las cargas axiales en ambas direcciones; también existen con doble hilera de bolas.

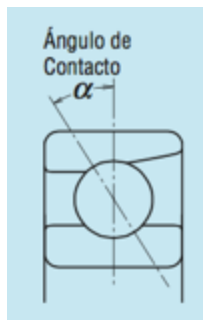


Figura 1.8 Ángulo de contacto “ α ”.

C. Bolas auto-alineables o Rotula: El anillo interior de estos rodamientos posee dos pistas de rodadura, y el anillo exterior presenta una única pista de rodadura esférica con el centro de curvatura que coincide con el eje del rodamiento. De esta manera, el eje del anillo interior, las bolas y la jaula pueden oscilar en cierta medida, admitiendo desalineaciones angulares que existan en el eje y alojamiento. Soportan cargas radiales y pequeñas cargas axiales en ambos sentidos.

D. Rodillos Cilíndricos: Este tipo de rodamientos utiliza rodillos como elementos rodantes, los que admiten una mayor capacidad radial que las bolas. Estos rodillos son guiados por pestañas en alguno de los aros o en ambos. Según sea la disposición de las pestañas, existen distintos tipos de rodamientos.

La Figura 1.9 ejemplifica las siguientes variaciones:

- **NU:** Dos pestañas en el aro exterior y ninguna en el aro interior. Sólo admiten cargas radiales, son desmontables y permiten desplazamientos axiales relativos del alojamiento y eje en ambos sentidos.
- **N:** Posee dos pestañas en el aro interior y ninguna en el aro exterior. Mismas cualidades que el tipo NU.
- **NJ:** Con dos pestañas en el aro exterior y una en el interior. Puede utilizarse para fijar axialmente en un sentido el rodamiento.
- **NUP:** Presenta dos pestañas integrales en el aro exterior, mientras que el aro interior posee una integral y una pestaña no integral en la forma de una arandela suelta. De esta forma permiten fijar axialmente el eje en ambos sentidos.

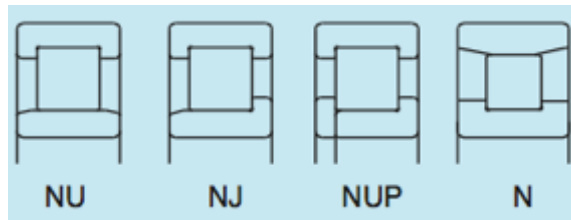


Figura 1.9 Tipos de rodamientos de rodillos cilíndricos

E. Rodillos tipo Agujas: Este tipo de rodamientos utiliza rodillos muy finos, llamados agujas, cuya longitud es de 3 a 10 veces su diámetro. Poseen una alta capacidad de carga radial y son excepcionalmente útiles cuando se dispone de un espacio radial limitado. No admiten cargas axiales.

F. Rodillos Cónicos: Los rodamientos de este tipo son del tipo desarmable, están constituidos por un cono y una cubeta (ver Figura 1.10), y sus elementos rodantes son rodillos cónicos, los que son guiados por una pestaña en el mismo cono. Estos rodamientos pueden soportar cargas radiales elevadas y axiales en un sentido. En general se montan en parejas, soportando así cargas axiales en ambos sentidos.

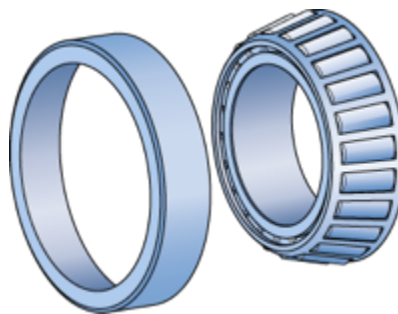


Figura 1.10 Cubeta a la izquierda y cono a la derecha

G. Rodillos Esféricos o Rotula: Constan de un anillo exterior, el cual tiene una pista esférica continua dentro de la cual se mueven dos hileras de rodillos con forma de barril, y estos giran guiados por un anillo interior que posee dos pistas independientes separadas por una pestaña guía central. Gracias a esta forma constructiva, tienen la capacidad de absorber desalineaciones entre el anillo interior y el exterior (ver Figura 1.11). Tienen una alta capacidad de soportar cargas radiales y axiales en cualquier dirección. Además, son adecuados para aplicaciones en donde se presenten vibraciones y cargas de choque.

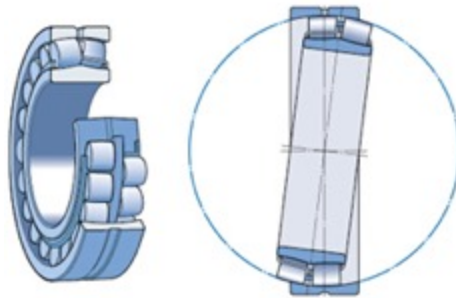


Figura 1.11 Rodamiento de rodillos esféricos

H. Rodillos Toroidales (CARB): Combinan la capacidad de auto-alineación de los rodamientos de rodillos esféricos con la capacidad de desplazamiento axial de los rodamientos de rodillos cilíndricos (ver Figura 1.12). Son la solución para rodamientos del lado libre en el eje, ya que pueden soportar la dilatación térmica del eje dentro del rodamiento, prácticamente, sin fricción.

Conformados por una hilera de rodillos largos, ligeramente abombados y simétricos. El aro exterior e interior tienen un camino de rodadura toroidal, con esta forma los rodillos son auto-guiados, es decir, siempre se ubican de modo que la carga se distribuya uniformemente a lo largo del rodillo. Soportan elevadas cargas combinadas.

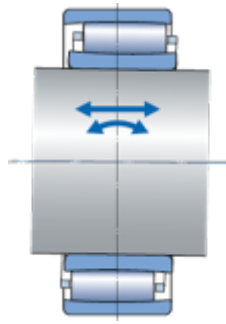


Figura 1.12 Rodamiento de rodillos toroidales

- I. Bolas axial:** Conformados por dos anillos, uno interior y otro exterior, cuyo ángulo de contacto es de 90° ha sido concebido para soportar únicamente cargas axiales, generalmente en un sentido. Sin embargo, también existen rodamientos axiales llamados de doble efecto, los que soportan la carga axial en ambos sentidos. Son del tipo separable: dos anillos o arandelas y la respectiva jaula de bolas.
- J. Rodillos axial:** Rodamientos axiales de rodillos cilíndricos son adecuados para disposiciones que tengan que soportar grandes cargas axiales. Además, son relativamente insensibles a las cargas de choque, son muy rígidos y requieren poco espacio axial. Existen diseños de una hilera de rodillos o doble.
- K. Agujas axial:** Al igual que los rodamientos radiales de agujas permiten disposiciones de rodamientos rígidas, que requieren un espacio axial mínimo. Sólo pueden soportar la carga en una dirección.

L. Rodillos esféricos axial: Estos rodamientos ensamblan una pista de rodadura esférica en la arandela del soporte y rodillos en forma de barril ordenados oblicuamente a su alrededor. Tienen la capacidad de ser auto-alineables, presentan una alta capacidad axial y pueden soportar moderadas cargas radiales, generalmente son utilizados en máquinas donde se acompaña de un rodamiento radial de rodillos esféricos (ver Figura 1.13). Destacar que sus puntos de aplicación de las cargas “A” deben coincidir para permitir el auto-alineamiento.

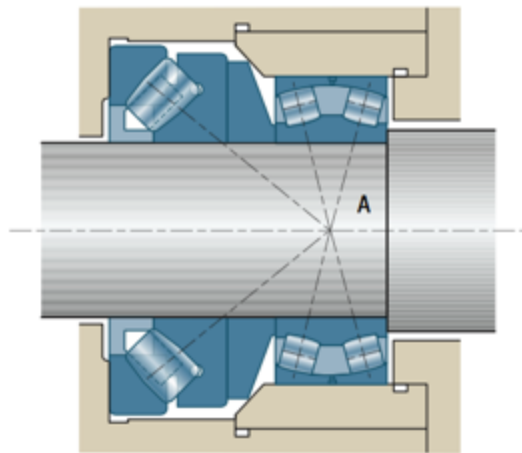


Figura 1.13 Rodamiento axial de rodillos esféricos

1.1.2.1 Características rodamientos de rodillos esféricos

Los rodamientos de rodillos esféricos, o también llamados de rodillos a rotulas, poseen dos hileras de rodillos con un camino de rodadura esférico común en el aro exterior, y dos caminos de rodadura en el aro interior (ver Figura 1.14). De este modo, este tipo de rodamientos tienen la ventaja de ser auto alineables, y consecuentemente son insensibles a la desalineación del eje respecto al alojamiento y a la flexión del eje. Por otra parte, su diseño constructivo permite que soporten cargas combinadas, es decir, cargas radiales y axiales en ambos sentidos.

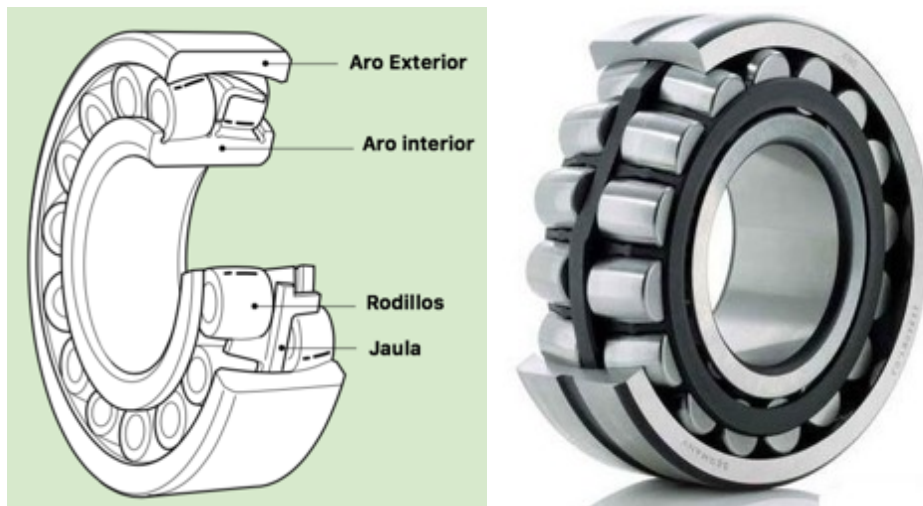


Figura 1.14 Componentes de un rodamiento de rodillos esféricos

Series

Por lo general, en el diseño de máquinas el diámetro del eje se establece al principio, por lo que la selección del rodamiento se realiza en función de su diámetro interior. Existen numerosas combinaciones de series de rodamientos y dimensiones, según sea el tipo de rodamiento. Por otra parte, la capacidad de carga axial está estrechamente relacionada con la capacidad de carga radial, de manera que ambas dependen del diseño constructivo del rodamiento. La Figura 1.15 muestra las 10 series más utilizadas de rodamientos de rodillos esféricos.

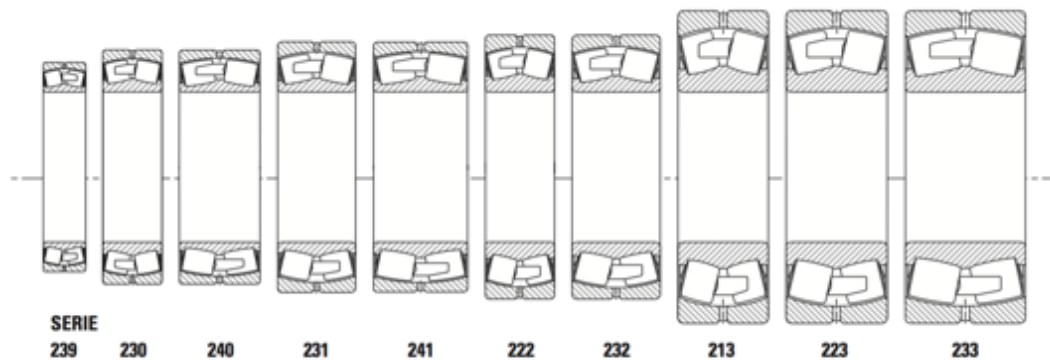


Figura 1.15 Series de rodamientos de rodillos esféricos

Conicidad

Los rodamientos de rodillos a rótula son fabricados con agujeros cilíndricos o agujeros cónicos. La mayoría de las series de rodamientos de rodillos a rótula que poseen agujero cónico, mantienen una conicidad 1:12, salvo las series 240 y 241, las cuales conservan una conicidad 1:30. Lo anterior es muy relevante al momento de instalar un rodamiento, ya que el juego radial interno está especificado por separado para ambas conicidades; consecuentemente una lectura errónea producirá un mal ajuste del rodamiento.

Desalineamiento

El diseño de los rodamientos de rodillos esféricos tolera excepcionalmente las desalineaciones angulares entre el aro exterior e interior, producidas por la deflexión de un eje causada por las cargas aplicadas, errores dimensionales del eje y alojamiento, y a errores de montaje. La Figura 1.16 enseña cómo dos rodamientos de rodillos a rótula absorben el desalineamiento de un eje flexionado.

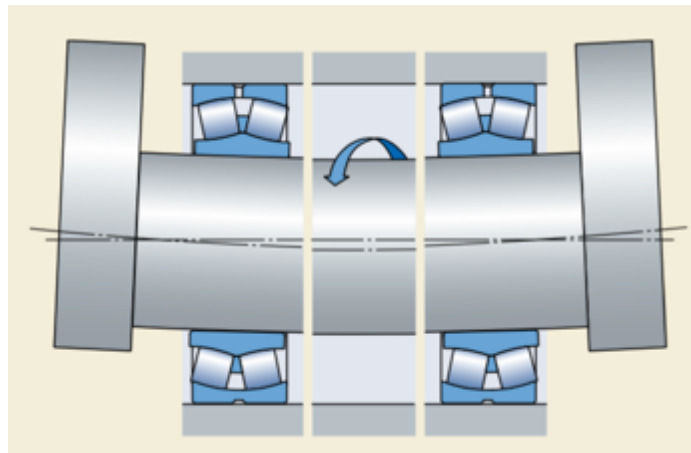


Figura 1.16 Desalineamiento angular producido por deflexión de un eje.

Los grados de desalineamiento máximos permisibles que pueden absorber los rodamientos de rodillos a rótula, dependen de la serie del rodamiento y del tamaño de éste, principalmente por su diámetro de agujero. La Tabla 1.2 muestra los valores máximos permisibles, según sea el tamaño de éstos:

Tabla 1.2 Desalineación angular permisible

Desalineación angular permisible			
Serie del rodamiento Tamaños ¹⁾	Desalineación angular permisible		
–	grados		
Series 213	2	Series 232	
		Tamaños < 52	2,5
		Tamaños ≥ 52	3,5
Series 222	2	Series 238	1,5
Tamaños < 52		Series 239	1,5
Tamaños ≥ 52	1,5	Series 240	2
Series 223	3	Series 241	
Series 230		Tamaños < 64	2,5
Tamaños < 56	2	Tamaños ≥ 64	3,5
Tamaños ≥ 56	2,5	Series 248	1,5
Series 231		Series 249	2,5
Tamaños < 60	2		
Tamaños ≥ 60	3		

(SKF, Catalogo General, 2006)

Capacidad de carga axial de los rodamientos montados sobre manguitos

La capacidad de carga axial permisible se calcula usando la fórmula:

$$F_{ap} = 0.003 B d$$

donde:

F_{ap}: Carga axial máxima permisible, kN.

B: Ancho del rodamiento, mm.

d: diámetro del agujero del rodamiento, mm.

Carga mínima

Para lograr una correcta rodadura, los rodamientos deben someterse a una carga mínima determinada, especialmente si éstos van a girar a altas velocidades o están sometidos a cambios rápidos en la dirección de carga.

La carga mínima requerida se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$P_m = 0.01 C_0$$

donde:

P_m: Carga mínima equivalente, kN.

C₀: Capacidad de carga estática rodamiento, kN.

Velocidad permisible

La velocidad máxima permisible de los rodamientos de rodillos esféricos depende de su tamaño, tipo de jaula, cargas, métodos de lubricación, entre otros. Por consiguiente, las velocidades máximas permisibles están especificadas para cada rodamiento en los catálogos de los fabricantes.

1.1.3 Soportes de pie

Los soportes de pie son fabricados en fundición de hierro, acero o termoplástico. Su diseño constructivo permite alojar, para un mismo modelo, distintos tipos de rodamientos y obturaciones. Su principal ventaja es que en ellos se pueden instalar ejes pre montados, agilizando el montaje y desmontaje en múltiples aplicaciones industriales. Es decir, se monta el rodamiento en el eje, y luego éste se monta sobre el soporte, posicionando los accesorios pertinentes y finalmente apertnando la tapa del soporte (ver Figura 1.17). Cabe mencionar, que los soportes de pie se fabrican en dimensiones métricas e imperiales, los que son designados por los prefijos SNL y SAF, respectivamente.



Figura 1.17 Soporte de pie

1.1.3.1 Soporte libre y fijo

Las máquinas que poseen ejes u otros elementos rotativos están soportados generalmente por dos rodamientos, uno en cada extremo. Habitualmente, un extremo debe poseer un rodamiento capaz de fijar el eje axialmente en ambos sentidos; llamado **soporte fijo**. Por otra parte, el extremo contrario, soporte libre, debe permitir el movimiento axial del eje para evitar las cargas axiales inducidas por las dilataciones térmicas propias del funcionamiento de la máquina.

Generalmente los alojamientos de los soportes están mecanizados de forma que los rodamientos se puedan desplazar axialmente, es decir, actúan como soportes libres. Un soporte fijo se obtiene al introducir dos anillos de fijación, representados en la Figura 1.18, los que limitan el movimiento axial del aro exterior del rodamiento con respecto al alojamiento del soporte y eje.



Figura 1.18 Anillos de fijación

Los anillos de fijación están denominados por el prefijo FRB y seguidos del tamaño (ancho/diámetro exterior) en milímetros. Por ejemplo: FRB 9/90.

La Figura 1.19 muestra dos rodamientos de rodillos esféricos, el de la izquierda corresponde al extremo libre, donde se aprecia la libertad axial representada por la distancia “s”. Por otra parte, el de la derecha monta dos anillos de fijación denotados en color naranja; uno a cada lado del rodamiento.

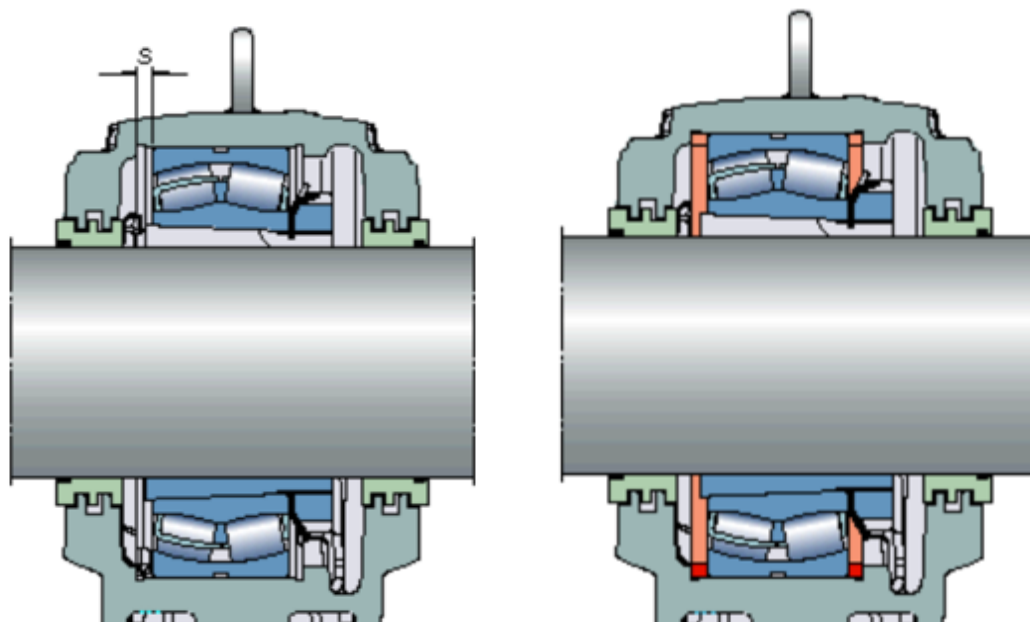


Figura 1.19 Soporte libre a la izquierda y soporte fijo a la derecha.

1.1.4 Obturaciones

Los soportes de pie pueden alojar distintos tipos de obturaciones en su interior, dependiendo de las exigencias de la aplicación. La Figura 1.20 muestra los tipos de obturaciones más utilizados:

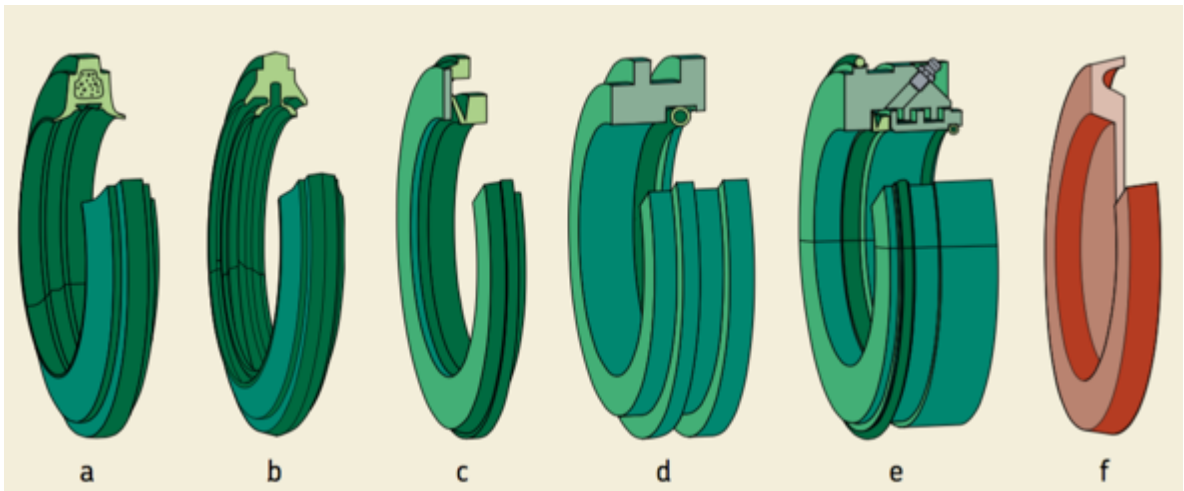


Figura 1.20 Tipos de obturaciones admitidos por soportes de pie.

Los tipos de obturaciones son:

- a. Obturación de doble labio del tipo L.
- b. Obturación de doble labio del tipo G (cuádruple labio).
- c. Obturación de anillo en V.
- d. Obturación laberíntica.
- e. Obturación Taconite con laberinto radial.
- f. Tapas laterales.

La correcta elección de la obturación dependerá principalmente de las condiciones de contaminación y la velocidad de rotación que presente la aplicación. Sin embargo, existen otros criterios de selección, los que se presentan en la Tabla 1.3

Tabla 1.3 Criterios de selección para los distintos tipos de obturaciones.

Muy adecuado	Adecuado					
Poco adecuado	Inadecuado	Obtención de doble labio de tipo L	Obtención de doble labio de tipo G	Obtención de anillo en V	Obtención de laberinto	Obtención Taconite
		TSN .. L	TSN .. G	TSN .. A	TSN .. S	TSN .. ND
Temperatura		-40 a +100 °C	-40 a +100 °C	-40 a +100 °C	-50 a +200 °C	-40 a +100 °C
Velocidad periférica		13 m/s	8 m/s	12 m/s 7 m/s ¹⁾		12 m/s
Desalineación		0,5 a 1°	0,5 a 1°	1 a 1,5°	0,3°	0,5°
Relubricación con grasa			4 m/s ³⁾	2)		
Lubricación con aceite						
Bajo rozamiento						
Desplazamiento axial del eje						
Montaje vertical				4)		
Facilidad de sustitución						

Muy adecuado	Adecuado					
Poco adecuado	Inadecuado	Obtención de doble labio de tipo L	Obtención de doble labio de tipo G	Obtención de anillo en V	Obtención de laberinto	Obtención Taconite
		TSN .. L	TSN .. G	TSN .. A	TSN .. S	TSN .. ND
Temperatura		-40 a +100 °C	-40 a +100 °C	-40 a +100 °C	-50 a +200 °C	-40 a +100 °C
Velocidad periférica		13 m/s	8 m/s	12 m/s 7 m/s ¹⁾		12 m/s
Desalineación		0,5 a 1°	0,5 a 1°	1 a 1,5°	0,3°	0,5°
Relubricación con grasa			4 m/s ³⁾	2)		
Lubricación con aceite						
Bajo rozamiento						
Desplazamiento axial del eje						
Montaje vertical				4)		
Facilidad de sustitución						

(SKF, 2015)

1.1.4.1 Obturación de cuádruple labio

El tipo de obturación más común y suministrada por defecto en los soportes, es la obturación de doble labio del tipo G, o comúnmente llamada cuádruple labio, que posee la mejor relación efectividad de sellado – costo, en relación a los demás tipos de obturaciones. Además, tiene la gran ventaja de ser fácil de montar; por esto sustituye a la obturación de doble labio que se utiliza en aplicaciones donde la velocidad del eje es mayor.

Las obturaciones de cuádruple labio, ilustradas en la Figura 1.21, son elaboradas con elastómero de poliéster (TPE), un termoplástico moldeado por inyección que confiere a la obturación una resistencia al desgaste con buenas propiedades elásticas.



Figura 1.21 Obturaciones de cuádruple labio

Características

Las obturaciones de cuádruple labio presentan las siguientes características:

- Rango de temperaturas de funcionamiento de -40 a + 100° C.
- Velocidad periférica admisible de hasta 13 m/s.
- Desalineación máxima permisible del eje respecto al soporte de 1° para diámetros de hasta 100 [mm], y 0.5° para ejes mayores.
- Movimiento axial admisible del eje respecto al soporte no está limitado por la obturación.
- Aptos para funcionamiento en ambientes contaminados por polvo y partículas contaminantes finas.

1.2. Lubricación

Finalidad de la lubricación

La principal función de la lubricación es reducir la fricción y el desgaste en el interior de los rodamientos, instancias que podrían causar fallos prematuros. También impide la corrosión, y protege contra la contaminación de sólidos y líquidos.

Los efectos de la lubricación se pueden describir de la siguiente manera:

1. Reducción de fricción y desgaste

Se impide el contacto metálico directo entre los anillos del rodamiento, los elementos de rodadura y la jaula, por medio de una película de aceite que reduce la fricción y el desgaste en las zonas de contacto.

2. Ampliación de la vida frente a la fatiga

La vida frente a la fatiga de los elementos rodantes de los rodamientos, depende de la viscosidad y grosor de la película entre las zonas de contacto de los elementos rodantes. Una película de mucho grosor prolonga la vida frente a la fatiga, pero la reduce si la viscosidad del aceite es demasiado baja y el grosor de la película es insuficiente.

3. Disipación del calor por fricción y refrigeración

Si la lubricación se realiza mediante aceite, puede utilizarse un circuito de lubricación para eliminar el calor de la fricción o el calor transmitido desde el exterior, con el fin de evitar recalentamientos del rodamiento y la consiguiente degeneración del aceite.

1.2.1 Tipos de lubricantes

Los distintos tipos de lubricantes se dividen inicialmente en lubricación por grasa o aceite. Cada tipo de lubricante posee sus respectivas ventajas o desventajas, que dependerán de la exigencia de la aplicación.

- Lubricación con grasa:

En los casos en que el rodamiento funciona en condiciones normales de velocidad y temperatura, se elige la grasa como lubricante. La grasa presenta diversas ventajas con respecto al aceite; requiere un sistema más sencillo y barato, mejor adhesión, protección contra la humedad y los contaminantes del ambiente de trabajo.

- Lubricación con aceite:

El aceite es el lubricante apropiado cuando la velocidad y/o las condiciones de funcionamiento no permiten usar grasa o cuando es necesario evacuar el calor del rodamiento; muchas veces se emplea aceite debido a los requisitos de otros componentes, es decir, obturaciones, engranajes, cojinetes lisos, entre otros.

La selección de un lubricante depende del rango de temperaturas de operación, la velocidad de rotación, y de las condiciones ambientales y de funcionamiento.

La Tabla 1.4 expone una primera comparación entre lubricación por grasa y aceite.

Tabla 1.4 Comparativa entre lubricación por grasa y aceite.

Item	Lubricación Grasa	Lubricación Aceite
Estructura del alojamiento y método del sellado	Simple	Puede ser complicada Requiere mantenimiento cuidadoso
Velocidad	Velocidad límite es entre 65 y 80% de la lubricación por aceite	Alta velocidad límite
Efecto Refrigerante	Pobre	Posible desaparición de calor mediante circulación forzada de aceite
Fluidez	Pobre	Buena
Sustitución Total del Lubricante	A veces difícil	Fácil
Eliminación de Cuerpos extraños	Imposible con grasa	Fácil
Contaminación externa debida a fugas	Entorno raras veces contaminado por fugas	Fugas frecuentes si no se toman medidas. No aconsejable si se debe evitar contaminación exterior

(Rodamientos NSK, 2009)

Cabe destacar que aproximadamente el 90% de los rodamientos se lubrican con grasa. La ventaja de la grasa respecto al aceite, es que es más fácil de retener en la disposición de rodamientos, y también ayuda a obturar contra los contaminantes, la humedad o el agua.

Por otra parte, el aceite ofrece una mejor lubricación, mayores velocidades de giro y mayor capacidad para evacuar el calor. No obstante, requiere un mantenimiento más cuidadoso y es más costoso de implementar.

1.2.1.1 Lubricación por grasa

Composición

Las grasas lubricantes poseen forma física semilíquida y están constituidas por los siguientes componentes:

- Aceite base: 70-90 %.
- Espesante: 5-30%.
- Aditivos: 1-5%.

1) **Aceite base:** Los aceites minerales o sintéticos, tales como la silicona o el aceite diester, son aceite base para las grasas. Las propiedades lubricantes de la grasa dependen principalmente de las características de su aceite base. De esta manera, la viscosidad del aceite base es una de las características más importante al momento de seleccionar el lubricante adecuado.

Normalmente las grasas fabricadas con una baja viscosidad, son utilizadas en aplicaciones de alta velocidad y baja temperatura, mientras que una alta viscosidad es adecuada en aplicaciones donde la velocidad es baja y las cargas son grandes.

2) **Espesante:** La función del espesante, es proporcionar una red tridimensional que retiene el lubricante entre sus poros. Más del 90% de los espesantes existentes corresponden a un jabón metálico. Este jabón metálico actúa como una esponja, es decir, el jabón forma una malla de fibras jabonosas que están llenas de aceite base. El espesante libera el aceite base a medida que la temperatura y la carga aumenta.

3) Aditivos: Con la finalidad de mejorar el rendimiento del lubricante en los rodamientos, se agregan distintos tipos de aditivos, dependiendo de las exigencias que requiera la aplicación. A continuación, se describen los aditivos más relevantes en la lubricación de rodamientos.

- i) **Extra Presión (EP):** Si el espesor de película lubricante no es suficiente para evitar el contacto metálico entre las superficies, la vida útil del rodamiento se reduce drásticamente. El uso de aditivos Extra Presión, compuestos por fósforo, cloro y azufre, evitan dicho fenómeno. Las altas temperaturas de contacto entre las micro crestas de las superficies activan este aditivo, produciendo un desgaste suave en los puntos de contacto. El resultado es una superficie más suave, menores tensiones de contacto y una mayor vida útil.
- ii) **Anti desgaste (AW):** Operan de forma similar a los aditivos de Extra Presión. Sin embargo, la principal diferencia es que el aditivo forma una capa protectora que se adhiere a la superficie.
- iii) **Anti oxidantes:** A medida que la temperatura aumenta por sobre el límite superior que permite el aceite base, éste comienza a oxidarse rápidamente. Estos aditivos retrasan la descomposición del aceite y permiten mayores intervalos de re lubricación.
- iv) **Inhibidores de corrosión:** Estos agentes mejoran la protección que ofrece la grasa. Son necesarios para rodamientos que funcionan en ambientes húmedos. También los protegen durante el transporte y almacenaje.

Propiedades

Las siguientes propiedades son relevantes al momento de seleccionar el lubricante más adecuado según sea la aplicación:

Viscosidad aceite base

La viscosidad es la propiedad física básica de los aceites lubricantes más importante, de la cual resulta la capacidad de carga de la película de aceite en el rodamiento al existir rozamiento líquido. Desde un punto de vista práctico, se puede definir como su resistencia a fluir, es por lo tanto una medida de la fricción interna de un lubricante. Mientras menor sea la fricción más fácil fluirá y por lo tanto su viscosidad será menor.

La viscosidad es una función inversamente proporcional a la temperatura, a mayor temperatura decrece la viscosidad de un lubricante y viceversa. La unidad internacional para medir la viscosidad cinemática es en $[\text{mm}^2/\text{s}]$, o también llamado CentiStoke (cSt). La medición de la viscosidad referencial se realiza a 40°C.

La Tabla 1.5 muestra la clasificación de viscosidad según norma ISO 3448. Indica los distintos grados de viscosidad existentes, medidos a 40°C. Además, señala los límites máximos y mínimos que establece la norma para cada grado de viscosidad.

Tabla 1.5 Clasificación de viscosidad según ISO 3448

Clasificación de viscosidad según la ISO 3448			
Grado de viscosidad	Límites de viscosidad cinemática a 40 °C		
	medio	mín	máx
—	mm ² /s		
ISO VG 2	2,2	1,98	2,42
ISO VG 3	3,2	2,88	3,52
ISO VG 5	4,6	4,14	5,06
ISO VG 7	6,8	6,12	7,48
ISO VG 10	10	9,00	11,0
ISO VG 15	15	13,5	16,5
ISO VG 22	22	19,8	24,2
ISO VG 32	32	28,8	35,2
ISO VG 46	46	41,4	50,6
ISO VG 68	68	61,2	74,8
ISO VG 100	100	90,0	110
ISO VG 150	150	135	165
ISO VG 220	220	198	242
ISO VG 320	320	288	352
ISO VG 460	460	414	506
ISO VG 680	680	612	748
ISO VG 1 000	1 000	900	1 100
ISO VG 1 500	1 500	1 350	1 650

(SKF, Catalogo General, 2006)

Índice de viscosidad

El índice de viscosidad (IV), es la medida de variación de la viscosidad de un lubricante en un rango de temperatura. Mientras más alto sea el índice de viscosidad, menor será el cambio con la temperatura. Generalmente un índice de viscosidad entre 90 y 110, es clasificado como un lubricante con alto índice de viscosidad.

En rodamientos, un lubricante (aceite mineral) debe poseer un índice de viscosidad como mínimo de 95, además es importante mencionar que los gráficos que permiten seleccionar la correcta viscosidad para un rodamiento, se basan sobre un índice de viscosidad 95.

Consistencia

La consistencia es el grado de rigidez de una grasa. Se clasifica de acuerdo a la escala del Instituto Nacional de Grasas Lubricantes de los Estados Unidos (NLGI), por grados de consistencia. La medición de la consistencia se realiza mediante un cono impulsado por un peso específico, el cual penetra en la grasa durante 5 segundos. La profundidad de penetración se expresa en unidades de 1/10 [mm]. (Ver figura 12).

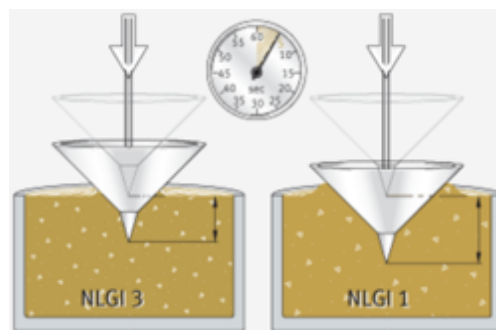


Figura 1.22 Medición de consistencia.

La Tabla 1.6 indica los grados de consistencia empleados en rodamientos, los que van desde 0 hasta el grado 4, a mayor grado menor es la consistencia de la grasa. Cuanto más blanda es una grasa, la penetración será mayor y el índice NLGI menor.

Número de Consistencia	0	1	2	3	4
Consistencia(1) 1/10 mm	355~385	310~340	265~295	220~250	175~205
Condiciones de Trabajo (Aplicación)	-Para engrase centralizado -Cuando es probable la corrosión por arrastre	-Para engrase centralizado -Cuando es probable la corrosión por arrastre -Para bajas temperaturas	-Para Uso General -Para los rodamientos de bolas sellados	-Para Uso General -Para los rodamientos de bolas sellados -Para altas temperaturas	-Para altas temperaturas -Para sellados de grasa

Tabla 1.6 Grado NLGI de consistencia y sus aplicaciones respectivas.

(Rodamientos NSK, 2009)

La consistencia no debe experimentar cambios en el rango de temperaturas especificado después de su trabajo mecánico, ya que si una grasa se endurece a bajas temperaturas puede restringir o impedir la rotación del rodamiento.

Los jabones metálicos utilizados de los espesantes son de consistencia 1,2 o 3; siendo el grado 2 el más común, sin embargo, en aplicaciones especiales donde las temperaturas son bajas, se prefieren grasas con una menor consistencia.

Temperatura de trabajo

Es importante seleccionar una grasa que admita las temperaturas adecuadas según sea la aplicación. A altas temperaturas muchas grasas se ablandan, y contrariamente cuando las temperaturas son bajas, las grasas se vuelven rígidas que fallan en la misión de lubricar.

En el caso de las grasas con aceite base mineral, las temperaturas admisibles van desde -30° a 110°C. No obstante, el tipo de espesante juega un papel importante en el rango de temperaturas. Por otro lado, una grasa con aceite base sintético tiene un mejor rendimiento, con temperaturas admisibles entre -50° a 150° C.

Cabe destacar, que este rango es en general para rodamientos y el mercado ofrece distintos tipos de grasas según sean las condiciones de trabajo. Existen grasas para uso general, para bajas, medias y altas temperaturas; y también con aditivos específicos según sea la aplicación.

Miscibilidad

Si es necesario cambiar de una grasa a otra, es preciso tener en cuenta la miscibilidad o capacidad para mezclar las grasas sin efectos negativos. Cuando se mezclan grasas incompatibles, la consistencia puede cambiar drásticamente y se pueden producir daños en el rodamiento, debidos, por ejemplo, a fugas graves.

Las grasas que tienen el mismo espesante y aceite base similares, generalmente se pueden mezclar sin ninguna consecuencia perjudicial.

Protección contra la corrosión

La grasa debe proteger al rodamiento contra la corrosión, y no debe ser lavada de la disposición de rodamientos en el caso de penetración de agua. El tipo de espesante únicamente determina la resistencia al agua: las grasas de complejo de litio, de complejo de calcio y de poliurea suelen ofrecer una muy buena resistencia. El tipo de antioxidante determina principalmente las propiedades inhibidoras del óxido de las grasas. A velocidades muy bajas, un llenado completo de grasas aumenta la protección contra la corrosión y previene la entrada de agua.

Factor de velocidad “A”

La viscosidad del aceite base también determina la velocidad máxima recomendada a la que se puede utilizar una grasa en rodamientos. La velocidad de giro permisible dependerá principalmente de la naturaleza del aceite base y del espesante. Este factor está determinado por la siguiente formula:

$$A = n * d_m$$

donde:

A: factor de velocidad

n: velocidad de giro, rpm.

d_m : diámetro medio del rodamiento, equivalente a $0.5 (d+D)$, mm.

Estabilidad Mecánica

Gran parte de las grasas tienden a ablandarse ligeramente durante un trabajo pesado, y luego recuperan poco a poco su consistencia. El trabajo mecánico puede descomponer la estructura de una grasa y cambiar su consistencia.

La estabilidad mecánica de una grasa, es la capacidad para resistir cambios en su consistencia durante el trabajo, sin perjudicar la correcta lubricación. Esta propiedad está estrechamente relacionada con el espesante de una grasa lubricante.

Punto de Goteo

El punto de goteo de una grasa lubricante, corresponde a la descomposición de su estructura cuando la grasa comienza a derretirse al superar una temperatura específica. Es decir, la temperatura a la cual se produce la licuación se llama punto de goteo. Cuando la grasa se enfría, se endurece gradualmente, perdiendo sus cualidades lubricantes.

Por lo tanto, el punto de goteo es una referencia que indica la temperatura a la cual puede ser utilizada la grasa, aunque hay muchos otros factores que se deben tener en cuenta (tipo de espesante y aceite base). La grasa no debe ser trabajada a la temperatura de su punto de goteo, sino que, por debajo de éste, entre 20 a 40°C.

Selección de la grasa adecuada

La correcta elección de una grasa lubricante depende de las condiciones de funcionamiento:

- Temperatura.
- Carga de presión.
- Velocidad de rotación (factor de velocidad).
- Agua y humedad.

La Tabla 1.7 permite conocer los distintos tipos de grasas lubricantes que se utilizan en rodamientos, además señala las respectivas propiedades.

Tabla 1.7 Principales propiedades de grasas lubricantes.

Nombre (Nombre popular) Espesante Aceite base	Grasa de Litio			Grasa de Sodio (Grasa de Fibra)	Grasa de Calcio (Grasa de Copa)	Grasa de Base Mixta	Grasa de Base Compleja (Grasa Compleja)
	Jabón de Litio			Jabón Na	Jabón Ca	Jabón Na + Ca, Jabón Li + Ca, etc.	Jabón Complejo de Ca, Jabón Complejo de Al, Jabón Complejo de Li, etc.
	Aceite Mineral	Aceite Diéster, Aceite de Éster Poliatómico	Aceite de Silicona	Aceite Mineral	Aceite Mineral	Aceite Mineral	Aceite Mineral
Propiedades							
Punto de goteo, °C	170~195	170~195	200~210	170~210	70~90	160~190	180~300
Temperaturas de Trabajo, °C	-20~+110	-50~+130	-50~+160	-20~+130	-20~+60	-20~+80	-20~+130
Velocidad de Trabajo, % ⁽¹⁾	70	100	60	70	40	70	70
Estabilidad Mecánica	Buena	Buena	Buena	Buena	Pobre	Buena	Buena
Resistencia al Agua	Buena	Buena	Buena	Pobre	Buena	Pobre para el Jabón de Na	Buena
Prevención a la Oxidación	Buena	Buena	Pobre	Pobre a Buena	Buena	Aceptable a Buena	Aceptable a Buena
Observaciones	Grasa general para uso en numerosas aplicaciones	Buenas características para bajo par y temperatura. A menudo se usa en rodamientos para pequeños motores e instrumentos. Prestar atención al óxido provocado por el barniz de aislamiento.	Principalmente para aplicaciones de elevada temp. No adecuado para rodam. sometidos a elevadas velocidades o cargas o en aquellos con muchas áreas de deslizamiento (rodamientos de rodillos, etc.)	Hay tipos de fibras cortas y largas. La grasa con fibras largas es adecuada para altas velocidades. Prestar atención a las altas temperaturas y al agua.	Las grasas para resistir altas presiones que contienen aceite mineral de alta viscosidad y aditivos para presiones extremas (Jabón de Pb, etc.) ofrecen una alta resistencia a la presión.	A menudo se usa para rodamientos de rodillos y para rodamientos de grandes bolas.	Adecuada para elevadas presiones mecánicamente estable

- (1) Los valores listados son los porcentajes de las velocidades límite indicadas en las tablas de los rodamientos.

(Rodamientos NSK, 2009)

Cantidad de grasa inicial

La cantidad de grasa inicial a suministrar a un rodamiento y su alojamiento, dependerá del diseño del mismo, la velocidad de giro, temperatura ambiente y de las características de la grasa.

Como norma general para rodamientos normales (no de alta precisión), los fabricantes de rodamientos recomiendan lo siguiente:

Se debe introducir grasa suficiente en el rodamiento, incluyendo el lado guía de la jaula. El espacio disponible dentro del alojamiento para la grasa depende de la velocidad:

1. Cuando la velocidad sea menor del 50% de la velocidad límite:

Llenar con grasa de $1/2$ a $2/3$ del espacio libre.

2. Cuando la velocidad sea mayor del 50% de la velocidad límite:

Llenar con grasa $1/3$ a $1/2$ del espacio libre.

En síntesis, a medida que la velocidad de rotación aumenta, la cantidad de grasa en el alojamiento del rodamiento debe ser menor. Si la cantidad es excesiva a altas velocidades, el calor generado aumentará considerablemente; dañando la película lubricante.

Cantidad de grasa de reemplazo

La cantidad de grasa nueva debe ser adecuada al tamaño del rodamiento, una referencia en la cantidad de grasa a utilizar para re lubricar el rodamiento es la siguiente:

$$G = 0,005 * D * B$$

donde:

G: cantidad de grasa, en gramos.

D: diámetro exterior del rodamiento, en milímetros.

B: ancho del rodamiento, en milímetros. (utilizar H, si es rodamiento axial)

Intervalos de rellenado

Aun utilizando grasa de alta calidad, con el tiempo las propiedades de la grasa se van deteriorando. Por consiguiente, para los diferentes diseños de rodamientos se establecen distintos intervalos de rellenado.

Los siguientes gráficos permiten conocer los correctos intervalos de rellenado. Sin embargo, éstos son aplicables cuando la temperatura de funcionamiento es menor a 70°C (el intervalo de tiempo debe ser reducido a la mitad por cada 15°C de aumento en la temperatura). Además, están formulados para grasas de buena calidad con jabón de litio y aceite base mineral (que corresponde al tipo más común).

El Figura 1.3 indica los intervalos de rellenado (en horas) para los rodamientos radiales de bolas y para los rodamientos de rodillos cilíndricos, en función de la velocidad de giro y de su diámetro interior.

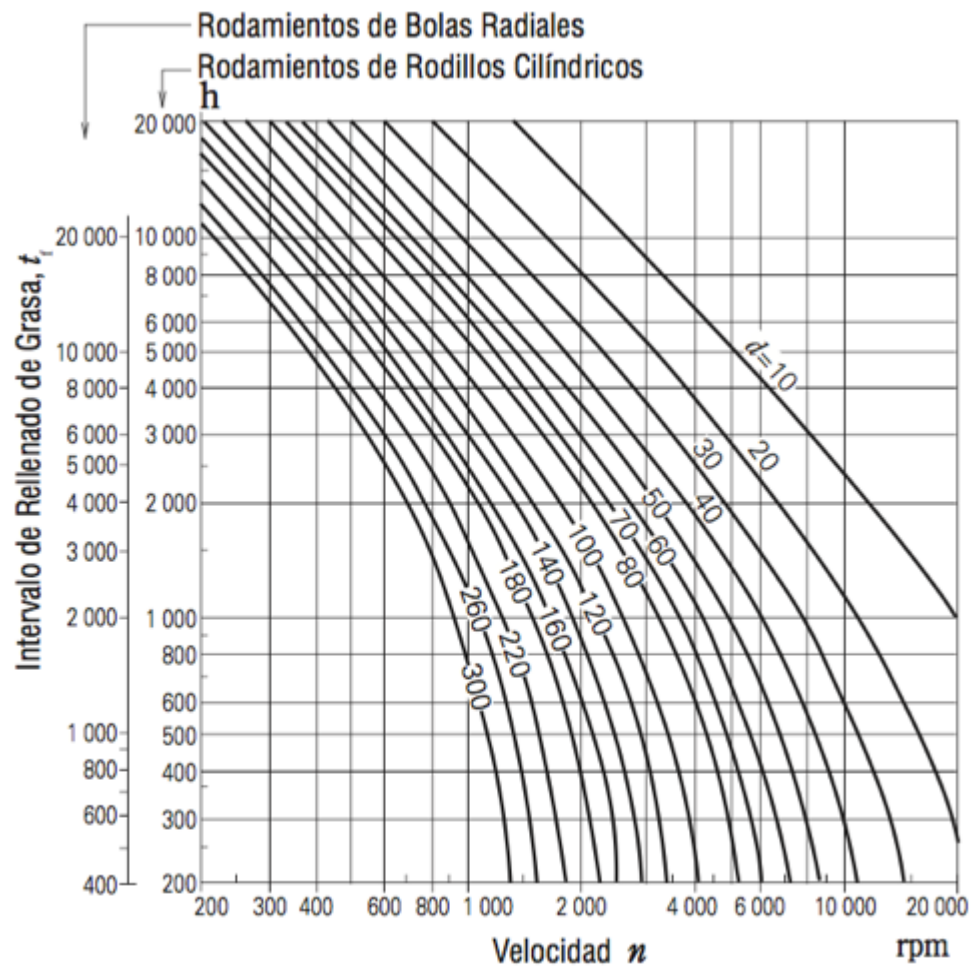


Figura 1.23 Intervalos de relleno para rodamientos de bolas y de rodillos cilíndricos.

(Rodamientos NSK, 2009)

El Figura 1.24 indica los intervalos de relleno (en horas) para los rodamientos de rodillos cónicos y esféricos, en función de la velocidad de giro y de su diámetro interior.

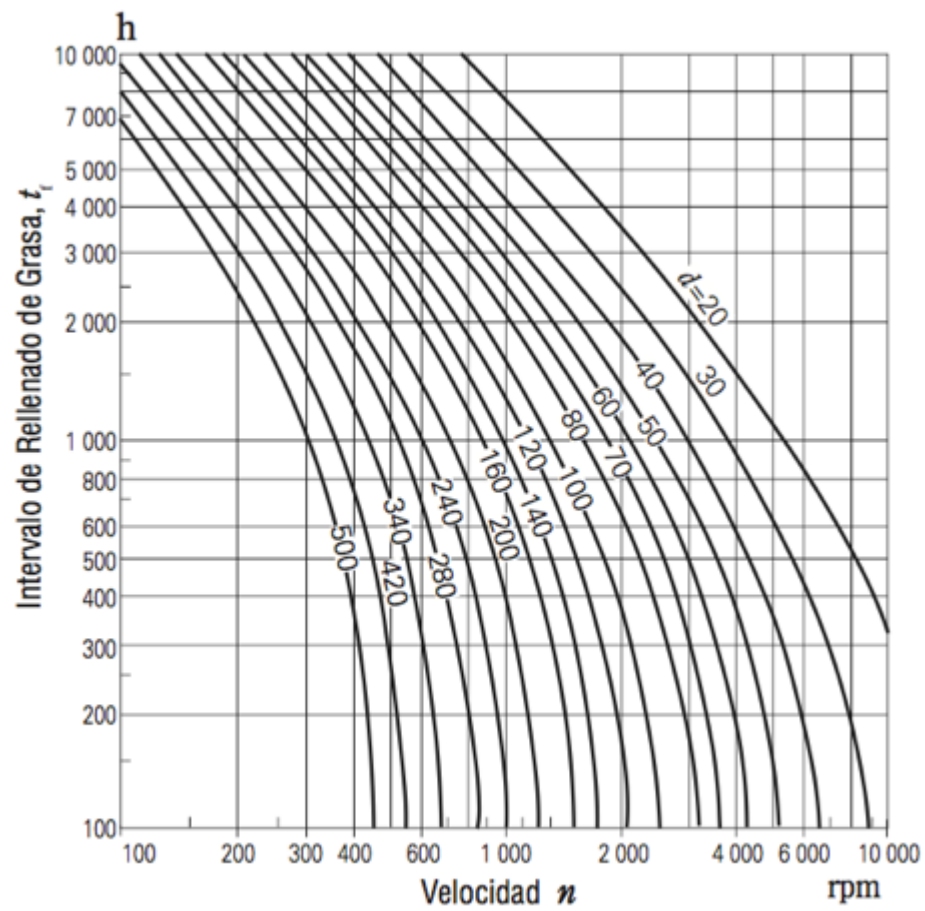


Figura 1.24 Intervalos de rellenado para rodamientos de rodillos cilíndricos y esféricos.

(Rodamientos NSK, 2009)

1.2.1.2 Lubricación por aceite

Cuando una grasa lubricante no es adecuada para un rodamiento, se debe emplear aceite lubricante. La razón más frecuente para utilizar lubricación por aceite, es una temperatura de funcionamiento alta. Uno de los factores que conducen a una alta temperatura, es una temperatura alta del ambiente; otro factor es el aumento de la temperatura a causa de una elevada fricción debido a la alta velocidad o fuertes cargas. También se emplea lubricación por aceite cuando los intervalos de lubricación con grasa son muy frecuentes. Por otro lado, si un rodamiento está montado junto a ruedas dentadas u otros componentes de máquinas lubricados con aceite, se lubricarán generalmente con el mismo aceite.

Composición

Los aceites lubricantes están compuestos por:

- Aceite base: 95-99%.
- Aditivos: 1-5%.

1.2.1.2.1 Tipos de aceites

Aceites Minerales

En la mayoría de los casos, los aceites minerales de alta calidad son los lubricantes más adecuados para los rodamientos. Deben ser puros, libres de compuestos inestables como nitrógeno, oxígeno, compuestos de azufre y ácidos. Si no la vida de servicio del rodamiento será menor a la prevista.

Los aceites más comunes hoy en día, son los aceites parafínicos altamente refinados.

Aceites Sintéticos

Los aceites sintéticos sólo son importantes para la lubricación de rodamientos en casos especiales. Principalmente utilizados cuando las temperaturas son sobre 90°C, o a temperaturas muy bajas. Además, poseen mayor estabilidad mecánica en el uso, menor fricción interna, mayor fluidez a temperaturas ambiente y bajas, y garantizan una película lubricante más resistente en condiciones críticas de cargas.

Las familias de aceites sintéticos más comunes son:

- **Diésteres:** Poseen poca viscosidad y se usan para lubricar rodamientos de instrumentos. Tienen excelentes propiedades a temperaturas de -60° a +120°C, y con los aditivos adecuados, ofrecen buena protección contra la corrosión.
- **Aceites de silicona:** También se emplean en lubricación de instrumentos y otros rodamientos ligeramente cargados. Su gama adecuada de temperaturas se ubica entre -70 y +200°C. Su capacidad de absorber cargas es baja.
- **Aceites fluorados:** Tienen buena estabilidad a la oxidación y buenas propiedades EP, y son apropiados para temperaturas de hasta +250°C.
- **Poliglicoles:** Son apropiados para su aplicación a temperaturas bajas y elevadas (-50 a +200°C). Su alta resistencia a la oxidación permite elevar su duración, aumentando los intervalos de cambio.

- **PAOs:** El principal aceite lubricante sintético es la PAO (poli-alfa-olefina), los cuales poseen un amplio rango de temperaturas de operación, buena resistencia a la corrosión y oxidación.

1.2.1.2.2 Aditivos

Los aceites lubricantes, tanto minerales como sintéticos, pueden incluir aditivos que mejoran sus propiedades. Los aditivos más importantes y necesarios, que aumentan el rendimiento de un aceite lubricante en aplicación de rodamientos, son los siguientes:

Antioxidantes

Los aceites expuestos a altas temperaturas y en contacto con el aire se oxidan, formando compuestos químicos indeseados, que pueden incrementar la viscosidad del aceite y causar corrosión. Estos aditivos mejoran la estabilidad a la oxidación del aceite entre 10 a 150 veces.

Protectores contra corrosión

Existen dos tipos de aditivos que ofrecen protección contra la corrosión: aditivos solubles en agua (por ejemplo: nítrico sódico), y aditivos solubles en aceite.

Anti-espumantes

Si el aceite forma espuma, su capacidad de formación de película lubricantes decrecerá, disminuyendo la capacidad de carga. El efecto anti-espumante, es decir, la acción de humedecer la espuma, se obtiene añadiendo pequeñas cantidades de silicona fluida. Los aditivos que disminuyen la espuma hacen que las burbujas se destruyan cuando alcanzan la superficie del baño de aceite.

Anti-desgaste

Se utilizan para reducir el contacto metálico cuando la película lubricante se rompe. Se emplean distintos compuestos químicos, que forman una capa superficial con buenas propiedades que dan lugar a una mayor presión superficial de la película de aceite.

Extra Presión EP

Estos aditivos están compuestos por fósforo, cloro y azufre. Cuando las crestas de las superficies metálicas están en contacto, la temperatura que se alcanza es muy alta, de tal manera que los compuestos EP reaccionan formando un compuesto químico con las superficies metálicas. Así, el resultado final es una superficie más suave, menores tensiones de contacto y una mayor vida útil.

1.2.1.2.3 Tipos de rodamientos y correctas viscosidades

Los diversos tipos de rodamientos existentes, requieren distintos grados de viscosidad, dado que sus geometrías y elementos rodantes varían entre sí. Además, cada tipo de rodamiento posee un coeficiente de fricción distinto, y un área de contacto diferente entre pista de rodadura y elemento rodante.

La Tabla 1.8 muestra los valores de viscosidad recomendados (a temperatura de servicio) para cada tipo de rodamiento, en $[\text{mm}^2/\text{s}]$.

Tabla 1.8 Viscosidad adecuada a temperatura de funcionamiento para cada tipo de rodamientos.

Tipo de rodamiento	Viscosidad Adecuada a Temperatura de Funcionamiento
Rodamientos de Bolas y Rodamientos de Rodillos Cilíndricos	Superior a 13 mm ² /s
Rodamientos de Rodillos Cónicos y Rodamientos de Rodillos Esféricos	Superior a 20 mm ² /s
Rodamientos de Rodillos Esféricos de Empuje	Superior a 32 mm ² /s

(Rodamientos NSK, 2009)

Guía referencial selección de aceites lubricantes

La tabla 8 entrega una referencia respecto a los grados de viscosidad que debe poseer el aceite lubricante, para determinados rangos de temperatura de funcionamiento. Además, clasifica en función de la velocidad de giro y en función de la carga aplicada; si es alta o normal.

Tabla 1.9 Guía referencia grado viscosidad aceite lubricante.

Temperatura Operativa	Velocidad	Carga ligera o normal	Carga alta o de choque
-30 a 0°C	Menor que la velocidad límite	ISO VG 15, 22, 32 (aceite de refrigeración para máquinas)	—
0~50°C	Menor que el 50% de la velocidad límite Del 50 al 100% de la velocidad límite Mayor que la velocidad límite	ISO VG 32, 46, 68 (aceite para rodamientos, aceite para turbinas) ISO VG 15, 22, 32 (aceite para rodamientos, aceite para turbinas) ISO VG 10, 15, 22 (aceite para rodamientos)	ISO VG 46, 68, 100 (aceite para rodamientos, aceite para turbinas) ISO VG 22, 32, 46 (aceite para rodamientos, aceite para turbinas) —
50~80°C	Menor que el 50% de la velocidad límite Del 50 al 100% de la velocidad límite Mayor que la velocidad límite	ISO VG 100, 150, 220 (aceite para rodamientos) ISO VG 46, 68, 100 (aceite para rodamientos, aceite para turbinas) ISO VG 32, 46, 68 (aceite para rodamientos, aceite para turbinas)	ISO VG 150, 220, 320 (aceite para rodamientos) ISO VG 68, 100, 150 (aceite para rodamientos, aceite para turbinas) —
80~110°C	Menor que el 50% de la velocidad límite Del 50 al 100% de la velocidad límite Mayor que la velocidad límite	ISO VG 320, 460 (aceite para rodamientos) ISO VG 150, 220 (aceite para rodamientos) ISO VG 68, 100 (aceite para rodamientos, aceite para turbinas)	ISO VG 460, 680 (aceite para rodamientos, aceite para engranajes) ISO VG 220, 320 (aceite para rodamientos) —

(Rodamientos NSK, 2009)

Determinación de la viscosidad mínima del aceite base

La eficacia del lubricante viene determinada fundamentalmente por el grado de separación entre las superficies de contacto de rodadura. Para que se forme la película lubricante adecuada, se requiere una viscosidad mínima cuando la aplicación alcance su temperatura de funcionamiento normal.

Mediante el uso de los siguientes gráficos es posible obtener la viscosidad mínima requerida para una correcta lubricación, además de entregar el valor de referencia de la viscosidad correspondiente a una temperatura de 40°C internacionalmente normalizada (viscosidad ISO VG). Los gráficos son válidos para aceites minerales con un índice de viscosidad 95 (IV 95).

Para calcular la viscosidad mínima requerida del aceite base se utilizan los siguientes parámetros:

d_m : 0.5 (d+D) diámetro medio, en milímetros.

n : velocidad de giro, en revoluciones por minuto.

T : temperatura del rodamiento en condiciones estándar, en grados Celsius.

ν : viscosidad cinemática bajo condiciones de funcionamiento estándar.

ν_1 : viscosidad cinemática mínima requerida en función del diámetro del rodamiento y de la viscosidad.

Procedimiento para obtener la viscosidad ν :

- A. Calcular el diámetro medio del rodamiento, que corresponde a la media aritmética entre el diámetro exterior e interior del rodamiento.
- B. En el Figura 1.25 ubicar en el eje de abscisas el valor del diámetro medio y trazar una línea vertical hasta llegar a la diagonal de la velocidad de giro.
- C. Proyectar una línea horizontal hacia el eje de ordenadas desde punto encontrado en B, dicho punto será la viscosidad requerida ν_1 . Esta es la viscosidad requerida para lograr una lubricación apropiada a la temperatura de funcionamiento.
- D. Utilizando el Figura 1.26 y el valor encontrado de la viscosidad ν_1 , trazar una línea horizontal hacia la derecha del eje de ordenadas en el valor de la viscosidad ν_1 .

- E. Ubicar la temperatura de trabajo en el eje de abscisas y trazar una línea vertical que intersecte con la línea horizontal de la viscosidad ν_1 .
- F. Finalmente la viscosidad de referencia a 40°C es la intersección del punto obtenido en E con la curva superior más cercana de viscosidades de referencia ν (ISO VG).

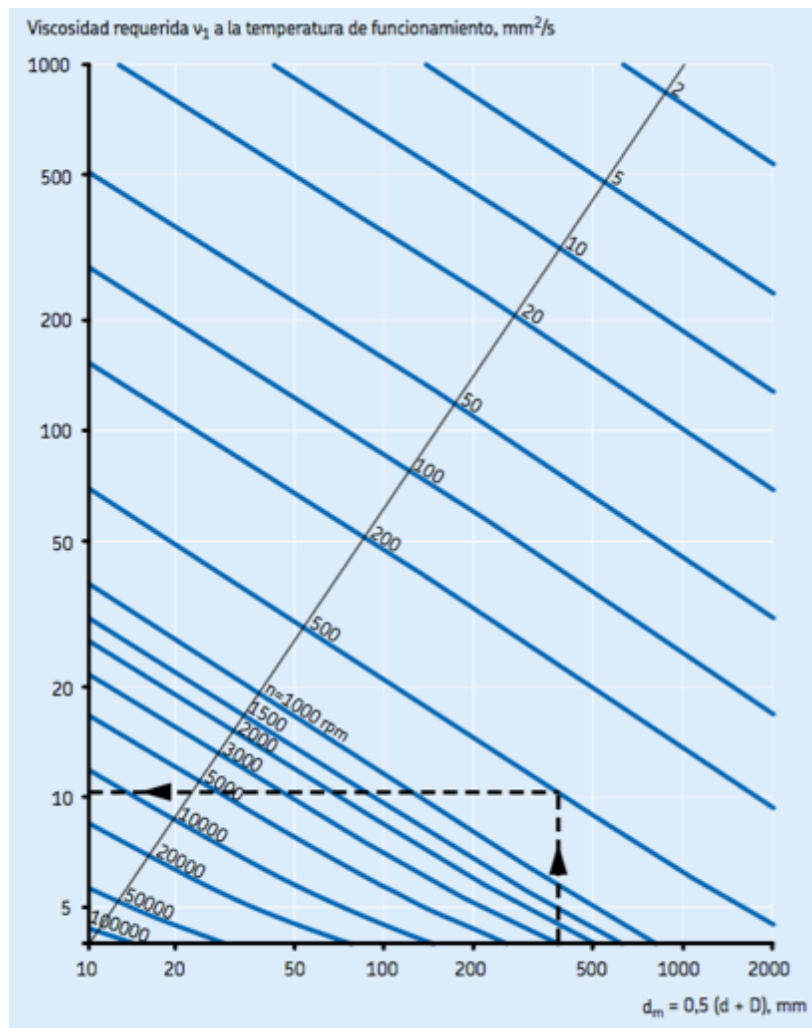


Figura 1.25 Estimación de la viscosidad cinemática mínima ν_1 a la temperatura de funcionamiento.

(SKF, Catalogo General, 2006)

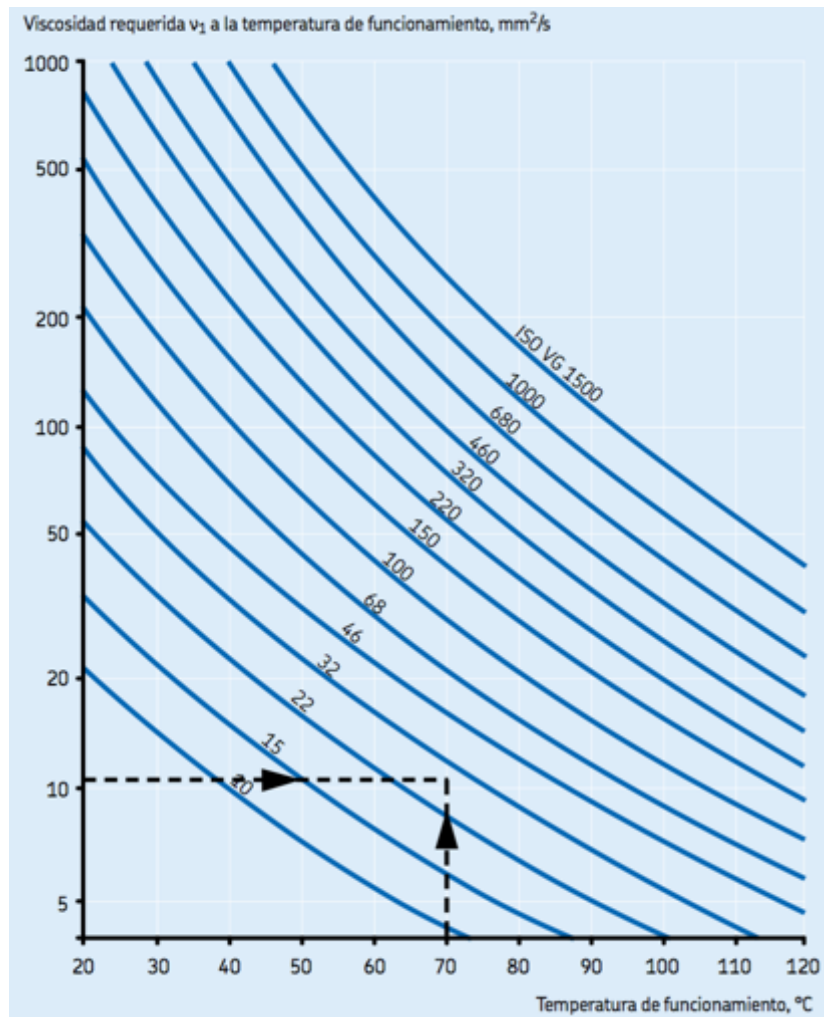


Figura 1.26 Conversión a la viscosidad cinemática ν a la temperatura de referencia de 40°C.

(SKF, Catalogo General, 2006)

Regímenes de lubricación

No siempre la película lubricante será la óptima, el comportamiento respecto al rozamiento y al desgaste del rodamiento, así como la duración a la fatiga que pueda alcanzar, dependen del régimen de lubricación.

La Figura 1.27 muestra la película lubricante que se forma entre las micro crestas del acero, entre el elemento rodante y la pista de rodadura.

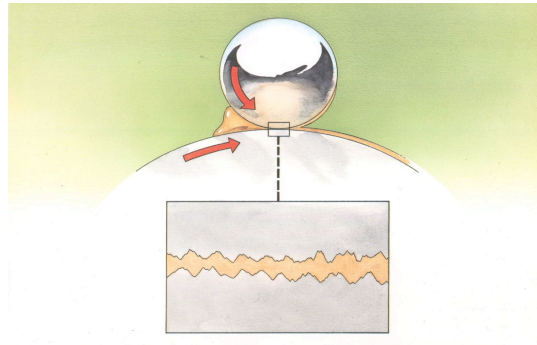


Figura 1.27 Película lubricante.

En los rodamientos se distinguen principalmente 3 regímenes de lubricación:

- a) **Lubricación hidrodinámica o total:** Las superficies de contacto de los elementos en movimiento relativo están separadas totalmente o casi totalmente por una película lubricante. Existe rozamiento líquido prácticamente puro. Éste es el régimen que se debe alcanzar para un correcto funcionamiento del rodamiento. Ver Figura 1.28.



a) Lubricación total
Las superficies están separadas totalmente por una película portante de aceite



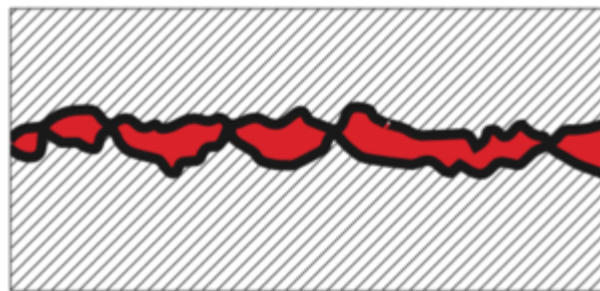
Capa límite



Película lubricante

Figura 1.28 Régimen de lubricación total

- b) **Lubricación hidrodinámica parcial:** Debido a un espesor insuficiente de la película lubricante aparecen contactos metálicos en algunas zonas. Se origina un rozamiento mixto. Ver Figura 1.29.

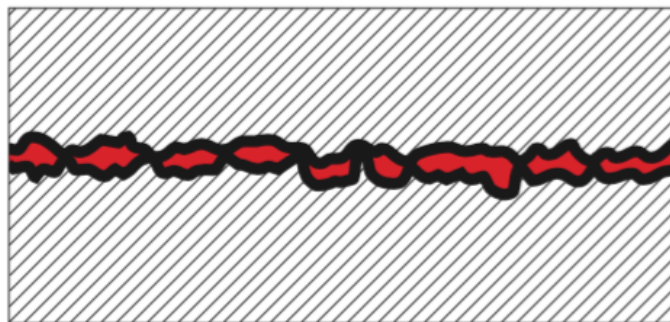


b) Lubricación parcial
Tanto la película de aceite portante como la capa límite tienen importancia



Figura 1.29 Lubricación hidrodinámica parcial.

- c) **Lubricación límite:** Se produce cuando el espesor de la película lubricante es demasiado escaso para separar adecuadamente las superficies de contacto (ver Figura 1.30). Esta situación tiene lugar cuando la cantidad de lubricante es insuficiente, o cuando el movimiento relativo entre dos superficies es demasiado bajo para crear una película lubricante. Esta condición también se puede dar cuando la viscosidad del lubricante es demasiado baja, ya sea por una elevada temperatura o una baja viscosidad inicial del lubricante. Durante la lubricación parcial aparecen presiones y temperaturas muy elevadas en los puntos de contacto metálico, ya que las micro-crestas de las superficies de ambos elementos en movimiento relativo, se rozan y se pueden formar micro-soldaduras entre los aceros. Si el lubricante posee aditivos apropiados, se originan reacciones entre los aditivos y las superficies metálicas, los que permiten la formación de una capa límite que mejora la condición de lubricación.



c) Lubricación límite
El comportamiento depende en primera
línea de las cualidades de la capa límite



Figura 1.30 Lubricación límite

Factor Kappa: viscosidad relativa

Para que se forme una capa lubricante adecuada, el lubricante debe tener una viscosidad mínima cuando la aplicación alcance su temperatura de funcionamiento normal. Así, el factor Kappa garantiza la correcta formación de la película lubricante tomando en cuenta la temperatura de trabajo, a la cual operará el rodamiento.

El factor Kappa (κ) es la relación entre la viscosidad real del lubricante a la temperatura de operación ν , y la viscosidad ν_1 necesaria para una lubricación adecuada.

$$\kappa = \frac{\nu}{\nu_1}$$

donde:

κ : factor kappa, relación de viscosidad.

ν : viscosidad cinemática real de funcionamiento del lubricante, [mm²/s].

ν_1 : viscosidad cinemática nominal en función del diámetro medio del rodamiento y la velocidad de giro, [mm²/s].

El Figura 1.31 permite observar el comportamiento de la vida útil de los rodamientos, para distintos valores del factor Kappa.

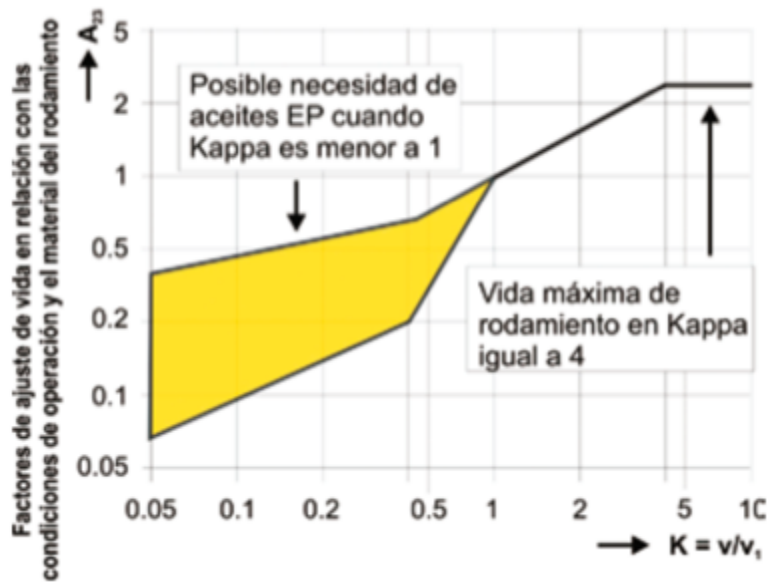


Figura 1.31 Relación entre el factor de viscosidad Kappa y la vida del rodamiento.

(Kappa)

El factor A_{23} permite ajustar la vida útil final del rodamiento, en función del material del rodamiento y la lubricación.

Cuando el factor Kappa es menor que 1; es decir, cuando la viscosidad a la temperatura de operación es menor que la viscosidad requerida por el rodamiento, se opera a un régimen donde las superficies no están separadas por una película lubricante, por lo que habrá contacto metal-metal. De este modo, el factor de incremento de la vida esperada del rodamiento está por debajo del valor 1, lo que implica un deterioro prematuro de los rodamientos.

Para mejorar la operación de rodamientos cuando el factor Kappa es menor a 1, es decir, cuando el rodamiento se encuentra en el régimen de lubricación límite, se deben

utilizar aditivos Extra Presión (EP) que brinden una protección adecuada en los puntos de contacto metal-metal.

A medida que el factor Kappa se acerca al valor de 1, se observa que el factor de incremento de vida se acerca al valor de la tasa de vida esperada, en este caso 1. Cuando el valor del factor Kappa sobrepasa el valor de 1, el valor de la vida esperada del rodamiento se extiende, inclusive hasta en una proporción de dos veces y media.

No es recomendable utilizar aditivos EP cuando el factor Kappa es mayor a 1, dado que pueden tener un efecto contrario por los compuestos químicos que intervienen en la formulación final del lubricante. Los aditivos EP se requieren para prevenir el desgaste entre la pista y el elemento rodante, cuando se presentan condiciones de operación que involucran altas cargas y cargas de choque, velocidades muy bajas y valores de factor Kappa menor a 1.

Además, del gráfico se observa que cuando el valor del factor Kappa es cercano a 4, la vida del rodamiento alcanza el máximo valor en relación a la vida esperada del rodamiento.

Cuando los valores del factor Kappa son mayores a 4, no resulta beneficioso para la vida del rodamiento, ya que se pueden producir incrementos en la fricción fluida, en la viscosidad, y las bolas o rodillos comenzarán a deslizar en vez de rodar. Asimismo, se generará más calor, fricción y consumo de energía dado que el lubricante posee una mayor viscosidad que la requerida.

En resumen, para una correcta lubricación se debe utilizar un factor Kappa que posea valores entre $1 < \kappa < 2.5$

Curva de Stribeck

La curva de Stribeck, aplicada a rodamientos entrega una visión general de la variación del coeficiente de rozamiento en los distintos regímenes de lubricación, es decir, contrasta el coeficiente de rozamiento en función de la velocidad de rotación del rodamiento, la carga aplicada y la viscosidad del lubricante.

El Figura 1.32 muestra que a medida que la velocidad de rotación es menor y/o las cargas son elevadas (sección 1), el coeficiente de fricción es muy elevado debido a que la película lubricante es considerablemente fina ($h \rightarrow 0$), es decir, predomina la lubricación por capa límite.

A medida que la velocidad del rodamiento aumenta y/o la carga disminuye, el régimen de lubricación comienza a ser parcialmente hidrodinámico (sección 2), por lo que el coeficiente de rozamiento disminuye y el espesor de película lubricante aumenta, acercándose al espesor de rugosidad del acero ($h \cong R$).

Se comienza a desarrollar un efecto de cuña en el lubricante, que eleva el cuerpo rodante de la pista de rodadura. Sin embargo, éste efecto no se alcanza a desarrollar por completo, por lo que los cuerpos quedan parcialmente en contacto metálico.

Estos dos regímenes son considerados inestables, ya que un aumento de la temperatura reduce la viscosidad y aumenta la fricción, desplazando el régimen de lubricación a la izquierda del grafico 1. Zona donde se genera mayor desgaste.

Además de los regímenes anteriormente explicados en el Figura 1.32, también existe un régimen intermedio, llamado lubricación Elastohidrodinámica (sección 3). Esta condición se obtiene en superficies de contacto muy pequeñas, pero fuertemente cargadas (elásticas), esto es, superficies que cambian su forma bajo una carga elevada, y vuelven a su forma original cuando la carga es retirada.

En rodamientos, cuando la bola o rodillo rueda por las pistas, se alcanzan presiones muy altas (4600 MPa) en los puntos de contacto, que incrementan drásticamente la viscosidad del lubricante y deforman ambas superficies reduciendo la rugosidad. Una vez que el elemento rodante ha pasado por el punto de contacto, la viscosidad se reduce nuevamente.

Finalmente, la sección 4 corresponde al régimen hidrodinámico, es aquí donde se produce el efecto deseado de cuña entre lubricante y cuerpo rodante. Este efecto genera una contrapresión que eleva el cuerpo rodante de la pista de rodadura; generando un espesor de película lubricante adecuado ($h \gg R$), evitando completamente el contacto metálico y previniendo el desgaste prematuro entre los componentes.

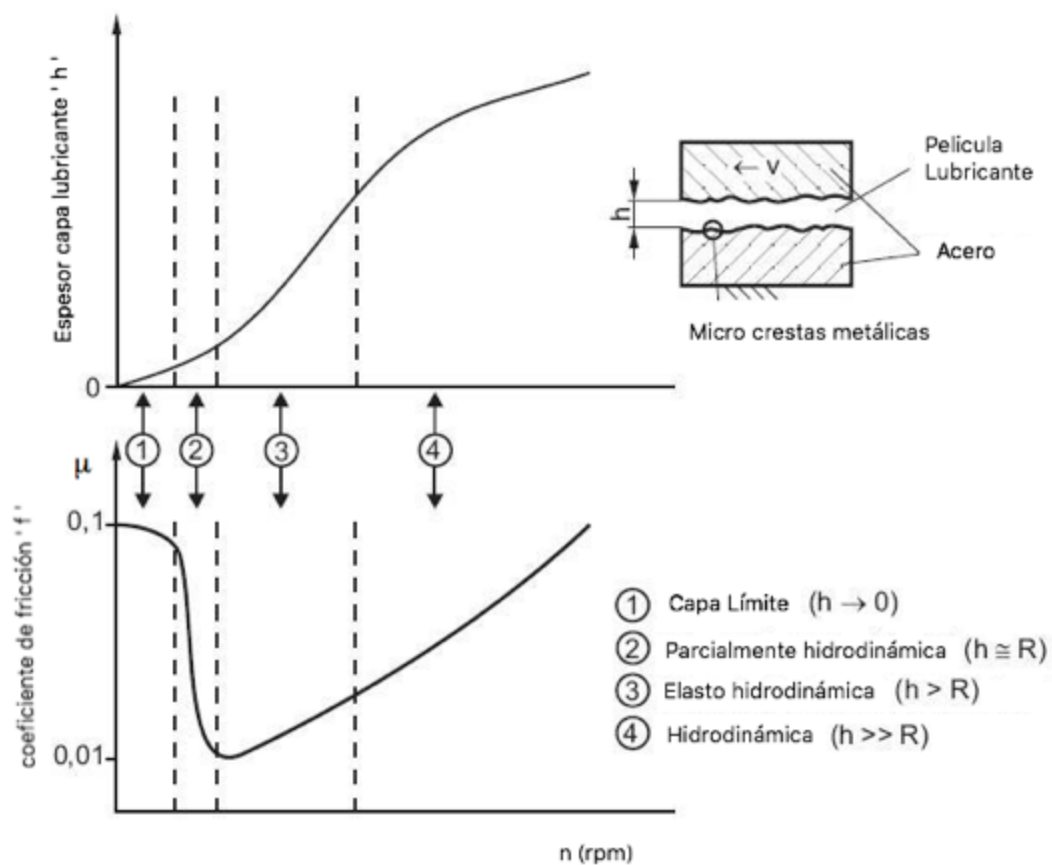


Figura 1.32 Curva de Stribeck

(Folleto SKF, 1989)

1.2.1.2.4 Efecto de la temperatura

La temperatura más baja de funcionamiento de un aceite se determina por su composición. A temperaturas por sobre 90°C, los aceites minerales se oxidan rápidamente, formando depósitos sólidos (coke) sobre el rodamiento y causando severos daños. Por lo tanto, es recomendable para una adecuada lubricación a altas temperaturas, utilizar aceites sintéticos.

Como guía general, la duración de un aceite se suele especificar como 30 años a 30°C, 15 años a 40°C, etc. Esto implica, que su duración es reducida a la mitad por cada 10°C de incremento en la temperatura. ¡Esto corresponde a una duración de 3 meses a una temperatura de 100°C!

El gráfico 4 describe el comportamiento de la duración del aceite (en años) respecto al incremento en la temperatura.

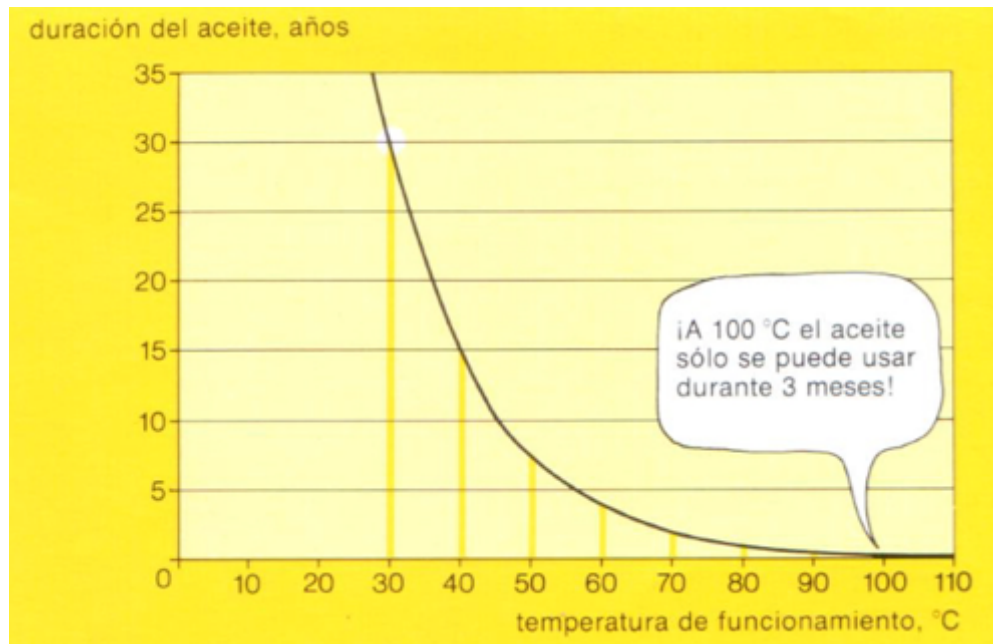


Figura 1.33 Duración del aceite respecto a un aumento en la temperatura.

(Folleto SKF, 1989)

1.2.1.3 Grasa sólida

1.2.1.3.1 ¿Qué es la grasa sólida?

La grasa sólida está constituida por un aceite saturado, el cual se aloja en matriz de polímero. Dicha matriz completa todo el vacío existente en el rodamiento, de éste modo se encapsulan juntos los elementos rodantes y la jaula.

La Figura 1.34 muestra un rodamiento de rodillos esféricos con grasa sólida en su interior.



Figura 1.34 Rodamiento con grasa sólida.

El polímero utilizado es una resina de Poliolefina, la cual tiene una estructura que posee millones de micro-poros, que mantienen el aceite lubricante de forma sólida en una sola disposición. Los poros son tan pequeños que mantienen retenido al aceite sólo por su propia capacidad de tensión superficial. El aceite representa un 70% del peso del total.

La Figura 1.35 muestra cómo se distribuye microscópicamente el aceite en la matriz polimérica, la escala utilizada es de 100 [µm]. La imagen muestra los poros que representan la poliolefina, y a su alrededor el aceite base.

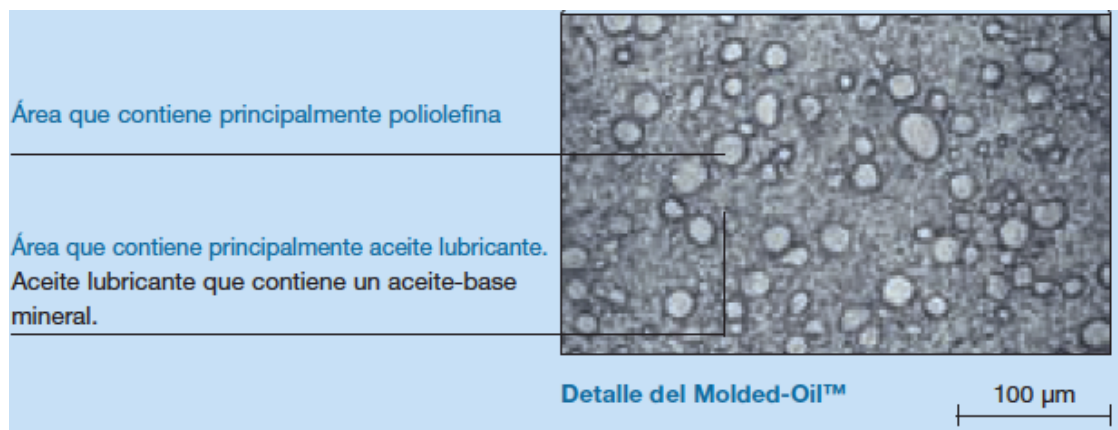


Figura 1.35 Vista microscópica grasa sólida.

(NSK , 2011)

La grasa sólida es introducida en el rodamiento, dejando un espacio muy pequeño entre elementos rodantes y las pistas de rodadura, permitiendo que los componentes del rodamiento puedan girar libremente. De esta forma el ingreso de contaminantes está muy restringido.

La lubricación ocurre cuando el aceite base se desprende poco a poco de la matriz polimérica, es decir, el rodamiento inicia su movimiento rotatorio, por consiguiente, aumenta su temperatura y el aceite disminuirá su viscosidad, fluyendo desde la matriz hacia el intersticio entre elementos rodantes y pistas de rodadura.

La Figura 1.36 muestra gráficamente cómo el aceite se va desprendiendo de la matriz polimérica en forma de micro burbujas, cuando el rodamiento inicia su movimiento. Cabe destacar que la grasa sólida forma una película lubricante permanente alrededor de los elementos rodantes, y a su vez sobre las pistas de rodadura.

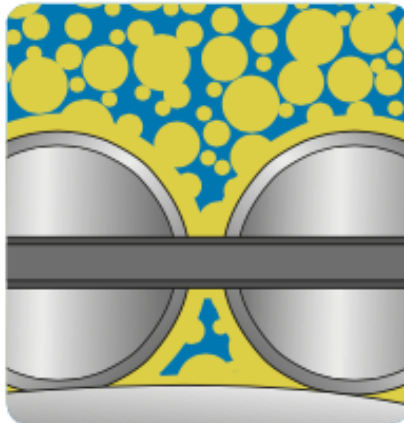


Figura 1.36 Micro burbujas de aceite lubricante.

1.2.1.3.2 ¿Cuándo utilizar grasa sólida?

En la mayoría de las aplicaciones estándar, la grasa o el aceite proveen una lubricación adecuada. Sin embargo, en casos donde existan rodamientos con difícil acceso para re-lubricación, la grasa sólida es adecuada, siendo una excelente solución. Además, es altamente efectiva en ambientes con altos niveles de contaminación. Así la grasa brinda dos soluciones en una, provee lubricante y actúa como un sello eficaz.

Áreas típicas donde es utilizada la grasa sólida:

- Ambientes con alta humedad y/o suciedad.
- Presencia de químicos agresivos.
- Ambientes de trabajo con bajas temperatura.
- Fuerzas centrifugas.
- Ejes verticales.
- Difícil acceso para re-lubricación.
- Movimientos oscilantes.
- Exigencia de alta limpieza.

1.2.1.3.3 Ventajas de la Grasa Sólida

a. Suministro permanente de lubricante

Cuando las pistas de rodadura se deslizan contra la grasa sólida, ésta se lubrica con una capa consistente de aceite. Luego de que el rodamiento comienza su movimiento rotatorio, la temperatura comienza a elevarse, permitiendo que el aceite base fluya desde la matriz polimérica hacia todo el rodamiento. Este flujo es posible, ya que la grasa sólida posee un coeficiente de expansión térmico mayor que la matriz polimérica.

Además, se debe recordar que la viscosidad disminuye con el aumento de la temperatura, lo cual favorece el flujo del lubricante.

b. Mayor cantidad de lubricante disponible

Un rodamiento con grasa sólida posee una mayor cantidad de aceite base que uno lubricado con grasa convencional, debido a que el rodamiento es llenado por completo con grasa sólida (ver Figura 1.34). Al contrario de un rodamiento con grasa convencional, que dependiendo de su velocidad de giro; si es alta velocidad, debe ser llenado con 1/3 de grasa; si es baja velocidad, debe ser llenado con 2/3 de grasa.

La Figura 1.37 muestra que la grasa sólida posee entre 2 a 4 veces más aceite que la grasa convencional para rodamientos, la cantidad varía en función del tipo de rodamiento.

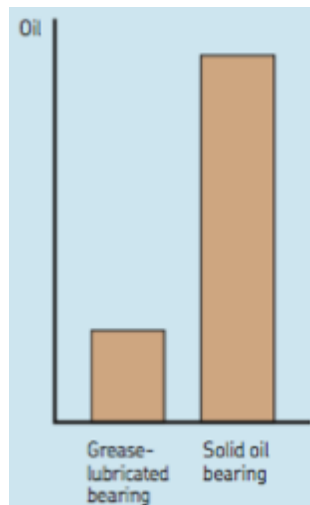


Figura 1.37 Comparativa cantidad de aceite base entre dos lubricantes.

(SKF, 1999)

c. Restricción al ingreso de contaminantes al rodamiento

De la misma forma, el rodamiento al estar lleno de grasa sólida, se dificulta enormemente para las partículas contaminantes el ingreso a las pistas de rodadura. Si la condición de trabajo es extremadamente contaminada, se recomienda rellenar el espacio libre que resta en el rodamiento con grasa convencional; agregando así una capa de protección extra al rodamiento.

d. Elimina la necesidad de re-lubricación

Nuevamente como la grasa sólida posee una mayor cantidad de aceite, no es necesaria la re-lubricación. El aceite se desprende de la matriz polimérica con el aumento de la temperatura y de la fricción, al finalizarse el movimiento rotativo, el aceite vuelve a adherirse a los poros del polímero; solidificándose.

e. No se requieren sellos

Los sellos cumplen la función de retener el lubricante al interior de los rodamientos y de mantener los contaminantes fuera de éstos. Como se mencionó anteriormente, el rodamiento al estar lleno de grasa sólida, no requiere de sellos, incluso en ejes verticales. Eventualmente se pueden encontrar soportes de rodamientos de grasa sólida que incluyan sellos, sin embargo, son incluidos para brindar una protección extra en ambientes altamente contaminados.

f. Resistencia a los químicos

El aceite base junto con la matriz; constituida por una resina poliolefica, soporta una mayor cantidad de químicos en comparación a la grasa convencional o el aceite. No obstante, los solventes orgánicos como el Kerosene, pueden remover el aceite base de la matriz.

g. Fuerzas Centrifugas

Una gran ventaja sobre el aceite o la grasa convencional, es que la grasa sólida pasa a ser una parte integral del rodamiento, la cual no puede ser expulsada de éste; inclusive cuando las fuerzas centrifugas son altas.

1.2.1.3.4 Soluciones típicas en la industria

a. Industria papelera

Son altamente recomendables en el proceso de tratamiento de la madera, donde la grasa sólida protege al rodamiento contra las impurezas que contiene la pulpa. Por otra parte, es utilizado en la misma maquina papelera, en los tambores que transportan la celulosa de la zona húmeda; allí la grasa sólida tolera sin problemas los químicos que traen la pulpa y la humedad de los rollos de celulosa. Además, son altamente eficientes en la última etapa, donde se debe cortar la celulosa en tamaños más pequeños; aquí la limpieza es un factor clave, las filtraciones de aceite deben reducirse a cero.

b. Centros de Ski

Otra ventaja de la grasa sólida es su bajo torque de partida en ambientes fríos, comparado con la grasa convencional; donde los elementos rodantes deben superar la resistencia que opone la grasa convencional a bajas temperaturas, donde su viscosidad aumenta.

c. Maquinas en altura

La libertad que provee la grasa sólida en cuanto a re-lubricación es una ventaja en máquinas como grúas o generadores eólicos, donde el acceso se dificulta y los tiempos requeridos para mantenciones son extensos, lo cual se traduce en altos costos.

d. Industria Alimenticia

Es una de las industrias más exigentes en cuanto a limpieza. Se debe emplear una grasa especial, que sea apta y certificada para esta industria; denominada NFS grado H1 ó H2.

e. Bombas y agitadores

Rodamientos de este tipo son idóneos en el uso de bombas que impulsen aguas residuales, o lodo, ya que contaminan fuertemente los rodamientos; la grasa solida minimiza el daño prematuro de sus componentes.

1.2.1.3.5 Especificaciones Técnicas

Composición

La grasa sólida está compuesta por un aceite base y una matriz de polímero llamado Poliolefina. El aceite base utilizado es de origen sintético y es adecuado para la mayoría de las aplicaciones.

Viscosidad: 140 mm²/s a 40°C

19 mm²/s a 100°C

También se pueden utilizar aceites que posean otras viscosidades, la correcta elección dependerá netamente de la aplicación, inclusive se puede utilizar aceite especial para la industria alimenticia “food grade”. La incorporación de aditivos; como anti-

corrosivos, extra presión (EP), retardantes de oxidación, también pueden ser agregados al aceite base para una mayor protección.

La grasa sólida presenta la gran ventaja de poseer un porcentaje mayor de aceite que la grasa convencional, la *Figura 1.38* revela las cantidades de cada tipo de lubricante.

- La grasa convencional contiene un 35% de aceite, un 5% de espesante y un 60% de aire.
- La grasa sólida contiene un 70% de aceite, el 30% restante es la matriz de polímero.

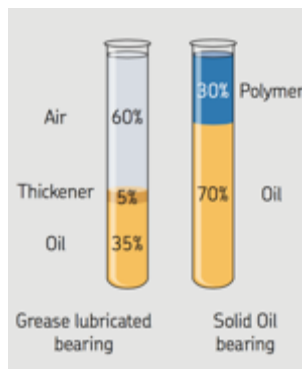


Figura 1.38 Composición de dos tipos de lubricantes.

(SKF, Catalogo General, 2006)

Existen dos tipos de composiciones disponibles, dependiendo de la velocidad a la cual se utilizará el rodamiento se debe seleccionar la composición adecuada; se divide en uso general (L11) o alta velocidad (L12), y se diferencian visualmente por distintos colores (ver *Figura 1.39*).

La principal diferencia entre los dos tipos de grasas sólidas, radica en un mayor contenido de resina polimérica que posee la grasa sólida de alta velocidad. Al poseer una mayor cantidad, la matriz es más fuerte y su capacidad de retener el aceite es superior; al poseer una mayor cantidad de micro poros. Además, soporta mayores fuerzas centrífugas que se producen al aumentar la velocidad rotacional.

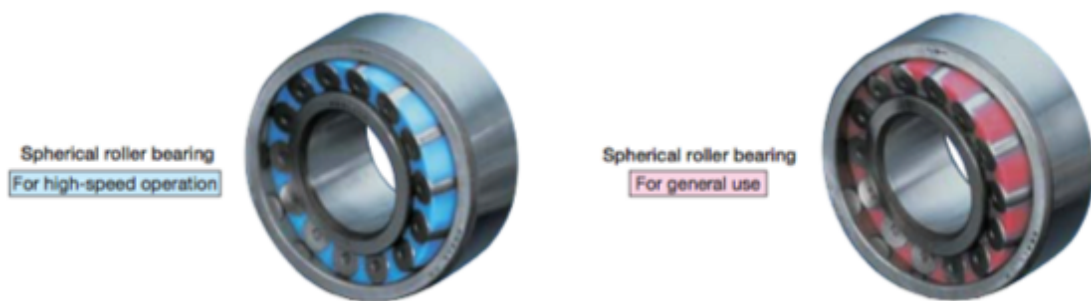


Figura 1.39 Grasa sólida para alta velocidad y para uso general.

1.2.1.3.6 Tipos de rodamientos con grasa sólida

La gran mayoría de los rodamientos pueden lubricarse con grasa sólida, la cual se agrega en fabrica. Sin embargo, no es recomendable la utilización de grasa sólida en rodamientos que posean grandes tamaños de jaula de poliamida o bronce mecanizado, debido a que el espacio restante dentro del rodamiento es muy limitado.

1.2.1.3.7 Capacidad de carga

La capacidad de carga dinámica para rodamientos con grasa sólida es la misma con respecto a los rodamientos lubricados por grasa convencional o aceite.

Se debe tener presente que se requiere de una carga mínima para que el rodamiento opere correctamente, este valor asciende al 1% de la carga dinámica equivalente. Estos valores de cargas están especificados por catálogos para cada tamaño y serie de rodamiento.

Por otra parte, dependiendo del tipo de jaula que posean los rodamientos, variará el tipo de carga admisible por los rodamientos. Es decir, si pueden soportar sólo cargas radiales, axiales o una combinación de éstas.

Un ejemplo son los rodamientos de rodillos esféricos:

Los que poseen un diseño de jaula de acero dividida para cada hilera de rodillos (tipo EA), no admiten cargas axiales. Esto se debe a que, si se presentan este tipo de cargas, una hilera de rodillos podría eventualmente girar con una velocidad rotacional distinta a la otra; provocando la fractura de la grasa sólida al interior del rodamiento. Con tal de evitar esta situación se recomienda utilizar una jaula de bronce mecanizado (tipo CAM), la cual no es dividida para las dos hileras de rodillos.

1.2.1.3.8 Límites de velocidad

Los límites de velocidad están definidos por el siguiente factor de velocidad:

$$A = n * dm$$

Donde:

- **A:** Factor de velocidad.
- **n:** Velocidad de rotación [revoluciones/min]

- d_m : Diámetro medio del rodamiento = $0.5 (d+D)$
- d : Diámetro agujero rodamiento [mm]
- D : Diámetro exterior rodamiento [mm]

La Tabla 1.10 indica los valores del factor de velocidad A según sea el tipo de rodamiento, además se sub-clasifica por el tipo de jaula que utilizan.

Tabla 1.10 Velocidades límites para cada tipo de rodamiento y su respectivo tipo de grasa.

Tipos de Rodamiento	Tipos Molded-Oil™	Tipos de jaula	Velocidades límite ($d_m n$)	Tamaños (diámetro exterior, mm)
Rodamientos de rodillos esféricos	Para usos generales (L11)	Bronce mecanizada (CA)	Inferior a 60.000	$70 \leq OD \leq 250$
		Acero prensado (EA)	Inferior a 30.000	$70 \leq OD \leq 215$
	Para aplicaciones de alta velocidad (L12)	Bronce mecanizada (CA)	60 000 – 100 000	$70 \leq OD \leq 215$
Rodamientos de bolas de ranura profunda	Para usos generales (L11)	Acero Prensado	Inferior a 150.000	$19 \leq OD \leq 250$
	Para aplicaciones de alta velocidad	Acero Prensado	150 000 – 200 000	$19 \leq OD \leq 215$
Rodamientos de rodillos cónicos	Para usos generales (L11)	Acero Prensado	Inferior a 40.000	$80 \leq OD \leq 215$

Nota: Para rodamientos de rodillos cónicos y esféricos con jaula de acero (EA), no está disponible grasa sólida para altas velocidades (L12).

(NSK , 2011)

Para rodamientos con sellos integrados, se debe utilizar el 80% de los valores de la Tabla 1.10. Si la temperatura excede los 20°C los valores serán menores, ya que, al aumentar la velocidad, aumentará la temperatura de operación del rodamiento; se debe limitar la velocidad de funcionamiento, para que no se superen los límites de temperaturas para la grasa sólida. La mayoría de los lubricantes aumentan su vida de servicio, cuando la temperatura se mantiene baja.

1.2.1.3.9 Temperaturas limites

Existen límites en las temperaturas de funcionamiento para los rodamientos, a continuación, la Tabla 1.11 muestra los límites establecidos:

Temperature limits	
Max. continuous operating temperature	85 °C (185 °F)
Max. intermittent operating temperature	95 °C (205 °F)
Min. start-up temperature (standard oil)	-40 °C (-40 °F)

Bearings with solid oil can be heated to a maximum of 100 °C (210 °F) for mounting purposes.

Tabla 1.11 Temperaturas límites para la grasa sólida.

(SKF, Catalogo General, 2006)

Lo recomendable es no sobrepasar los 85°C cuando la temperatura de operación es constante; si existen altas temperaturas, pero intermitentes, se recomienda no sobrepasar los 95°C. La temperatura requerida mínima de funcionamiento es de -40°C.

Cabe destacar que, al calentar los rodamientos para su correcto montaje, no se debe superar la temperatura de 100°C.

Las temperaturas indicadas en la tabla 9, aplican tanto para rodamientos sellados o abiertos, generalmente los rodamientos sellados tienen una temperatura de funcionamiento mayor que los abiertos.

1.2.1.3.10 Rangos de operación

Temperatura ambiente y límite de velocidad A

A continuación, se detallan los gráficos correspondientes para cada tipo de rodamiento y su relación entre la temperatura ambiente y los límites de velocidades, de ésta forma se determinará qué tipo de grasa sólida se debe utilizar; uso general (L11) o alta velocidad (L12).

Temperatura ambiente y velocidad límite ($d_m n$)

La relación entre velocidad límite y temperatura ambiente es la siguiente:

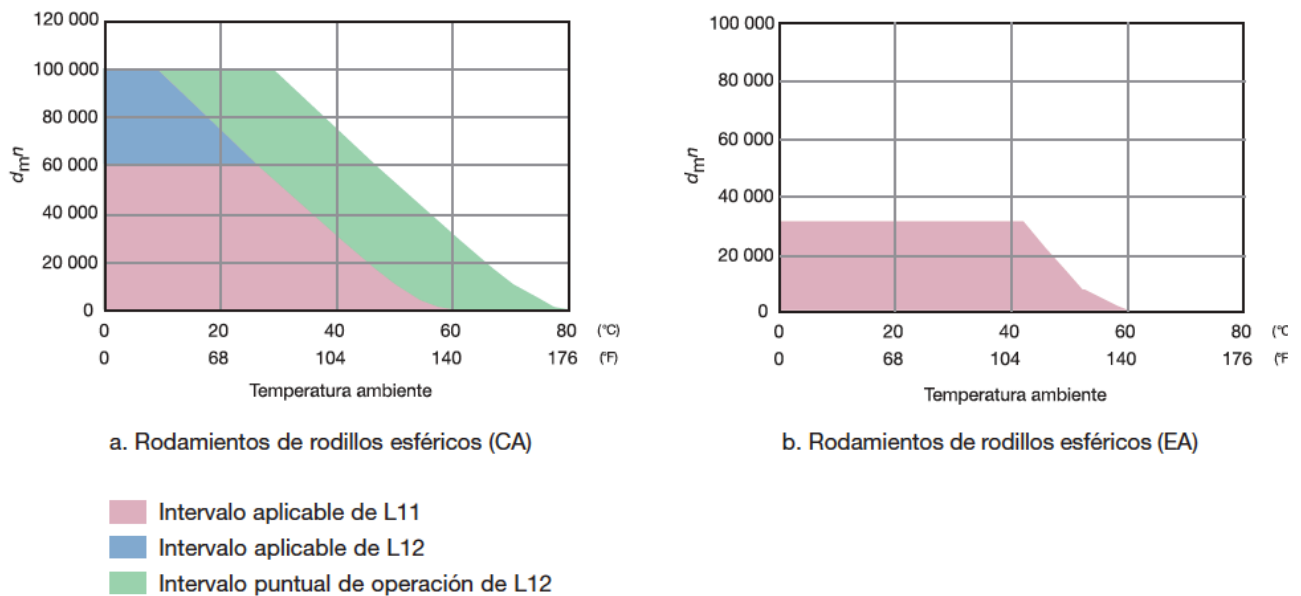


Figura 1.40 A-B: Temperatura ambiente v/s Factor de velocidad.

(NSK , 2011)

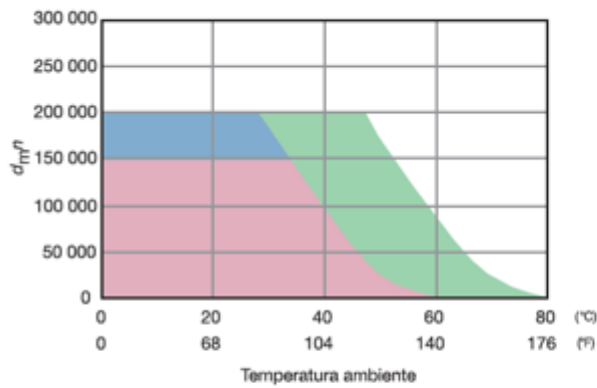
El gráfico A muestra los valores para los rodamientos de rodillos esféricos, con jaula del tipo CA, es decir, jaula de bronce mecanizado. Se observa lo siguiente:

- Se recomienda utilizar grasa sólida de uso general (L11) en temperaturas ambiente entre 0 – 60°C y con un factor de velocidad hasta 60.000 [mm/min]. Correspondiente al área bajo la curva de color rosa.
- Se recomienda utilizar grasa sólida para altas velocidades en ambientes con temperaturas entre 0 – 25°C, cuando el factor de velocidad se sitúa entre 60.000 y 100.000 [mm/min]. Área bajo la curva de color azul.
- Finalmente existe una zona donde se puede utilizar grasa sólida de alta velocidad en condiciones de operación intermitentes, dicha zona corresponde al área bajo la curva de color verde.

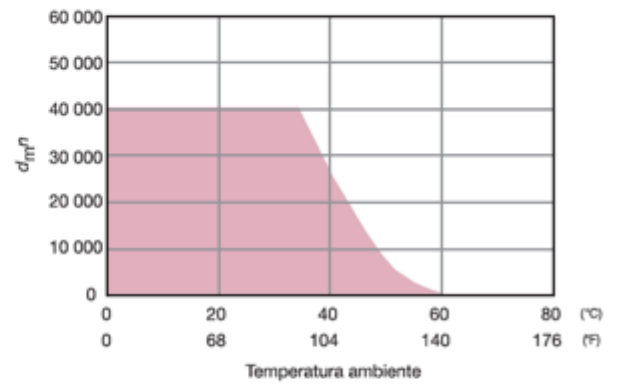
El gráfico B muestra que sólo es posible utilizar grasa solida de uso general para rodamientos de rodillos esféricos que utilicen jaulas del tipo EA; acero prensado.

- El rango de temperaturas admisibles es entre 0 - 60°C, sin embargo, el factor de velocidad permitido llega hasta los 30.000 [mm/min] cuando la temperatura se encuentra entre 0 - 42°C. A partir de 42°C la velocidad permitida es se va reduciendo hasta alcanzar el limite de 60°C.
- No hay posibilidad de utilizar grasa sólida de alta velocidad con jaulas de bronce mecanizado.

Temperatura ambiente y velocidad límite ($d_m n$)



c. Rodamientos de bolas de ranura profunda



d. Rodamientos de rodillos cónicos

- Intervalo aplicable de L11
- Intervalo aplicable de L12
- Intervalo puntual de operación de L12

Figura 1.41 C-D : Temperatura ambiente v/s Factor de velocidad.

(NSK , 2011)

El gráfico C muestra los límites recomendados para rodamientos de bolas de ranura profunda.

- Se recomienda utilizar grasa sólida de uso general hasta un factor de velocidad de 150.000 [mm/min] cuando la temperatura ambiente esté entre 0 – 60°C. Corresponde al área bajo la curva de color rosa.
- Se recomienda utilizar grasa sólida de alta velocidad cuando el factor de velocidad se encuentra entre 150.000 y 200.000 [mm/min] y la temperatura ambiente se ubique entre 0 – 30°C. Corresponde al área bajo la curva de color azul.

- Existe un rango adicional donde se puede utilizar por periodos de operación intermitente grasa sólida de alta velocidad. Dicho rango se encuentra entre 30 – 80°C, hasta una velocidad de 200.000 [mm/min]. Corresponde al área bajo la curva de color verde.

El gráfico D muestra los límites para rodamientos de rodillos cónicos. Estos sólo pueden utilizar grasa de uso general, ya que poseen el mismo diseño de jaula EA.

- Funcionan en un rango de velocidades mayores que los de rodillos esféricos, que asciende a 40.000 [mm/min], cuando la temperatura ambiente se encuentra entre 0 – 35°C. Entre 35 – 60°C las velocidades permitidas disminuyen con el aumento de la temperatura. Corresponde al área bajo la curva de color rosa.

Se debe tener en cuenta que los límites mencionados anteriormente son para alojamientos en condiciones normales, si existe una fuente de calor cercana a los rodamientos, o una fuente de enfriamiento; los límites se verán afectados.

En síntesis:

- Para bajas velocidades y temperaturas, lo recomendado es utilizar L11.
- Para condiciones de alta temperatura, lo recomendado es L12.
- Se deben respetar los valores de carga radial mínima para que el rodamiento gire correctamente; la carga radial debe ser mayor al 1% de la carga dinámica equivalente, la cual está establecida por catálogo.

1.2.1.4 Pruebas teóricas de fabrica

A continuación, se analizarán los resultados obtenidos por pruebas de laboratorio de la empresa de rodamientos NSK. Las pruebas realizadas comparan la efectividad de los

rodamientos que utilizan grasa sólida contra los rodamientos que son lubricados tradicionalmente por grasa o aceite.

La Figura 1.42 detalla los elementos utilizados en el banco de pruebas. Se busca determinar la duración de la vida útil del rodamiento con grasa sólida, cuando el rodamiento está en funcionamiento bajo una determinada carga aplicada y es sometido bajo una exposición constante de agua.

1.2.1.4.1 Rodamiento expuesto bajo una atomización de agua

El siguiente procedimiento se realizó dos veces. En primera instancia para un rodamiento con grasa convencional, y después utilizando un rodamiento con grasa sólida.

Procedimiento:

1. Un motor eléctrico es conectado a un eje de 10 [mm], en su extremo se monta un rodamiento de bolas (6000), el cual monta sellos de gomas en ambos costados y es de acero inoxidable. El aro exterior del rodamiento se ubica en un alojamiento, el cual se muestra en la Figura 1.42 como “housing”.
2. El rodamiento está sometido a través del alojamiento a una fuerza radial de 79.4 [N] y axial de 29.4 [N], debido a la reacción que ejerce el contrapeso que está conectado al rodamiento mediante la polea.
3. Se conecta una placa a un costado del rodamiento, en dicha placa se adhiere un vibro-metro.
4. Se añade al banco de pruebas un inyector de agua, que se ubicará sobre el rodamiento.

5. El motor eléctrico se ajusta para que la velocidad de rotación sea de 1000 [rpm].
6. Al mismo tiempo que se inicie la partida del motor eléctrico, se comenzará a inyectar una neblina de agua sobre el rodamiento, con un flujo de 0.8 [cm³/min] y una presión de 0.2 [MPa]
7. La prueba finalizará cuando se perciba una anomalía en las frecuencias de trabajo normales que registra el vibro-metro.
8. Finalmente se procede a contabilizar, en horas, la vida útil del rodamiento.

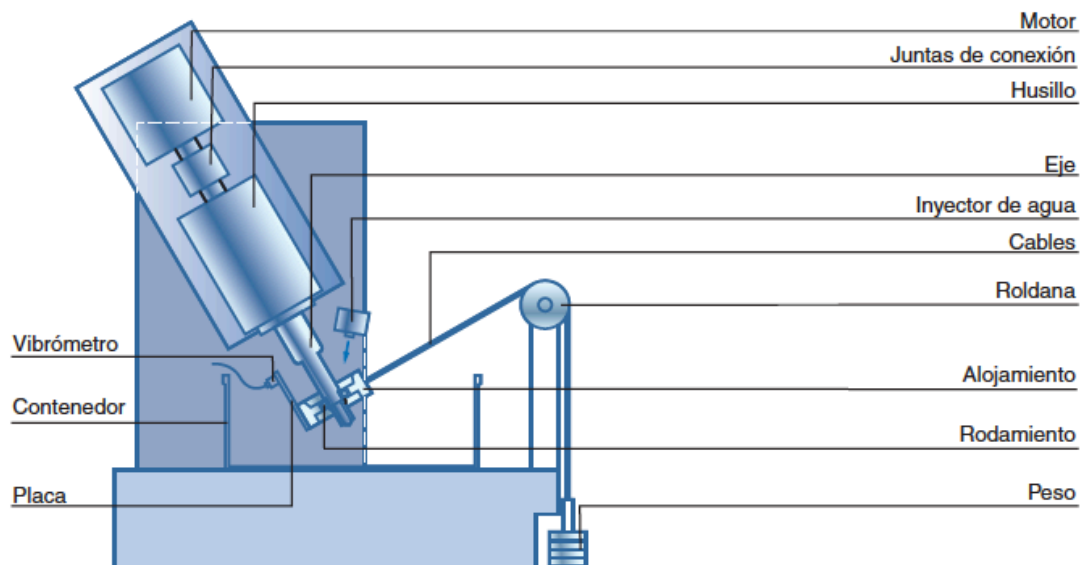


Figura 1.42 Banco de pruebas.

La Tabla 1.12 indica las condiciones de la prueba para un rodamiento de bolas de ranura profunda, 6000 H DD (acero inoxidable con sellado de contacto).

Tabla 1.12 Condiciones de pruebas para rodamiento 6000 H DD.

Condiciones del test	Rodamientos de test	6000-H-DD (acero inoxidable con sellado de contacto)
	Velocidad de rotación	1000 min ⁻¹
	Carga radial	79,4 N
	Carga axial	29,4 N
	Exposición al agua	0,8 cm ³ /min
	Presión en spray	0,2 MPa

(NSK , 2011)

Resultados Obtenidos Bajo Exposición de Agua

El Figura 1.43 muestra los resultados obtenidos, se determinó lo siguiente:

- Al utilizar un rodamiento con grasa convencional, la vida útil fue de 480 [horas].
- El emplear un rodamiento con grasa sólida se alcanzó una vida útil de 1200 [horas].

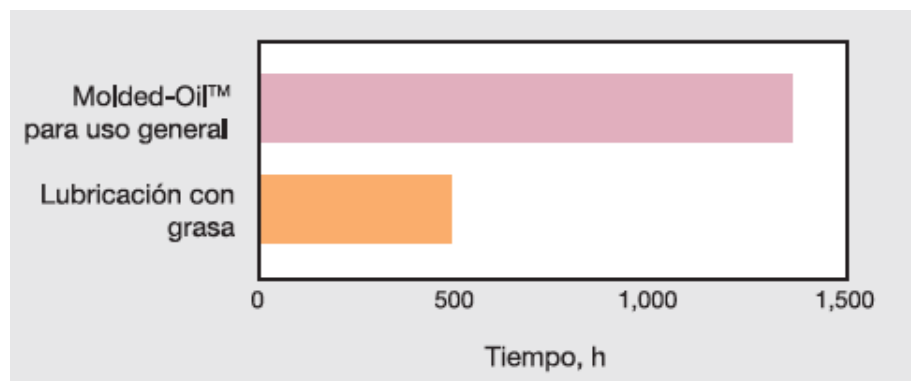


Figura 1.43 Duración de los dos tipos de grasas.

(NSK , 2011)

Por consiguiente, se obtuvo una mejora de 2.5 veces en la vida útil del rodamiento 6000 H-DD, utilizando como lubricante, la grasa sólida.

1.2.1.4.2 Prueba de Durabilidad

Una de las grandes ventajas de la grasa sólida frente a los lubricantes convencionales, es su capacidad de suministrar el aceite lentamente, por extensos periodos de tiempo.

La siguiente prueba determinó demostrar las diferencias existentes referentes a la vida útil, al someter a prueba dos rodamientos de bolas 6305 DDU; uno con grasa sólida de uso general (L11) y otro con grasa sólida de alta velocidad (L12).

La Tabla 1.13 indica las condiciones de trabajo a las cuales fueron expuestos los rodamientos:

- El rodamiento fue cargado radialmente con 98 [N] y axialmente de 245 [N].
- Las pruebas fueron ejecutadas con las siguientes velocidades de giro: 3500, 4200 y 4600 [rpm].

Condiciones del test	Rodamientos de test	6305DDU	
	Carga radial	98N	
	Carga axial	245N	
	Velocidad de rotación	❶	3 500 min ⁻¹ (d _m n : 152 000)
		❷	4 200 min ⁻¹ (d _m n : 183 000)
		❸	4 600 min ⁻¹ (d _m n : 200 000)

Tabla 1.13 Condiciones de prueba para rodamiento 6305DDU.

(NSK , 2011)

Resultados Obtenidos

Los resultados obtenidos tras analizar la vida útil de los rodamientos a diferentes velocidades de rotación se muestran en el Figura 1.44. Las pruebas finalizaron cuando el vibro-metro detecto un aumento anormal de las vibraciones, es decir, cuando el torque aumento al interior del rodamiento.

1. Prueba a 3500 [rpm]:

Utilizando una velocidad rotacional de 3500 [rpm] se logró superar las 5000 [horas] para ambos tipos de rodamientos, es decir, con lubricante de uso general y de alta velocidad. Se determinó que es posible continuar sobre las 5000 [horas], sin embargo, por efectos prácticos de comparación de las pruebas, se abortó la continuidad de éste.

2. Prueba a 4200 [rpm]:

Al aumentar la velocidad a 4200 [rpm] utilizando un rodamiento con grasa sólida de uso general, la vida útil disminuyó drásticamente a 500 [horas]. Sin embargo, el

rodamiento que utilizaba grasa sólida de alta velocidad, alcanzó sin problemas las 5000 [horas].

3. Prueba a 4600 [rpm]:

La última prueba fue realizada a 4600 [rpm], en este caso al emplear grasa sólida de uso general, los resultados no fueron positivos. La vida útil que logró fue de apenas 200 [horas], contrariamente, el rodamiento con grasa sólida de alta velocidad superó las 2000 [horas].

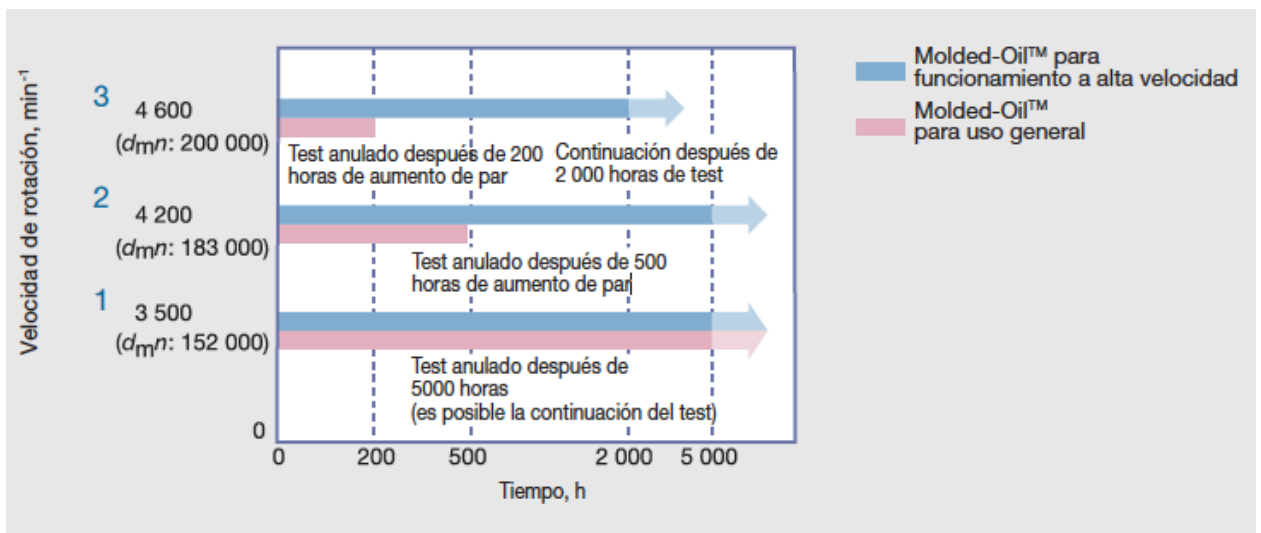


Figura 1.44 Resultados obtenidos tras prueba de durabilidad.

(NSK , 2011)

1.2.1.4.3 Torque de Rotación

La última prueba compara las diferencias en el torque dentro del rodamiento cuando se utilizan las diferentes grasas. No mide la vida útil del rodamiento.

Torque de arranque

El torque de arranque de un rodamiento, se define como el par de fricción que debe superarse cuando el rodamiento comienza su movimiento rotatorio.

Toda grasa dentro de un rodamiento tiene una fase inicial llamada “arranque”, fenómeno que ocurre cuando el rodamiento inicia su movimiento rotacional. En dicha fase la grasa aumenta su temperatura y comienza a desprender su aceite base, con el fin de lubricar el rodamiento.

Durante la fase de “arranque”, el torque aumenta al interior del rodamiento hasta que se llega a una etapa estable, que es cuando la grasa adquiere su temperatura normal de funcionamiento y el aceite lubrica con la viscosidad requerida el rodamiento; como consecuencia el torque y la temperatura disminuyen.

Condiciones de prueba

El Figura 1.45 muestra una prueba realizada para un rodamiento de bolas de ranura profunda, cada uno testado con tres tipos de lubricación; grasa convencional, grasa sólida de uso general y de alta velocidad.

Rodamiento de bolas de ranura profunda, 6305 DDU:

- Rodamiento con diámetro interior de 25 [mm] y exterior de 62
- El rodamiento sometido a una carga radial y axial de 29.4 [N] cada una.
- La velocidad de rotación de 1200 [rpm]. Clasifica como baja velocidad de rotación.

- Factor de velocidad igual a 52.200. Se recomienda utilizar grasa sólida de uso general.

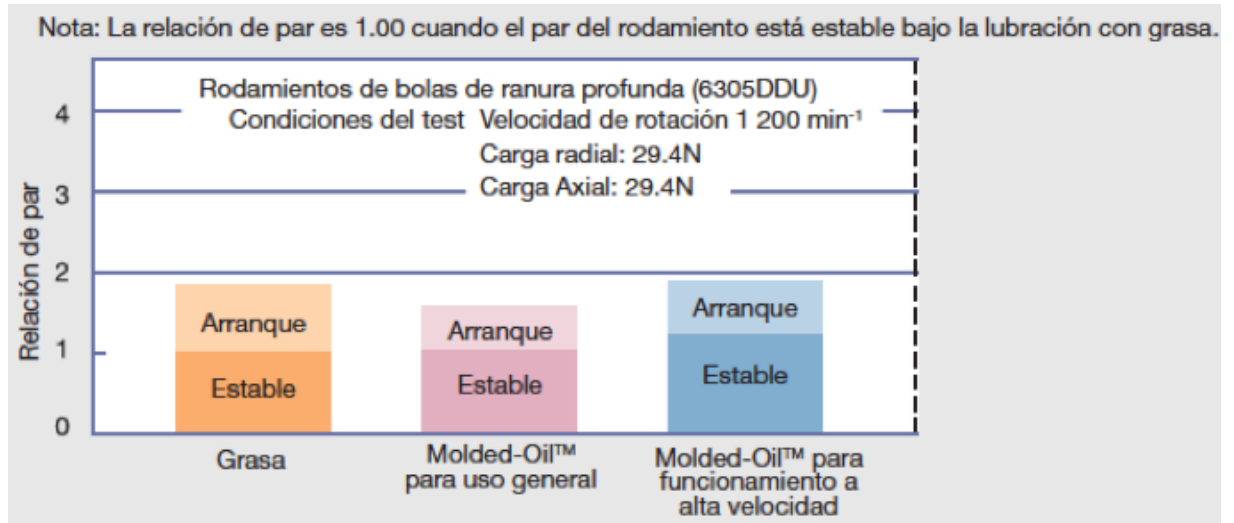


Figura 1.45 Torque de arranque de distintos tipos de grasas.

(NSK , 2011)

NOTA: El torque es 1.00 cuando la grasa lubrica en condiciones normales de trabajo, respecto a su temperatura y viscosidad.

Resultados Obtenidos

1) Rodamiento de bolas ranura profunda, 6305 DDU:

- Se obtuvo que, al utilizar grasa convencional, el valor de torque de arranque corresponde a 1.8 veces de torque estable.
- Al utilizar grasa sólida de uso general su valor asciende a 1.5 veces del torque estable.

- Al emplear grasa sólida de alta velocidad el torque de arranque corresponde a un valor de 1,8 veces del torque estable. Similar a la grasa convencional, pero en este caso el torque también es mayor en el rango estable. Esto es consecuente, ya que la grasa de alta velocidad posee una mayor cantidad de resina de polietileno, la que ofrece una mayor resistencia a la rodadura.

Por lo tanto, se concluye que para esta aplicación es beneficioso utilizar grasa sólida de uso general, ya que su torque en fase de arranque es menor respecto a las otras grasas. Un menor torque de arranque permite un ahorro energético para los equipos que impulsan los rodamientos.

Asimismo, los resultados obtenidos son congruentes con los cálculos del factor de velocidad, es decir, se recomienda utilizar grasa sólida de uso general.

1.2.2 Métodos de lubricación tradicionales

1.2.2.1 Lubricación por baño de aceite

Corresponde al método de lubricación más sencillo, adecuado para medias y bajas velocidades de rotación. Cuando el rodamiento está en reposo, el nivel del baño de aceite debe quedar justo por debajo del centro del elemento rodante más bajo (ver Figura 1.46). Cuando el rodamiento comienza a girar, el aceite es elevado y se introduce por los componentes del rodamiento, gira con él, y luego retorna al baño.

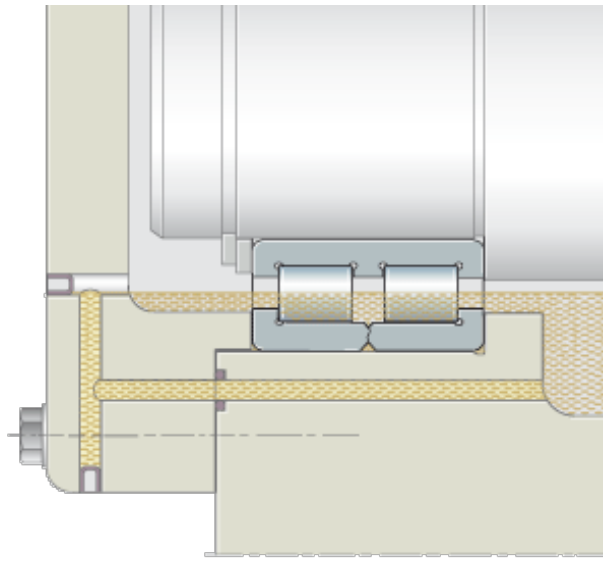


Figura 1.46 Lubricación por baño de aceite.

(FAG Schaeffler Group, 2003)

1.2.2.2 Lubricación por circulación de aceite

Si la temperatura del aceite se mantiene alta, éste comenzará a envejecerse con mayor rapidez. En la lubricación por circulación de aceite, éste puede filtrarse y refrigerarse en el retorno. Así, el aceite evacúa el calor generado en el rodamiento.

La Figura 1.47 muestra un rodamiento de doble hilera de rodillos cilíndricos, que se lubrica mediante aceite. El aceite es impulsado por la bomba (2) y se refrigera en el intercambiador de calor (3), luego es impulsado hacia el rodamiento lubricándolo. Finalmente se filtra (1) antes de ingresar a la bomba (2).

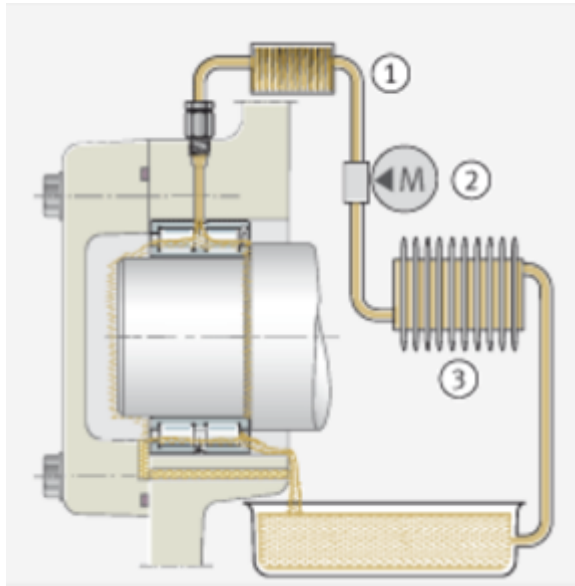


Figura 1.47 Lubricación por circulación de aceite.

(FAG Schaeffler Group, 2003)

1.2.2.3 Lubricación por goteo de aceite

Este método se puede utilizar en rodamientos que giren a alta velocidad, generalmente en rodamientos de bolas. La cantidad de aceite depende del tamaño del rodamiento, del tipo constructivo, de la velocidad de operación y de la carga. Un valor orientativo se sitúa entre 3 [gota/min] y 50[gotas/min] por cada pista de rodadura. (una gota pesa aproximadamente 0.025 gramos).

La Figura 1.48 muestra cómo se lubrica un rodamiento mediante goteo de aceite. Tal y como se aprecia en la imagen, el aceite se almacena en un deposito visible. Los tiempos de goteo se controlan mediante un tornillo.

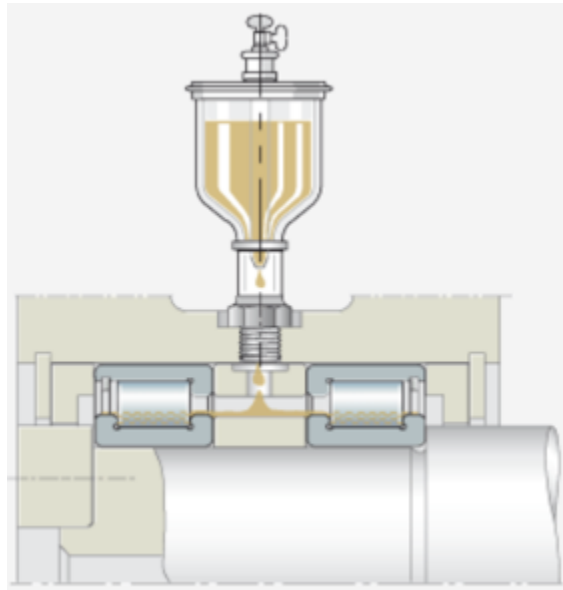


Figura 1.48 Lubricación por goteo de aceite.

(FAG Schaeffler Group, 2003)

1.2.2.4 Lubricación por inyección de aceite

Cuando las velocidades son altas, el aceite tiende a escaparse de la zona de lubricación. Con el fin de evitar este problema, el aceite debe ser inyectado a presión en el rodamiento. La velocidad debe ser bastante alta (15 m/s como mínimo), para asegurar que entre suficiente aceite en el torbellino de aire provocado por la rotación del rodamiento.

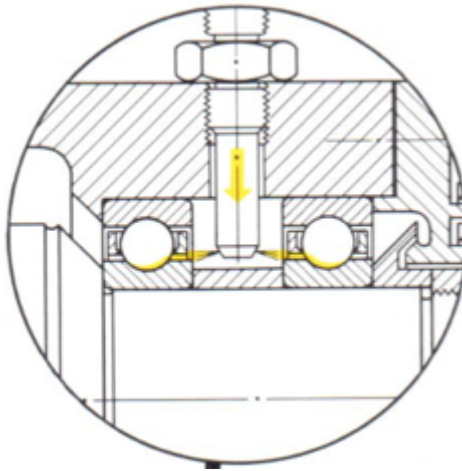


Figura 1.49 Lubricación por inyección de aceite.

(FAG Schaeffler Group, 2003)

1.2.2.5 Lubricación por aire y aceite

Método especialmente utilizado para rodamientos radiales que giran a altas velocidades y que soportan poca carga.

El aire comprimido conduce pequeñas cantidades de aceite hacia el interior de los rodamientos. Esta cantidad mínima permite que los rodamientos puedan funcionar a temperaturas inferiores o a mayores velocidades que las permitidas por los métodos anteriores. El aire comprimido sirve para refrigerar el rodamiento y también para producir una presión más alta en la posición donde se ubica, evitando el ingreso de contaminantes.

El aceite es impulsado a través de cañerías por la fuerza del aire comprimido, y luego se inyecta en la disposición del rodamiento mediante una boquilla.

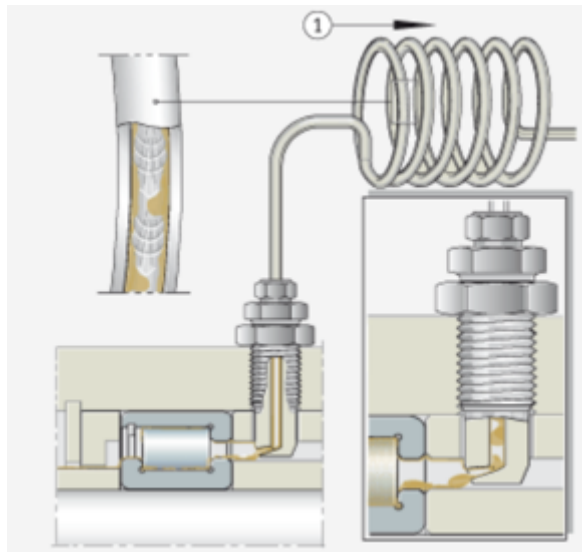


Figura 1.50 Lubricación por aire y aceite.

(FAG Schaeffler Group, 2003)

1.3. Modos de fallas de rodamientos

Los rodamientos son uno de los elementos de máquinas más importantes en la mayoría de las industrias, donde son altamente exigidos en cuanto a capacidades de carga, velocidades, temperaturas, vibraciones, lubricación, desalineamiento, entre otras condiciones. Por consiguiente, las fallas prematuras en los rodamientos generalmente causan pérdidas económicas, y peor aún, pérdidas en la producción.

Las fallas prematuras de los rodamientos pueden ocurrir por variadas razones, sin embargo, cada modo de falla deja una marca especial en el rodamiento. Consecuentemente, una posterior inspección y un análisis del rodamiento dañado establecerá la causa raíz de falla, lo que permitirá definir las futuras acciones correctivas con tal de prevenir la reiteración de la falla.

1.3.1 Estadística de fallas

La vida de los rodamientos se puede separar en dos grupos: fallas prematuras y fallas normales por la fatiga del acero. Un rodamiento se torna inutilizable cuando sufre fallas prematuras debido al manejo y/o procedimientos de mantenimiento inadecuados.

En relación al Figura 1.51, según estudios estadísticos de la marca de rodamientos SKF, cerca del 50% de los modos de fallas prematuros están relacionados con la lubricación. En efecto, el 36% de los rodamientos fallan por una lubricación inadecuada, causada por especificaciones, cantidades o intervalos de recambio incorrectos de los lubricantes.

Un rodamiento es un elemento de precisión, el cual no funcionará adecuadamente si no está correctamente lubricado y aislado de la contaminación. Al menos el 14% de todos los modos de fallos prematuros son causados por problemas de contaminación, debido al ingreso de fluidos líquidos o partículas sólidas al interior del rodamiento.

Por otra parte, un 16% de las fallas están ligadas a otras razones, tales como montajes incorrectos, que se deben principalmente al uso de la fuerza bruta, y por no utilizar las herramientas adecuadas de montajes, por ejemplo: calentadores de inducción.

El 34% restante falla prematuramente por fatiga, principalmente por una sobre carga de las máquinas y/o revisiones deficientes en las mantenciones de los equipos.

Es importante mencionar, que la estadística anterior abarca un rango muy general de aplicaciones, la cual varía dependiendo de la industria en que trabajan los rodamientos. Particularmente, en la industria papelera, la mayor causa de fallas de los rodamientos es la contaminación o la inadecuada lubricación, y no la fatiga.

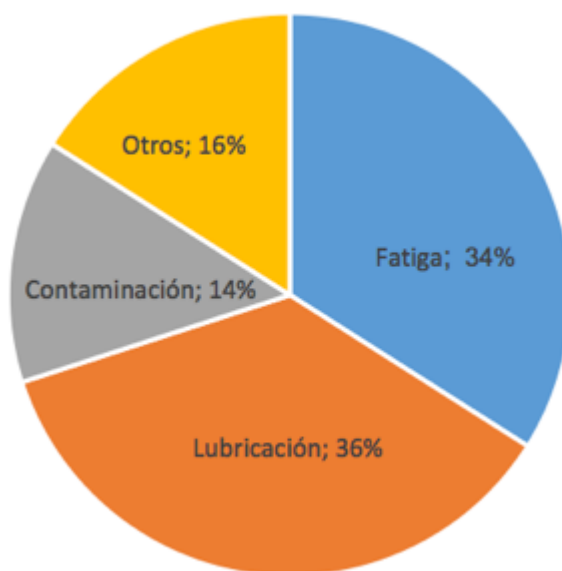


Figura 1.51 Estadística modos de fallos prematuros.

(SKF, 2014)

1.3.2 Clasificación modos de fallas ISO

La norma ISO 15243:2004 establece un método común de clasificación y terminología para los distintos modos de fallas de los rodamientos. Los modos de fallas están divididos en 6 causas principales, y estos a su vez, se sub clasifican en dos o tres categorías.

1.3.2.1 Fatiga

1.3.2.1.1 Fatiga sub superficial

Dependiendo de la carga, temperatura y el número de ciclos que un rodamiento gira, el acero de las pistas y de los elementos rodantes sufre cambios en su estructura cristalina, acumulando un stress residual en el punto de mayor carga, el que generalmente se ubica a una profundidad entre 0.1 a 0.5 [mm] bajo la superficie de rodadura (ver Figura 1.52). Como consecuencia, se crean micro grietas en la estructura cristalina del acero, las que crecerán y evolucionarán en un desprendimiento del acero en la superficie de contacto de aros y elementos rodantes.

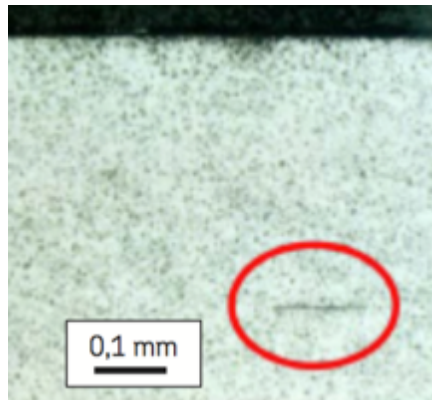


Figura 1.52 Fractura desarrollada bajo la pista de rodadura.

1.3.2.1.2 Fatiga iniciada en la superficie

Principalmente, la fatiga que comienza en la superficie de contacto es provocada por una inadecuada lubricación, es decir, por una cantidad o tipo inadecuada de lubricante, o por contaminantes sólidos en el lubricante. Resultando, en un contacto metal – metal de las superficies, iniciando el desgaste del acero, a través de micro cráteres y desprendimiento de material (ver Figura 1.53).

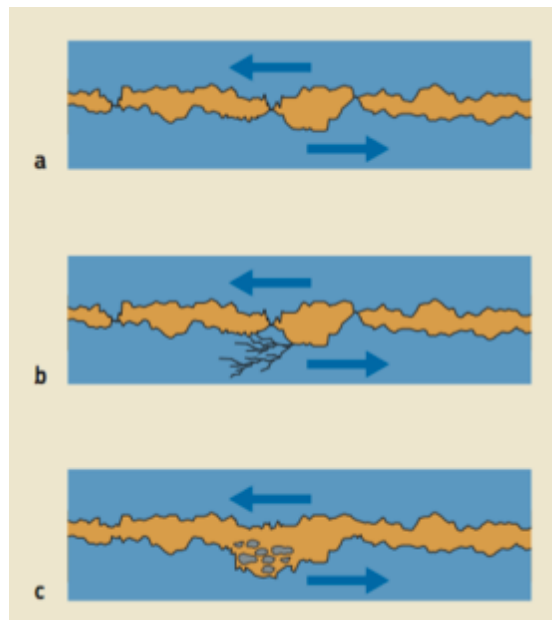


Figura 1.53 Fatiga superficial inicia con el contacto metal - metal.

1.3.2.2 Desgaste

1.3.2.2.1 Desgaste abrasivo

El desgaste abrasivo es el desprendimiento progresivo de material, un ejemplo es el desgaste que se produce cuando se inicia el giro de un rodamiento detenido; el cual es leve. Sin embargo, un desgaste abrasivo mayor ocurre por una inadecuada lubricación o por el ingreso de contaminantes sólidos, el que se identifica por el color mate del acero en las zonas de rodadura cuando la pérdida de lubricación es total, de lo contrario las superficies se pulen (efecto espejo). Cabe destacar, que el primer elemento del rodamiento en desgastarse es la jaula; por su menor dureza (ver Figura 1.54)



Figura 1.54 Desgaste abrasivo en jaula de un rodamiento de rodillos cilíndricos.

1.3.2.2.2 Desgaste adhesivo

El desgaste adhesivo es un modo de falla que tiene estricta relación con una lubricación inadecuada, dado que se genera por el contacto metálico entre dos superficies que rozan entre sí. Se caracteriza por la transferencia de metal de una superficie a otra, provocando concentraciones de estrés en las zonas de contacto metal – metal. Generalmente, se produce cuando los elementos rodantes ingresan a la zona de carga, donde la aceleración de éstos es máxima (ver Figura 1.55).

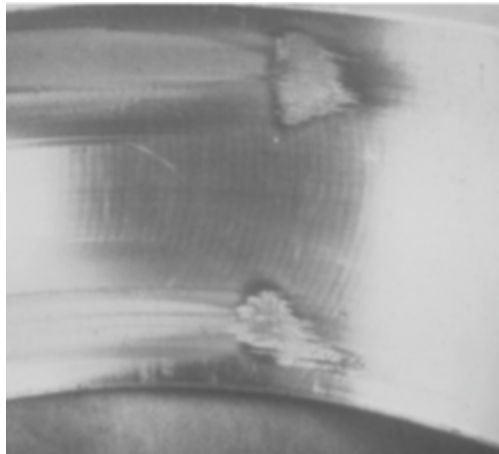


Figura 1.55 Desgaste adhesivo en aro exterior de un rodamiento de rodillos esféricos.

1.3.2.3 Erosión eléctrica

1.3.2.3.1 Corriente excesiva

El paso de corriente eléctrica desde un aro del rodamiento (interior o exterior) hacia un elemento rodante produce una soldadura, similar a la de arco eléctrico. Las temperaturas llegan a niveles tan altos que producen la fundición del acero en el punto de contacto, desprendiendo acero en aros y elementos rodantes. Las marcas

características son cráteres de color negro (a veces en forma de zigzag), que pueden llegar hasta un diámetro de 0,5 [mm] (ver Figura 1.56). Falla usual en rodamientos utilizados en motores eléctricos.

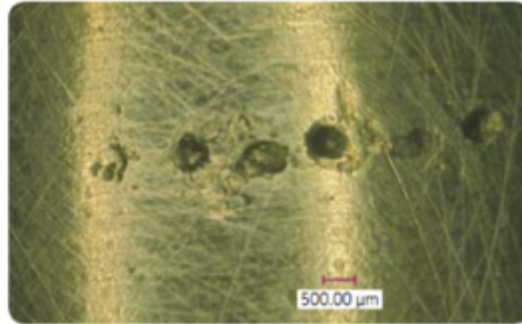


Figura 1.56 Cráteres causados por paso de corriente eléctrica.

1.3.2.3.2 Fuga de corriente

En la etapa inicial de este modo de falla, las superficies del acero son dañadas por micro cráteres de poca profundidades, pero cercanamente posicionados (comparado con el paso de corriente excesiva). Es característico de este modo de falla un patrón de rodadura que se torna ondulado (ver Figura 1.57), el que se desarrolla sobre las pistas de rodadura. En los rodamientos de rodillos, éstos también adquieren dicho aspecto, mientras que los de bolas, éstas se decoloran, alcanzando un color gris mate o gris oscuro. La principal consecuencia es el cambio de la dureza del acero, la superficie de rodadura se sobre endurece a 66 a 68 HRc, resultado en un acero duro y frágil, mientras que la zona inferior a ésta, pierde dureza llegando entre 56 a 67 HRc.

Otra característica importante, es que la grasa se carboniza gradualmente, perdiendo la capacidad de formar una película lubricante; iniciándose una fatiga prematura y el posterior desprendimiento de material (descascarillado).



Figura 1.57 Marca típica ondulada causada por una fuga de corriente.

1.3.2.4 Deformación plástica

1.3.2.4.1 Sobrecarga

La deformación plástica puede ser producida por una sobre carga estática, cargas de choque, o por un montaje inadecuado. No obstante, cualquiera sea la razón anteriormente mencionada, el patrón de daño es el mismo: macro indentaciones, es decir, marcas de abolladura o hendiduras; permanentes. La mayoría de las veces, las marcas son equidistantes en las pistas de rodadura; plasmadas por los elementos rodantes (ver Figura 1.58). Si un rodamiento comienza a operar con dichos daños, los niveles de vibraciones y sonido aumentarán considerablemente.

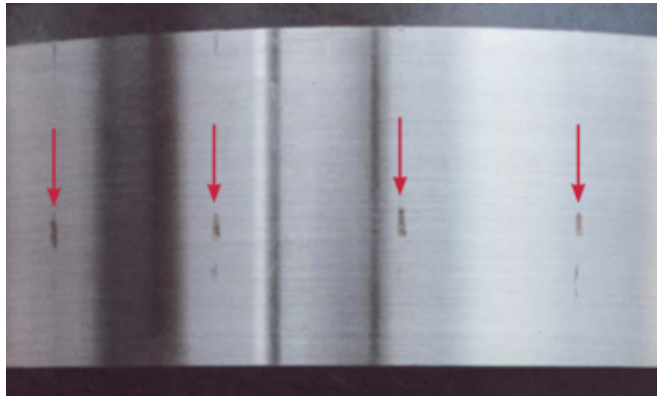


Figura 1.58 Marcas de montaje, equidistantes a la distancia de los elementos rodantes.

1.3.2.4.2 Indentaciones por contaminación

Los contaminantes sólidos pueden ingresar al interior de los rodamientos, a través de los sellos o por medio del lubricante. También, pueden ser partículas desgastadas de otro componente, por ejemplo: una rueda dentada.

Cuando un rodillo o una bola rueda sobre una partícula sólida, ésta se adhiere a la pista de rodadura; causando una indentación. Cabe mencionar, que la partícula no necesariamente debe tener una alta dureza, incluso una partícula de baja dureza con un tamaño adecuado, puede ser perjudicial. La indentación marca la superficie del rodamiento, creando una hendidura, comenzando una fatiga prematura, la cual en un determinado tiempo evolucionará en el desprendimiento del acero (ver Figura 1.59).

Las medidas preventivas más importantes son un lubricante limpio y una limpieza y cuidado exhaustivo en el montaje de los rodamientos.

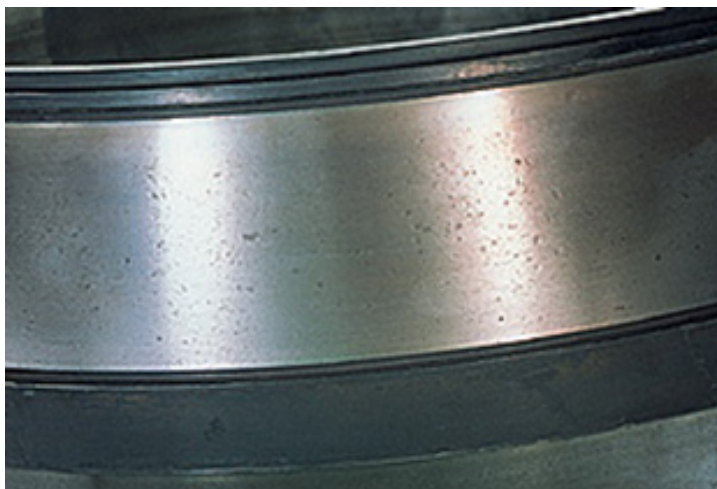


Figura 1.59 Múltiples indentaciones por contaminación, en un aro interior.

1.3.2.5 Fractura y agrietamiento

1.3.2.5.1 Fractura forzada

Este modo de falla ocurre cuando las concentraciones de esfuerzos en el acero superan la resistencia a la tracción máxima del material. Una sobrecarga puntual o un sobrestrés son dos causas comunes de fracturas. Por ejemplo, un montaje en frío de un rodamiento utilizando un martillo y un cincel, es una mala técnica de montaje, que conducirá a la creación de fracturas cuando el rodamiento comience a operar. Otra causa común de fracturas, es cuando un rodamiento de agujero cónico se cala excesivamente en el eje o manguito, produciendo un excesivo estrés circular en el aro interior, desencadenando la fractura del mismo; generalmente en sentido axial. También, cuando se montan rodamientos en ejes que tienen una sobre medida; fuera de norma ISO (ver Figura 1.60).



Figura 1.60 Fractura en el hombro del aro interior.

1.3.2.5.2 Fractura por fatiga

Este tipo de fractura ocurre cuando se supera el número de ciclos límite que resiste el acero del rodamiento, causado por los repetidos ciclos de flexión que deben soportar todos los elementos del rodamiento. La fractura comienza en forma de “rayadura”, y progresivamente se propaga hasta fracturar el aro del rodamiento (ver Figura 1.61), o de la jaula (elemento más débil del rodamiento).



Figura 1.61 Fractura de fatiga en un aro exterior de un rodamiento de rodillos esféricos.

1.3.2.5.3 Ruptura térmica

Dos superficies metálicas que deslizan entre sí, generan fricción y temperatura. Si el contacto es muy fuerte, el calor aumenta a niveles tan altos que puede fracturar el acero. Este modo de falla, se caracteriza porque las fracturas se ocasionan de forma transversal al movimiento deslizante de ambas superficies (ver Figura 1.62).

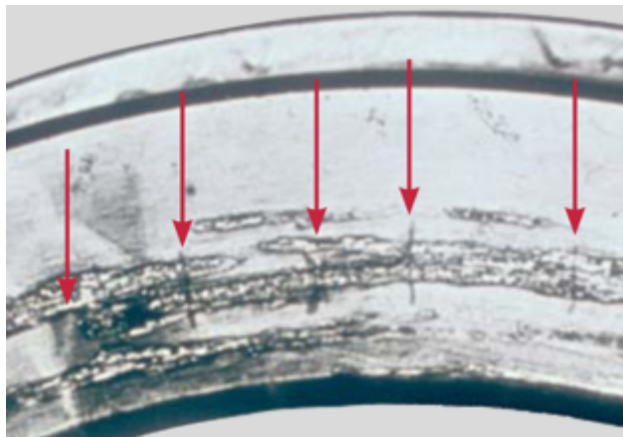


Figura 1.62 Fracturas perpendiculares al deslizamiento de las superficies.

1.3.2.6 Corrosión

Si ingresan fluidos corrosivos o agua al interior del rodamiento, en una cantidad que sobrepasé la protección que le otorga el lubricante a la superficie del acero, ésta se oxidará. Este proceso continuará creando zonas de óxido profundo en el rodamiento, lo que desencadenará lentamente el desprendimiento del acero, en forma de *picaduras*, tanto en las pistas de rodadura como en los elementos rodantes; lo que conllevará a la destrucción del rodamiento.

Principalmente, existen dos maneras en la que se crea corrosión en los rodamientos. En primer lugar, la corrosión causada por la presencia de humedad al interior del rodamiento o por el ataque de fluidos agresivos, como por ejemplo: ácido. En segundo lugar, la corrosión por fricción, que se crea por el contacto metálico entre dos elementos, provocando el arranque de finas partículas de metal del rodamiento o de los apoyos de los ejes y alojamientos; las que se oxidan rápidamente.

1.3.2.6.1 Corrosión por humedad o fluidos agresivos

Generalmente en las superficies de acero del rodamiento expuestas al aire, se forma una fina capa protectora de óxido. Sin embargo, ésta no es impenetrable y si agua o fluidos corrosivos entran en contacto, se formarán manchas de corrosión de color café rojizo o negras. Éstas producen en un corto tiempo óxido profundo, el que representa un daño avanzado del rodamiento, ya que la estructura cristalina del acero cambia, reduciendo las zonas efectivas de carga.

Posterior a esto, las capas oxidadas ceden bajo la presión de los rodillos frente a la rodadura, formando micro cráteres. Así, se inicia un proceso de desprendimiento de partículas de acero de las pistas de rodadura y del rodamiento en general, los que liberan polvo abrasivo. Luego de que el rodamiento continúe operando, los micro cráteres

comenzarán a debilitar al rodamiento, evolucionando en futuras grietas, que pueden terminar fracturando el aro interior o exterior del rodamiento.

La mejor forma de evitar daños por corrosión es utilizar sellos apropiados o lubricantes que posean propiedades inhibidoras de corrosión. También, se pueden implementar rodamientos de acero inoxidable o rodamientos lubricados por grasa sólida.

Imágenes características

Las siguientes imágenes, obtenidas de diferentes catálogos de rodamientos, muestran las características típicas de los daños por corrosión. En cada una de ellas se señala el síntoma y la causa del modo de falla.

1. Aro interior de un rodamiento de rodillos esféricos.

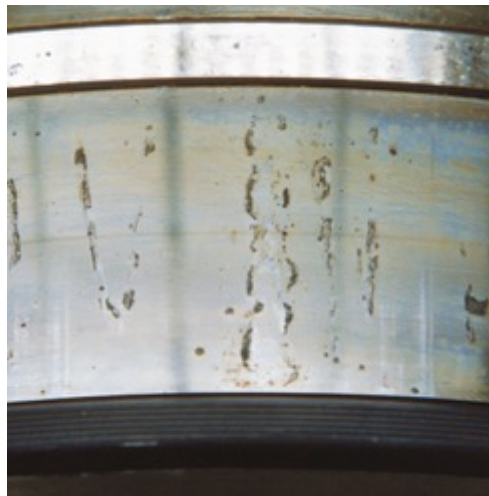


Figura 1.63 Aro interior rodamiento rodillos esféricos.

Síntoma: Manchas de corrosión en la superficie de la pista en el espaciado de los rodillos.

Causa: Entrada de agua al lubricante.

2. Rodillo esférico.



Figura 1.64 Rodillo esférico con daño medio.

Síntoma: Puntos de corrosión en la superficie de contacto, especialmente en la zona de carga.

Causa: Condensación de la humedad por un mal almacenamiento del rodamiento.



Figura 1.65 Rodillo esférico con daño severo.

Síntoma: Corrosión severa en todo el rodillo, manchas negras y micro cráteres.

Causa: Ingreso de agua y fluidos corrosivos al interior del rodamiento.

3. Aro interior y rodillo de un rodamiento de rodillos esférico

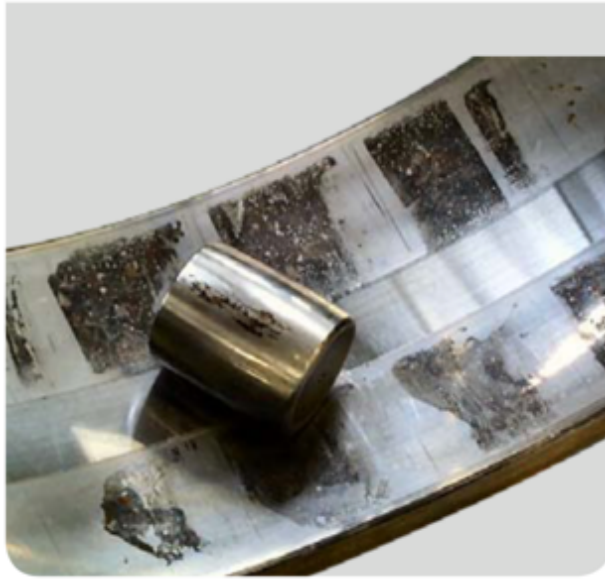


Figura 1.66 Aro interior y rodillo esférico.

Síntoma: Manchas grabadas de agua en el acero a una distancia equidistante respecto a los rodillos del rodamiento.

Causa: Ingreso de agua o fluido corrosivo al interior del rodamiento, mezclándose con el aceite.

Es preciso señalar, que este fenómeno se produce cuando el rodamiento está detenido, allí el agua se concentra a los costados de los elementos rodantes. Esto ocurre porque el agua posee un peso específico superior al del aceite, por lo tanto el agua decanta hacia los costados de los elementos rodantes. La Figura 1.67 muestra el fenómeno anteriormente descrito.

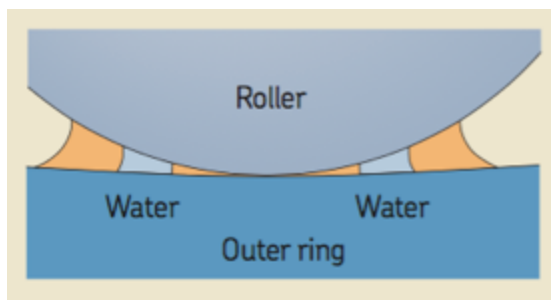


Figura 1.67 Grabado de agua en las pistas de rodadura.

1.3.2.6.2 Corrosión por fricción

La corrosión por fricción, o también llamada corrosión de contacto, se origina cuando existe un movimiento relativo entre dos elementos que no están lubricados. En rodamientos, es común apreciar este fenómeno entre el aro del rodamiento y el eje o soporte; generalmente debido a un ajuste flojo. Así, la corrosión de contacto se presenta bajo la forma de manchas de color café rojizo o negras más o menos extensas.

La Figura 1.68 muestra que el continuo movimiento relativo entre las micro crestas del acero, desencadena el desprendimiento de pequeñas partículas de material de la superficie, las que se oxidan rápidamente al quedar expuestas al oxígeno de la atmósfera.

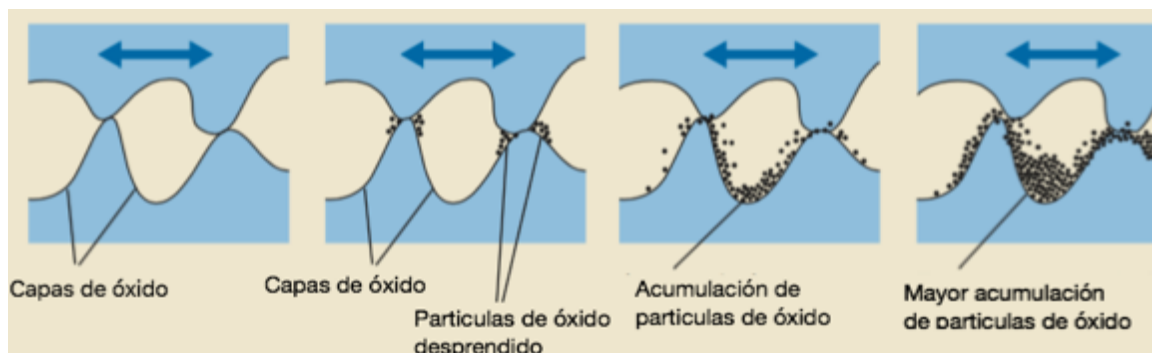


Figura 1.68 Generación de partículas de óxido debido al movimiento relativo entre las superficies metálicas.

Cabe destacar, que con frecuencia se puede obtener una aproximación, a través de las manchas de corrosión, de la posición y tamaño de la zona de distribución de carga a la que está sometido el rodamiento. Sin embargo, como consecuencia de una profunda corrosión de contacto, los aros de los rodamientos no tendrán un apoyo uniforme, ya sea en su alojamiento o eje, lo que perjudicará la distribución de carga en los rodamientos, ya que las zonas corroídas actúan como zonas de concentración de esfuerzos, las que conducirán a los aros del rodamientos a la fractura.

Imágenes representativas

Las siguientes imágenes, obtenidas de diferentes catálogos de rodamientos, muestran los daños por corrosión. En cada una de ellas se señala el síntoma y la causa del modo de falla.

4. Aro interior de un rodamiento de rodillos cilíndricos



Figura 1.69 Aro interior de un rodamiento de rodillos cilíndricos.

Síntoma: Corrosión de contacto en el agujero del aro interior.

Causa: Ajuste demasiado flojo, a pesar de que no se observan marcas de giro del aro interior respecto al eje.

5. Aro exterior rodamiento de rodillos esféricos



Figura 1.70 Aro exterior rodamiento de rodillos esféricos.

Síntoma: Corrosión de contacto impide una correcta distribución de carga.

Causa: Ajuste inadecuado respecto al alojamiento.

6. Aro interior de un rodamiento de rodillos cónicos

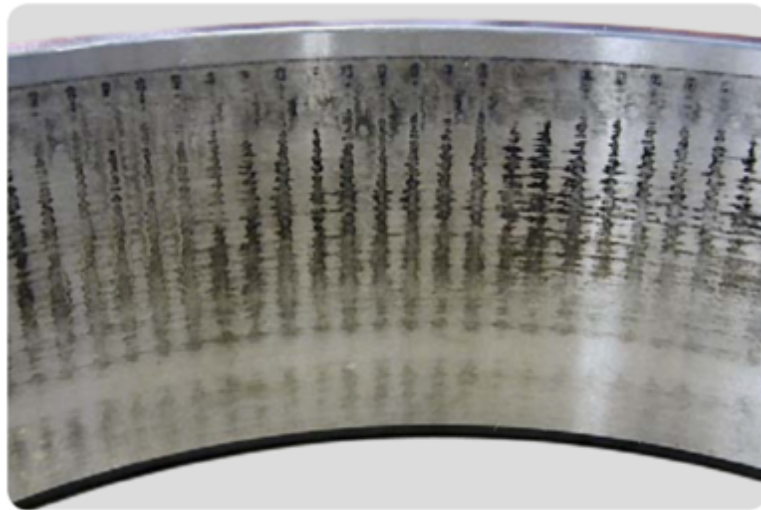


Figura 1.71 Aro interior rodamiento rodillos cónicos.

Síntoma: Marcas de corrosión de contacto en segmentos equidistantes.

Causa: Micro movimientos correspondientes a un deficiente mecanizado del eje.

1.3.2.6.3 Fallas, causas y contramedidas

Corrosión por humedad o medios agresivos

La Tabla 1.14 indica el aspecto de las fallas producidas por corrosión por humedad o medios agresivos, detallando el aspecto, causas y soluciones, en cada caso.

Tabla 1.14 : Aspecto, causas y soluciones para fallas por corrosión por humedad o medios agresivos.

Aspecto	Causas	Soluciones
Marcas negras y/o grises sobre el acero en todos los componentes del rodamiento, generalmente coinciden con los espacios entre los elementos rodantes. En una fase más avanzada de la corrosión, se van creando picaduras sobre el acero, generalmente sobre las pistas de rodadura y sobre los elementos rodantes.	Almacenamiento inadecuado, humedad relativa > 60%. Presencia de humedad, ingreso de agua o fluidos corrosivos (ácidos) al interior del rodamiento durante un periodo prolongado de tiempo. Condensación de la humedad existente en el aire.	Mejorar eficiencia de los sellos. Inspeccionar periódicamente el lubricante . Utilizar un lubricante con propiedades inhibidoras; protectores contra la corrosión. Utilizar rodamientos o soportes para uso específico en ambientes corrosivos. Por ejemplo: Rodamientos con grasa sólida o soportes y rodamientos de acero inoxidable.

Fuente: Elaboración propia.

Corrosión por fricción

La Tabla 1.15 indica el aspecto de las fallas producidas por corrosión por fricción, detallando el aspecto, causas y soluciones, en cada caso.

Tabla 1.15 Aspecto, causas y soluciones para fallas por corrosión por humedad o medios agresivos.

Aspecto	Causas	Soluciones
Zonas de óxido en la superficie externa del aro exterior o en el agujero del aro interior. Generalmente, las marcas de corrosión adquieren la huella del camino de rodadura. Manchas extendidas sobre la superficie del acero de color café rojizo o negras.	Ajuste demasiado flojo. Asientos en el eje o alojamiento con errores de forma, debido a tolerancias incorrectas de ajuste o calidades superficiales inadecuadas. Vibraciones durante transporte. Lubricación deficiente o incorrecta.	Seleccionar los ajustes apropiados. Verificar que los alojamientos estén correctamente mecanizados. En aplicaciones sin ajuste de interferencia, es recomendable aplicar una pasta anti adherente. Por ejemplo: SKF Anti-fretting Agent.

Fuente: Elaboración propia.

1.4. Montaje y desmontaje

1.4.1 Consideraciones previas

1.4.1.1 Condiciones de almacenaje

Los rodamientos se deben almacenar en su embalaje original, y sólo deben ser sacados de su envoltura al momento de instalarlos. De esta forma, se evita que el rodamiento entre en contacto directo con el aire, humedad y partículas contaminantes del ambiente.

Por otra parte, es recomendable guardar los rodamientos en bodegas que no excedan una humedad atmosférica del 60% y que no estén expuestas a grandes cambios de temperatura. Además, se recomienda almacenar los rodamientos en una posición horizontal, sobre una superficie libre de vibraciones.

1.4.1.2 Limpieza previa al montaje

Antes de montar los rodamientos, el área de instalación debe estar lo más limpia posible. Se debe evitar el ingreso de contaminantes al interior de los rodamientos, como polvo, esquirlas, humedad, entre otros. La suciedad influye negativamente en la rodadura de los rodamientos, acortando dramáticamente la duración de éstos. Además de controlar que el rodamiento no se contamine, el eje y alojamiento deben estar limpios y libres de rebabas o rayaduras, ya que afectarían negativamente el contacto entre las superficies.

1.4.2 Montaje

Dada la gran cantidad de tipos y tamaños de rodamientos existentes, no todos pueden montarse y desmontarse de la misma manera. Los distintos métodos se distinguen inicialmente entre procedimientos mecánicos, hidráulicos y térmicos. Además, los métodos a emplear dependerán del tipo de agujero que posea el rodamiento; el que puede ser cilíndrico o cónico.

Independiente del método a utilizar es importante que los aros, elementos rodantes y la jaula del rodamiento no reciban golpes directos durante el montaje. En ningún caso, se debe aplicar presión a un aro para calar el otro aro del rodamiento.

1.4.2.1 Montaje de rodamientos con asiento cilíndrico

Los métodos que se utilizan para montar rodamientos con asientos cilíndricos son procedimientos mecánicos y térmicos.

1.4.2.1.1 Procedimiento mecánico

Rodamientos con diámetros inferiores a 80 [mm] pueden ser montados mediante una prensa en frío sobre el eje o alojamiento. Siempre es recomendable utilizar una prensa mecánica o hidráulica para montar los rodamientos (ver Figura 1.72).

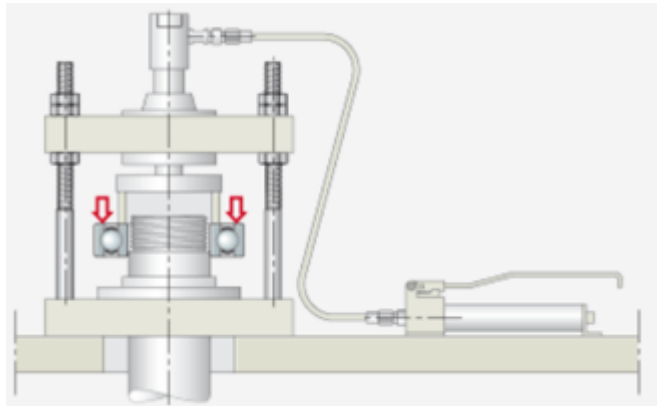


Figura 1.72 Montaje en frío mediante prensa hidráulica.

No obstante, en caso de no disponer de una prensa, se pueden montar los rodamientos mediante la utilización de un casquillo de montaje (ver Figura 1.73), el cual debe ser de acero blando y poseer una superficie frontal plana. Así, aplicando **ligeros** golpes con un martillo de bronce, la fuerza actuará igualmente en toda la circunferencia del aro.

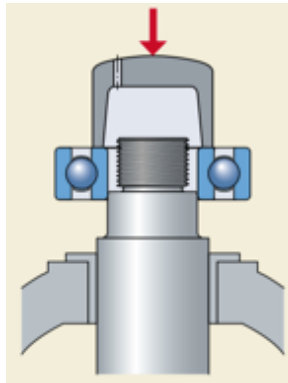


Figura 1.73 Casquillo de montaje.

Si el rodamiento a montar, es del tipo no desarmable (p.e. un rodamiento de bolas ranura profunda), se debe montar primero el aro que tiene el ajuste más fuerte. De este modo, si el rodamiento requiere un ajuste más fuerte en el aro interior, se deberá aplicar una fuerza homogénea sobre dicho aro. Por otra parte, si el rodamiento requiere un ajuste fuerte en ambos aros, se deberá utilizar un casquillo doble (ver Figura 1.74) que reparta la presión uniformemente en ambos aros.

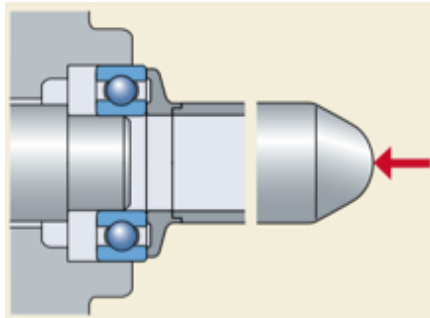


Figura 1.74 Casquillo de montaje doble.

1.4.2.1.2 Procedimiento térmico

Los rodamientos más grandes generalmente no se pueden montar en frío, dado que las fuerzas requeridas aumentan considerablemente con el tamaño del mismo. Por esta razón se opta por calentar los rodamientos, los aros interiores y los soportes antes de su montaje. Los métodos más utilizados para calentar los rodamientos son el baño de aceite, horno de aire caliente y el calentador por inducción.

a. Horno de aire caliente

Los rodamientos se calientan en un horno de aire caliente, donde la temperatura se mantiene estable utilizando un termostato. La gran ventaja de este método es que el ensuciamiento queda prácticamente excluido, sin embargo su principal desventaja es que tarda mucho tiempo en calentar rodamientos medianos y grandes.

b. Baño de aceite

El método consiste en calentar los rodamientos en un recipiente que contiene aceite caliente entre 80°C y 100°C; siempre controlando la temperatura con un termómetro. Es importante que el rodamiento se apoye sobre una malla metálica en el fondo del recipiente (ver Figura 1.75), evitando que el rodamiento se caliente de forma irregular, e impidiendo que las partículas contaminantes no ingresen al interior del rodamiento.

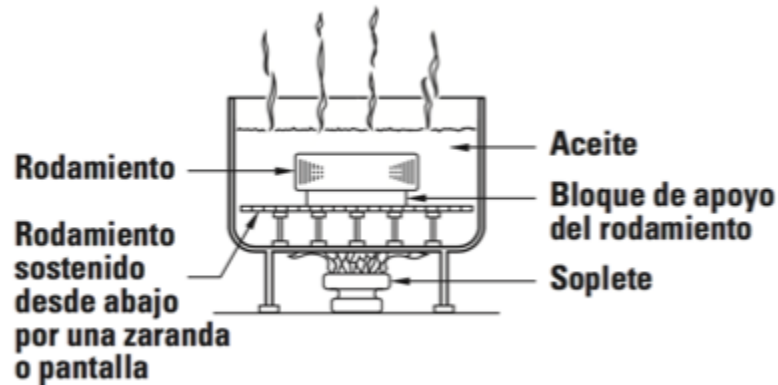


Figura 1.75 Baño de aceite.

En suma, el baño de aceite es un método eficiente para calentar los rodamientos, dado que es relativamente fácil controlar la temperatura del rodamiento, sin embargo es un método peligroso para los operadores.

c. Calentador de inducción

Corresponde al método más utilizado en la actualidad en la industria, dado que es un procedimiento seguro, rápido y sobre todo limpio. Su principio de funcionamiento radica en que la electricidad (corriente alterna) circula por una bobina produciendo un campo magnético que induce en el rodamiento una corriente que genera calor (ver Figura 1.76).

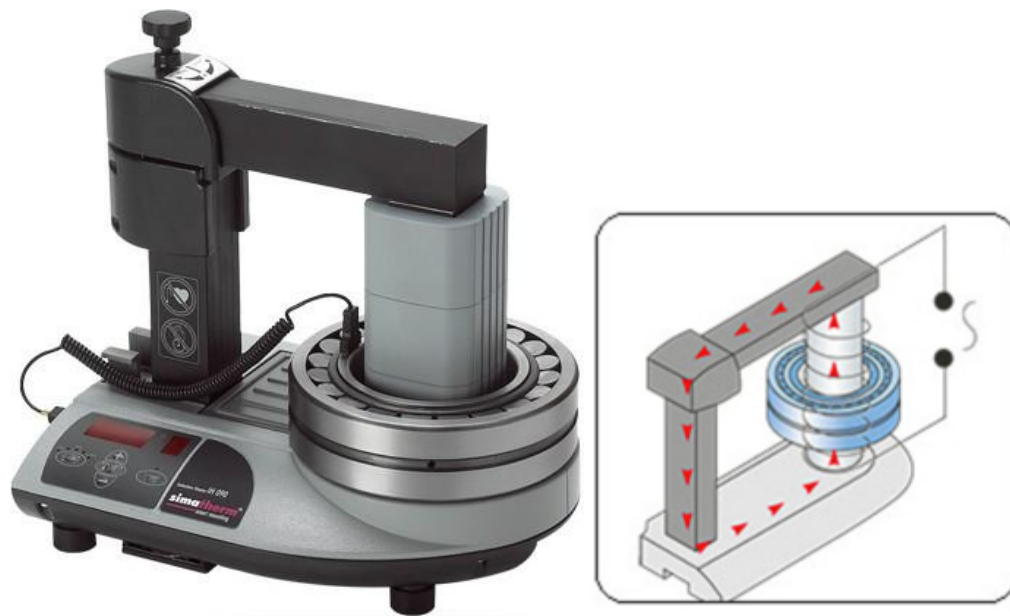


Figura 1.76 Calentador de inducción.

1.4.2.2 Montaje de rodamientos con asiento cónico

Los rodamientos de agujero cónico se pueden montar directamente sobre un eje cónico, y en caso de que el eje sea cilíndrico, se puede utilizar un manguito de fijación o desmontaje para calar el rodamiento sobre éstos. Generalmente, se utilizan manguitos de fijación.

Los aros interiores de los rodamientos con un agujero cónico siempre se montan con un ajuste de interferencia; el cual dependerá de la distancia de calado del rodamiento en el asiento cónico del eje, o del manguito de fijación o desmontaje. El ajuste correcto será cuando el rodamiento alcance la reducción de juego radial interno deseado, dependiendo del tamaño del rodamiento y de su aplicación.

1.4.2.2.1 Procedimiento mecánico

Los rodamientos pequeños ($d < 120$ mm) se pueden calar directamente sobre el asiento cónico, o mediante un manguito de fijación o desmontaje. El rodamiento queda fijo cuando se aprieta la tuerca mecánica, asegurando ésta mediante una arandela de retención. La Figura 1.77, Figura 1.78, Figura 1.79, representan los distintos tipos de montajes.

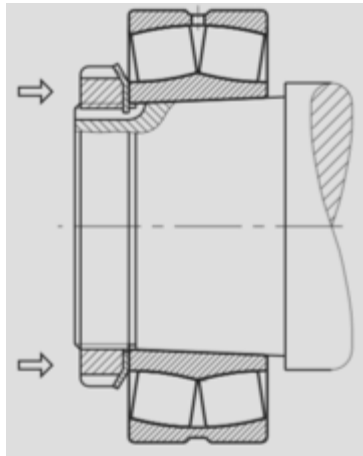


Figura 1.77 Montaje directo sobre asiento cónico en el eje.

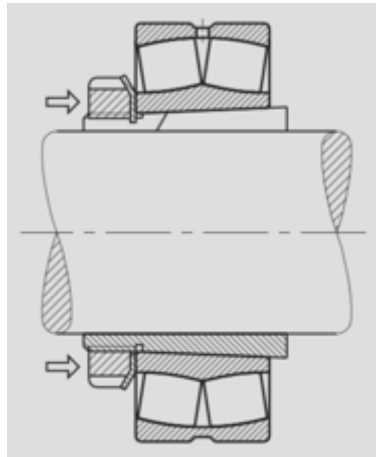


Figura 1.78 Montaje sobre un manguito de fijación.

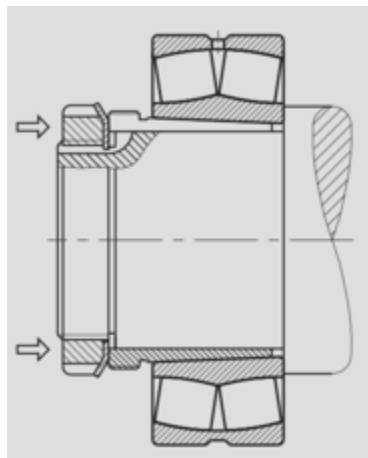


Figura 1.79 Montaje sobre un manguito de desmontaje.

El montaje se realiza empujando el aro interior con las manos sobre el eje o manguito hasta que quede firme, y luego se inserta la tuerca y se aprieta con una llave de gancho (ver Figura 1.80), y en el caso de rodamientos de mayor tamaño se debe utilizar una llave de impacto; aplicando ligeros golpes con un martillo.



Figura 1.80 Llave de gancho a la izquierda, y llave de impacto a la derecha.

Para montar rodamientos grandes, las fuerzas requeridas son mayores para apretar la tuerca, es por esta razón que se utilizan tuercas hidráulicas para montar el rodamiento sobre el eje cónico o para introducir el manguito a presión. La Figura 1.81 ejemplifica el montaje de un rodamiento con asiento cónico directamente sobre el eje; utilizando una tuerca hidráulica (el procedimiento es similar cuando se utiliza un manguito de fijación o desmontaje, ver Figura 1.82).

La tuerca se aprieta manualmente como si fuera una tuerca mecánica en la sección roscada, hasta que el pistón anular tope con el aro interior del rodamiento. Luego se conecta la manguera de la bomba hidráulica manual en la tuerca hidráulica. Una vez asegurada la válvula, se debe comenzar a bombear y lentamente el pistón de la tuerca comenzará a desplazarse axialmente, calando el rodamiento en el eje.

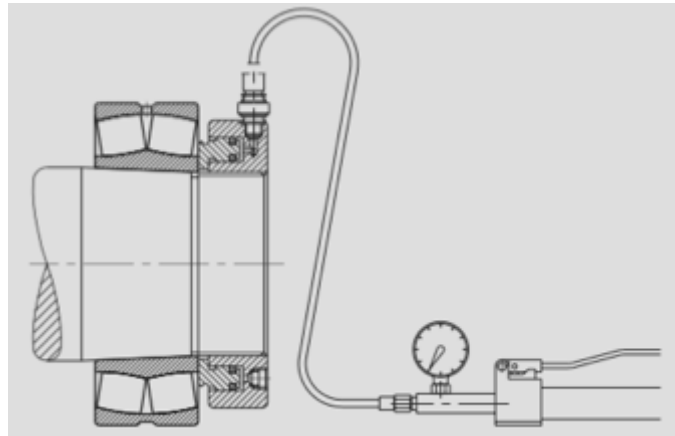


Figura 1.81 Montaje en asiento cónico utilizando una tuerca hidráulica.

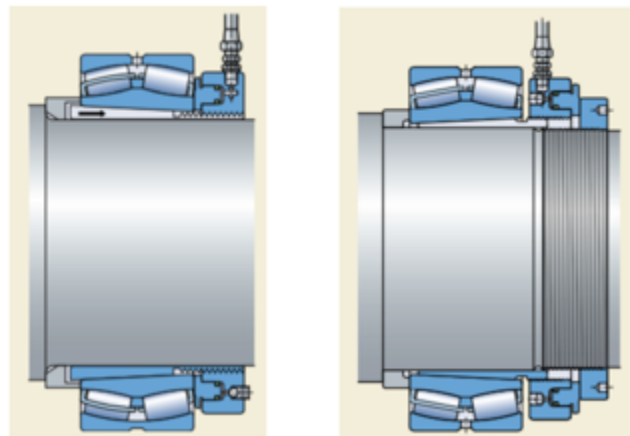


Figura 1.82 Montaje sobre manguito de fijación (izquierda) y desmontaje (derecha) en asiento cilíndrico, utilizando tuerca hidráulica.

1.4.3 Desmontaje

1.4.3.1 Desmontaje de rodamientos con asiento cilíndrico

1.4.3.1.1 Procedimiento mecánico

El desmontaje de rodamientos pequeños se ejecuta utilizando un extractor mecánico (ver Figura 1.83), o prensas hidráulicas cuando los rodamientos son de un tamaño mayor. Independiente del método mecánico a utilizar para desmontar los rodamientos, la fuerza siempre debe ser ejercida en el aro que posee el ajuste de interferencia.

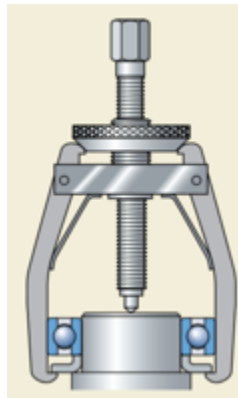


Figura 1.83 Desmontaje mecánico, utilizando un extractor mecánico.

1.4.3.1.2 Procedimiento hidráulico

Los rodamientos de mayor tamaño que poseen un ajuste de interferencia requieren mayores fuerzas para ser desmontados. Por consiguiente, el método de inyección de aceite facilita considerablemente el desmontaje. El método consiste en inyectar aceite por medio de las ranuras que tiene el eje, creando una película lubricante entre las

superficies de contacto (ver Figura 1.84). Así, el rodamiento tenderá a flotar sobre el eje y podrá ser removido manualmente.

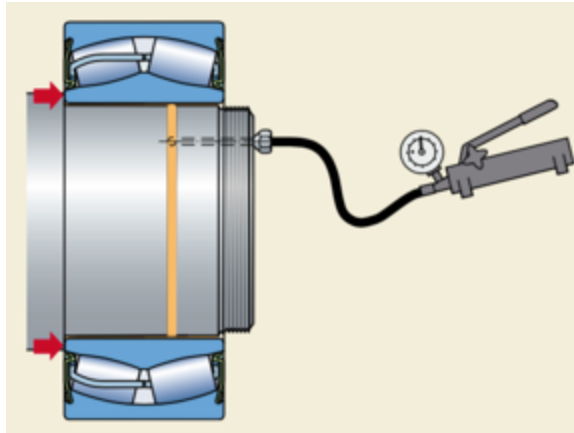


Figura 1.84 Desmontaje hidráulico, utilizando inyección de aceite.

1.4.3.2 Desmontaje de rodamientos con asiento cónico

1.4.3.2.1 Procedimiento mecánico

Los rodamientos pequeños y medianos, que están montados directamente sobre un asiento cónico pueden ser desmontados utilizando un extractor autocentrante (ver Figura 1.85), ejerciendo la fuerza en el aro interior del rodamiento.

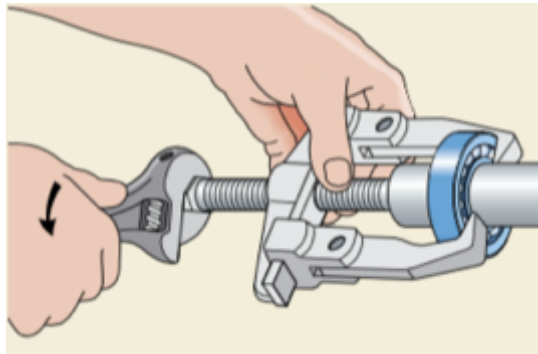


Figura 1.85 Desmontaje mediante un extractor mecánico.

Por otra parte, los rodamientos pequeños y medianos montados sobre un manguito de fijación, se desmontan aplicando ligeros golpes a través de un casquillo de sujeción, sobre el aro interior, utilizando martillo de bronce para ejercer la fuerza requerida (ver Figura 1.86). Antes de aplicar los golpes, la tuerca de seguridad se debe aflojar varias vueltas.

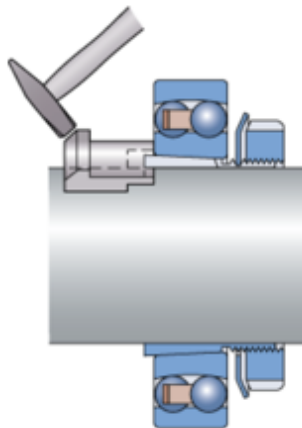


Figura 1.86 Desmontaje sobre un manguito de fijación.

1.4.3.2.2 Procedimiento hidráulico

De la misma forma en que se desmontan los rodamientos de agujero cilíndrico, los rodamientos con asiento cónico de gran tamaño se desmontan utilizando presión hidráulica (ver Figura 1.87). Al introducir aceite a presión entre las superficies de contacto, el rodamiento saldrá bruscamente de su asiento. Por esta razón, es importante colocar un tope que detenga el movimiento axial del rodamiento. Generalmente se utiliza de tope la tuerca de fijación.

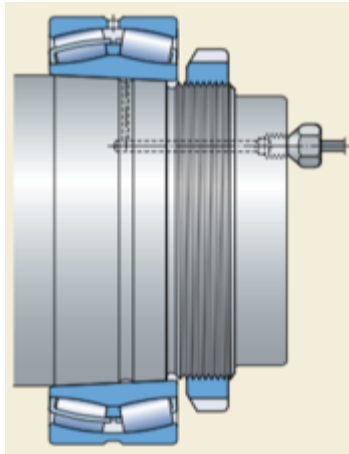


Figura 1.87 Desmontaje mediante inyección de aceite, sobre un eje cónico.

Los rodamientos de mayor tamaño, montados sobre un manguito de fijación, requieren grandes esfuerzos para ser desmontado, que no son posibles de realizar mediante un procedimiento mecánico. Es por esta razón, que utilizar una tuerca hidráulica simplificará el desmontaje (ver Figura 1.88). El desmontaje se inicia aflojando la tuerca de seguridad, para reemplazarla por la tuerca hidráulica. Luego de conectar la bomba de aceite con la tuerca hidráulica, se debe inyectar el aceite, el que fluirá a través de las ranuras que posee el manguito de fijación, de manera que las piezas se puedan desplazar entre sí.

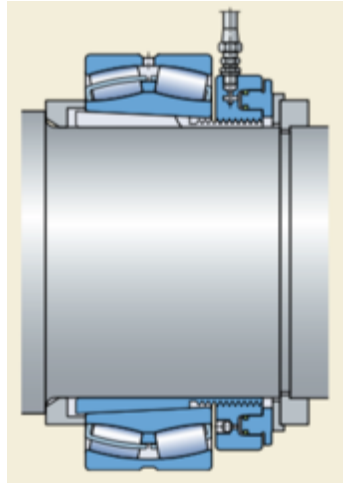


Figura 1.88 Desmontaje mediante inyección de aceite, sobre un manguito de fijación.

1.4.4 Juego radial interno

El juego radial interno de un rodamiento corresponde a la distancia total, medida sin carga, que puede desplazarse el aro exterior respecto al aro interior, ya sea radialmente o axialmente. La Figura 1.89 representa dicha distancia en un rodamiento de rodillos esféricos.

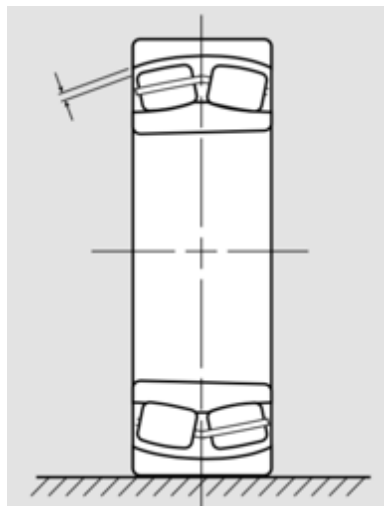


Figura 1.89 Juego radial interno en un rodamiento de rodillos esféricos.

El juego radial de un rodamiento antes del montaje, es **mayor** al que tendrá después de ser montado, y al juego de funcionamiento. El juego de funcionamiento resulta del juego radial y de la variación del mismo a causa de las interferencias de ajuste, y por la dilatación térmica de los aros del rodamiento durante la operación, que dan lugar a una expansión o contracción de los aros. La Figura 1.90 ejemplifica dicha situación.

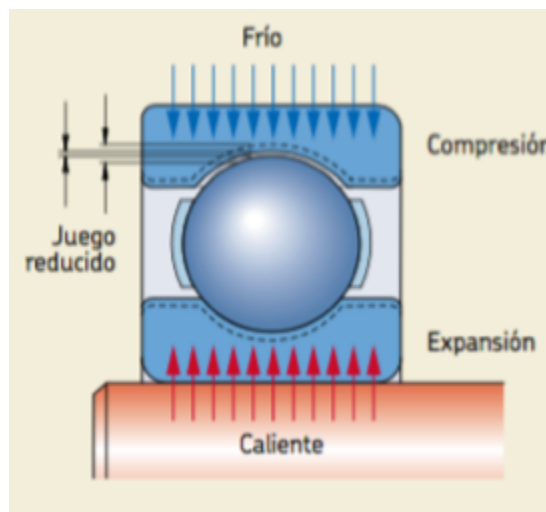


Figura 1.90 Reducción del juego radial interno por dilatación térmica.

Existen distintas clasificaciones de juegos radiales, los cuales se especifican en la Tabla 1.16:

Tabla 1.16 Tipos de juegos radiales internos.

Sufijo	Juego Radial Interno	Campos de utilización
C1	Menor que C2	Alta precisión
C2	Menor que Normal	Para cargas alternas elevadas, en combinación de movimientos de basculación.
CN	Normal	En condiciones normales de funcionamiento.
C3	Mayor que normal	Para ajustes forzados de los anillos del rodamiento y para una mayor diferencia de temperatura entre los anillos interior y exterior.
C4	Mayor que C3	
C5	Mayor que C4	

Fuente: Elaboración propia a partir de catalogo general Rodamientos NSK, E1102c.

En suma, un juego de funcionamiento mayor es necesario, por ejemplo, en casos de generación de calor a través del eje, por flexión de estos y/o a causa de errores en la alineación. Por otra parte, un juego de funcionamiento menor que CN sólo se aplica en casos especiales, donde es necesaria una alta precisión de rodadura; máquinas-herramienta.

La Tabla 1.17 entrega los valores de fábrica que deben tener los rodamientos de rodillos esféricos con agujero cónico para los juegos más comunes; CN, C3 y C4. También proporciona los valores mínimos y máximos de reducción de juego radial, y el juego de rodamiento mínimo admisible después de montaje.

Tabla 1.17 Juegos radiales internos para rodamientos de rodillos esféricos con agujero cónico.

Diámetro del agujero del rodamiento (mm)		Juego del rodamiento						Reducción del juego radial		Desplazamiento axial Cono 1:12		Ángulo nominal de torsión	Juego de rodamiento mínimo admisible		
desde	incl.	CN		C3		C4		min	max	min	max	Nominal	CN	C3	C4
30	40	0,035	0,050	0,050	0,065	0,065	0,085	0,025	0,030	0,40	0,45	100°	0,010	0,025	0,035
40	50	0,045	0,060	0,060	0,080	0,080	0,100	0,030	0,035	0,45	0,55	120°	0,015	0,030	0,045
50	65	0,055	0,075	0,075	0,095	0,095	0,120	0,030	0,035	0,45	0,55	90°	0,025	0,035	0,060
65	80	0,070	0,095	0,095	0,120	0,120	0,150	0,040	0,045	0,60	0,70	120°	0,030	0,040	0,075
80	100	0,080	0,110	0,110	0,140	0,140	0,180	0,045	0,055	0,70	0,85	140°	0,035	0,050	0,085
100	120	0,100	0,135	0,135	0,170	0,170	0,220	0,050	0,060	0,75	0,90		0,045	0,065	0,110
120	140	0,120	0,160	0,160	0,200	0,200	0,260	0,060	0,070	0,90	1,10		0,055	0,080	0,130
140	160	0,130	0,180	0,180	0,230	0,230	0,300	0,065	0,080	1,00	1,30		0,060	0,100	0,150

Todas las dimensiones en mm

(NSK Rodamientos, 2013)

CAPÍTULO 2: DESARROLLO

2.1. Empresa

Yamana Gold Inc. es una de las productoras de oro más importantes del mundo, con base en Canadá y presente en países de Sudamérica como Brasil, México, Argentina, Colombia y Chile. En este último está presente como Yamana Chile Servicios Ltda., desde el año 2008 a través de las operaciones mineras “El Peñón” (Minera Meridian) y “Florida” (Minera Florida).

El Peñón es un conjunto de minas subterráneas, ubicada a 165 [km] al sureste de la ciudad de Antofagasta (ver Figura 2.1). Inició sus operaciones en el año 2000, donde produce oro y plata de alto grado. Al año 2014 produjo 452.120 oz de oro equivalente, el cual se desglosa en 282.617 oz de oro y 8.5 millones de oz de plata.

Cabe destacar, que en el año 2009 se ejecutó una optimización de la planta con la finalidad de aumentar la capacidad instalada de procesamiento, la que requirió de nuevos equipos, tales como: un chancador secundario y un quinto filtro de bandas. Así, el procesamiento del mineral aumentó de 3550 tpd a 4200 tpd; como promedio diario.



Figura 2.1 Vista satelital minera Meridian, Yamana Gold.

2.2. Equipo a intervenir

El equipo a intervenir es el filtro de banda horizontal de vacío, marca Delkor, modelo 32B/09/30V, específicamente el filtro número 4, de los 5 existentes en la faena “El Peñón” (ver Figura 2.2).

Las características principales del filtro son

- Área de filtración: 82.3 [m²]
- Potencia instalada de accionamiento: 45 [kW]
- Longitud caja de vacío: 27 [m]
- Ancho de la correa: 3.2 [m]
- Modelo de la bomba de vacío: NASH CL 6003
- Potencia instalada de la bomba de vacío: 250 [kW]
- Presión de vacío a 1800 msnm y 25°C: -65 [kPa]



Figura 2.2 Vista panorámica sector filtros de banda.

2.2.1 Funcionamiento

La filtración es el proceso de separar partículas sólidas de una líquida. Existen distintos métodos para filtrar, sin embargo, todas requieren de un diferencial de presión para hacer pasar el líquido a través de un elemento filtrante poroso. Un método común en minería son los filtros de vacío, donde la separación sólido-líquido se obtiene por la aspiración que ejerce una bomba de vacío bajo la superficie, donde reposa el concentrado en forma de *lodo*.

La Figura 2.3 enseña un esquema típico de un filtro de banda. A continuación se explica en relación a ésta el proceso de funcionamiento:

- A. Los dos alimentadores permiten que se distribuya uniformemente el concentrado de mineral, por la zona superior del filtro, en todo su ancho. La disposición horizontal, sumado a la acción que ejerce la fuerza de gravedad, permite que se ahorre energía en la succión en la bomba de vacío.
- B. El mineral concentrado, llamado *torta*, se desplaza sobre una tela filtrante, la cual es soportada por una banda de goma. Durante el trayecto en la parte superior, el concentrado se filtra mediante una bomba de vacío, la que actúa a través de la tela filtrante, deshidratando la torta.
- C. La diferencia de presión succiona el fluido líquido filtrado, el cual es conducido hacia la parte inferior, a través de la banda de goma, la que está ranurada en toda su extensión, permitiendo el drenaje hacia un canal de central.
- D. Sistemas especiales de lavado, diseñados para cumplir los requisitos del proceso específico, utilizados para obtener la máxima eficiencia en la recuperación del producto.

- E. El líquido filtrado junto con el aire es conducido a un recipiente. Allí el líquido es bombeado al siguiente proceso mediante una bomba. Por otra parte, el aire escapa por la zona superior debido a la presión negativa que desarrolla la bomba de vacío.
- F. La torta se descarga al final del filtro, en la polea motriz que mueve la banda de goma. Ésta cae por el cambio de dirección que ejerce un rodillo cuando se separa la tela filtrante de la banda de goma.
- G. Múltiples inyectores de agua limpian por separado la banda de goma y la tela filtrante; extendiendo la vida útil.
- H. Las poleas permiten el movimiento continuo de la banda de goma. Asimismo, los múltiples rodillos, de menor diámetro, mantienen una tensión permanente sobre la tela filtrante durante todo el recorrido de ésta. Cabe señalar, que todo el movimiento giratorio es transmitido a través de rodamientos, los cuales se montan en sus respectivos soportes, y se ubican en los extremos de los rodillos y poleas.

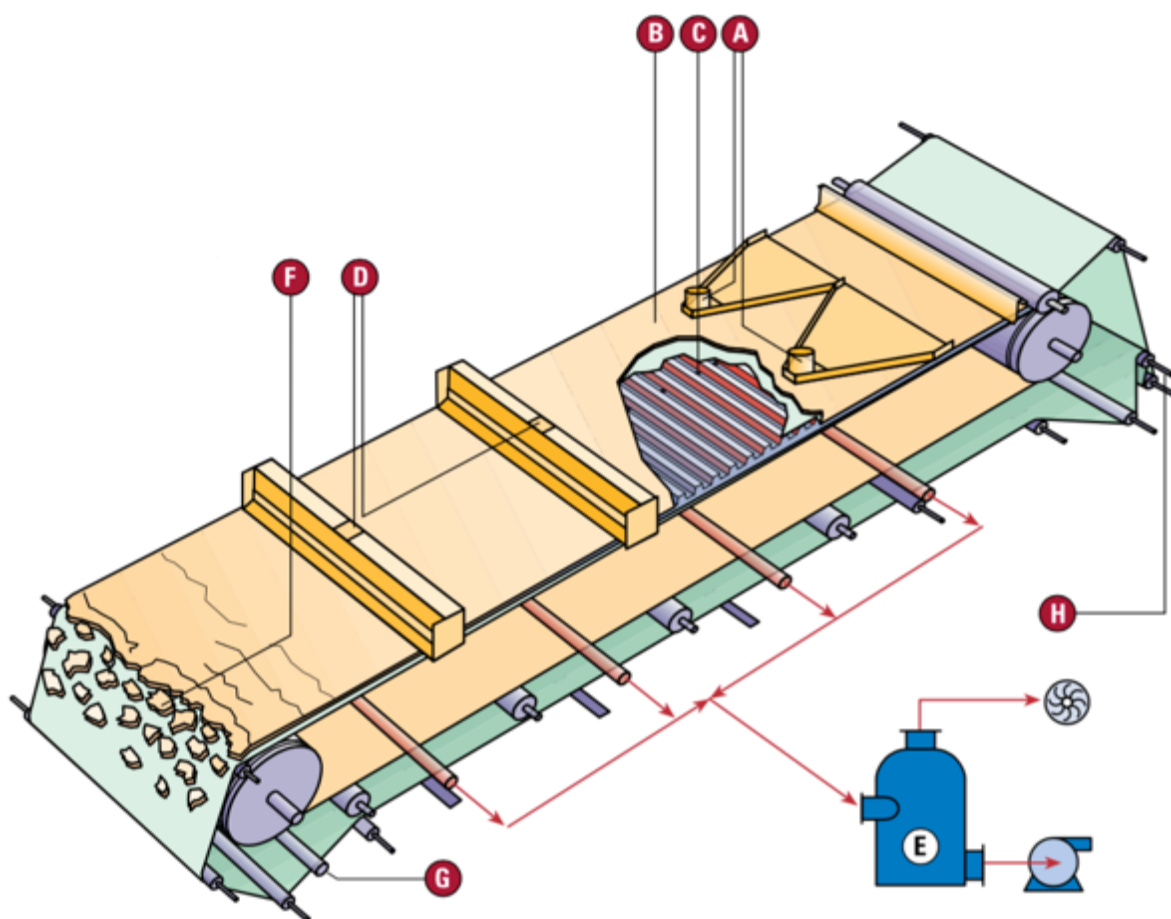


Figura 2.3 Esquema funcionamiento filtro de banda horizontal de vacío.

2.2.2 Componentes a intervenir

Cabe destacar que todo el proceso de filtrado opera de forma continua, por este motivo los rodamientos con sus respectivos soportes y accesorios asociados, son uno de los elementos más importantes en el filtro. Éstos son los encargados de soportar y transmitir la carga de los rodillos que sustentan y guían tanto la banda de goma, como la tela filtrante; asegurando su movimiento continuo. En total, el filtro utiliza 58 rodamientos distribuidos en su mayoría en cada extremo de los rodillos guiadores de la tela, y en menor cantidad utilizados en la polea motriz y de cola.

La Figura 2.4 muestra el diagrama del filtro de banda, donde se aprecia la alta cantidad de rodamientos y soportes que son utilizados tanto en la banda de goma (zona central), como en la tela filtrante (zona perimetral).

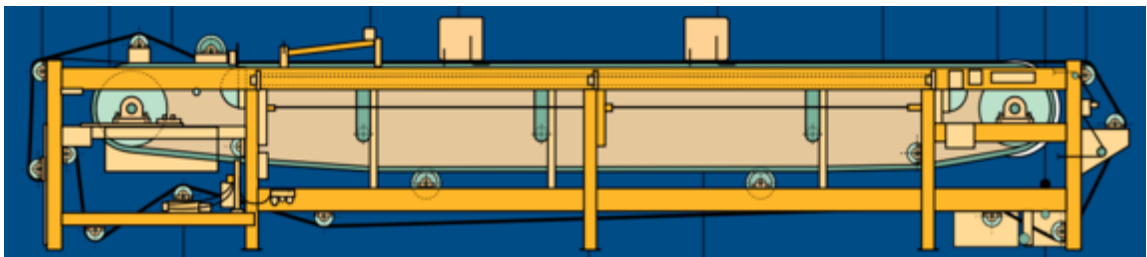


Figura 2.4 Alta cantidad de soportes y rodamientos utilizados en el filtro horizontal de banda.

La Figura 2.5 muestra un acercamiento en la zona izquierda del diagrama, que ratifica la gran cantidad de rodamientos y soportes que utiliza el filtro de bandas.

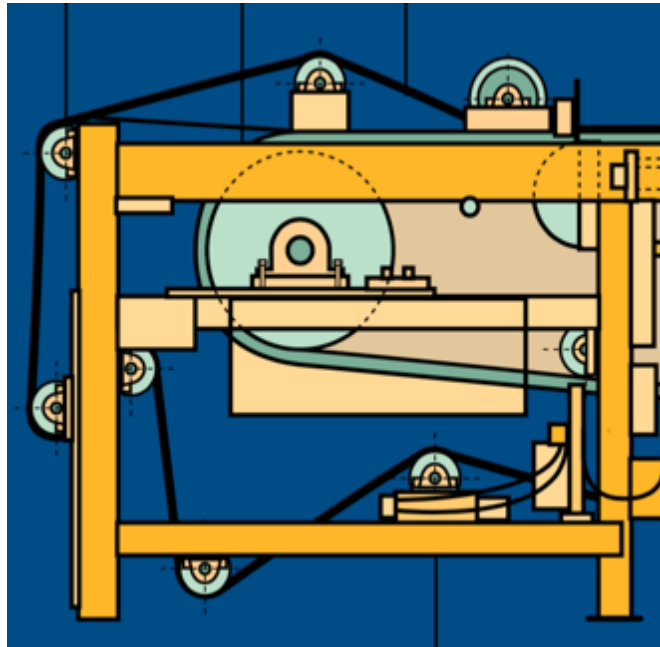


Figura 2.5 Zoom: polea de cola

2.2.3 Diagrama rodillos filtro de banda

La Figura 2.6 enseña la distribución real que presentan los rodillos en el filtro de banda horizontal de vacío. Se dividen en dos grupos, los de mayor tamaño que guían y soportan la banda, y los más pequeños que guían la tela.



Figura 2.6 Diagrama rodillos filtro de banda N°4.

2.2.4 Problemática

La faena “El Peñón”, presenta un alto e indeseado consumo de rodamientos en los filtros de banda. Los rodamientos que mayoritariamente presentan fallas prematuras corresponden a los que guían la tela, principalmente los de la zona inferior. En dicha área la contaminación es excesiva, debido a la existencia de *lodo* que se forma a partir del concentrado de mineral, y que cae por gravedad de la zona de filtrado hacia los soportes y rodamientos. Además, existe una alta presencia de agua, debido a que allí se ubican aspersores que inyectan agua a presión con el propósito de limpiar la tela filtrante, sin embargo, ésta se introduce a los rodamientos; dañándolos.

La inspección visual “in situ”, que expone la Figura 2.7 de la zona en que opera el filtro de banda evidencia la presencia de una alta contaminación por fluidos líquidos, además de una gran presencia de material sólido y de lodo; pertenecientes al proceso mismo de filtrado.



Figura 2.7 Zona inferior del filtro, donde se ubica un rodamiento.

La Figura 2.8 ratifica la alta contaminación a la que están expuestos los soportes de rodamientos.



Figura 2.8 Zona superior del filtro de banda, con alta contaminación de partículas sólidas pertenecientes al proceso de filtrado.

2.2.5 Soporte y rodamiento a reemplazar

El componente a modificar “in situ” es un soporte que en su interior aloja un rodamiento 22210 EAK C3, perteneciente a la zona inferior del filtro de banda, exactamente de soporte fijo del rodillo 11T, mostrado en la Figura 2.9. El rodamiento convencional será reemplazado por un rodamiento lubricado por grasa sólida, el que

desarrolla una mayor vida útil en ambientes con alta contaminación sólida y líquida. Por otra parte, también se reemplazarán los elementos que se ubican al interior del soporte, que permiten la fijación del rodamiento en el soporte.



Figura 2.9 Soporte de rodamiento a intervenir, perteneciente al rodillo 11T.

Además, también se reemplazará un soporte completo de un rodillo nuevo (en maestranza), instalando en éste, un rodamiento lubricado por grasa sólida.

2.3. Diagnóstico de falla

2.3.1 Información General

- **Industria:** Minería de oro.
- **Aplicación:** Filtro de banda horizontal de vacío.
- **Rodamientos:** SKF 22210 EAK C3.
- **Velocidad:** Menor a 10 [rpm].
- **Carga:** Aprox. 250 [kg] cada rodillo es soportado por dos rodamientos.
- **Lubricación:** Grasa.
- **Problema:** Rodamientos fallan y son reemplazados cada 2 a 3 meses.

2.3.2 Inspección

Los rodamientos del filtro de banda horizontal de vacío N°4, están insertos en un ambiente contaminado por fluidos líquidos y minerales sólidos, que provienen del proceso mismo de filtrado. La Figura 2.10 representa claramente dicha situación.



Figura 2.10 Alta contaminación presente en todo el filtro de banda horizontal de vacío.

La Figura 2.11 revela un soporte de rodamiento, donde se observa la contaminación de material sólido adherido sobre todo el soporte.



Figura 2.11 Contaminación sólida completamente adherida al soporte.

Luego de retirar el rodamiento de su soporte, se observa que la grasa que lo lubrica posee un aspecto degradado, de color negro, lo cual indica que se emulsionó al entrar en contacto con fluidos líquidos como agua y/o ácidos. Más aún, en ella se distingue una contaminación por partículas sólidas provenientes del acero oxidado y corroído del rodamiento.

Lo anterior es el resultado de un aceite oxidado, el que produce sedimentos carbonosos en forma de *barros*, tal como muestra la Figura 2.12. Por consiguiente, la grasa pierde sus propiedades físico-químicas y no es capaz de ofrecer una lubricación y protección al rodamiento.



Figura 2.12 Rodamiento cubierto con grasa descompuesta.

Tras desmontar el rodamiento junto con su manguito de fijación del eje, sus componentes se desensamblaron instantáneamente, lo cual no debiese ocurrir, dado que los rodamientos de rodillos esféricos no son del tipo separables. La Figura 2.13 revela el resultado después de la desinstalación.



Figura 2.13 Rodamiento completamente desarmado tras su desmontaje.

2.3.3 Análisis y descripción del daño del rodamiento

2.3.3.1 Vista general

La Figura 2.14 revela una vista general de todos los componentes del rodamiento, también se muestra el manguito de fijación y la arandela de retención. El estado de los componentes, ratifica la magnitud del daño del rodamiento, siendo éste catastrófico. El rodamiento, sin duda no podrá ser reutilizado. Una primera mirada, indica que el rodamiento está dañado por problemas de lubricación, ya que se observa grasa en forma de *barro*; en otras palabras descompuesta.



Figura 2.14 Rodamiento, manguito y arandela de retención sin limpiar.

Se debe limpiar el rodamiento exhaustivamente con desengrasante industrial, hasta remover toda la grasa y las partículas metálicas adheridas a los componentes del rodamiento.

La Figura 2.15 enseña una vista general de todos los componentes del rodamiento, una vez completada la limpieza. Se puede apreciar una elevada cantidad de corrosión, evidenciado por la gran cantidad de manchas negras que se extienden por todos los elementos del rodamiento. Éstas, son típicas de este modo de falla, y por el estado del rodamiento, es que se determina que el grado de corrosión es severo.



Figura 2.15 Vista general del rodamiento y su manguito limpios.

2.3.3.2 Aro interior

La Figura 2.16 muestra el aro interior del rodamiento limpio, el cual se distingue lleno de óxido y corrosión en toda su extensión. Se aprecia que el acero posee picaduras, las que se generan tras superar la etapa de fatiga superficial, debido a problemas de lubricación, específicamente lubricación deficiente por pérdida de sus propiedades al contaminarse con fluidos agresivos.



Figura 2.16 Aro interior del rodamiento.

La Figura 2.17 muestra un acercamiento de una sección del aro interior. En ella se muestra la fractura que tiene el aro interior, la cual es transversal a las pistas de rodadura del rodamiento.

En los rodillos del filtro de banda, el rodamiento posee un ajuste de interferencia sobre el manguito, por lo tanto el aro interior está sometido a fuertes tensiones en toda su área circular, es decir a 360°.

Por otra parte, el *zoom* del aro interior permite asegurar, que el daño del rodamiento es generado por la corrosión en el acero, la que inicia rápidamente el desprendimiento de material del rodamiento, especialmente sobre las pistas de rodadura (zona de carga). En otras palabras, se van creando rápidamente micro cráteres sobre la superficie del acero, los que definitivamente causan la fractura del aro interior.



Figura 2.17 Zoom revela fractura en el aro interior.

2.3.3.3 Aro exterior

El aro exterior del rodamiento, mostrado en la Figura 2.18, exhibe en toda su extensión corrosión y oxidación. Una primera mirada, no permite identificar los micro cráteres en el acero. Sin embargo, la Figura 2.19 muestra un acercamiento de una zona de la pista de rodadura, la que si permite distinguir los micro cráteres causados por la corrosión, que están parcialmente cubiertos por óxido y *barro*. El orificio que se presenta en la misma figura, corresponde a un agujero de lubricación.



Figura 2.18 Aro exterior.



Figura 2.19 Zoom revela micro cráteres en la pista de rodadura del aro exterior.

2.3.3.4 Elementos rodantes

La Figura 2.20 representa dos rodillos esféricos, en ellos se aprecia un severo daño por corrosión, corroborado por la alta cantidad de micro cráteres y por las manchas negras; típicas de este modo de falla. Cabe mencionar, que todos los rodillos poseen similar condición, los que se comprueba en la Figura 2.15.



Figura 2.20 Rodillos esféricos llenos de micro cráteres.

2.3.3.5 Jaula

La Figura 2.21 enseña el estado de las dos mitades de la jaula, las cuales aún mantienen su geometría relativamente intacta, con leve desgaste. Si bien, la jaula presenta dos segmentos transversales cortados, ésta posee un buen estado en cuanto a su resistencia mecánica, de otra forma, no habría resistido y se habría cortado completamente. Cabe señalar, que éste es el componente más débil y no transmite carga, su función sólo es guiar los rodillos durante el tránsito por la zona descargada. Por lo tanto, el rodamiento empezó trabajando bien, pero la corrosión fue muy acelerada; lo que se evidencia por el estado del acero de los demás componentes.

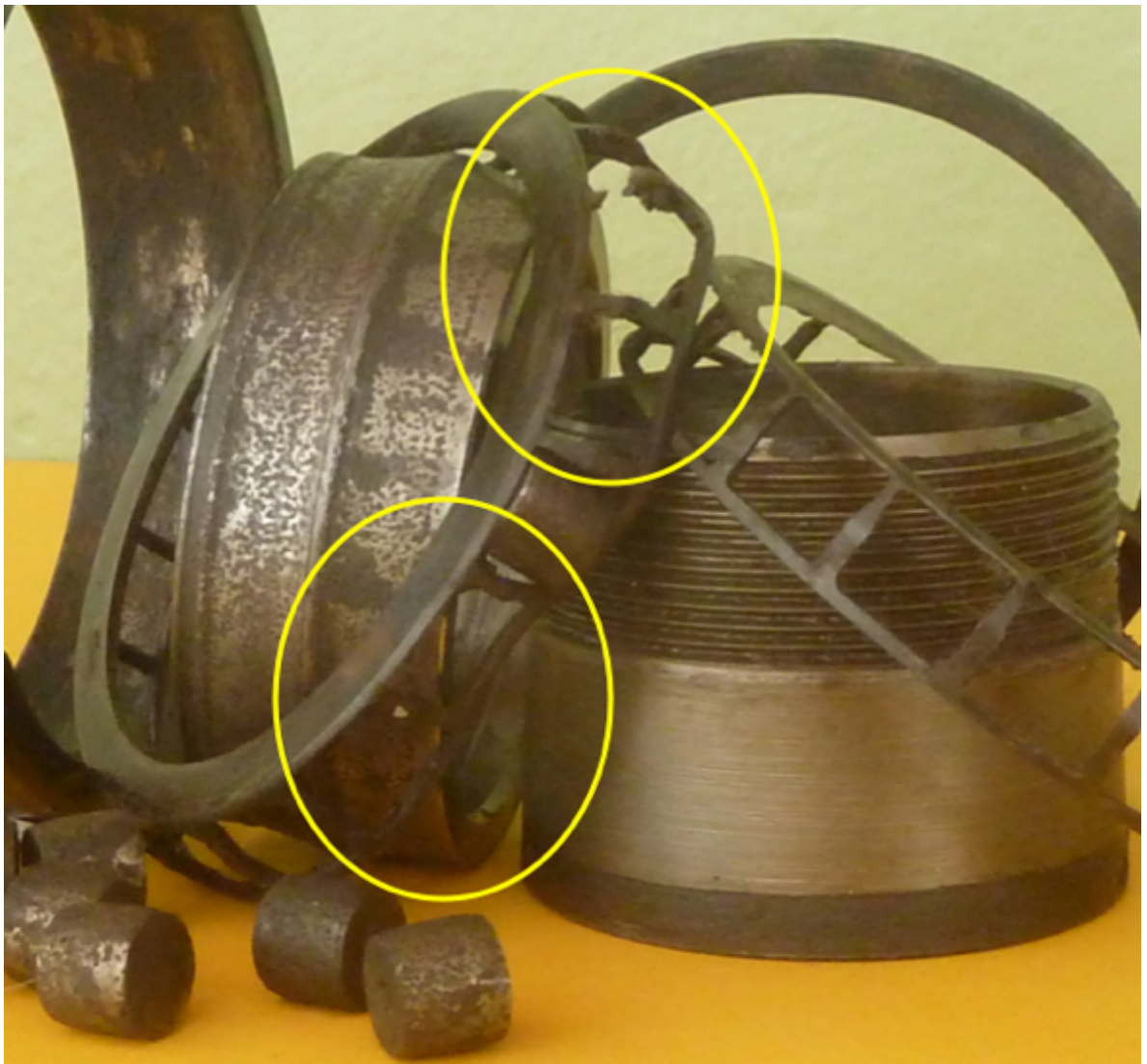


Figura 2.21 Jaula del rodamiento.

2.3.4 Análisis y comentarios.

El presente análisis de falla del rodamiento SKF 22210 CAK C3, reveló lo siguiente:

- Una inspección visual *in situ* del entorno donde trabajan los rodamientos, permitió conocer que el ambiente no es el más adecuado en cuanto a limpieza. Existe una excesiva presencia de contaminantes sólidos y de fluidos líquidos; agua y ácidos del proceso mismo de filtrado, los que caen sobre los soportes, ingresando al interior de estos, y a su vez al interior de los rodamientos.
- Tras desmontar un rodamiento de la zona inferior del filtro, la cual era una de las más afectadas por la contaminación, se observó que el rodamiento posee un daño severo, dado que se desarmó cuando se desinstaló, siendo que un rodamiento de rodillos esféricos es del tipo no desarmable. Otro síntoma asociado a la corrosión, fue que la grasa estaba descompuesta, ya que mantenía un color y consistencia anormal, asimismo poseía partículas contaminantes sólidas.
- Luego de remover la grasa y las impurezas del rodamiento, se descubrió que éste tenía una gran cantidad de micro cráteres sobre la superficie del acero en la mayoría de sus componentes. Igualmente, todos los componentes mostraron manchas de color café o negras, típicas de óxido y corrosión, las que respaldan que el modo de falla fue producido por el ingreso de fluidos agresivos al interior del rodamiento.

- Un análisis más preciso reveló que el aro interior estaba fracturado. Esto es consecuente con el daño provocado por la corrosión, dado al avanzado deterioro de las pistas de rodadura iniciado por los micro cráteres y sumado a que el aro interior está sometido a altas tensiones debido al ajuste de interferencia respecto al eje, terminó por fracturar el aro interior.

Las razones anteriormente mencionadas, permiten concluir que los rodamientos junto con sus soportes están siendo fuertemente atacados químicamente por la acción de fluidos que ingresan al interior de éstos. En consecuencia, se genera progresivamente corrosión en el acero, y al mismo tiempo el agua y/o los ácidos disueltos en el lubricante, termina por descomponerlo. Un efecto directo, es la inmediata disminución de la viscosidad de la grasa, que resulta en el debilitamiento de su capacidad de carga; provocando la ruptura de la capa lubricante.

Luego, bajo estas condiciones desfavorables, las micro crestas de las rugosidades superficiales de los elementos en contacto, sin lubricación, se sueldan. Por consiguiente, el movimiento relativo entre ambos elementos metálicos comienza a romper las micro soldaduras, formando micro cráteres, los que actúan como puntos de alta concentración de tensiones. Finalmente, durante la operación del rodamiento, éste se va debilitando cada vez más, hasta producirse la fractura de alguno de sus componentes, generalmente del aro interior; debido a que éste elemento está fuertemente tensionado por el ajuste de interferencia en relación respecto a su manguito de fijación.

En síntesis, el análisis de causa raíz de falla determina que sobre la base de la teoría y de la inspección de las anomalías físicas que presenta el rodamiento, el modo de falla según las clasificaciones ISO 15243:2004, es corrosión por humedad, el que se sub clasifica como corrosión por ingreso de fluidos químicamente agresivos. Cabe mencionar, que no se hallaron marcas o daños que permitan sospechar de una causal

distinta; los daños como el de la jaula, son sólo secundarios, resultado del proceso de desgaste acelerado por la corrosión.

2.4. Propuestas de solución

A continuación se explica la forma en que se lubrican los rodamientos de forma tradicional, que se ubican en los soportes de poleas o rodillos guías. Por otra parte, se exponen tres formas de mejorar la lubricación en condiciones de alta contaminación.

2.4.1 Lubricación tradicional

Actualmente los rodamientos utilizados en aplicaciones como poleas o rodillos guías, se lubrican mediante grasa. Dichos equipos operan a bajas velocidades, que no superan las 100 [rpm]. Es por ésta razón, que los soportes, que alojan en su interior los rodamientos de rodillos esféricos, deben ir completamente llenos de grasa. De esta forma, la grasa actúa como lubricante y a su vez, como barrera obturante, retardando el ingreso de los contaminantes al interior del rodamiento.

En general, la grasa más empleada para estas aplicaciones, debe poseer las siguientes características; independiente de la marca a utilizar.

- Grado consistencia, NLGI N° 2.
- Viscosidad de al menos 220 cSt, sin exceder 320 cSt.
- Aditivos Extrema Presión (EP).

2.4.2 Grasas hidrorrepelentes

Una mejora que se suele emplear en aplicaciones que están sometidas a altos niveles de contaminación, principalmente por agua o alta humedad, es la utilización de grasas que utilicen como jabón espesante, el complejo de aluminio.

La composición química de éstas, les proporciona una muy buena resistencia frente a la presencia de agua bajo presión, ya que mantienen su estabilidad mecánica. Cabe destacar, que las grasas de complejo de aluminio no se pueden mezclar con otras que tengan distinto espesante.

La Tabla 2.1 indica las principales propiedades de la grasa con espesante complejo de aluminio:

Tabla 2.1 Características grasa complejo de aluminio.

Pruebas	Método ASTM	Resultados
Grado NLGI		2
Apariencia	Visual	Liso Brillante
Color	Visual	Rojo
Tipo de espesante		Complejo de Aluminio
Penetración a 25 °C (60G), 1/10 mm	D 217	280
Estabilidad mecánica, %	D 217	3
Pérdida lavado con agua a 80 °C, % peso	D 1264	1.0
Separación de aceite, % peso	D 1742	2.5
Temperatura de goteo °C	D 2265	260
Cuatro bola, punto soldado, kgf	D 2596	400
Extrema presión Timken, Lbs	D 2509	60
Aceite base:		
Viscosidad cinemática a 40 °C cSt	D 445	220
Viscosidad cinemática a 100 °C cSt		17

(AKRON Lubricantes, 2011)

La norma ASTM D1264 indica la capacidad de una grasa a resistir un chorro de agua a 80°C, a una presión determinada. La prueba se realiza en laboratorio, donde un rodamiento con grasa en su interior, gira en un eje al que se le inyecta un chorro de agua, mientras gira a una velocidad determinada. La clasificación se muestra en la siguiente Tabla 2.2:

Tabla 2.2 Clasificación calidad de grasa complejo de aluminio.

Pérdida de Grasa	Condición
0-3 %	Excelente
3-8 %	Buena
8-15%	Pobre

Es decir, si al finalizar la prueba, el porcentaje de grasa pérdida dentro del rodamiento está comprendida entre un 0 a 3% del total inicial; la grasa se considera como excelente.

La principal desventaja de éste tipo de grasas, es su elevado precio, dado que cuestan el doble o más, que una grasa típica de complejo de litio. Además, su resistencia a los fluidos líquidos ácidos es igual de deficiente que una de complejo de litio.

2.4.3 Rodamientos de rodillos esféricos sellados

Los rodamientos de rodillos esféricos, de algunas series y diámetros de agujero, pueden ser solicitados con sellos obturadores laterales. La Figura 2.22, muestra un rodamiento que está sellado en ambos costados, lo que le brinda una barrera protectora frente a los contaminantes del ambiente. A su vez, los sellos cumplen la función de retener el lubricante, incorporado de fábrica en el interior del rodamiento.



Figura 2.22 Rodamiento de rodillos esféricos sellado.

La Figura 2.23 muestra una vista en detalle del tipo de sello que se incorpora en el lateral del rodamiento. Es un sello de contacto, es decir roza con el aro interior y exterior del rodamiento, lo cual otorga una buena protección contra contaminantes sólidos. Sin embargo, por fricción se aumenta comparado a un rodamiento abierto, lo que conlleva a un mayor gasto energético. Un buen ejemplo de aplicación para estos rodamientos, es en poleas de cintas transportadoras, donde existe alta contaminación sólida. Además, el consumo energético no será apreciable, dada la baja velocidad con que operan estos equipos.



Figura 2.23 Diseño del sello obturante.

La desventaja de estos tipos de rodamientos, es que poseen un mayor valor respecto a los rodamientos convencionales; como mínimo 3 veces. Por otra parte, la protección contra contaminantes líquidos es insuficiente, prácticamente nula, especialmente donde existan fluidos ácidos.

2.4.4 Rodamientos lubricados por grasa sólida

Los rodamientos de grasa sólida son la tercera y mejor opción propuesta, por las siguientes razones:

- Minera Meridian informó que no tuvo una mejora significativa utilizando como lubricante la grasa de complejo de aluminio, por lo que descartaron esa opción.
- Los rodamientos de rodillos esféricos obturados son una solución óptima en condiciones de contaminación sólida, como en correas transportadoras de mineral seco, sin embargo, cuando existe presencia de agua o humedad ocurre el siguiente fenómeno:

El agua y los fluidos ácidos son capaces de deflechar los sellos laterales obturantes (ver Figura 2.24), afectando directamente al lubricante, degradándolo. Así, comenzará inmediatamente la corrosión del acero de los componentes del rodamiento; acelerando el desgaste del acero y finalizando en la falla catastrófica de él. inmediatamente la corrosión del acero de los componentes del rodamiento; acelerando el desgaste del acero y finalizando en la falla catastrófica de él.

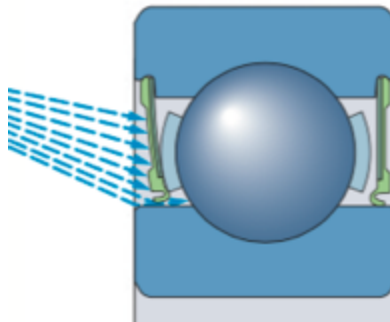


Figura 2.24 Deflección de los sellos laterales obturantes.

(SKF, SKF bearings with solid oil, 2015)

Por otro lado, las ventajas directas que presentan los rodamientos de grasa sólida para esta aplicación son:

- La estructura del material polimérico que retiene el aceite lubricante llena todo el espacio libre dentro del rodamiento, lo que evita el ingreso de contaminantes al interior del rodamiento.
- La grasa sólida expuesta a contaminación por agua o fluidos ácidos no es removida del rodamiento, por su estructura polimérica.

- La grasa sólida contiene desde 2 a 4 veces más aceite que la grasa convencional, resultando en una lubricación efectiva por mucho mas tiempo.
- Se elimina la necesidad de re lubricación, lo que impacta directamente en el ahorro de lubricante, y en el caso de Meridian, se elimina la necesidad de los mantenedores que lubrican los rodamientos del equipo. Así, se evitan detenciones operacionales que perjudican a la continuidad de la producción, y se reduce el impacto medioambiental.

Por todas las razones anteriormente expuestas es que minera Meridian decidió utilizar esta tecnología para iniciar una prueba en los soportes del filtro de banda horizontal de vacío n°4.

2.5. Procedimientos de montaje y desmontaje

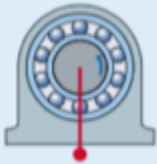
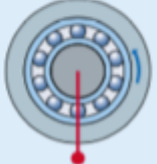
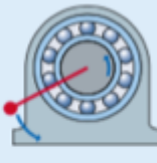
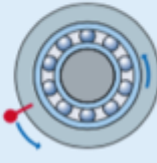
2.5.1 Consideraciones previas: Tolerancias

Antes de montar el rodamiento, se deben controlar correctamente las tolerancias establecidas según normas ISO, para el eje y alojamiento. Por otra parte, se debe verificar que el rodamiento quede con el correcto juego radial interno final, tras su montaje.

En primer lugar se debe definir el tipo de movimiento que tiene el aro del rodamiento, respecto a la dirección de la carga. Esencialmente, existen dos condiciones de giro: carga rotativa y carga estacionaria. La Tabla 2.3 ilustra cada condición de giro y las ejemplifica.

1. La carga es rotativa cuando el aro del rodamiento gira y la carga permanece estacionaria, o si el aro permanece estacionario y la carga gira. De este modo, todos los puntos del camino de rodadura están sometidos a la carga en el transcurso de una revolución.
2. La carga es estacionaria cuando el aro del rodamiento y la carga permanecen fijos, o si el aro y la carga giran a la misma velocidad. De esta forma, la carga siempre permanece en el mismo punto del camino de rodadura.

Tabla 2.3 Condiciones de giro y carga.

Condiciones de funcionamiento	Ilustración esquemática	Condición de carga	Ejemplo	Ajustes recomendados
Aro interior rotativo Aro exterior estacionario Carga de sentido constante		Carga rotativa en el aro interior Carga estacionaria en el aro exterior	Ejes de transmisión por correa	Ajuste de interferencia para el aro interior Ajuste flojo para el aro exterior
Aro interior estacionario Aro exterior rotativo Carga de sentido constante		Carga estacionaria en el aro interior Carga rotativa en el aro exterior	Rodillos de cintas transportadoras Rodamientos de cubos de rueda	Ajuste flojo para el aro interior Ajuste de interferencia para el aro exterior
Aro interior rotativo Aro exterior estacionario La carga gira con el aro interior		Carga estacionaria en el aro interior Carga rotativa en el aro exterior	Aplicaciones vibratorias Cribas vibratorias o motores	Ajuste de interferencia para el aro exterior Ajuste flojo para el aro interior
Aro interior estacionario Aro exterior rotativo La carga gira con el aro exterior		Carga rotativa en el aro interior Carga estacionaria en el aro exterior	Machacadoras giratorias (Transmisiones de transportadores)	Ajuste de interferencia para el aro interior Ajuste flojo para el aro exterior

(SKF, Catalogo General, 2006)

Los rodillos del filtro de banda, que guían la tela, se clasifican según la primera categoría de la Tabla 2.3, es decir la carga es rotativa en el aro interior y estacionaria en el aro exterior. Dado que las condiciones de funcionamiento son: un aro interior rotativo, un aro exterior estacionario y una carga de sentido constante. Los ajustes

recomendados para esta aplicación son de interferencia en el aro interior, y un ajuste flojo para el aro exterior.

2.5.1.1 Tolerancias recomendadas

En rodamientos sólo se utiliza un número limitado de grados de tolerancias ISO, para obtener un ajuste de apriete o un ajuste flojo, hay que seleccionar las tolerancias adecuadas para los asientos en el eje y en el alojamiento. La Figura 2.25 ilustra los grados de tolerancia más utilizados en rodamientos.

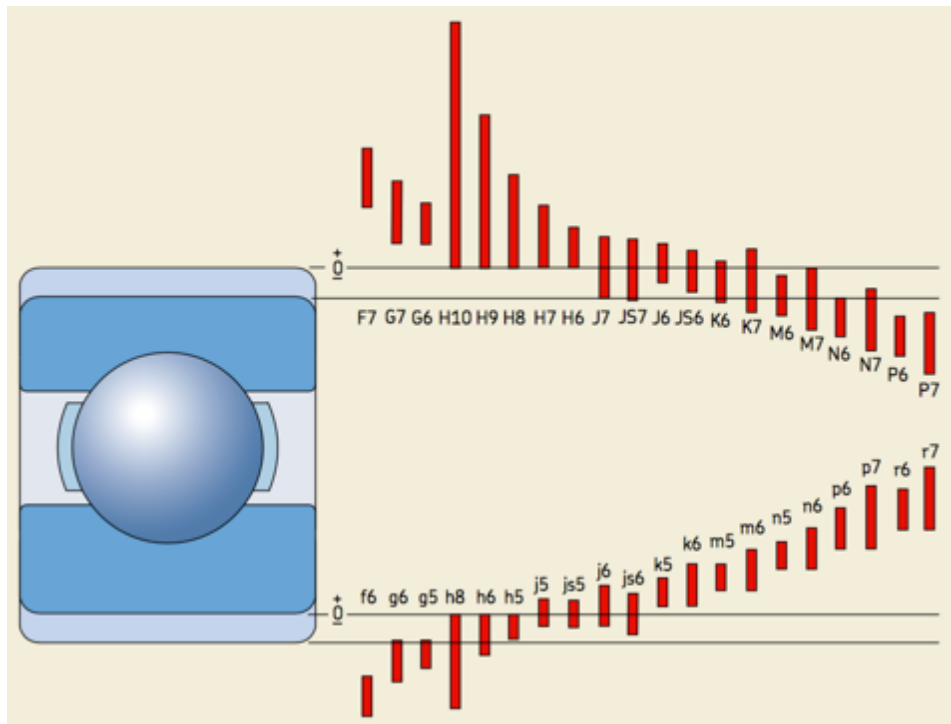


Figura 2.25 Grados de tolerancias ISO más utilizados en rodamientos.

(SKF, Catalogo General, 2006)

La Tabla 2.4 indica que para rodamientos de rodillos esféricos montados sobre manguitos, de cualquier diámetro de eje, y para todo tipo de condición de carga y para aplicaciones generales, se establece que la tolerancia del eje debe ser h9 y con una desviación cilíndrica del eje correspondiente a IT5.

Tabla 2.4 Tolerancia para rodamientos de rodillos esféricos, montados sobre manguitos.

Condiciones de carga	Ejemplos	Diámetro del eje (mm)			Tolerancia del Eje	Observaciones
		Rodamientos de bolas	Rod. de Rodillos Cilíndricos, Rod. de Rodillos Cónicos	Rod. de Rodillos Esféricos		
Todo Tipo de Carga	Aplicaciones Generales de Rodamientos, Soportes para Ejes Ferroviarios	Cualquier diámetro de eje			h9/IT5	IT5 e IT7 significan que la desviación del eje de su verdadera forma geométrica, por ejemplo, la redondez y cilíndricidad deben quedar dentro de las tolerancias de IT5 e IT7 respectivamente.
	Ejes de Transmisión, Husillos de Maquinaria para Madera				h10/IT7	

(Rodamientos NSK, 2009)

Respecto al ajuste entre el aro exterior y el asiento del alojamiento, la Tabla 2.5 muestra que la tolerancia se define en función de las siguientes condiciones:

- Alojamiento de soporte partido.
- Carga rotatoria en el aro interior.
- Cargas normales o ligeras.
- Soportes de fundición.

Tabla 2.5 Ajuste de rodamientos radiales con alojamientos.

Condiciones de Carga			Ejemplos	Tolerancias para Diám. Int. de los Aloj.	Desplaz. Axial Anillo Ext.	Observaciones
Alojamientos Sólidos	Carga rotatoria en anillo exterior	Cargas Pesadas en Rod. en Alojamientos de Paredes Finas o Cargas Pesadas con Impacto	Cubos de Ruedas Automóviles (Rodamientos de Rodillos), Ruedas de Gías Móviles	P7	Imposible	—
		Cargas Normales o Pesadas	Cubos de Ruedas Automóviles (Rodamientos de Bolas), Cribas	N7		
		Cargas Ligeras o Variables	Rodillos Transporte Levas, Poleas tensoras	M7		
	Dirección de Carga Indeterminada	Cargas Pesadas de Impacto	Motores de Tracción	K7	Generalmente Imposible	Si no se necesita desplazamiento axial del anillo exterior.
		Cargas Normales o Pesadas	Bombas Rodamientos Principales para Cigüeñales Motores de Tamaño Medio y Grande			
		Cargas Normales o Ligeras				
Alojamientos Sólidos o Partidos	Carga rotatoria en anillo interior	Cargas de Todo Tipo	Aplicaciones Generales de Rodamientos, Soportes para Ejes Ferroviarios	H7	Fácilmente Posible	—
		Cargas Normales o Ligeras	Soportes de fundición	H8		
		Alta Elevación de Temperatura del Anillo Interior a Través del Eje	Secadoras de Papel	G7		
	Alojamiento Sólido	Dirección de Carga Indeterminada	Deseable Funcionamiento Preciso bajo Cargas Normales o Ligeras	Rodamientos de Bolas Traseros de Cabezales de Rectificadoras, Rodamientos Libres para Compresores Centrífugos de Alta Velocidad	JS6 (J6)	Posible
Rodamientos delanteros de los Cabezales de Rectificadoras. Rodamientos fijos de Compresores Centrífugos de alta velocidad.				K6	Generalmente Imposible	Para cargas pesadas, se usan ajustes más apretados que K. Cuando se necesita gran precisión, deben usarse para el ajuste tolerancias muy estrictas.
Carga rotatoria sobre el anillo interior		Deseables Funcionamiento Preciso y Alta Rigidez bajo Cargas Variables	Rodamientos de Rodillos Cilíndricos para Husillos Principales de Máquinas Herramienta	M6 o N6	Imposible	
		Se necesita un nivel de ruido mínimo	Dispositivos Eléctricos Domésticos	H6	Fácilmente Posible	—

Observaciones Esta tabla sólo es aplicable a alojamientos de acero y de fundición. Para alojamientos de aleaciones ligeras, la interferencia debe ser más ajustada que las de la tabla.

(Rodamientos NSK, 2009)

De esta forma, la tolerancia correcta para esta aplicación es H8, la cual permite el desplazamiento axial del aro exterior del rodamiento respecto al alojamiento del soporte.

2.5.1.2 Magnitudes de las tolerancias

2.5.1.2.1 Eje

Utilizando la Tabla 2.6, para un diámetro de eje de 45 [mm] y una tolerancia h9, se obtienen las dimensiones mínimas y máximas permitidas:

Tabla 2.6 Magnitudes tolerancias para ejes.

Clasificación del Diámetro (mm)		d6	e6	f6	g5	g6	h5	h6	h7	h8	h9	h10
más de	hasta											
3	6	-30 -38	-20 -28	-10 -18	-4 -9	-4 -12	0 -5	0 -8	0 -12	0 -18	0 -30	0 -48
6	10	-40 -49	-25 -34	-13 -22	-5 -11	-5 -14	0 -6	0 -9	0 -15	0 -22	0 -36	0 -58
10	18	-50 -61	-32 -43	-16 -27	-6 -14	-6 -17	0 -8	0 -11	0 -18	0 -27	0 -43	0 -70
18	30	-65 -78	-40 -53	-20 -33	-7 -16	-7 -20	0 -9	0 -13	0 -21	0 -33	0 -52	0 -84
30	50	-80 -96	-50 -66	-25 -41	-9 -20	-9 -25	0 -11	0 -16	0 -25	0 -39	0 -62	0 -100
50	80	-100 -119	-60 -79	-30 -49	-10 -23	-10 -29	0 -13	0 -19	0 -30	0 -46	0 -74	0 -120

Nota: tolerancias en micras.

(Rodamientos NSK, 2009)

- ✓ Mínimo: 44,938 [mm].
- ✓ Máximo: 45,000 [mm].

2.5.1.2.2 Alojamiento

El rodamiento 22210 EAK tiene un diámetro exterior de 90 [mm], utilizando la tabla 8 para una tolerancia H8, las medidas mínimas y máximas permitidas para el alojamiento son:

Tabla 2.7 Magnitud tolerancias para alojamientos.

Clasificación del Diámetro (mm)		E6	F6	F7	G6	G7	H6	H7	H8
más de	hasta								
10	18	+ 43 + 32	+ 27 + 16	+ 34 + 16	+ 17 + 6	+ 24 + 6	+ 11 0	+ 18 0	+ 27 0
18	30	+ 53 + 40	+ 33 + 20	+ 41 + 20	+ 20 + 7	+ 28 + 7	+ 13 0	+ 21 0	+ 33 0
30	50	+ 66 + 50	+ 41 + 25	+ 50 + 25	+ 25 + 9	+ 34 + 9	+ 16 0	+ 25 0	+ 39 0
50	80	+ 79 + 60	+ 49 + 30	+ 60 + 30	+ 29 + 10	+ 40 + 10	+ 19 0	+ 30 0	+ 46 0
80	120	+ 94 + 72	+ 58 + 36	+ 71 + 36	+ 34 + 12	+ 47 + 12	+ 22 0	+ 35 0	+ 54 0

Nota: tolerancias en micras.

(Rodamientos NSK, 2009)

- ✓ Mínimo: 90,000 [mm].
- ✓ Máximo: 90,054 [mm].

2.5.1.2.3 Tolerancia para la forma cilíndrico

La precisión de forma cilíndrica está definida según norma ISO 1101:2004, en cuanto a la calidad de la tolerancia el sistema ISO provee 18 calidades designadas por el prefijo IT. En rodamientos se utilizan grados desde IT1 hasta IT18.

Tal como indica la Tabla 2.8, en aplicaciones donde se utiliza manguitos de montaje o desmontaje en aplicaciones de uso general, se recomienda IT5. La tabla 9 muestra que para un grado IT5 y una dimensión de eje de 45 [mm], la variación de forma cilíndrica tolerable no debe exceder 11 micras.

Tabla 2.8 Tolerancia de forma cilíndrica, grados IT.

Tamaño Básico (mm)												Grados
		IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11
más de	hasta	Tolerancias (μ m)										
—	3	0.8	1.2	2	3	4	6	10	14	25	40	60
3	6	1	1.5	2.5	4	5	8	12	18	30	48	75
6	10	1	1.5	2.5	4	6	9	15	22	36	58	90
10	18	1.2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110
18	30	1.5	2.5	4	6	9	13	21	33	52	84	130
30	50	1.5	2.5	4	7	11	16	25	39	62	100	160
50	80	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190

(Rodamientos NSK, 2009)

2.5.2 Procedimiento

El siguiente procedimiento establece cómo se debe realizar correctamente el montaje de un rodamiento de rodillos esféricos lubricado por grasa sólida, en su respectivo soporte de pie. El método también incluye la instalación del soporte en el eje de un rodillo nuevo. Es importante controlar dimensionalmente el eje y el juego radial del rodamiento, antes del montaje.

Cabe destacar, que el procedimiento detalla el montaje en un rodillo nuevo en un ambiente relativamente limpio. Sin embargo, también se incluye proceso de desmontaje de un rodamiento instalado en el filtro de banda horizontal, y el posterior montaje de éste, donde las condiciones de limpieza cambian drásticamente de forma negativa.

La Figura 2.26 ilustra un soporte de pie y los elementos adicionales (accesorios) que son necesarios para el montaje del rodamiento en el soporte, y de éste en el eje. Cada rodillo del filtro de banda se sostiene en dos soportes de pie; uno en cada extremo.

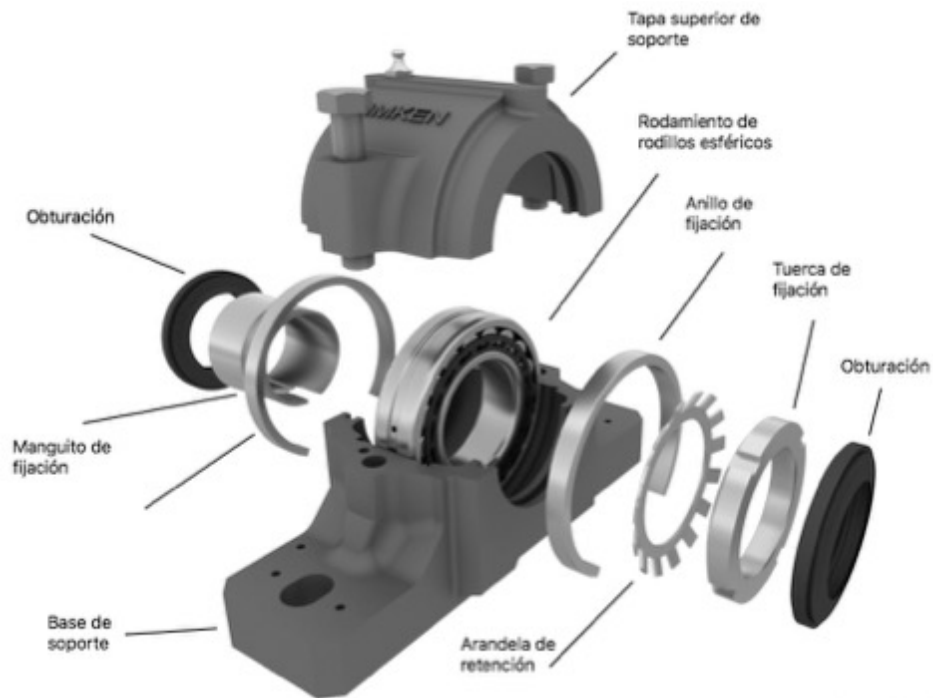


Figura 2.26 Conjunto soporte de pie, rodamiento y accesorios.

Cada soporte de pie permite alojar en su interior un rodamiento, que en el caso de ser cónico, se monta al eje sobre un manguito de fijación (en el caso de que el eje sea cilíndrico), éste se fija axialmente utilizando una tuerca de fijación, montando previamente una arandela de retención. Los anillos de fijación permiten limitar axialmente el movimiento del rodamiento en el soporte (en la aplicación que corresponda). Finalmente, las obturaciones permiten sellar el conjunto, es decir, evitando el ingreso de contaminantes al interior del soporte, y por otra parte, manteniendo el lubricante dentro del éste.

2.5.2.1 Componentes requeridos

2.5.2.1.1 Rodamientos

El rodamiento a utilizar es de la marca NSK, 22210 EAK E4 C3 L11, de rodillos esféricos, con agujero cónico y lubricado por grasa sólida (ver Figura 2.27).



Figura 2.27 Rodamiento 22210 EAKE4 C3 L11, lubricado por grasa sólida.

Las dimensiones del rodamiento se especifican en la Figura 2.28:

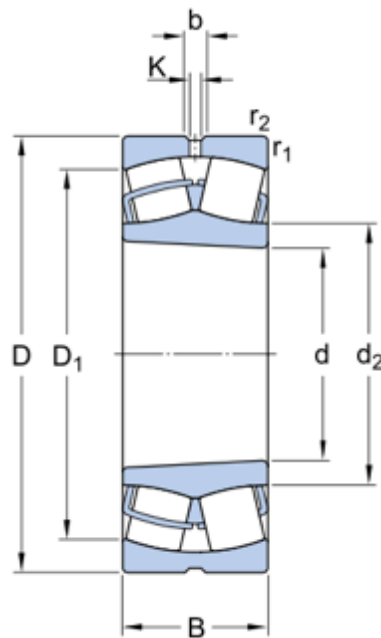


Figura 2.28 Dimensiones rodamiento 22210 EAK E4 C3 L11

Donde:

d:	50 [mm]
D:	90 [mm]
B:	23 [mm]
d ₂ :	60 [mm]
D ₁ :	79 [mm]
b:	5.5 [mm]
K:	3 [mm]
r _{1,2 min.} :	1.1 [mm]

Especificaciones técnicas:

Capacidad de carga dinámica:	148.000 [N]
Capacidad de carga estática:	167.000 [N]

Velocidad límite:	6.000 [rpm]
Masa:	0.9 [kg]

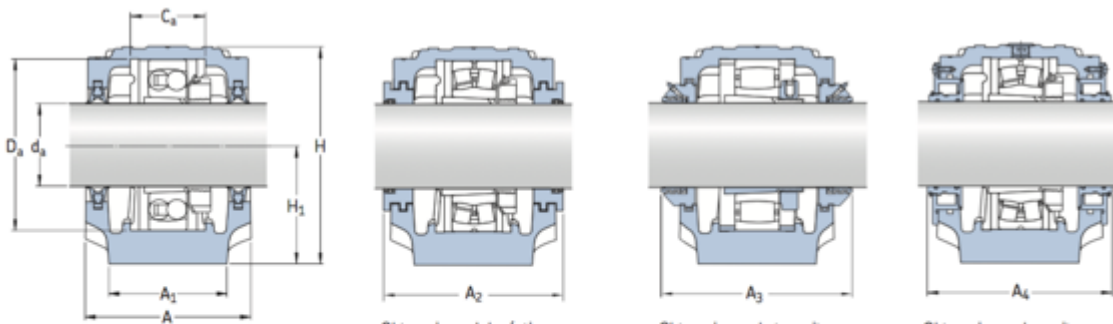
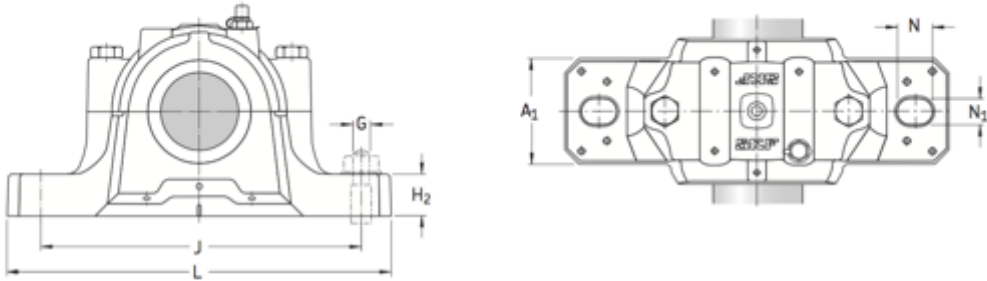
2.5.2.1.2 Soporte de pie

El soporte de pie que aloja al rodamiento 22220 EAKE4 C3 L11, corresponde al modelo SNL 510-608 (ver Figura 2.29), el cual también admite otros tipos de rodamientos, los que son ilustrados en la Tabla 2.9. Las dimensiones del soporte, su peso y los códigos de los accesorios necesarios son descritos en la misma.



Figura 2.29 Soporte de pie, SNL 510-608.

Tabla 2.9 Especificaciones soporte de pie SNL 510-608.

															
Obturaciones de doble labio, diseño G¹⁾ Obturaciones laberínticas, diseño S Obturaciones de taconita, diseño ND Obturaciones de aceite, diseño TURU															
Eje	Soporte										Masa	Designaciones	Obturaciones	Tapa lateral	
d _a	A	A ₁	H	H ₁	H ₂	J	L	N	N ₁	G					
mm	mm										kg	—			
45	90	60	113	60	25	170	205	20	15	12	3,20	SNL 510-608 SNL 510-608 SNL 510-608 SNL 510-608 SNL 510-608	TSN 510 L TSN 510 A TSN 510 C TSN 510 S TSN 510 ND	ASNH 510-608 ASNH 510-608 ASNH 510-608 ASNH 510-608 ASNH 510-608	
															
Eje	Asiento del rodamiento	Anchura entre obturaciones			Rodamientos apropiados y componentes asociados				Anillos de fijación		Rodamiento de bolas a rótula			Anillos de fijación	
d _a	C _a	D _a	A ₂	A ₃	A ₄	Rodamiento de bolas a rótula	Rodamiento de rodillos a rótula	Manguito de fijación	2 por soporte		Rodamiento de rodillos a rótula	Rodamiento de rodillos toroidales CARB	Manguito de fijación	2 por soporte	
mm	mm	mm	mm	mm	mm	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
45	41	90	102	155	—	1210 EKTN9	—	H 210	—	FRB 10.5/90	2210 EKTN9 22210 EK BS2-2210-2CSK/VT143 C 2210 KTN9	—	H 310 H 310 H 310 E H 310 E	FRB 9/90 FRB 9/90 FRB 6.5/90 FRB 9/90	—

(Rodamientos NSK, 2009)

2.5.2.1.3 Manguito de fijación

El manguito de fijación H310, visible en la Figura 2.30, permite el montaje de un rodamiento con agujero cónico, en un eje cilíndrico.



Figura 2.30 Manguito de fijación, H310.

Por lo tanto, para un eje de 45 [mm], éste debe poseer las siguientes dimensiones (ver Figura 2.31):

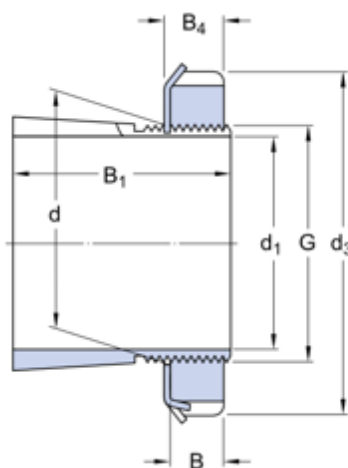


Figura 2.31 Dimensiones manguito de fijación, H310.

Donde:

d_1 :	45 [mm]
d :	50 [mm]
d_3 :	70 [mm]
B_1 :	42 [mm]
B :	11 [mm]
B_4 :	12 [mm]
G :	M 50x1.5

2.5.2.1.4 Tuerca de fijación

La tuerca de fijación, KM10 (ver Figura 2.32), permite asegurar la posición correcta del rodamiento sobre el manguito, y de éste sobre el eje.



Figura 2.32 Tuerca de fijación, KM10.

Las dimensiones que debe poseer la tuerca KM10 están denotadas en la Figura 2.33:

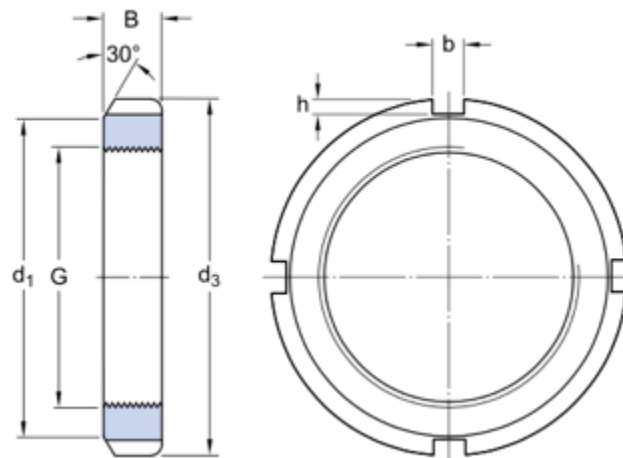


Figura 2.33 Dimensiones tuerca de fijación, KM10.

Donde:

G:	M 50x1.5
d_3 :	70 [mm]
B:	11 [mm]
d_1 :	61 [mm]
b:	6 [mm]
h:	2.5 [mm]

2.5.2.1.5 Arandela de retención

La arandela de retención, MB10 (ver Figura 2.34), permite asegurar que la tuerca de fijación no se desenrosque. Esto es posible, doblando una de las lengüetas de la arandela, la cual debe coincidir con alguna de las cuatro ranuras que posee la tuerca.



Figura 2.34 Arandela de retención, MB10.

Las dimensiones de la arandela son detalladas en la Figura 2.35:

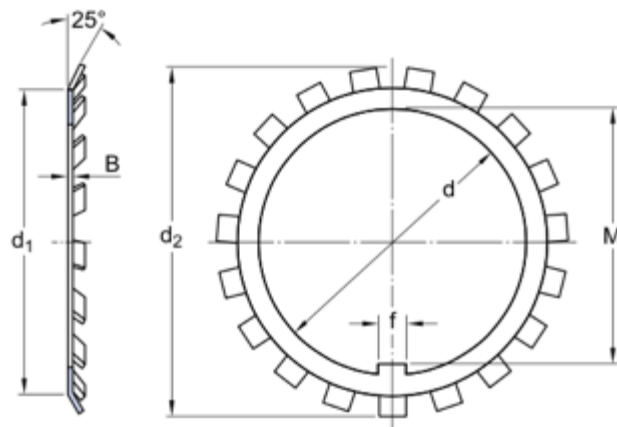


Figura 2.35 Dimensiones arandela de retención, MB10.

Donde:

d:	50 [mm]
d ₁ :	61 [mm]
d ₂ :	74 [mm]
B:	1.25 [mm]

f:	6 [mm]
B ₄	12 [mm]
M:	47.5 [mm]

2.5.2.1.6 Anillos de fijación

Los anillos de fijación, FRB 9/90, permiten limitar el movimiento axial del rodamiento dentro del soporte (ver Figura 2.36). En ésta aplicación, se utilizan dos anillos dentro de un sólo soporte, mientras que el soporte del lado opuesto no monta anillos.



Figura 2.36 Anillo de fijación, FRB 9/90.

Dimensiones:

Diámetro externo:	90 [mm]
Ancho:	9 [mm]

2.5.2.1.7 Obturaciones

La obturación a utilizar en el soporte SNL 510-608, corresponde a la obturación estándar TSN 510 tipo G, de cuádruple labio, la que es fabricada con elastómero de

poliéster (TPE). La Figura 2.37 indica que la obturación está partida en dos, lo que facilita su montaje.



Figura 2.37 Obturación TSN 510 G.

Dentro del soporte, las obturaciones se ubican en los extremos, tal como indica la Figura 2.38.

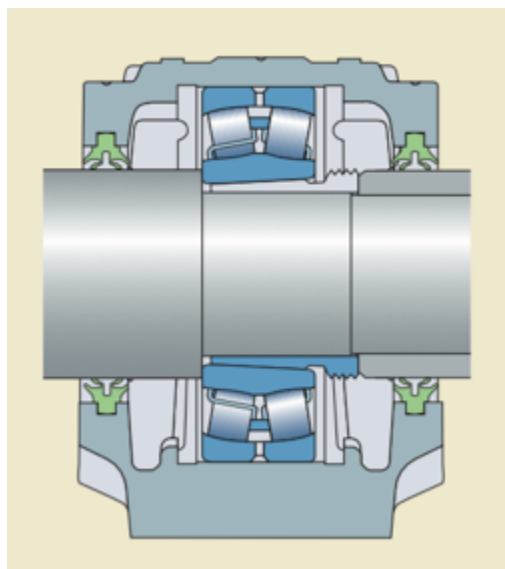


Figura 2.38 Obturación de cuádruple labio dentro de un soporte.

Las especificaciones técnicas de la obturación de cuádruple labio se señalan en la tabla 13:

Tabla 2.10 Especificaciones técnicas obturación TSN tipo G.



TSN .. G

Condiciones internas	
Temperatura, °C	-40 a +100
Velocidad periférica, m/s ²⁾	hasta 8
Desalineación, grados	0,5 a 1
Lubricación con grasa	4 m/s ⁴⁾
Lubricación con aceite	--
Baja fricción	+
Desplazamiento axial del eje	++
Disposición vertical	+
Recambio	++
Símbolos:	
++ muy adecuado	- no recomendado
+ adecuado	-- inadecuado

(SKF, 2015)

Conforme a la Tabla 2.10w, la máxima velocidad periférica permisible es 8 [m/s]. De acuerdo a la Tabla 2.11 y para un eje de 45 [mm], la máxima velocidad de rotación corresponde a 3400 [rpm]. Así, las obturaciones de cuádruple labio son aptos para ser

instalados en los soportes del filtro de banda, donde la velocidad de rotación de los rodamientos no supera las 8 a 10 [rpm].

Tabla 2.11 velocidades de rotación correspondientes a las velocidades periféricas.

Velocidades de rotación correspondientes a velocidades periféricas						
Diámetro del eje en el labio de la obturación $d_a, d_b^{1)}$	Velocidades de rotación correspondientes a velocidades periféricas de					
	2 m/s	4 m/s	7 m/s	8 m/s	12 m/s	13 m/s
mm	r/min					
20	1 910	3 820	6 680	7 640	11 460	–
25	1 530	3 060	5 350	6 110	9 170	–
30	1 270	2 550	4 460	5 090	7 640	8 280
35	1 090	2 180	3 820	4 370	6 550	7 090
40	950	1 910	3 340	3 820	5 730	6 210
45	850	1 700	2 970	3 400	5 090	5 520

(SKF, 2015)

En suma, un correcto montaje de un rodamiento de agujero cónico 22210 EAKE4 C3 L11, en un soporte de pie SNL 510-608, requiere de los siguientes accesorios:

- ✓ Manguito de fijación, H310
- ✓ Anillos de fijación, FRB 9/90
- ✓ Obturaciones, TSN 510 tipo G
- ✓ Arandela de retención, MB 10
- ✓ Tuerca de fijación, KM 10

Adicionalmente, para montar el rodamiento sobre el manguito se utiliza una llave de gancho (ver Figura 2.39), la cual en se identifica cómo HN 10, para el rodamiento 22210 EAKE4 C3 L11.



Figura 2.39 Llave de gancho, HN 10.

2.5.2.2 Control dimensional

Siempre se debe controlar el estado dimensional del eje. Utilizando un micrómetro de exteriores se debe medir en distintos puntos, tal como indica la Figura 2.40, luego se deben registrar dichos valores y compararlos con las tolerancias permitidas, según sea el diámetro del eje.

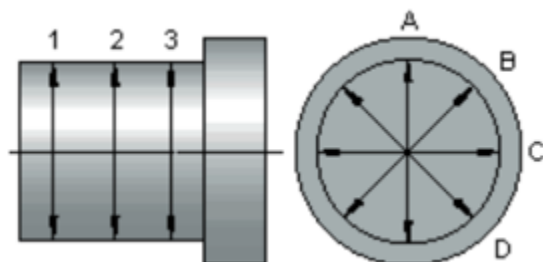


Figura 2.40 Correcto control dimensional de un eje cilíndrico.

La Tabla 2.12 muestra el control dimensional que se efectuó en 3 posiciones longitudinales del eje, perteneciente al rodillo nuevo, en 4 puntos: A, B, C, D.

Tabla 2.12 Control dimensional eje rodillo nuevo.

	A	B	C	D
1	44,940	44,940	44,950	44,940
2	44,950	44,950	44,950	44,950
3	44,960	44,960	44,960	44,960

Nota: dimensiones en [mm]

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 2.41 refleja el control dimensional efectuado en el rodillo que se montará en el filtro de banda.



Figura 2.41 Medición del diámetro del eje, mediante un micrómetro de exteriores.

2.5.2.2.1 Medición Juego radial interno inicial

En el montaje de rodamientos sobre manguitos de fijación se obtiene un ajuste de interferencia entre el aro interior, manguito y el asiento en el eje. El grado de interferencia se puede determinar por la reducción en el juego radial interno del rodamiento al ser calado sobre el manguito.

Es por esto, que siempre se debe comenzar midiendo el juego radial interno (JRI) inicial que trae el rodamiento de fábrica, y después realizar la reducción del JRI correspondiente.

Empleando una galga de espesores, se deben seguir los siguientes pasos:

- Identificar en la Tabla 2.13, según el diámetro del rodamiento y el tipo de juego, el intervalo de juego radial interno que tendrá el rodamiento. Para el rodamiento 22210 EAKE4 C3 L11 (diámetro 50 mm) el JRI se encuentra entre **0,060 – 0,080** [mm].
- Ubicar el rodamiento sobre una superficie limpia, de forma vertical.
- Dar un par de vueltas al rodamiento para que los rodillos se acomoden bien, y luego alinear el aro interior con respecto al aro exterior.
- Como el peso de los elementos rodantes se apoya en la parte inferior, se debe medir el juego radial en el segmento de arco superior del rodamiento (ver Figura 2.42).
- La galga de espesores debe medir entre la parte superior de los rodillos y la pista de rodadura del aro exterior; un ángulo de 120 grados aproximadamente (ver Figura 2.43). Como se trata de un rodamiento con juego C3, éste tiene un juego radial mayor que normal, es decir, la galga debe ofrecer resistencia al pasar entre 4 a 5 rodillos del rodamiento. No se deben girar los rodillos sobre la galga, de lo contrario seria una medida errónea.

- Realizar la misma medición por la hilera de rodillos contraria. Los valores deben ser congruentes en ambos lados.
- Registrar el valor obtenido del JRI para luego realizar la reducción.

Tabla 2.13 Extracto tabla juego radial interno, en rodamiento de rodillos esféricos con agujero cónico y juego C3.

Diámetro del agujero del rodamiento (mm)		Juego del rodamiento						Reducción del juego radial		Desplazamiento axial Cono 1:12		Ángulo nominal de torsión	Juego de rodamiento mínimo admisible		
desde	incl.	CN		C3		C4		min	max	min	max	Nominal	CN	C3	C4
30	40	0,035	0,050	0,050	0,065	0,065	0,085	0,025	0,030	0,40	0,45	100°	0,010	0,025	0,035
40	50	0,045	0,060	0,060	0,080	0,080	0,100	0,030	0,035	0,45	0,55	120°	0,015	0,030	0,045
50	65	0,055	0,075	0,075	0,095	0,095	0,120	0,030	0,035	0,45	0,55	90°	0,025	0,035	0,060
65	80	0,070	0,095	0,095	0,120	0,120	0,150	0,040	0,045	0,60	0,70	120°	0,030	0,040	0,075
80	100	0,080	0,110	0,110	0,140	0,140	0,180	0,045	0,055	0,70	0,85	140°	0,035	0,050	0,085

Nota: Dimensiones en [mm].

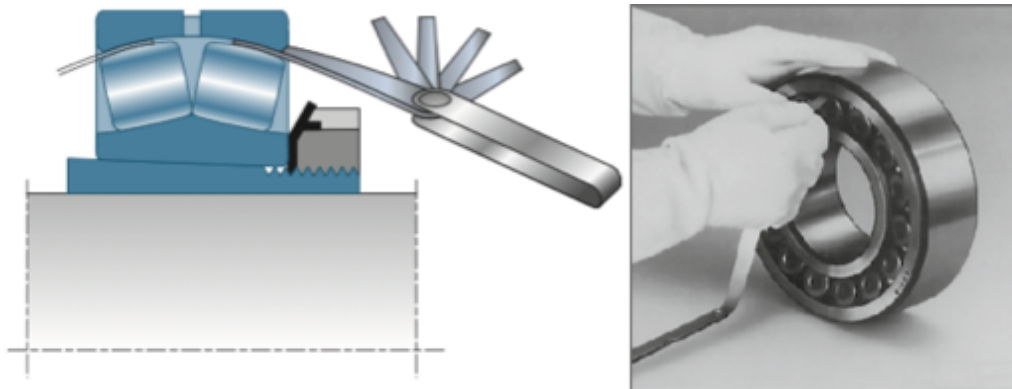


Figura 2.42 Medición JRI inicial mediante galga de espesores.

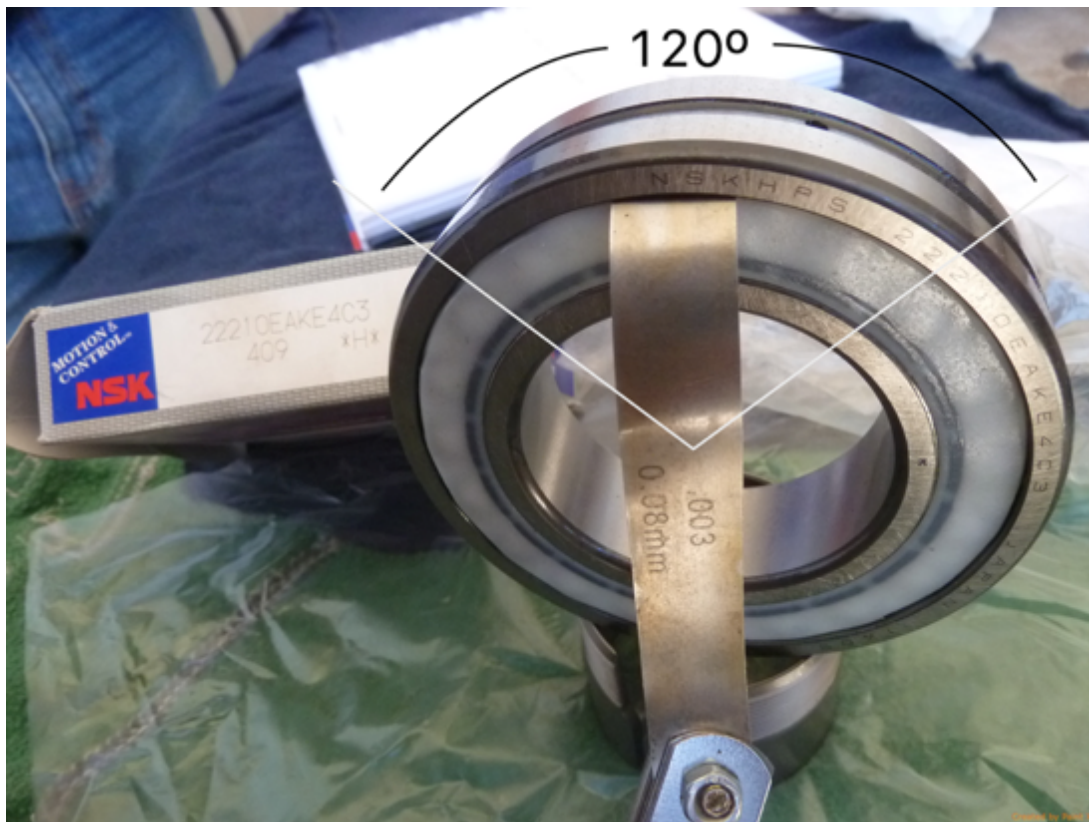


Figura 2.43 Ángulo de medición del juego radial interno inicial.

2.5.2.2.2 Reducción el juego radial interno

El juego radial interno final que tendrá un rodamiento con agujero cónico, lo determinará el instalador. Es decir, durante el montaje se irá controlando el JRI hasta que esté dentro del rango especificado por la Tabla 2.14. **Nunca debe quedar con menos juego que el especificado en la columna “Juego de rodamiento mínimo permisible”**, ya que de esta manera, el rodamiento quedaría precargado y su vida esperada se acortará considerablemente.

Tabla 2.14 Reducción juego radial para diámetro agujero 50 [mm].

Diámetro agujero	Juego del rodamiento: C3		Reducción del Juego Radial		Juego del rodamiento mín. admisible
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	
50	0.060	0.080	0.030	0.035	0.030

Nota: Dimensiones en [mm]

(NSK Rodamientos, 2013)

La Figura 2.43 muestra que el juego radial interno inicial medido corresponde a 0,08 [mm], y la reducción del JRI sugerida debido a la instalación es de 0,030 a 0,035 [mm].

Entonces:

$$\begin{array}{r} \text{Mín.} \\ 0,080 \\ - \quad 0,030 \\ \hline 0,050 \end{array}$$

$$\begin{array}{r} \text{Máx.} \\ 0,080 \\ - \quad 0,035 \\ \hline 0,045 \end{array}$$

De este modo, el rodamiento funcionará correctamente con un ajuste que se encuentre entre **0,050 y 0,045 [mm]**, dentro de este rango se asegura que el aro interior de rodamiento no se girará en el manguito. No obstante, en esta aplicación, es recomendable ajustar el JRI hacia el mínimo admisible; **0,030 [mm]**. Así, se obtendrá un mayor ángulo de distribución de carga, tal como indica la Figura 2.44.



Figura 2.44 Ángulo distribución de carga es mayor a la derecha, debido a un mayor ajuste de interferencia.

2.5.2.3 Montaje del rodamiento en el eje

Luego de verificar las medidas del eje y registrar el valor del juego radial interno de fábrica del rodamiento, se debe limpiar cuidadosamente el eje, removiendo toda partícula que pueda contaminar el asiento del éste (ver Figura 2.45).



Figura 2.45 Inspección del eje a utilizar.

Enseguida, es recomendable lubricar el eje con un poco de aceite de baja viscosidad, de esta forma, el montaje del manguito de fijación será suave y no existirá dificultad en la instalación. Luego, se debe abrir el manguito insertando un atornillador en la ranura (ver Figura 2.46), para deslizarlo a lo largo del eje, hasta que llegue a su posición final. La posición final corresponde a la distancia entre el centro del rodamiento

anterior y el extremo del eje. Sin embargo, si no se tiene esta medida, la distancia la indicará la posición de la base de los soportes en la estructura del filtro de banda.



Figura 2.46 Imagen referencial: Montaje de un manguito de fijación mediante un desatornillador.

A continuación:

1. Insertar por diámetro mayor del agujero cónico, el rodamiento sobre el manguito, fijándolo sólo con la fuerza de las manos hasta que quede fijo axialmente.
2. Rosque la tuerca con el chaflán hacia el interior y apriete, utilizando la llave de gancho (ver Figura 2.47), hasta que el rodamiento sea calado hasta la posición correcta.
3. Dado que se trata de un rodamiento pequeño, se debe tener cuidado con la fuerza aplicada, de lo contrario el rodamiento quedará con un excesivo ajuste de interferencia.

4. Antes de controlar el JRI, se debe girar el rodamiento, verificando que los rodillos estén en su posición correcta; alineado.
5. A medida que se va apretando la tuerca, se debe ir **controlando** el JRI del rodamiento a intervalos regulares, hasta llegar al valor del juego final calculado. Esta vez se debe medir en la **zona descargada** del rodamiento, es decir, una vez montado en el eje, controlar el JRI en la parte inferior tal como indica la Figura 2.48.
6. Para medir correctamente el JRI, se debe presionar ligeramente el rodillo sobre la jaula, y luego insertar la galga sobre dicho rodillo. **Nunca medir ambas hileras de rodillos simultáneamente.** El JRI medido debe ser igual en ambas hileras de rodillos.
7. Se continúa apretando la tuerca, hasta llegar al JRI recomendado: **0.03 [mm]** (ver Figura 2.49).
8. Desenroscar la tuerca e insertar la arandela de retención, comprobando que la cara cóncava de la arandela coincida con la parte biselada de la tuerca.
9. Apretar la tuerca de fijación e ir controlando el JRI del rodamiento, hasta llegar a un valor cercano del recomendado en el punto 7.
10. Bloquear la tuerca doblando una de las lengüetas de la arandela de retención, como indica la Figura 2.50. Si la lengüeta no coincide con alguna muesca de la tuerca, ésta se debe apretar un poco más en lugar de aflojarla.
11. Comprobar que el rodamiento gire sin problemas y que la distancia del centro del rodamiento al extremo del eje sea la correcta; 50 [mm] (ver Figura 2.51).



Figura 2.47 Apriete de la tuerca de fijación por medio de llave de gancho.

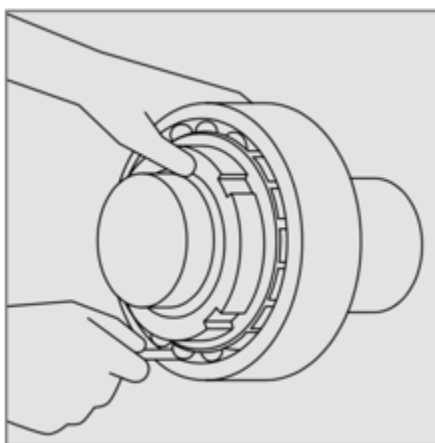


Figura 2.48 Medición del JRI del rodamiento en la zona descargada.



Figura 2.49 Juego radial interno residual correspondiente a 0.03 [mm].

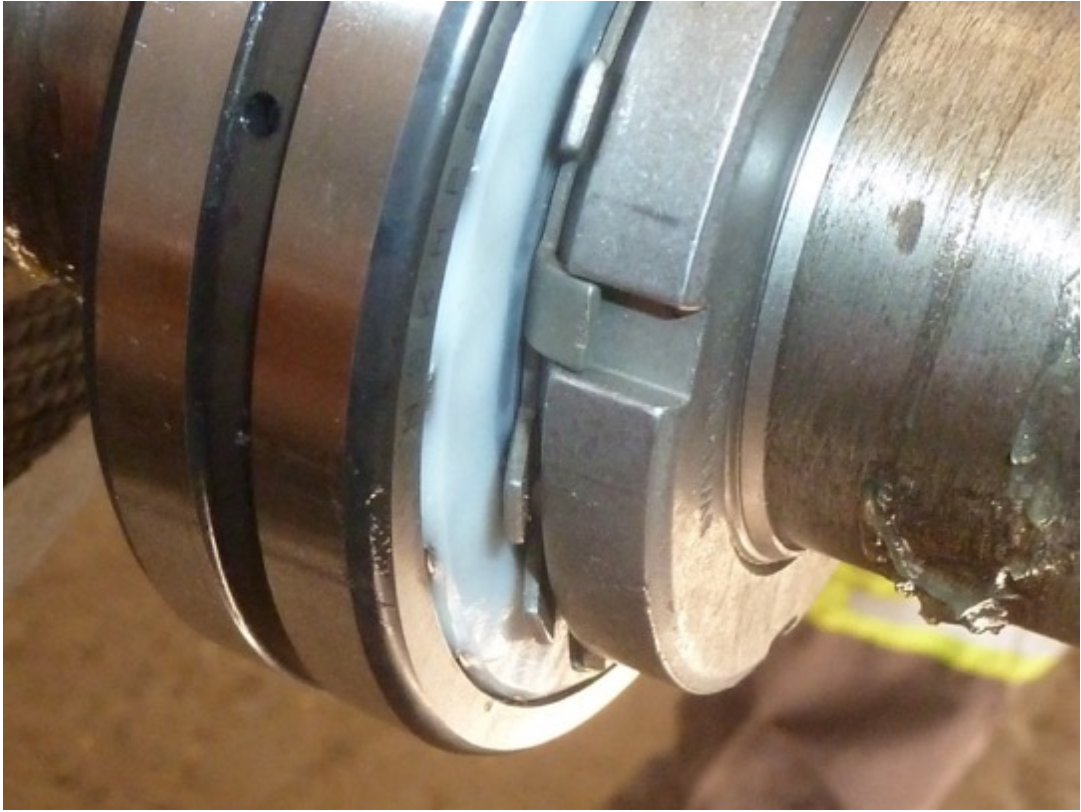


Figura 2.50 Lengüeta doblada de la arandela asegura el bloqueo de la tuerca de fijación.

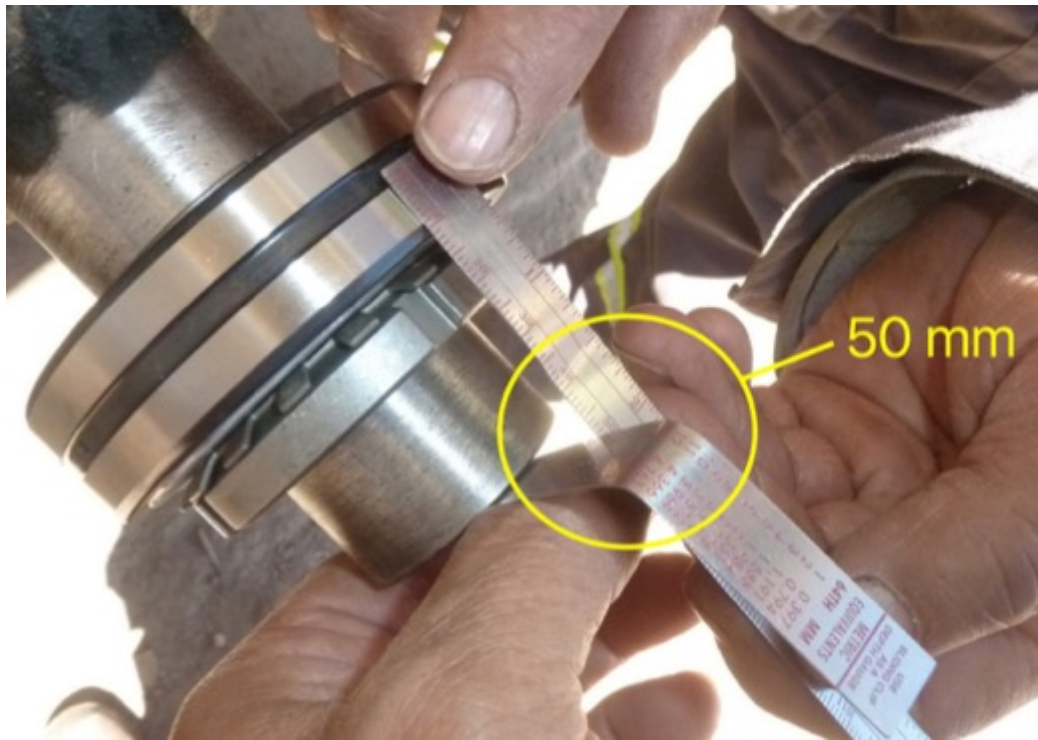


Figura 2.51 Comprobación de la distancia correcta de montaje.

2.5.2.4 Montaje del rodamiento en el soporte

Repuestos requeridos:

- Soporte, SNL 510-608
- Anillos de fijación, FRB 9/90
- Obturaciones partidas de cuádruple labio, TSN 510 G

Procedimiento:

1. Insertar las obturaciones partidas en la parte inferior del soporte, los cuales tienen una guía que facilita y asegura su montaje.

2. Llenar de grasa el espacio entre los dos labios de las obturaciones. La grasa a utilizar debe ser sintética, así no existirán problemas de miscibilidad con el lubricante sólido del rodamiento.
3. Instalar ambos anillos de fijación en la base del soporte. Sólo un soporte (lado fijo) debe llevar dichos anillos, dado que el rodamiento del extremo contrario (lado libre), debe tener la capacidad de desplazarse axialmente debido a las dilataciones térmicas del eje.
4. Posicionar el eje con el rodamiento en la base del soporte, de manera que el rodamiento se ajuste en el alojamiento de éste (Figura 2.52).
5. Llenar de grasa el rodamientos, las obturaciones y el soporte completo. De este modo, la grasa actuará como sello contra posibles agentes contaminantes (ver Figura 2.53).
6. Insertar las obturaciones partidas restantes en la tapa del soporte, además llenar de grasa el espacio entre los labios de las obturaciones (ver Figura 2.54).
7. Tapar el soporte y apretar los pernos M10x55 con un torque de 50 [Nm] (ver Figura 2.55).



Figura 2.52 Conjunto armado y posicionado en el eje.



Figura 2.53 Soporte y rodamiento lleno de grasa sintética.



Figura 2.54 Ambas obturaciones partidas instaladas en la tapa del soporte.



Figura 2.55 Apriete de pernos tapa soporte.

2.5.2.5 Desmontaje y montaje en filtro de banda

A continuación se indica el procedimiento necesario para realizar el reemplazo de un rodamiento 22210 CAK C3, en el soporte fijo perteneciente al rodillo guiador de tela N°11T.

Repuestos requeridos:

- Rodamiento 22210 EAKE4 C3 L11
- Arandela de retención, MB10
- Tuerca de fijación, KM10
- Manguito de fijación, H310
- Obturaciones partidas de doble labio, TSNA 510 G

La figura 69 muestra el rodillo N°11T, que guía la tela en la sección inferior del filtro de banda. Dicho rodillo posee dos soportes de rodamientos en sus extremos, donde el rodamiento del soporte lado fijo, indicado en la misma figura, será reemplazado “in situ” por el nuevo rodamiento lubricado con grasa sólida.

2.5.2.5.1 Desmontaje

Procedimiento:

En primer lugar, se comienza por aflojar los dos pernos de tamaño M10x55 [mm] de la tapa del soporte, como indica la Figura 2.56.



Figura 2.56 Soporte lado fijo del rodillo número 11T.

Luego, utilizar un tecle para levantar el rodillo, así se podrá remover fácilmente hacia arriba el rodamiento de su alojamiento, tal como indica la Figura 2.57.



Figura 2.57 Extracción del rodillo hacia arriba mediante un tecle.

Al retirar la tapa del soporte, se observa inmediatamente que el lubricante se encuentra en mal estado, descompuesto por la acción corrosiva del fluido y de las partículas sólidas del mineral filtrado (ver Figura 2.58).



Figura 2.58 Rodamiento lleno de grasa descompuesta.

Para desmontar el rodamiento, es necesario aplicar un solvente químico (CP-40) sobre el rodamiento y el soporte para remover la grasa contaminada, ya que sólo así será posible aflojar la tuerca que fija el rodamiento. Luego, se debe utilizar un cincel para levantar la lengüeta de la arandela de retención, y seguidamente aflojar la tuerca con la llave de gancho, para retirarla junto con el rodamiento y el manguito. Dado que es un rodamiento pequeño ($d < 120$ mm), el desmontaje no requiere mayor esfuerzo, sólo se debe aplicar una fuerza uniforme en el aro interior mediante un cincel y martillo, hacia el exterior. Una vez removido el rodamiento, sólo resta desmontar el manguito de fijación, el cual se extrae con facilidad del mismo modo; teniendo precaución de no dañar el eje con el cincel. El resultado del desmontaje se aprecia en la Figura 2.59.



Figura 2.59 Eje del rodillo tras desmontaje del rodamiento dañado.

Posteriormente, sólo resta limpiar exhaustivamente tanto el eje, como el interior de la base del soporte y su tapa, y lijar las impurezas que existan en el eje; procedimiento que será explicado en la siguiente sección de montaje.

Por último, se deben guardar todos los componentes del rodamiento para efectuar el correspondiente análisis de causa raíz de falla, y así determinar las acciones correctivas pertinentes. La Figura 2.60 revela el mal estado del rodamiento desmontado, el cual se desarmó aún cuando es un rodamiento del tipo no desarmable.



Figura 2.60 Rodamiento completamente desarmado tras desmontaje.

2.5.2.5.2 Montaje

El reemplazo del nuevo rodamiento en el filtro de banda difiere respecto al montaje en un ambiente ideal en ciertos aspectos, como por ejemplo la limpieza del lugar de trabajo o el criterio de ajuste en las tolerancias de los ejes o alojamientos, dado que muchas veces éstos se deben reutilizar. Sin embargo, siempre se debe tratar de limpiar lo más posible la zona de trabajo y utilizar los criterios pertinentes según sea la situación de trabajo.

En primer lugar, se recomienda establecer una zona de trabajo limpia para comprobar el juego radial interno del nuevo rodamiento a instalar. La Figura 2.61 muestra la superficie cubierta con un paño limpio, éste no debe tener pelusas o residuos que puedan ingresar al interior del rodamiento.



Figura 2.61 Rodamiento nuevo sobre una superficie limpia.

A continuación se debe medir el juego radial interno. El procedimiento es el mismo que en un montaje anterior realizado en taller. La Figura 2.62 permite ver que el rodamiento posee un juego radial interno medido de 0.06 [mm] de fábrica.

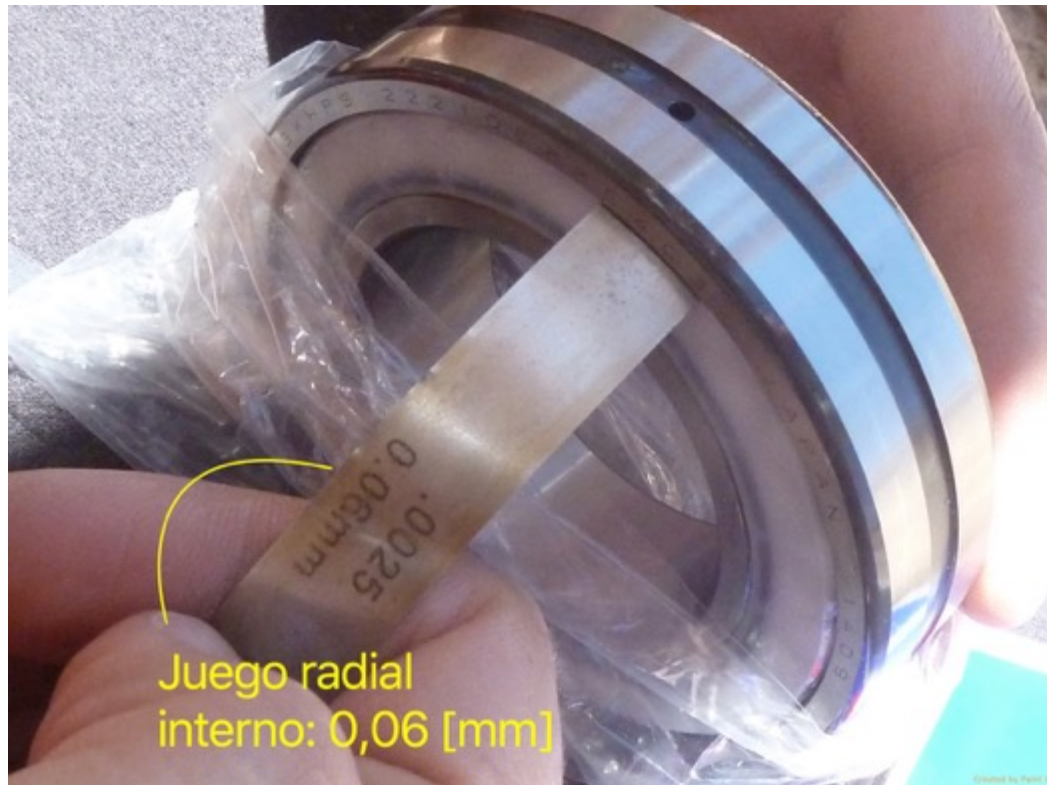


Figura 2.62 Juego radial interno del nuevo rodamiento es 0.06 [mm].

Luego, se debe verificar el estado del eje y utilizando una lija fina, remover la mayor cantidad de impurezas del eje, tanto como óxido o rebabas. Sólo así se podrá montar el manguito de fijación sobre el eje; calándolo hasta la distancia marcada en el desmontaje (50 [mm]). El resultado tras la limpieza del eje y la instalación del manguito se pueden apreciar en la Figura 2.63 y en la Figura 2.64 , respectivamente.



Figura 2.63 Eje libre de impurezas tras ser lijado.



Figura 2.64 Manguito de fijación montado sobre el eje a la distancia correcta.

Después de calar el rodamiento con la fuerza de las manos sobre el manguito de fijación, se debe continuar montando y apretando progresivamente la tuerca de fijación empleando la llave de gancho. Siempre se debe controlar el juego radial interno cada vez que se da un grado mayor de apriete. La Figura 2.65 muestra que la medición del juego radial interno residual debe realizarse en la zona descargada del rodamiento, es decir, el rodamiento al estar montado en el eje, el JRI debe ser medido en la parte inferior del rodamiento.



Figura 2.65 Medición del juego radial interno residual en la zona descargada del rodamiento.

Una vez que se alcanza el JRI residual deseado, 0.03 [mm], se debe retirar la tuerca de fijación y proceder a insertar la arandela de retención, teniendo la precaución de que las lengüetas queden hacia el exterior y no rozando con la grasa sólida ni la jaula (ver Figura 2.66).



Figura 2.66 Lengüetas de arandela de retención hacia el exterior.

Después de comprobar el JRI residual, se debe montar la tuerca de fijación con su chaflán hacia el interior y dar el mismo apriete con el que se caló el rodamiento, sin sobrepasar el mínimo juego residual admisible tras el montaje; **0,030** [mm].

Luego, utilizando un cincel y un martillo, doblar una lengüeta de la arandela de retención que coincida con la muesca de la tuerca de fijación, así la tuerca quedará segura y no podrá aflojarse (ver Figura 2.67).



Figura 2.67 Lengüeta de arandela de retención doblada asegura la fijación de la tuerca.

Después de que el rodamiento está correctamente instalado, se procede a instalarlo en su soporte. Cabe mencionar, que el soporte de pie será reutilizado, ya que en la faena no contaban con una unidad nueva. A pesar de que el soporte posee zonas con corrosión y oxido, éste aun se encuentra en buenas condiciones, ya que la zona donde se aloja el rodamiento no posee daños en el acero. La Figura 2.68 y la Figura 2.69, evidencian el aceptable estado del alojamiento inferior de la base, y de la tapa del soporte.



Figura 2.68 Inspección del estado del alojamiento de la base del soporte.



Figura 2.69 Inspección del estado del alojamiento de la tapa del soporte.

A continuación, se debe llenar el todo el soporte con grasa, tanto la base del soporte como la tapa, tal como indica la Figura 2.70 y la Figura 2.71. En esta aplicación es recomendable utilizar una grasa compatible con la de los rodamientos de grasa sólida, que es del tipo PAO (polialfaolefínica), en este caso se utilizó Shell Albania EP2, la que actuará como sello en conjunto con las obturaciones de cuádruple labio.



Figura 2.70 Montaje de obturaciones partidas en el soporte y posterior engrase.



Figura 2.71 Montaje de obturaciones partidas en la tapa del soporte y posterior engrase.

Finalmente, se debe posicionar el rodamiento en el interior del soporte, bajando gradualmente el tecla hasta llegar a la posición final. Luego, se deben insertar los anillos de fijación (lado fijo) a los costados del rodamiento, guiados por las ranuras que posee la base del soporte (ver Figura 2.72).

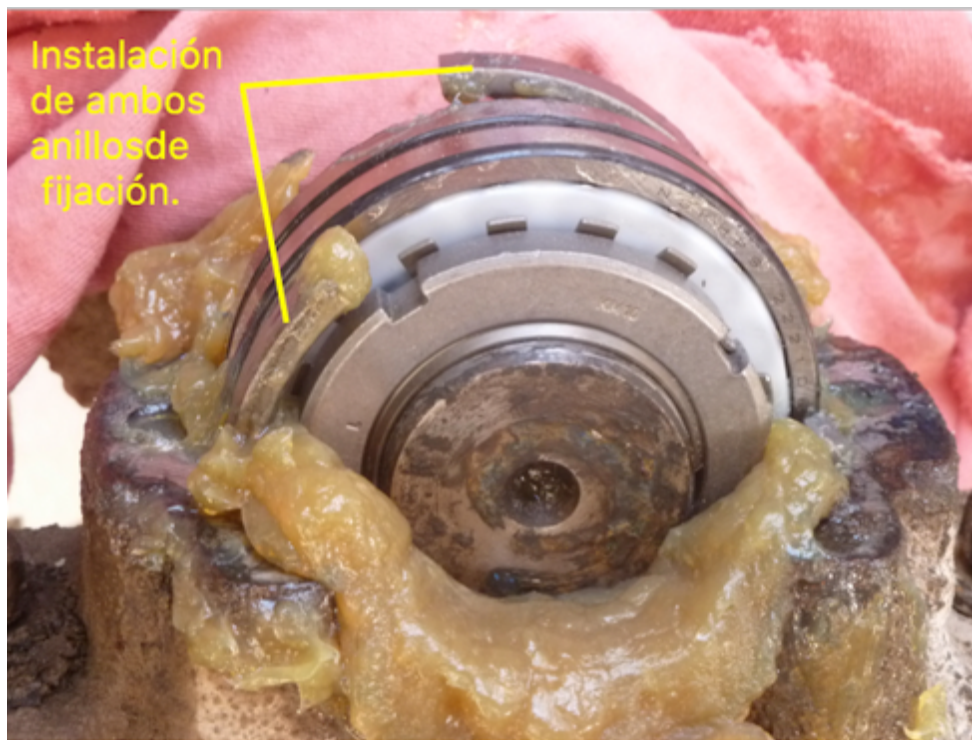


Figura 2.72 Montaje de anillos de fijación.

Se finaliza el montaje tapando el soporte, y luego apretando con el torque correcto los pernos de la tapa del soporte, y los pernos que fijan el soporte a la base de la estructura del filtro. El torque para los pernos M10 de la tapa corresponde a 50 [Nm], y el torque para los pernos M12 que fijan la base del soporte a la estructura del filtro corresponde a 80 [Nm].



Figura 2.73 Soporte tapado.

Nota: El color verde del soporte (ver Figura 2.73) es pintura, que se utiliza para diferenciarlo de los demás soportes que utilizan rodamientos convencionales.

2.5.3 Guía rápida de reemplazo

La presente guía de reemplazo, entrega la información precisa para que un operador realice un cambio “in situ” de los soportes y sus rodamientos; exceptuando los pertenecientes a las poleas de cabeza y de cola. Es importante destacar que, cada rodillo se sostiene en dos soportes de pie, uno en cada extremo.

2.5.3.1 Elementos necesarios

2.5.3.1.1 Repuestos

Tabla 2.15 Repuestos.

Repuesto	Código	Cantidad
Soporte de pie	SNL 510-608	2 unidades
Rodamiento	22210 EAKE4 C3 L11	2 unidades
Manguito de fijación	H310	2 unidades
Tuerca de fijación	KM10	2 unidades
Arandela de retención	MB10	2 unidades
Anillo de fijación	FRB 9/90	2 unidades

Obturación	TSN 510 G	4 unidades
Grasa sintética	Viscosidad 220 cSt, EP2.	500 gramos

Fuente: Elaboración propia.

2.5.3.1.2 Herramientas e instrumentos

Tabla 2.16 Herramientas e insumos.

Herramienta	Observación	Cantidad
Llave de gancho	Código: HN 10	1 unidad
Tecle manual cadena	Capacidad: 500 [kg]	1 unidad
Micrómetro de interiores	Rango: 25-50 [mm]	1 unidad
Micrómetro de exteriores	Rango: 25-50 [mm]	1 unidad
Galga de espesores	Milimétrica	1 unidad
Regla metálica	Rango: 0-150 [mm]	1 unidad
Atornillador metálico	Punta de paleta, 150 - 200 [cm]	1 unidad

Martillo	Material: bronce	1 unidad
Chicharra	Para dados de ½"	1 unidad
Dado hexagonal	10 [mm]	1 unidad
Dado hexagonal	12 [mm]	1 unidad
Cinzel	De metal	1 unidad
Llave dinamométrica	Rango: 0-100 [Nm]	1 unidad
Plumón de pintura	De color blanco o amarillo	1 unidad

Fuente: Elaboración propia.

2.5.3.1.3 Insumos

Tabla 2.17 Insumos.

Insumo	Observación	Cantidad
Grasa sintética	Viscosidad: 220 [cSt]	500 [g]
Solvente químico	CP-40 o similar	2 tarros

Paños algodón	Limpios, libres de contaminación	10 unidades
Lija para metal	Grano: 100 a 180	2 unidades
Aceite mineral	Para insertar el manguito en el eje	100 [ml]

Fuente: Elaboración propia.

2.5.3.1.4 Elementos de Seguridad

El operador encargado debe utilizar los siguientes elementos de seguridad:

- Guantes
- Casco
- Lentes de seguridad
- Zapatos de seguridad
- Protector respiratorio de medio rostro

2.5.3.2 Desmontaje:

1. Emplazar una mesa de trabajo cerca del filtro de banda horizontal, con la finalidad de mantener una superficie de trabajo limpia y ordenada.
2. Limpiar exhaustivamente el área del soporte de rodamiento, y sus alrededores. Aplicar solvente químico, CP-40 o similar, si es necesario.
3. Utilizando la regla metálica, marcar una línea con el plumón la distancia que se ubica el rodamiento en el eje del rodillo.
4. Con la ayuda de una chicharra (o barrote) y con un dado de 12 [mm], soltar los pernos que fijan la tapa superior del soporte, y retirarla. En caso de agripamiento, aplicar solvente químico y repetir la acción.

5. Retirar la mayor cantidad de grasa y contaminación que exista dentro del soporte, utilizando solvente y trapos limpios, según sea necesario.
6. Instalar el tecele sobre la estructura del filtro, con el objetivo de elevar el rodillo utilizando la cadena.
7. Accionar manualmente el tecele y subir gradualmente el rodillo, retirando el eje con el rodamiento, de la base del soporte.
8. Identificar la lengüeta de la arandela de retención que está doblada hacia la tuerca, y enderezarla con la ayuda del cincel y martillo.
9. Soltar la tuerca de fijación utilizando la llave de gancho, retirando la tuerca y la arandela.
10. Retirar el rodamiento aplicando ligeros golpes en el aro interior del rodamiento, con la ayuda del cincel y martillo. La fuerza debe ser uniforme en los 360° del aro del rodamiento; **no en un solo punto**, dado que se puede atravesar el rodamiento.
11. Remover el manguito de fijación abriendo su ranura con la ayuda de un atornillador de paleta; así se expandirá y se soltará del eje. Aplicar solvente CP-40 o similar en caso de trabamiento.
12. Limpiar el eje con solvente, y en caso de rebabas utilizar una lija para quitarlas.

2.5.3.3 Montaje:

1. Verificar el estado del eje, si no está completamente limpio, se deben remover las impurezas utilizando solvente químico. Lijar posibles rebabas y luego limpiar con un trapo libre de pelusas.
2. Utilizar el micrómetro de exteriores, y comprobar que el eje esté dentro de la tolerancia h9, es decir, mínimo: 44.938 [mm] y máximo: 45.000 [mm]. Luego, utilizando un micrómetro de interiores, medir el alojamiento y verificar que las dimensiones estén dentro de 90.000 [mm] y 90.054 [mm]. Se debe medir en 3 posiciones y 4 planos.
3. Sobre la mesa de trabajo, situar un rodamiento de forma vertical y utilizar una hoja de la galga de espesores, para medir el juego radial interno; el cuál es C3. La medición es correcta cuando se logra pasar una hoja que mida entre 0,060 [mm] y 0,080 [mm], por el segmento **superior de una sola hilera** de rodillos (cantidad de rodillos $\approx$ arco de 120°): entre el aro exterior y los rodillos. Medir ambas hileras de rodillos, y luego repetir la medición en el otro rodamiento.
4. Lubricar el eje utilizando aceite mineral, e introducir el manguito de fijación en éste, expandiéndolo por su ranura con la ayuda de un atornillador de paleta ,

hasta llegar a la línea realizada en el desmontaje, ya que ésta define de la posición original.

5. Introducir el rodamiento por el lado que tiene el mayor diámetro (agujero cónico), sólo con la fuerza de los brazos. Después, rosque la tuerca de fijación y apriétela suavemente con la llave de gancho.
6. Rosque ligeramente la tuerca utilizando la llave de gancho, a medida que el rodamiento se va calando en el eje, éste irá reduciendo su juego radial interno, por lo tanto verifique el juego radial interno, cada vez que aprieta la tuerca.
7. Controlar la reducción del juego radial interno, introduciendo una hoja de la galga de espesores por una hilera de rodillos (exteriores), que esté entre: 0,055 [mm] y 0,045 [mm], por la zona **inferior** del rodamiento, es decir, entre el aro exterior y los rodillos. **No se debe apretar excesivamente**, el rodamiento **nunca** debe quedar con un juego radial interno menor a 0,030 [mm]; es el límite para que este rodamiento funcione correctamente.
8. Soltar la tuerca de fijación y retirarla, luego insertar la arandela de retención (con sus lengüetas hacia la tuerca), enseguida roscar nuevamente la tuerca de fijación hasta llegar al JRI descrito en el párrafo anterior, siguiendo las mismas indicaciones.
9. Utilizando un cincel y un martillo, doblar una lengüeta de la arandela que coincida con una muesca de la tuerca, sino calza, apretar ligeramente la tuerca hasta que coincida.
10. Proceder a apernar la base del nuevo soporte de pie, pasando ambos pernos M12 por debajo de la estructura y roscando las tuercas por el lado del soporte, con la ayuda de una chicharra o barrote. El apriete debe ser ligero, de forma que el soporte se pueda mover hasta conseguir la misma posición que tenía el soporte desmontado.
11. Llenar con grasa sintética el interior de la base del soporte e insertar dos obturaciones partidas TSN 510 G, una a cada lado del soporte. Enseguida, realizar el mismo procedimiento para la tapa del soporte.
12. Descender gradualmente el rodillo que está sostenido por el tecla, hasta insertar suavemente el rodamiento en el alojamiento del soporte. El conjunto soporte-rodamiento debe quedar exactamente en la misma posición de la que fue retirado en el desmontaje.
13. En el soporte del lado fijo, se deben insertar a ambos costado del rodamiento, los anillos de fijación, FRB 90/9. Si ésta acción se complica, se puede utilizar un atornillador de paleta para ejercer una mayor fuerza, nunca golpeando, hasta lograr la posición deseada.

14. Luego agregar más grasa sintética sobre el rodamiento, y a continuación tapar el soporte apretando los pernos M10, hasta que el torque de apriete sea de 50 [Nm].
15. Se finaliza con el torqueado de los pernos de la base, M12, hasta alcanzar los 80 [Nm].

CAPÍTULO 3: CONCLUSIONES

Minera Meridian presentaba un alto e indeseado consumo de rodamientos en sus filtros de banda, motivo por el cual los mantenedores deseaban buscar una mejora que permitiera reducir dicho consumo, y en consecuencia mejorar la disponibilidad de los equipos. Es por esta razón, que se comenzó por una inspección visual en uno de los filtros. Allí el suscrito se percató de una alta contaminación en toda la zona donde se encuentran los soportes de pie, que alojan en su interior los rodamientos en cuestión.

Así, luego de asistir en el desmontaje de uno de ellos, específicamente los rodamientos y sus respectivos soportes del rodillo guía 11T, del filtro N°4, se observó que la contaminación tanto sólida como líquida, perteneciente al mismo concentrado de mineral que se filtra, se introducía a través de las obturaciones del soporte.

Tras un exhaustivo análisis de todos los componentes, y luego de descartar todos los daños colaterales, es decir, los modos de fallas secundarios, se llegó a la conclusión de que la falla de causa raíz, radica en la severa corrosión de todas sus partes. Esta corrosión era producida por el ingreso de fluidos líquidos ácidos al interior del soporte de pie, dañando las obturaciones, e incorporándose al interior del rodamiento. De esta forma, la película lubricante se degradó rápidamente y comenzó el acelerado desgaste de los rodamientos, acortando su vida útil a no más de 3 meses; lo cual es prematuro e insuficiente para el departamento de mantenimiento.

A través del estudio del arte sobre los tipos de rodamientos y sobre las tecnologías de lubricación, se llegó a la proposición de tres posibles mejoras, optando como propuesta correctiva, la de instalar rodamientos que utilizan como lubricante la grasa sólida.

Esta grasa, que es insertada de fábrica, llena todos los espacios libres dentro del rodamiento, limitando la entrada de contaminantes sólidos. Su estructura química otorga una resistencia mayor a fluidos agresivos, como ácidos, en comparación a otros métodos de lubricación; no siendo fácil de ser removida del rodamiento. Además, la grasa sólida ofrece de 2 a 4 veces mayor cantidad de aceite sintético base, en comparación a una grasa convencional. Esto se traduce en una mejor lubricación del rodamiento y la extiende por durante toda la vida útil de éste, eliminando la necesidad de relubricarlo. Por consiguiente, se eliminan en gran parte los costos asociados a lubricante y a mantenimiento.

El proyecto también consideró la aplicación *in situ* de un correcto procedimiento de montaje de los nuevos rodamientos, donde se enfatizó la importancia del adecuado control dimensional de las medidas de eje, alojamiento y del juego radial interno del rodamiento, que debe realizarse antes y después de la instalación; siempre respetando las tolerancias indicadas según normas ISO. Por otra parte, se desarrolló una guía rápida de montaje y desmontaje, que incluye un completo listado de los repuestos, insumos y herramientas necesarias para llevar a cabo de forma eficaz la ejecución.

En suma, la propuesta de solución fue exitosa, ya que la minera informó que desde la instalación de los rodamientos de grasa sólida, no han ocurrido problemas ni detenciones en el rodillo 11T. En consecuencia, se redujo la cantidad de rodamientos y lubricantes utilizados en el filtro, se aumentó la disponibilidad del equipo y al mismo tiempo se disminuyó la cantidad de horas hombre (HH) necesarias para la mantención.

CAPÍTULO 4: Bibliografía

SKF. (2015). *Productos de mantenimiento y lubricación*.

SKF. (2006). *Catalogo General* (Vol. 6000).

NTN-SNR. (2010). *Tecnología de los rodamientos*.

Rodamientos NSK. (2009). *Catalogo general de rodamientos* (Vol. E1102c).

Kappa, F. (s.f.). *Lublearn*. Recuperado el Marzo de 2016, de Lublearn: <http://noria.mx/lublearn/la-importancia-del-factor-kappa-en-la-lubricacion-de-rodamientos/>

Folleto SKF. (1989). *Lubricación de rodamientos* (Vol. 400/I).

NSK . (2011). *Molded oil bearings* (Vol. e1216d). Japón.

SKF. (1999). *Skf bearings with solid oil - the third lubrication choice* (Vol. 4827E). Sweden.

FAG Schaeffler Group. (2003). *Lubricación de rodamientos* (Vol. WL 81 115/4 SB). Alemania.

SKF. (2014). *Bearing damage and failure analysis* (Vol. 14219 EN). Sweden.

NSK Rodamientos. (2013). *Guía de bolsillo, mantenimiento de rodamientos*. México.

AKRON Lubricantes. (2011). *Akron alumiplex max*. México.

SKF. (2015). *SKF bearings with solid oil*. USA.

CAPÍTULO 5: ANEXOS

A) Manual filtro de banda horizontal de vacío, Delkor 32B/09/30V

NOTA: Se incluye en forma digital dado que posee 462 páginas