

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA**



**PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN PARA CALIFICAR LA  
FACTIBILIDAD DE RECONDICIONAMIENTO DE  
RODAMIENTOS DE 3040 KG. EN CHANCADORAS  
TERCIARIAS DE RODILLOS-PRESA DE 2250 TPH DE  
CAPACIDAD DE MOLIENDA DE MINERALES**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**MIGUEL ANGEL ÁLVAREZ AQUINO**

**PROMOCIÓN 2000 - I**

**LIMA – PERÚ**

**2014**

## **DEDICATORIA**

A mi madre María por su estímulo e incansable aliento, a mi tío Pablo por su apoyo incondicional y confianza depositada para el anhelo profesional.

## **AGRADECIMIENTOS**

Mis agradecimientos a todas las personas que hicieron posible la elaboración de este trabajo, en especial:

A mi familia, en especial a mi madre María por su apoyo moral incondicional, a mi tío Pablo, el motor paternal para lograr este objetivo de ser útil a la sociedad.

Al ingeniero Edwin Rubén Bejarano Linares por la dedicación en la orientación del desarrollo del presente informe de suficiencia.

A los profesores de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Ingeniería, por los momentos compartidos y consejos académicos durante la vida universitaria.

A mis amigos y colegas de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Ingeniería, con quienes compartí gratos momentos de experiencia de vida que me ayudaron a mejorar la calidad de persona.

# ÍNDICE

	PÁG.
1. PRÓLOGO	1
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN</b>	
1.1. ANTECEDENTES	3
1.2. OBJETIVO GENERAL	5
1.3. OBJETIVOS ESPECIFICOS	5
1.4. JUSTIFICACIÓN	8
1.4.1 Justificación académica	8
1.4.2 Justificación tecnológica	8
1.4.3 Justificación económica	8
1.5. ALCANCES	9
1.6. LIMITACIONES	10
<b>CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO DE REMANUFACTURA DE RODAMIENTOS BASADO EN SU INSPECCIÓN CALIFICADA Y SU APLICACIÓN EN LAS CHANCADORAS TERCIARIAS RODILLOS-PRENSA</b>	
2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO DE REMANUFACTURA DE RODAMIENTOS BASADO EN SU INSPECCIÓN CALIFICADA	11
2.1.1 Introducción	11
2.1.2 Concepto de reacondicionamiento de rodamientos	12
2.1.3 Evaluación e inspección de rodamientos	13
2.1.3.1 Nivel I – Recalificación	14
2.1.3.2 Nivel II – Restauración	15
2.1.3.3 Nivel III – Reconstrucción	17
2.1.3.4 Nivel IV – Reconstrucción Plus	18
2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE OPERACIÓN DE LOS RODAMIENTOS EN LAS CHANCADORAS TERCIARIAS DE RODILLO-PRENSA	20
2.2.1 Desarrollo y principio de operación las chancadoras rodillos-prensa	21
2.2.2 Apoyo del rodillo prensa	22
2.2.3 Dimensionamiento del rodamiento	22
2.2.4 Asientos del rodamiento	24
2.2.5 Juego interno radial del rodamiento	24
2.2.6 Lubricación del rodamiento	24
2.2.7 Datos técnicos de operación de la chancadora terciaria rodillos-prensa	26
2.2.8 Localización de los rodamientos en los rodillos prensa	28

### **CAPÍTULO 3: IDENTIFICACIÓN DE PROBLEMAS DE DESGASTE PREMATURO EN RODAMIENTOS Y PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS DE TRABAJO BASADO EN LA IMPLEMENTACIÓN DE SUS TÉCNICAS DE INSPECCIÓN, ANÁLISIS DE FALLA PARA DIAGNÓSTICO CONFIABLE DE CAUSAS Y CALIFICACIÓN DE REMANUFACTURA**

3.1	IDENTIFICACIÓN DE PROBLEMAS DE DESGASTE Y FALLAS PREMATURAS EN RODAMIENTOS USADOS EN CHANCADORAS TERCIARIAS DE RODILLO-PRENSA .....	31
3.1.1	Evaluación de la situación inicial .....	33
3.1.2	Situación futura deseada .....	40
3.2	PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS DE TRABAJO BASADO EN LA IMPLEMENTACIÓN DE SUS TÉCNICAS DE INSPECCIÓN, ANÁLISIS DE FALLA PARA DIAGNÓSTICO CONFIABLE DE CAUSAS Y SU CALIFICACIÓN DE REMANUFACTURA .....	42
3.2.1	Estructuración del diagrama Medios-Fines como método descriptivo .....	42
3.2.2	Planteamiento de la hipótesis de trabajo .....	42

### **CAPÍTULO 4: FUNDAMENTO TEÓRICO**

4.1	TEORÍA DE LA MECÁNICA DE CONTACTO .....	45
4.1.1	Introducción a la teoría de Hertz .....	45
4.1.2	Capacidad de carga de una esfera o rodillo sobre una pista de rodadura .....	45
4.2	INTRODUCCIÓN A LA VIDA DE LOS RODAMIENTOS BASADO EN LA TEORÍA DE LA FATIGA .....	47
4.2.1	Dimensionado de los rodamientos .....	49
4.2.2	Capacidad de carga dinámica y duración de vida .....	49
4.2.3	Carga dinámica equivalente .....	51
4.2.4	Carga límite de fatiga .....	52
4.2.5	Duración de vida necesaria aplicada .....	52
4.2.6	Duración de vida en servicio .....	53
4.2.7	Capacidad de carga estática .....	54
4.2.8	Coefficiente de seguridad estática .....	55
4.2.9	Carga estática equivalente .....	55
4.3	MARCO TEÓRICO RELACIONADO AL ANÁLISIS DE FALLA EN RODAMIENTOS .....	56
4.3.1	Comportamiento irregular como indicio de averías durante operación .....	56
4.3.1.1	Reconocimiento subjetivo de daños .....	56
4.3.1.2	Monitoreo de rodamientos con ayuda de medios técnicos .....	58

	4.3.1.2.1 Daños de gran superficie.....	58
	4.3.1.2.2 Daños puntuales.....	61
	4.3.1.3 Urgencia en la sustitución de un rodamiento – Vida remanente.....	64
4.4	<b>MARCO TEÓRICO RELACIONADO A LA GESTIÓN DE REPARACIÓN DE RODAMIENTOS</b>	67
	4.4.1 Alcances de la evaluación del proyecto de reparación.....	67
	4.4.2 Terminología usada comúnmente.....	67
	4.4.3 Determinación de la vida extendida del rodamiento.....	68
	4.4.4 Análisis procesal de un caso típico de reparación.....	69
	4.4.5 Criterios para la elegibilidad de reparación de rodamientos.....	71
	4.4.6 Proceso de remanufactura.....	72
	4.4.7 Grado de daños.....	74
	4.4.8 Métodos y opciones de reparación.....	76
	4.4.9 Expectativas y limitaciones de reparación.....	79

## **CAPÍTULO 5: DESARROLLO DE LAS ETAPAS DE LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA**

5.1	<b>PREPARACIÓN DE LA LOGÍSTICA Y CONDICIONES DE TRABAJO</b>	81
	5.1.1 Recopilación de antecedentes de aplicación de los rodamientos.....	82
	5.1.2 Establecimiento de la condición actual de los rodamientos.....	84
	5.1.3 Preparación del protocolo de trabajo.....	85
	5.1.4 Verificación de las técnicas de manipulación segura de rodamientos.....	86
5.2	<b>EVALUACIÓN CUALITATIVA DE LOS RODAMIENTOS DAÑADOS</b>	88
	5.2.1 Inspección visual de los rodamientos dañados.....	89
	5.2.2 Obtención de evidencias fotográficas de las componentes de los rodamientos.....	91
	5.2.3 Análisis de los principales daños en los rodamientos.....	93
	5.2.3.1 Rodamiento N° SNB61.....	94
	5.2.3.2 Rodamiento N° SND1.....	97
	5.2.3.3 Rodamiento N° SNE4.....	100
	5.2.3.4 Rodamiento N° SND28.....	102
	5.2.3.5 Rodamiento N° SND4.....	104
	5.2.3.6 Rodamiento N° SND35.....	106
	5.2.3.7 Rodamiento N° SND18.....	108
	5.2.3.8 Rodamiento N° SNE8.....	110
	5.2.3.9 Rodamiento N° SND29.....	113
	5.2.3.10 Rodamiento N° SND576.....	115
	5.2.3.11 Rodamiento N° SND2.....	117
	5.2.3.12 Rodamiento N° SND6.....	119

5.2.4	Comparación de resultados con patrones de daños característicos	122
5.3	EVALUACIÓN CUANTITATIVA DE LOS RODAMIENTOS DAÑADOS	122
5.3.1	Determinación de la profundidad de huellas y marcas en pistas y elementos rodantes	124
5.3.2	Obtención de los niveles de desgaste de las superficies de las pistas y elementos rodantes	124
5.4	DIAGNÓSTICO DE LOS ESTADOS DE CONDICIÓN DE CADA RODAMIENTO	124
5.4.1	Definición de los niveles de reparación de los rodamientos	125
5.4.2	Resultados del análisis causa-raíz a cada rodamiento	125
5.4.2.1	Rodamiento N° SNB61	125
5.4.2.2	Rodamiento N° SND1	126
5.4.2.3	Rodamiento N° SNE4	126
5.4.2.4	Rodamiento N° SND28	127
5.4.2.5	Rodamiento N° SND4	128
5.4.2.6	Rodamiento N° SND35	129
5.4.2.7	Rodamiento N° SND18	129
5.4.2.8	Rodamiento N° SNE8	130
5.4.2.9	Rodamiento N° SND29	131
5.4.2.10	Rodamiento N° SND576	132
5.4.2.11	Rodamiento N° SND2	132
5.4.2.12	Rodamiento N° SND6	133
5.4.3	Consolidación de resultados de la evaluación y recomendaciones asociadas	134
5.5	OBTENCIÓN DE LOS COSTOS DE REPARACIÓN Y EL PLAN DE EJECUCIÓN DEL PROYECTO	136
5.5.1	Obtención de los costos del proyecto de reparación	136
5.5.2	Obtención del plan de ejecución del proyecto	143
5.6	VALIDACIÓN DE LA CALIDAD BASADO EN EL GRADO DE CONFIABILIDAD DE LA INSPECCIÓN	143

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

**LISTADO DE TABLAS**

Tabla N°4.1	Valores recomendados de duración de rodamientos para aplicaciones pesadas.....	53
Tabla N°4.2	Chart para reconocimiento y diagnóstico práctico de daños en rodamientos.....	57
Tabla N°5.1	Registro de horas operativas y número de serie de rodamientos a inspeccionar.....	85
Tabla N°5.2	Chart de identificación del tipo y localización de daños en componentes de cada rodamiento según datos de fabricación y número de serie.....	90
Tabla N°5.3	Consolidación de resultados de inspección sobre condición de reparación.....	135
Tabla N°5.4	Valorización detallada del costo de inspección de rodamientos.....	139



## LISTADO DE ILUSTRACIONES

Fig. N°2.1 Montaje de un rodamiento reacondicionado para una perforadora de túnel	12
Fig. N°2.2 Evaluación visual de la pista de rodadura de un rodamiento grande	14
Fig. N°2.3 Examen microscópico de pistas de un rodamiento para una perforadora de túnel	15
Fig. N°2.4 Reacondicionamiento de rodillos: Antes – Rodillos con marcas de corrosión e indentaciones de cuerpos extraños. Después – Nuevos rodillos con sobremedidas ajustadas	16
Fig. N°2.5 Reacondicionamiento de jaulas: Antes – Segmento de jaula con residuos de lubricante y contaminantes. Después – Segmento de jaula decapados al ácido	16
Fig. N°2.66 Reacondicionamiento de pistas: Antes – Pista de rodadura con fuerte formación de huellas en la zona de deslizamientos. Después – Pista de rodadura rectificada	17
Fig. N°2.7 Rectificado de la pista de un rodamiento para una perforadora de túnel	18
Fig. N°2.8 Proceso de rectificado posterior y control de medidas del aro de un rodamiento de una perforadora de túnel	19
Fig. N°2.9 Proceso de montaje / armado del ensamble del nuevo rodamiento para embalaje	20
Fig. N°2.10 Principio de trituración de minerales a través de dos rodillos cilíndricos	21
Fig. N°2.11 Rodamiento de rodillos esféricos en chancadora rodillos-prensa	22
Fig. N°2.12 Hoja técnica del rodamiento de rodillos esféricos usados en las chancadoras terciarias de rodillos-prensa	23
Fig. N°2.13 Procedimiento de ensamble del montaje del rodamiento de rodillos esféricos	25
Fig. N°2.14 Plano de ensamble de componentes de chancadora de rodillos - prensa	27
Fig. N°2.15 Chancadora rodillos-prensa del proceso vista desde el lado accionamiento	28

Fig. N°2.16 Identificación de los rodamientos a través de la localización en los rodillos.....	29
Fig. N°2.17 Diagrama del proceso de molienda terciaria de las chancadoras rodillos-prensa.....	30
Fig. N°3.1 Chancadora terciaria rodillos-prensa lado operador (externo) posiciones B y D.....	36
Fig. N°3.2 Inspección del estado del rodamiento exterior (B) de HPGR N°31..	37
Fig. N°3.3 Inspección del estado del rodamiento exterior (B) de HPGR N°33..	39
Fig. N°3.4 Inspección del estado del rodamiento exterior (D) de HPGR N°33..	39
Fig. N°3.5 Estructura del diagrama Medios-Fines del procedimiento deinspección.....	44
Fig. N°4.1 Evolución de la temperatura para una máquina herramienta con apoyo de husillo principal en perfecto estado – Condición de ensayo: $n \cdot d_m = 750000 \text{ min}^{-1} \times \text{mm}$ .....	59
Fig. N°4.2 Evolución de la temperatura con función de rodamiento libre alterada – Condición de ensayo: $n \cdot d_m = 750000 \text{ min}^{-1} \times \text{mm}$ .....	60
Fig. N°4.3 Evolución de la temperatura en función del tiempo en caso de una lubricación con grasa deficiente. Condición de ensayo: $n \cdot d_m = 200000 \text{ min}^{-1} \times \text{mm}$ .....	61
Fig. N°4.4 Espectro de frecuencia de la señal de la envolvente entre 0 y 200 Hz. Abajo: Rodamiento sin daños. Arriba: Rodamiento dañado – $n_{IR}$ : Velocidad de rotación del aro interior [ $\text{min}^{-1}$ ] y $f_{IR}$ : Frecuencia de la señal del aro interior (frecuencia de paso de los cuerpos rodantes) [Hz].....	62
Fig. N°4.5 Daños en el aro interior detectados por medio del procedimiento de envolvente en un rodamiento oscilante de rodillos de una máquina papelera.....	63
Fig. N°4.6 Evolución de la temperatura e impulso de choque en función del tiempo después de la desconexión de la lubricación. Rodamientos para husillos B7216E-TVPA; $P/C=0,1$ ; $n=9000 \text{ min}^{-1}$ ; aceite lubricante ISO VG100.....	64

Fig. N°4.7 Evolución de daños por fatiga en el camino de rodadura del aro interior de un rodamiento de bolas de contacto angular. El intervalo de tiempo entre las revisiones desde el inicio del daño está indicado en % del tiempo de duración nominal $L_{10}$ .....	66
Fig. N°4.8 Comparación del tiempo de vida del rodamiento extendido por reparación relativo a la teórica y de servicio.....	69
Fig. N°4.9 Cuadro comparativo de las distintas etapas de reparación de rodamientos.....	77
Fig. N°5.1 Seguimiento de tendencias de sólidos contaminantes encontrados en Chancadoras con denominación HPGR N°31, N°32 y N°33.....	83
Fig. N°5.2 Registro de tendencias de monitoreo del lubricante según partículas contaminantes encontradas en análisis para Chancadoras HPGR N°31 y N°32.....	84
Fig. N°5.3 Instalaciones de almacenamiento de los rodamientos para inspección.....	88
Fig. N°5.4 Fotografía de un rodamiento con el reflejo de otra componente mecánica.....	91
Fig. N°5.5 Desarme parcial del rodamiento para inspección de sus componentes.....	93
Fig. N°5.6 Rodamiento de serie N° SNB61 grabado en lateral de aro exterior..	94
Fig. N°5.7 Marcas de corrosión de contacto en asiento de aro exterior, debido a desgaste en superficies por ajuste.....	94
Fig. N°5.8 Desgaste normal y marcas de indentaciones suaves en pista de aro exterior debido a ingreso de contaminantes sólidos por obturación insuficiente.....	94
Fig. N°5.9 Rayas de desgaste en lateral del labio central de pista por atascamiento de rodillos debido a sobregiro de rodillo y deficiente lubricación y/o cargas elevadas.....	95
Fig. N°5.10 Marcas de indentaciones suaves en rodillos y desgaste en bordes de alvéolo de jaula debido a lubricación deficiente.....	95
Fig. N°5.11 Desgaste normal por contacto de rodillos e indentaciones suaves en de aro interior debido a exceso de carga y contaminación respectivamente.....	96

Fig. N°5.12 Oxidación de contacto localizada en diferentes zonas de agujero interior por ajuste deficiente y pequeñas rayas en su borde debido a manipulación en desmontaje.....	96
Fig. N°5.13 Rodamiento de N° de serie SND1 grabado en lateral de aro interior .....	97
Fig. N°5.14 Oxidación de contacto en asiento de aro exterior y verificación de severidad con paso de lija suave sobre superficie dañada .....	97
Fig. N° 5.15 Desgaste en zona de carga y corrosión de contacto “standstill” en pista exterior debido a humedad.....	98
Fig. N°5.16 Desgaste por rozamiento de alvéolo de jaula y marca de oxidación de contacto “standstill” .....	98
Fig. N°5.17 Desgaste con rayas laterales por exceso de carga axial debido a atascamiento de rodillo en borde de labio central e indentaciones suaves en jaula.....	98
Fig. N°5.18 Marcas de oxidación de contacto “standstill” en pista de aro interior y desgaste en superficie brillante por contacto a presión de rodillo por sobrecarga.....	99
Fig. N°5.19 Desgaste según huella circunferencial localizada en agujero por posible deslizamiento mínimo del aro interior en eje .....	99
Fig. N°5.20 Rodamiento de N° de serie SNE4 grabado en lateral de aro interior.....	100
Fig. N°5.21 Corrosión de contacto en asiento aro exterior por ajuste deficiente .....	100
Fig. N°5.22 Desgaste uniforme (huellas cruzadas) al nivel de rectificado más intensa y mejor formadas en zona de carga de pista de aro interior....	100
Fig. N°5.23 Indentaciones profundas en rodillos y huellas de desgaste en superficie de contacto de rodillo y alvéolos de jaula respectivamente...	101
Fig. N°5.24 Desgaste por rodadura en pista de aro interior y huellas de contacto en alvéolo.....	101
Fig. N°5.25 Corrosión de contacto mínimo y surcos en borde de agujero debido a ajuste y atascamiento en procesos de desmontaje .....	101

Fig. N°5.26 Corrosión por contacto en diferentes posiciones (giro relativo) sobre asiento de aro exterior debido a ajuste deficiente (desgaste en alojamiento).....	102
Fig. N°5.27 Huella de desgaste central de rodadura dejado en pista de aro exterior .....	102
Fig. N°5.28 Indentaciones suaves y desgaste por contacto con jaula y lubricación deficiente .....	102
Fig. N°5.29 Desgaste en arista de labio central de pista por carga axial excesiva de rodillo.....	103
Fig. N°5.30 Desgaste en borde de alvéolos de jaula por lubricación deficiente.....	103
Fig. N°5.31 Huella de desgaste normal con indentaciones suaves en pista de aro interior .....	103
Fig. N°5.32 Número de serie SND4 grabado en lateral de aro interior / desgaste leve y formación de marcas de oxidación por humedad en pista de aro exterior (standstill).....	104
Fig. N°5.33 Corrosión de contacto en asiento de aro exterior por ajuste deficiente / Indentaciones suaves y marca frontal de corrosión de contacto en rodillo por humedad.....	104
Fig. N°5.34 Desgaste leve y marcas de oxidación por humedad en pista de aro exterior debido a parada prolongada.....	104
Fig. N°5.35 Indentaciones suaves y superficie brillante con marca de corrosión por contacto (standstill).....	104
Fig. N°5.36 Indentaciones suaves y superficie brillante con marca de corrosión por contacto "standstill" .....	105
Fig. N°5.37 Desgaste lateral en arista de labio central de pista por contacto de atascamiento de rodillo (sobregiro).....	105
Fig. N°5.38 Marcas circunferenciales debido a microgiro por desgaste de superficie de agujero de aro interior respecto al eje .....	105
Fig. N°5.39 Número de serie SND35 grabado en lateral de aro exterior.....	106
Fig. N°5.40 Corrosión por contacto en asiento de aro exterior debido a ajuste deficiente.....	106
Fig. N°5.41 Marcas de óxido por paradas a la distancia entre rodillos "standstill" debido a humedad en zonas de contacto .....	106

Fig. N°5.42 Desgaste en zona de carga y ligera huella lineal de óxido por humedad en parada prolongada.....	106
Fig. N°5.43 Desgaste uniforme en rodillo con marca de rozamiento con jaula.....	107
Fig. N°5.44 Desgaste en borde de jaula debido a contaminación y lubricación deficiente	107
Fig. N°5.45 Indentaciones y corrosión por contacto en pista (standstill) debido a humedad.....	107
Fig. N°5.46 Marcas lineales en agujero de aro interior por maniobras en desmontaje .....	107
Fig. N°5.47 Número de serie SND18 grabado en lateral de aro interior.....	108
Fig. N°5.48 Corrosión localizada en asiento de aro exterior debido a ajuste inadecuado.....	108
Fig. N°5.49 Desgaste normal en zona de carga de pista de aro exterior.....	108
Fig. N°5.50 Indentación mediana en rodillo y fatiga en forma de desconchado en pista de aro interior por contaminación de partícula dura.....	109
Fig. N°5.51 Desgaste con indentaciones (huellas medianas) en pista de aro interior .....	109
Fig. N°5.52 Exfoliación e indentación severa en pista de aro interior por penetración de contaminante.....	109
Fig. N°5.53 Desgaste con formación de óxido en agujero con microgiro en asiento de eje .....	110
Fig. N°5.54 Número de serie SNE8 grabado en lateral de aro exterior.....	110
Fig. N°5.55 Oxidación de contacto (fretting corrosion) en varias locaciones de asiento de aro exterior por microgiros en alojamiento.....	111
Fig. N°5.56 Desgaste con huellas de rectificado en pista de aro exterior (forma escamada y continua en zona cargada) y pequeña decoloración (óxido) por deposición de humedad.....	111
Fig. N°5.57 Marca de desgaste en rodillo por lubricación deficiente y contacto excesivo con alvéolo de jaula .....	112
Fig. N°5.58 Indentación moderada en pista de aro interior por contaminación.....	112
Fig. N°5.59 Huellas de corrosión por deposición de humedad debido a interferencia inadecuada de agujero y eje.....	113

Fig. N°5.60 Número de serie SND29 grabado en lateral de aro interior .....	113
Fig. N°5.61 Corrosión localizada en asiento de aro exterior por mal ajuste .....	114
Fig. N°5.62 Desgaste normal en pista de aro exterior .....	114
Fig. N°5.63 Rayas causadas por contacto de contaminación en rodillo con labio central de pista de aro interior .....	114
Fig. N°5.64 Desgaste importante con indentación y marca de corrosión "standstill" en pista debido a humedad en parada .....	115
Fig. N°5.65 Formación de condensado en agujero por interferencia deficiente en ajuste .....	115
Fig. N°5.66 Número de serie SND576 y estado de reparación del rodamiento grabado con lápiz eléctrico en aro exterior .....	115
Fig. N°5.67 Corrosión localizada admisible en asiento de aro exterior .....	116
Fig. N°5.68 Descascarillado de material de pista por fatiga debido a contaminación .....	116
Fig. N°5.69 Óxido de contacto en asiento de aro exterior por defecto de ajuste .. .....	117
Fig. N°5.70 Rayas de rodadura en pista desgastado y rugoso (estriado) formado en zonas específicas por lubricación deficiente .....	117
Fig. N°5.71 Desgaste con indentaciones en zona de carga .....	117
Fig. N°5.72 Indentaciones suaves y marca de rozamiento con alveolo de jaula debido a lubricación deficiente .....	118
Fig. N°5.73 Rayas sensibles en pista de aro interior debido a vibración de equipo y humedad .....	118
Fig. N°5.74 Marcas de Brinelling y Rayas en pista de aro exterior y rayas en borde de agujero por trabado con eje en desmontaje de rodamiento .....	119
Fig. N°5.75 Número de serie SND6 grabado en lateral de aro exterior .....	119
Fig. N°5.76 Corrosión de contacto en asiento de aro exterior por ajuste deficiente .....	119
Fig. N°5.77 Standstill - Corrosión localizada por contacto de rodillo a distancia de separación por efecto de humedad durante paradas prolongadas .....	120
Fig. N°5.78 Indentaciones suaves en rodillo con marca de desgaste por rozamiento con alvéolo de jaula .....	120

Fig. N°5.79 Desgaste axial en borde de labio central por trabado de rodillo debido a sobregiro (carga excesiva) y lubricación deficiente en alvéolo de jaula.....	121
Fig. N°5.80 Formación de corrosión de contacto en pista de aro interior e indentaciones suaves debido a contaminantes y largas paradas....	121
Fig. N°5.81 Marcas circunferenciales de contacto en agujero debido a microgiro del aro interior en eje.....	122
Fig. N°5.82 Métodos de medición del juego radial para rodamientos mayores.....	123
Fig. N°5.83 Cotizaciones del servicio de inspección de 12 rodamientos mayores para evaluación técnica del nivel de reparación según requerimiento del usuario.....	138
Fig. N°5.84 Orden de Compra consolidada del cliente por el servicio de inspección de 12 rodamientos para ser evaluados su condición de reacondicionamiento o remanufactura.....	140
Fig. N°5.85 Precios referenciales de los niveles de reparación de los rodamientos usados respecto de los nuevos para venta directa enviados por el fabricante al usuario final.....	141
Fig. N°5.86 Cotización por servicio de reacondicionamiento de rodamientos.....	142



## LISTADO DE SIMBOLOS

- $f^0$ : Capacidad de carga del elemento rodante.
- $k$ : Constante dependiente del tipo de rodamiento.
- $d$ : Diámetro del elemento rodante.
- $L$ : Longitud del elemento rodante.
- $L_{10}$ : Duración de vida nominal en millones de revoluciones de operación.
- $L_{10h}$ : Duración de vida nominal en horas de funcionamiento.
- $C$ : Capacidad de carga dinámica en Newton.
- $P$ : Carga dinámica equivalente en Newton.
- $p$ : Exponente de duración de vida.
- $n$ : Velocidad de funcionamiento en RPM.
- $F_r$ : Carga radial dinámica.
- $F_a$ : Carga axial dinámica.
- $X$ : Factor radial de tablas de medida.
- $Y$ : Factor axial de tablas de medida.
- $S_0$ : Coeficiente de seguridad estática en Newton.
- $C_0$ : Capacidad de carga estática en Newton.
- $P_0$ : Carga estática equivalente en Newton.
- $F_{0r}$ : Carga radial estática en Newton.
- $F_{0a}$ : Carga axial estática en newton.
- $X_0$ : Factor radial de tablas de medida.
- $Y_0$ : Factor axial de tablas de medida.
- GCL: Grado de confiabilidad de inspección local.
- CA: Cantidad de rodamientos según inspección de Alemania.
- CL: Cantidad de rodamientos según inspección local.

## PRÓLOGO

Para lograr el objetivo final del presente informe de suficiencia basado en actividades laborales especializadas se han desarrollado cinco capítulos cuyos contenidos son los siguientes:

En el capítulo 1 se muestra la introducción del proyecto de inspección para remanufactura a realizar presentando los antecedentes, el objetivo general y los específicos, además de la justificación, los alcances y finalmente las limitaciones.

En el capítulo 2 se presenta la descripción de las características del proyecto de reacondicionamiento basado en la inspección calificada del rodamiento y su aplicación en la chancadora terciaria tipo rodillos-prensa.

En el capítulo 3 se realiza la identificación del problema, es decir la determinación de fallas prematuras y la factibilidad de usar rodamientos reparados; asimismo la determinación de una hipótesis a este problema basado en la implementación de un procedimiento de inspección calificada que sirva como herramienta de diagnóstico causa-raíz del bien, y su evaluación para determinar su reacondicionamiento.

En el capítulo 4 se desarrolla un resumen del marco teórico relacionado primero a la mecánica de los materiales, como el principio de la elasticidad, teoría de rodadura, tensiones y deformaciones y la distribución de cargas en rodamientos.

En segundo lugar se abarca sobre los parámetros de diseño dimensional, cinemática y dinámica del rodamiento para su aplicación en equipos; en tercer lugar se trata los fundamentos del análisis de falla en rodamientos y finalmente en cuarto lugar se describen las bases de los procesos en la gestión de reacondicionamiento o remanufactura de rodamientos.

En el capítulo 5 se desarrolla el contenido de la solución al problema basado en la metodología de investigación del diagrama de medios-fines y la matriz de consistencia, explicando paso a paso un procedimiento de inspección especializada según las técnicas del desglose de componentes del proyecto, sus actividades y la medición de la precisión o grado de confiabilidad para la calificación en la inspección de rodamientos y su recomendación de remanufactura.

El presente informe es de utilidad debido a que permite cumplir con el requisito solicitado por la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Ingeniería para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico Electricista. Asimismo este trabajo es útil como aporte en la investigación tecnológica por que se ha desarrollado de manera sistémica, metodológica y cumpliendo con los estándares de la Ingeniería Mecánica.

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1. ANTECEDENTES**

Entre los servicios técnicos especializados que los fabricantes de rodamientos ofrecen a sus clientes como valor añadido están referidos a la ingeniería y el mantenimiento de sus productos y equipos basados en técnicas de confiabilidad, pero últimamente el concepto de reparación o reacondicionamiento de este importante activo está llegando a ser una importante alternativa tanto técnica como económica dirigida para aquellos de mayor tamaño o de producción especial.

La ventaja es relativo a la disminución del tiempo de entrega versus los fabricados que generalmente son elevados, además esta tecnología ayuda a reducir los costos de activos por almacenamiento pues el mismo bien se recupera y se reutiliza. Su evaluación de reparación está respaldado por un exhaustivo análisis de falla llevada a cabo en inspecciones especializadas.

En general el análisis de falla de componentes de equipos industriales es un tópico muy especializado que requiere del conocimiento técnico y experiencia necesaria para tener los criterios para definir el estado de desgaste y las posibles causas que originaron tal desperfecto, es decir recurrir a técnicas propias o procedimientos estándares para realizar un diagnóstico a priori están basados en investigaciones, experiencia previa, criterios y sobre todo en el conocimiento sobre la componente que se está analizando.

Actualmente existe una demanda de profesionales especializados en este rubro sea para actuar como peritos en tribología de bienes o el como servicio

técnico garantizado del fabricante para sus productos más importantes; esta última práctica es explicada en el presente informe usando métodos de análisis causa-raíz en rodamientos y componentes de maquinaria donde son usados, y el objetivo va más allá de la determinación del diagnóstico de falla sino también de las técnicas de inspección para evaluar la factibilidad del reacondicionamiento, know-how propio de los fabricantes.

Los usuarios de los productos actualmente exigen mayores garantías de los bienes que adquieren entonces los fabricantes han destinado mayores esfuerzos a invertir en el área de asistencia técnica post-venta para satisfacer la necesidad de clientes no conformes. Específicamente en la performance de los rodamientos, cuando no es cumplido el tiempo de vida operativo requerido, manifiestan su descontento sobre la calidad del producto sin hacer previamente un análisis del origen del problema, es por ello que la inspección de calidad del estado del producto es un valor añadido valorado tanto por los usuarios por que les permite conocer las causas del problema y pueden tomar acciones para mitigarlas, como también es importante para los fabricantes por que les permite obtener información de sus productos ante situaciones especiales para mejorar la calidad del producto.

Como la producción de rodamientos están basados en la calidad de sus procesos entonces es necesario que estén involucrados en este objetivo la tecnología de sus maquinarias, el conocimiento y la experiencia de su personal, los insumos de calidad como el acero según especificaciones, la gestión de procesos, una filosofía de política y cultura organizacional donde los empleados estén identificados con su visión y misión.

Ante esta tendencia de la mejora de la calidad en todo sentido es que las oficinas técnicas de los fabricantes se hacen importantes por que cumplen el objetivo de estar cerca del usuario final para conocer sus necesidades y demandas

requeridas en los productos para sus aplicaciones, información que servirá como retroalimentación para una mejora continua de sus procesos así como de su servicio técnico post-venta especialmente en las técnicas para recuperar sus bienes como es el reacondicionamiento de rodamientos.

## **1.2. OBJETIVO GENERAL**

Implementar un protocolo técnico-económico para la inspección cualitativa y cuantitativa de rodamientos de 3040 Kg. en chancadoras terciarias tipo rodillos-prensa de capacidad de 2250 TPH, con la finalidad de calificar por encima del 75% de confiabilidad para su reacondicionamiento en su centro especializado matriz.

## **1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Los objetivos específicos para implementar este procedimiento de inspección calificada están sustentados en los resultados parciales de cada fase de la metodología planteada para llegar a la solución del problema según lo desarrollado del capítulo 5:

- 1.3.1.** En la fase de la preparación de las condiciones de trabajo se obtiene un protocolo de procedimiento general de trabajo según padrón de fábrica pero adaptado a la revisión y requerimiento de facilidades para realizar las actividades de inspección de forma segura y confiable; tomando en cuenta las características de las instalaciones se realizarán las observaciones, así como la provisión de herramientas, equipos e insumos que se considera serán usadas y la disposición del personal de apoyo apto para realizar las maniobras y manipulación de los rodamientos y sus componentes. Esta etapa es necesario considerarla por que permite conocer los alcances y condiciones para planificar el cronograma de trabajo y los costos incurridos previamente para el personal y la logística para cumplir

esta actividad. En ella también se debe solicitar los antecedentes de aplicación de tales rodamientos en el equipo e investigar sobre sus condiciones operativas previas que originaron el desgaste prematuro.

- 1.3.2.** En la fase de la evaluación cualitativa de los rodamientos dañados se logra la identificación de las principales componentes dañadas basadas en la inspección visual y de sensibilidad de la calidad del estado material de su superficie, técnica que se realiza a través de fotos y anotaciones principales observadas en los lugares de mayor desgaste describiendo la forma, orientación, tamaño y profundidad si la hubiere del desperfecto o desgaste localizado, las cuales son registradas en formatos de localización de la anomalía identificada. Con esta información se procede a organizar la data relacionando cada observación a un patrón determinado de falla estándar para compararla y determinar a priori una causa probable del problema.
- 1.3.3.** En la fase de la evaluación cuantitativa de los rodamientos dañados se consigue una interpretación más certera y precisa sobre los componentes más dañados para descartar o continuar con el análisis de falla. Está orientada a determinar y medir el nivel de desgaste provocada por esfuerzos de contacto o profundidad causada por incrustaciones de agentes externos o propias del material de alguna componente del rodamiento. Este último análisis se realiza exhaustivamente en las superficies de las pistas de rodadura interior y exterior del rodamiento así como de los elementos rodantes y su respectiva jaula que la contiene para determinar el nivel de desgaste mutuo por fricción.

- 1.3.4.** En la fase del diagnóstico de los estados de cada rodamiento se obtiene una consolidación de la evaluación completa del nivel de desgaste de las componentes de los rodamientos más afectados, basados en el análisis de falla, métodos de causa-raíz, función operativa y localización de cada rodamiento en el equipo, finalmente una tercera opinión como sugerencias y recomendaciones del personal encargado de las reparaciones en la fábrica matriz para definir la factibilidad de reparación de cada uno de acuerdo a los niveles recomendados localmente.
- 1.3.5.** En la fase de la obtención de los costos de reparación y su plan de ejecución como un proyecto factible, se consigue la presentación ante el cliente para la sustentación de la propuesta técnica-económica de tal forma que la propuesta de reparación sea una garantía extendida del producto para su operación normal y la opción más real para disminuir los tiempos de entrega comparado con los rodamientos nuevos de fábrica producidos con precios mayores. Junto a esta propuesta se debe incluir la cotización final; asimismo el diagnóstico del análisis de falla del estado de cada rodamiento el cual permitirá tomar acciones correctivas y preventivas para aumentar el tiempo de vida de los rodamientos y mejorar la disponibilidad del equipo.
- 1.3.6.** En la validación de la calidad de este servicio técnico basado en el grado de confiabilidad de la inspección se consigue la retroalimentación del nivel de eficacia de la calificación especializada para esta actividad realizada, aunque no siempre es un índice de medición justa del rendimiento, porque no mide la eficiencia de la capacidad del profesional sino que está supeditado al azar dado que



existen rodamientos evidentemente deteriorados pero que están dentro del paquete considerados para el servicio de inspección conjunta.

#### **1.4. JUSTIFICACIÓN**

##### **1.4.1. Justificación académica:**

Mediante el uso de metodologías de investigación como el diagrama de Medios-Fines y la matriz de consistencia en el presente informe se desarrolla el contenido técnico para el tratamiento del problema con el desglose de entregables de cada fase o etapa analizada para plantear la solución parcial y finalmente consolidar los resultados para sustentar a través del respaldo económico la factibilidad del proyecto de remanufactura como la próxima etapa.

##### **1.4.2. Justificación tecnológica:**

La tecnología a emplear está basada en la capacitación y entrenamiento práctico en la misma fábrica matriz donde se reparan los rodamientos lo cual complementado con la experiencia permitirá realizar un análisis causa-raíz confiable identificando fallas usando métodos de diagnóstico especializados con la mayor probabilidad posible, sustentado en material bibliográfico y herramientas de medición para precisar y cuantificar los niveles de desgaste de las superficies de las componentes en contacto.

##### **1.4.3. Justificación económica:**

El análisis técnico del diagnóstico de fallas debe ir complementado siempre de una sustentación económica que viabilice el proyecto de reparación de rodamientos. Se justifica como una opción para el usuario frente a la indisponibilidad de los nuevos, además de revalorizar un activo bajo las mismas condiciones operativas que uno nuevo de fábrica.

## **1.5. ALCANCES**

El trabajo concluye cuando se logre el objetivo principal de elaborar un procedimiento de inspección calificado para obtener el diagnóstico confiable del estado de rodamientos y la evaluación profesional para su reacondicionamiento, los cuales están sustentados en las siguientes consideraciones, pruebas y logros:

- 1.5.1.** La consideración previa a tener en cuenta para demostrar que la hipótesis de inspección calificada sea sostenida es que el análisis de falla del rodamiento sea confiable basado en la observación y percepción del daño localizado con habilidad, criterio y expertiz para identificarlo y realizar un diagnóstico apropiado que sirva al cliente en la toma de decisión inicial para tomar acciones para reducir su efecto en la máquina.
- 1.5.2.** Las pruebas de laboratorio y ensayos respectivos sobre el material para confirmar la real condición de desgaste del rodamiento se realizan en los centros especializados de reparación en la fábrica matriz.
- 1.5.3.** Por tanto el logro correspondiente sería el de calificar con buen nivel de confiabilidad a través de la inspección local, el grado de reparación del rodamiento con el fin de enviar sólo los recomendados con su respectiva sustentación técnica del análisis de falla y así viabilizar económicamente su reparación ante el cliente puesto que son bienes mayormente de gran tamaño que tienen altos costos de transporte y de aduanas que no justificarían si fueran enviados todos directamente sin la previa calificación.

## **1.6. LIMITACIONES**

Entre los principales recursos utilizados para realizar esta actividad de inspección calificada para la evaluación de reparación de rodamientos se mencionan los siguientes:

- 1.6.1.** Recursos humanos especializados.
- 1.6.2.** Protocolos y técnicas de medición de desgastes superficiales como holguras y profundidades.
- 1.6.3.** Herramientas y equipo para movilización y manipulación de componentes del rodamiento.
- 1.6.4.** Comunicación con colaboradores experimentados de la casa matriz para contrastación de resultados.
- 1.6.5.** Manual técnico de análisis de falla en rodamientos basado en patrones para diferentes marcas de fabricantes.

## **CAPÍTULO 2**

### **DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO DE REMANUFACTURA DE RODAMIENTOS BASADO EN SU INSPECCIÓN CALIFICADA Y SU APLICACIÓN EN LAS CHANCADORAS TERCIARIAS RODILLOS-PRENSA**

#### **2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO DE REMANUFACTURA DE RODAMIENTOS BASADO EN SU INSPECCIÓN CALIFICADA**

##### **2.1.1 Introducción:**

Las características y el estado de los rodamientos tienen una influencia significativa en los procesos de producción; entonces con el fin de reducir los costos en este proceso, con frecuencia es más conveniente reacondicionar los rodamientos que sustituirlos por otros nuevos.

A través del mantenimiento preventivo y basado en la condición, se intenta mantener una disponibilidad consistente y alta de la planta. Por ello como parte de estas medidas, y por razones de seguridad, a menudo se suelen cambiar rodamientos que podrían ser devueltos a un estado aceptable y seguro en su funcionamiento mediante una limpieza y un reacondicionamiento correctos.

Los costos de dicho reacondicionamiento son, en algunos casos, notablemente inferiores a los de la compra de un rodamiento nuevo y en la mayoría de los casos, con plazos de entrega más cortos. En casos

concretos, el cliente recibe para el rodamiento reacondicionado las mismas garantías que para un rodamiento nuevo.

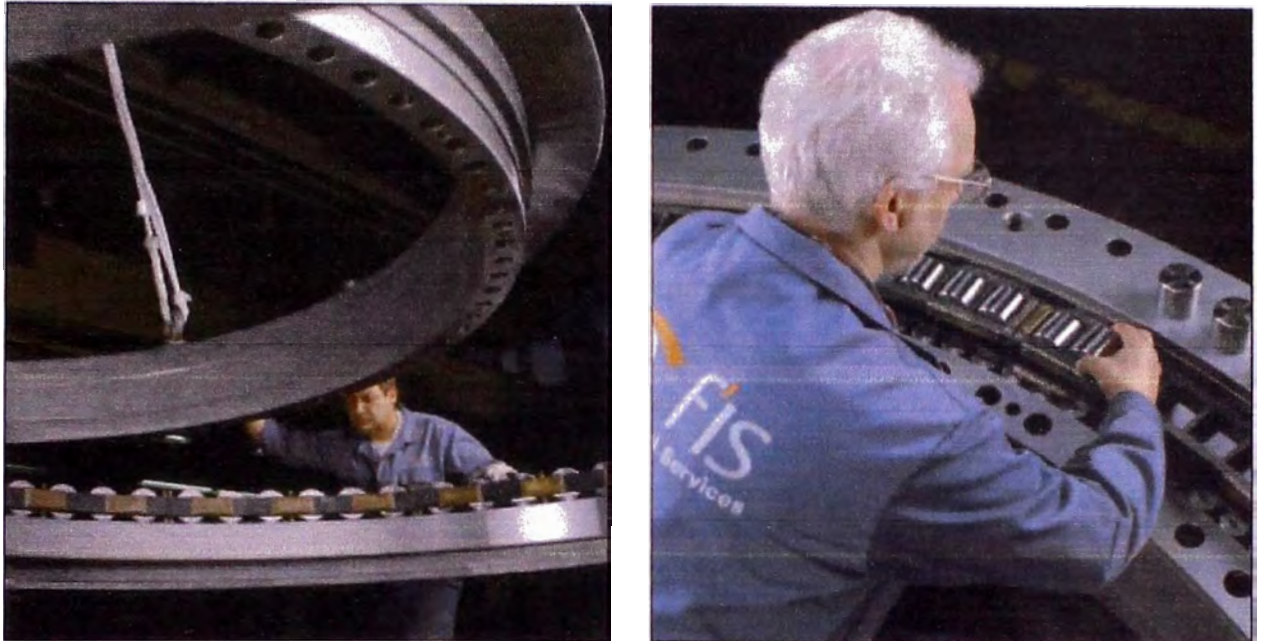


Fig. N°2.1 Montaje de un rodamiento reacondicionado para una perforadora de túneles.

### **2.1.2 Concepto de reacondicionamiento de rodamiento:**

El reacondicionamiento es un proceso definido para mantener y ampliar las capacidad de funcionamiento y la duración de vida de los rodamientos que ya están en servicio.

Los costos y el plazo de entrega que implica un reacondicionamiento son menores que los correspondientes para un rodamiento nuevo.

Se debe distinguir entre cuatro fases de reacondicionamiento y subdividir los tamaños de rodamientos y sus unidades en tres grupos, en función del diámetro exterior  $D$  hasta 4250 mm.:

- $D < 425$  mm.
- $425$  mm.  $< D < 1250$  mm.
- $1250$  mm.  $< D < 4250$  mm.

### **2.1.3 Evaluación – Inspección de rodamientos:**

Antes de llevar a cabo el reacondicionamiento, son necesarias algunas etapas previas como evaluación. Primero, los rodamientos son limpiados a fondo con técnicas de aseo propios que están configuradas especialmente de acuerdo con el producto.

Asimismo en el uso de insumos, se utiliza agentes limpiadores especiales para que todas las partículas contaminantes adheridas sean extraídas del rodamiento y eliminadas mediante métodos respetuosos con el medio ambiente.

Después de la limpieza, se realizan las actividades de inspección especializadas con el fin de una evaluar concienzudamente todos los componentes. Debido a la experiencia y familiarización con todo tipo de daños en rodamientos se trata de un know-how exclusivo del fabricante. Este trabajo está apoyado además en equipos de inspección y medición. Todos los defectos encontrados son registrados y archivados en un protocolo de forma donde se puede elaborar un currículo para cada rodamiento.

En base a este protocolo de inspección quedan definidas las demás fases del reacondicionamiento que son necesarias para devolver el rodamiento a su nuevo estado. De esta forma la evaluación determina el alcance de los daños y nivel de reacondicionamiento adecuado para el rodamiento.

Una vez el trabajo descrito ha sido completado, se envía una propuesta al cliente en la que se indica el alcance de los trabajos de reparación necesarios, con los precios resultantes y el plazo de entrega. Si los daños detectados son tales que son necesarios trabajos de mecanizado

(reacondicionamiento), los costos de la evaluación quedan incluidos en la factura de la reparación. Pero si los daños encontrados no son significativos, sólo se considerará el costo de la evaluación (inspección).



Fig. N°2.2 Evaluación visual de la pista de rodadura de un rodamiento grande.

#### **2.1.3.1 Nivel I – Recalificación:**

En un caso ideal, el rodamiento está en tan buenas condiciones que no es necesario mecanizado alguno. En el nivel I, simplemente se miden los componentes y a continuación se vuelve a montar el rodamiento. Después de la conservación y su lubricación con grasa nueva, el rodamiento es cuidadosamente embalado y reenviado al cliente. En este caso únicamente se factura la evaluación.



Fig. N°2.3 Examen microscópico de pistas de un rodamiento para una perforadora de túnel.

#### **2.1.3.2 Nivel II – Restauración:**

Se utiliza para eliminar pequeños rasguños y mínimas marcas de corrosión en grandes rodamientos. El proceso principal en esta fase es el rectificado fino de las superficies de los aros interior y exterior. Este proceso es también efectivo para eliminar las decoloraciones, como las que aparecen a causa de los aditivos del lubricante.

Además de estos procesos mecánicos, los métodos químicos son también utilizados para poner en buen estado las jaulas metálicas, utilizando recursos de una manera económica y responsable con el medio ambiente. Después de que todos los componentes han sido tratados convenientemente, el rodamiento se monta de nuevo y se reenvía, cuidadosamente embalado al cliente.





Fig. N°2.4 Reacondicionamiento de rodillos: Antes: Rodillos con marcas de corrosión e indentaciones de cuerpos extraños. Después: Nuevos rodillos con sobremedidas ajustadas.

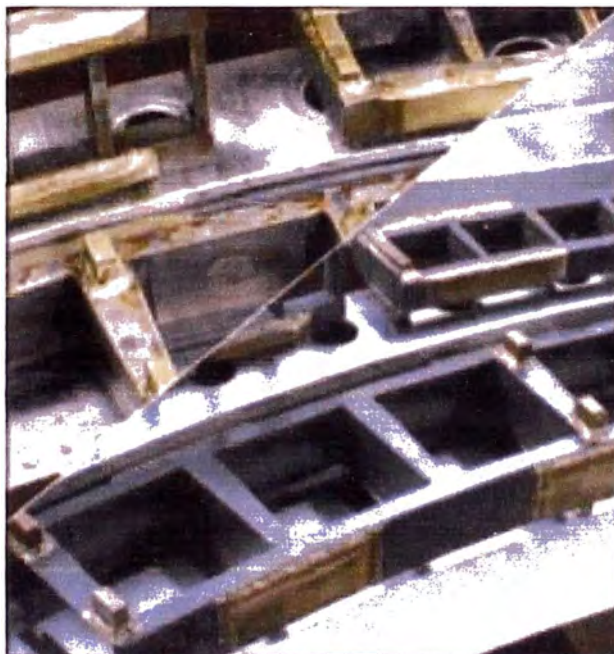


Fig. N°2.5 Reacondicionamiento de jaulas: Antes: Segmento de jaula con residuos de lubricante y contaminantes. Después: Segmentos de jaula decapados al ácido.



Fig. N°2.6 Reacondicionamiento de pistas: Antes: Pista de rodadura con fuerte formación de huellas en la zona de deslizamientos. Después: Pista de rodadura rectificada.

### **2.1.3.3 Nivel III – Reconstrucción:**

Cuando cuerpos extraños han dejado “indentaciones permanentes” en las pistas de rodadura o en los elementos rodantes, se deben tomar decisiones a veces drásticas. En este caso se requiere un completo conjunto de medidas: Las pistas de rodadura son nuevamente rectificadas y se fabrican nuevos elementos rodantes, con el objeto de salvar el bien de gran valor que representa un gran rodamiento.

En el nivel III, el análisis del estado del desgaste es seguido por un rectificado de unas pocas décimas de milímetro en el material de las pistas de rodadura. Sólo se rectifica tanto como lo permita la zona templada. No obstante, en caso de duda siempre se debe contrastar resultados con los ensayos realizados en laboratorio, con el objeto de eliminar desde el inicio cualquier riesgo o

repercusión sobre la funcionalidad y la duración de vida de los rodamientos.

En el rectificado, es esencial lograr el perfilado exacto, que es conocido únicamente por los fabricantes de rodamientos. Esta es la única forma de garantizar la capacidad de rendimiento de los rodamientos. Los nuevos elementos rodantes se fabrican con una sobremedida, específicamente adaptada para el rectificado posterior. Esto garantiza que los rodamientos conservan el juego radial original y, con ello, pueden asumir su servicio en la máquina sin restricciones.

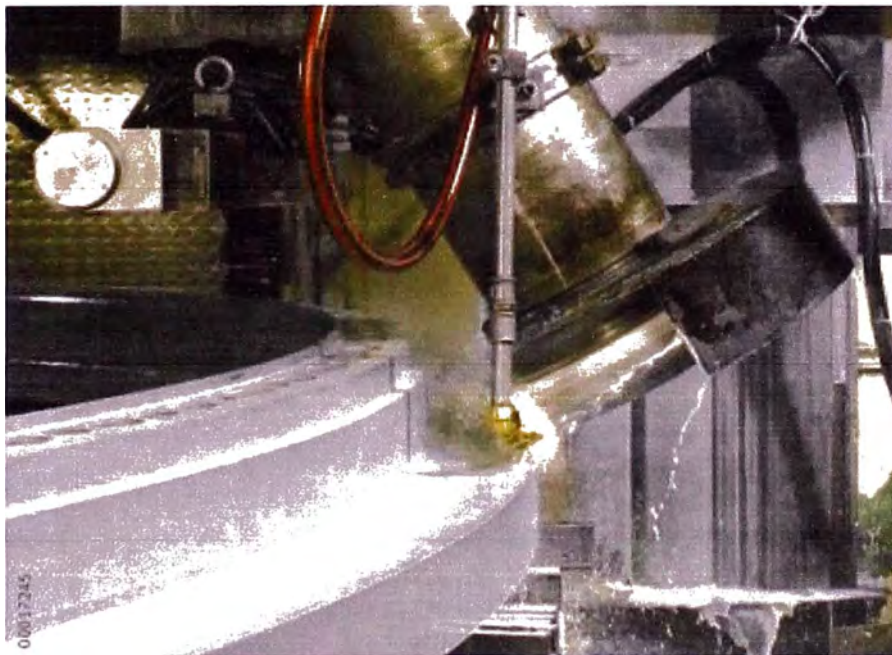


Fig. N°2.7 Rectificado de la pista de un rodamiento para una perforadora de túneles.

#### **2.1.3.4 Nivel IV – Reconstrucción Plus:**

Si los rodamientos tienen daños extremos, como desconchado del material o grietas a causa de la fatiga en las pistas de rodadura, no pueden efectuarse las reparaciones según los

niveles descritos anteriormente. El material está, en este caso, tan seriamente debilitado que no es posible facilitar una predicción fiable de la duración de servicio. El riesgo en este tipo de daños es que la duración de vida del rodamiento se reduce rápidamente. Por esta razón los anillos del rodamiento, los elementos rodantes, y/o la jaula deben totalmente ser reemplazados por componentes nuevos. No son posibles informaciones generales sobre plazos de entrega, ni costos, pero estos pueden ser acordados con el cliente de forma individual.



Fig. N°2.8 Proceso de rectificado posterior y control de medidas del aro de un rodamiento de una perforadora de túneles.



Fig. N°2.9 Proceso de montaje / armado del ensamble del nuevo rodamiento para embalaje.

## **2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE OPERACIÓN DE LOS RODAMIENTOS EN LAS CHANCADORAS TERCIARIAS DE RODILLO-PRENSA**

Las máquinas usadas para chancado de materiales duros fueron diseñados para molienda de minerales de tamaños grandes de hasta 2500 mm. y reducirlos a tamaños de unos pocos cientos de milímetros en una serie de procesos. En tales máquinas como las chancadoras de rodillo-prensas son procesados de moderado a extremo la molienda de materiales como piedras duras, otros minerales, carbón y arena, dependiendo del producto final deseado caracterizados por una alta eficiencia y confiabilidad operacional.

### 2.2.1 Desarrollo y principio de operación de los rodillo-prensas:

Las chancadoras terciarias tipo rodillo-prensa son equipos también referenciados como chancadoras cilindro o molinos horizontales y fueron desarrollados a mediados de los años ochentas. Ellos consumen considerablemente menos energía que el requerido para procesos de reducción de tamaños tradicional. Los rodillos-prensa son usados para molienda gruesa, híbrida y trituración fina. La trituración de grueso produce tamaños de granos de hasta 20 mm, molienda fina de hasta 0,04 mm.

Su funcionamiento está basado en uno de los dos rodillos que están accionados sincrónicamente en contra-rotación se ajusta hidráulicamente contra el otro. Bajo condición de alta presión el rodillo-prensa provoca la formación de grietas en el material cargado. Los desalineamientos causados por el proceso de molienda son compensados a través del mecanismo de ajuste del rodillo hidráulicamente precargado. Dependiendo de los requerimientos, los rodillos caracterizan ya sea una superficie de nivel o una superficie formada.

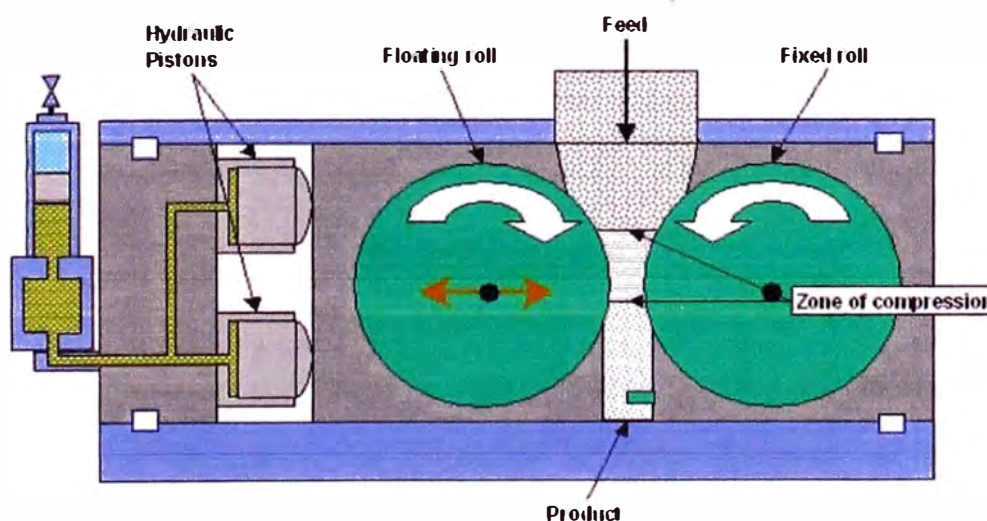


Fig. N°2.10 Principio de trituración de minerales a través de dos rodillos cilíndricos.

### 2.2.2 Apoyo del rodillo-prensa:

Debido a su alta capacidad de carga, los rodamientos de rodillos esféricos son preferiblemente usados para soportar los rodillos de la chancadora.

Los rodamientos de rodillos esféricos transmiten altas cargas radiales, y fuerzas de guiado axial. Por otra parte, compensan inclinaciones resultantes de una deflexión del eje o de desalineamientos de una extensión a la otra. Este rodamiento en el lado accionamiento está diseñado como un rodamiento fijo, mientras que en el lado operador es un rodamiento flotante.

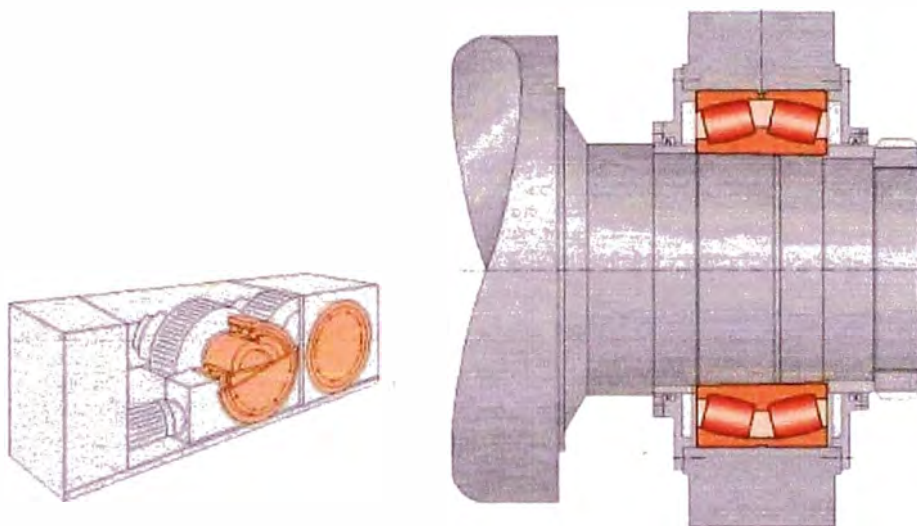


Fig. N°2.11 Rodamiento de rodillos esféricos en chancadora rodillos-prensa.

### 2.2.3 Dimensionamiento del rodamiento:

En la chancadora rodillos-prensa de la figura Fig. N°2.11 se muestra en corte 01 rodamiento de la serie 241/900-K30-C3 montado directamente sobre el eje cónico. La fuerza de trituración instalada, es igualmente distribuida entre los dos rodamientos de rodillos oscilantes soportando un rodillo de molienda. Las fuerzas axiales resultantes del desalineamiento del rodillo son insignificantes.

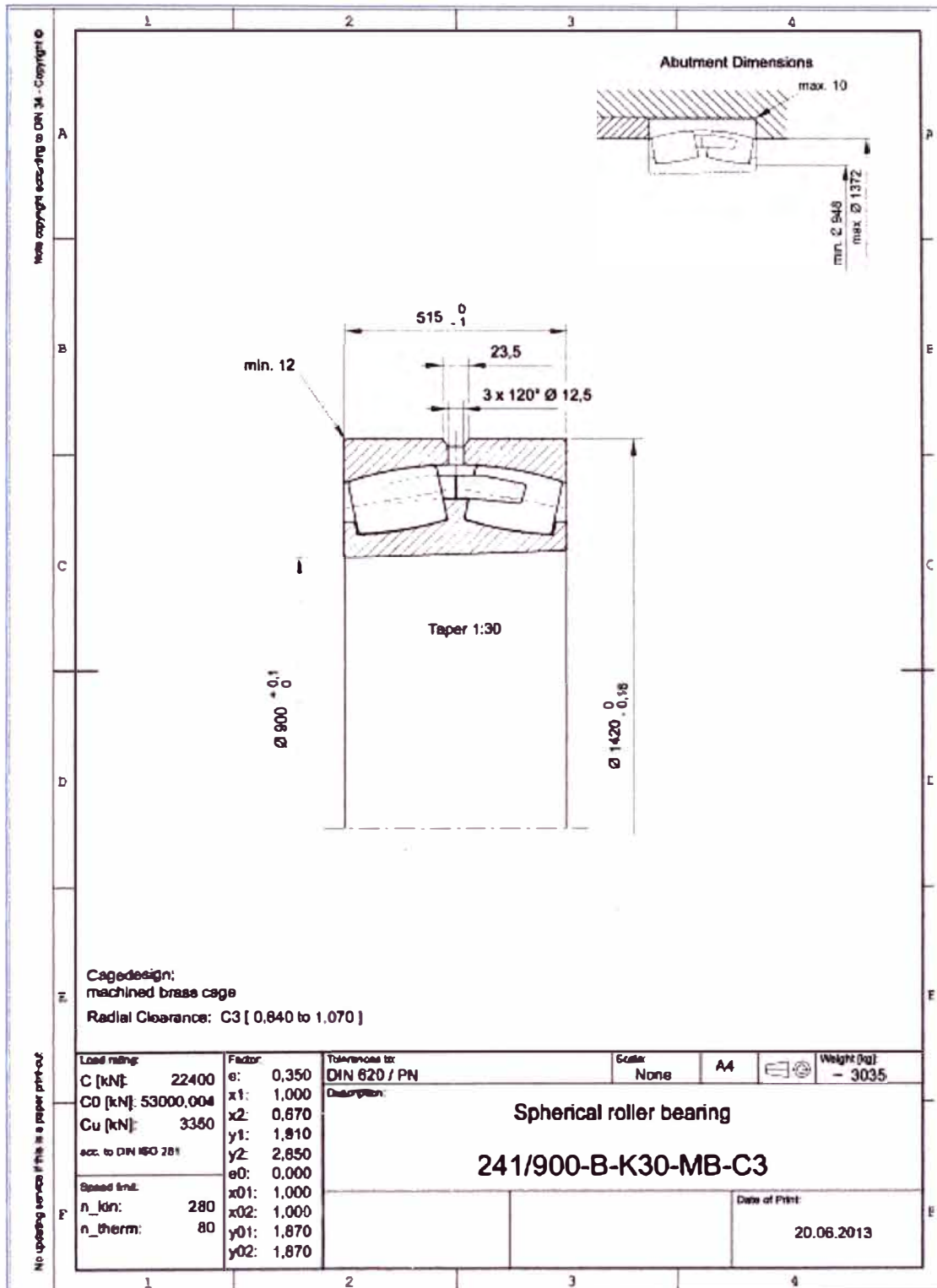


Fig. N°2.12 Hoja técnica del rodamiento de rodillos esféricos usados en las chancadoras terciarias de rodillos-prensa.



#### **2.2.4 Asientos del rodamiento:**

Los rodamientos de rodillos esféricos con un agujero cónico van directamente montado sobre el muñón cónico del eje utilizando el método hidráulico. El fabricante recomienda para un ajuste del aro exterior del rodamiento y el alojamiento bajo una carga puntual que esté maquinado a una tolerancia H7.

#### **2.2.5 Juego interno radial del rodamiento:**

Para los rodamientos de rodillos esféricos en los rodillos-prensa se selecciona un juego interno radial de C3. Esto asegura una suficiente holgura operativa, tomando en cuenta una reducción del juego cuando el rodamiento sea empujado sobre el asiento cónico y la temperatura del aro interior sea mayor que del aro exterior.

#### **2.2.6 Lubricación del rodamiento:**

Los rodamientos para los rodillos-prensa pueden ser lubricados sea con grasa o con aceite. Teniendo en cuenta las velocidades bajas, las altas cargas y los impactos en los rodillos-prensa, se recomienda usar grasas especialmente probadas en laboratorios para rodamientos, así la grasa de jabón de Litio es especialmente adecuado para esta aplicación debido a su alta viscosidad de aceite base de 1000 mm/s<sup>2</sup> a 40°C y sus aditivos EP, también su muy buena resistencia al agua y muy buena propiedad anti-corrosión.



### **2.2.7 Datos técnicos de operación de la chancadora terciaria rodillos-**

#### **prensa:**

Material a moler: Mineral de cobre sulfurado primario

Densidad aparente: 1,6 a 1,92 t/m<sup>3</sup> / Temp. máx. material: 60°C

Granulometría: Mayor que 50 mm.

Humedad de alimentación: Máx. de 4%

Tipo de rodillo-prensa Polycom: PM8-24/17M

Año de construcción: 2005

Capacidad de producción: 2500 t/h alimentación de material seco

Potencia motriz: 2500 kW x 02 motores (5000 kW)

Velocidad de rodillos (salida): 6,3 a 20,8 RPM (promedio 14,1 RPM)

Velocidad de motor (ingreso): 1320 RPM

Temperatura máxima de operación del rodamiento: 70°C

Temperatura máxima de aceite del sistema hidráulico: 75°C

Descripción grasa lubricante: Base de aceite mineral / ISO VG1000 /

DIN 51582 / KP2N-20

Depósito de grasa: 200 litros

Consumo de grasa por rodamiento: 26,4 g/h.

Impulsos por ciclo de engrase: 6

Número de ciclos de engrase por hora: 11

Primer llenado de grasa: 60 Kg. por rodamiento

Primer llenado de grasa: 20 Kg. por cada tapa en alojamiento.

202094

CENTRO SOPORTE FIJO  
CENTRE LINE OF LOCATING BEARING

3250

202095

CENTRO SOPORTE MOVIL  
CENTRE LINE OF NON-LOCATING BEARING

201514

MOMENTO DE APRIETE DE CADA TORNILLO 1300 NM  
TIGHTENING TORQUE EACH BOLT 1300 NM

478181

LLENADO DE GRASA: 60 KG. POR COJINETE  
FIRST FILLING OF GREASE: 60 KG PER BEARING

201514

MOMENTO DE APRIETE DE CADA TORNILLO 5500 NM  
TIGHTENING TORQUE EACH BOLT 5500 NM

1300064

PRIMER LLENADO CON GRASA 20 KG PARA CADA TAPA DEL COJINETE  
FIRST FILLING OF GREASE 20 KG PER BEARING COVER

751258

ANTES DE MONTAR EL COJINETE SE DEBE ENGRASAR EL TALADRO DEL BLOQUE DE COJINETE CON UNA PASTA ESPECIAL PARA EL MONTAJE. EL ANILLO EXTERIOR DEL COJINETE SOLO SE LIMPIA, PERO NO DEBE SER LUBRICADO.  
BEFORE FITTING THE BEARING, THE BORE OF THE BEARING BLOCK HAS TO BE GREASED WITH FITTING PASTE. THE OUTER RING OF THE BEARING MUST NOT BE OILED, BUT ONLY CLEANED.

5 1300249

LOS PUNTOS DE SEPARACION ENTRE LA TAPA DEL COJINETE Y EL BLOQUE DE COJINETE DEBEN SER SELLADOS CON TEROSTAT-930.  
THE JOINTS BETWEEN THE BEARING COVER AND THE BEARING BLOCK MUST BE SEALED WITH TEROSTAT-930

478414

TODOS LOS TORNILLOS APRETADOS CON UN PAR DE APRIETE DADO DEBEN ENGRASARSE SOLO LIGERAMENTE EN LA ROSCA Y LA CABEZA. NO EMPLEAR PASTA O MOLYCOTE.  
ALL BOLTS WITH STIPULATED TIGHTENING TORQUE MAY BE ONLY LIGHTLY OILED ON THE THREAD AND CONTACT SURFACE OF THE HEAD DO NOT USE PASTE OR MOLYCOTE

201514

MOMENTO DE APRIETE DE CADA TORNILLO 7700 NM  
TIGHTENING TORQUE EACH BOLT 7700 NM

751592

SUPERFICIE DE RODADURA DEBE SER ENGRASADA  
SEAL CONTACT SURFACE MUST BE GREASED

751258

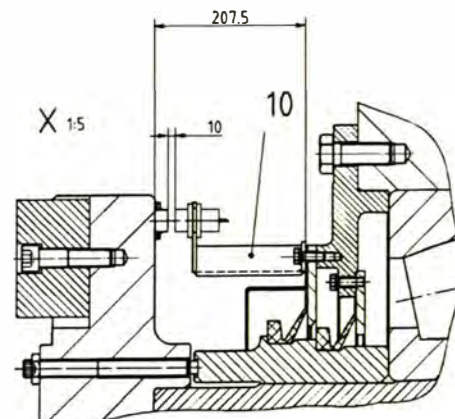
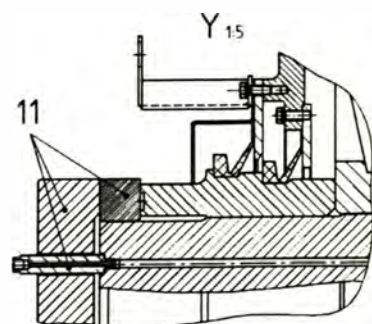
ANTES DE MONTAR EL COJINETE SE DEBE ENGRASAR EL TALADRO DEL BLOQUE DE COJINETE CON UNA PASTA ESPECIAL PARA EL MONTAJE. EL ANILLO EXTERIOR DEL COJINETE SOLO SE LIMPIA, PERO NO DEBE SER LUBRICADO.  
BEFORE FITTING THE BEARING, THE BORE OF THE BEARING BLOCK HAS TO BE GREASED WITH FITTING PASTE. THE OUTER RING OF THE BEARING MUST NOT BE OILED, BUT ONLY CLEANED.

751592

SUPERFICIE DE RODADURA DEBE SER ENGRASADA  
SEAL CONTACT SURFACE MUST BE GREASED

751592

SUPERFICIE DE RODADURA DEBE SER ENGRASADA  
SEAL CONTACT SURFACE MUST BE GREASED



- 12 TRANSPORTE Y DISPOSITIVO DE DEPOSITO  
TRANSPORT AND DEPOSITING DEVICE
- 13 ANILLO JUNTA; ABIERTO  
SALING RING OPEN
- 14 PASADORES CILINDRICOS (STUDS) DE RE  
SPARE STUDS WITH ADHESIVE

2005	Drawn	Date	Issue						
1103	Tewes								
1103	BAT								
1103	BAT								
<p>Surface finish according to ISO 1302 Average peak-to-valley height Ra (µm) Acabado de superficie según ISO 1302 Rugosidad media aritmética Ra (µm)</p> <p>General tolerances / Tolerancias generales ISO 1302 to / según 2718-MK</p> <p>For rough castings / para piezas brutas de fundición ISO 1302 Group / grado A</p> <p>For welded construction to / Para construcciones soldadas ISO 13020 Grade / Clase A For Lengths / para longitudes For Angles / para ángulos</p> <p>Check dimensions / Cotas a comprobar</p>									
<p>Scale on Original / Escala del original 1:10</p> <p>Designation / Nota: Roll unit PM 8 - 24/17 M unidad de rodillo PM 8 - 24/17 M</p> <p>30003194</p> <p>PM.RUN</p> <p>20003826</p> <p>032.1 A</p> <p>POLYSIUS AG Beckum, Germany Copyright reserved (ISO 16016)</p> <p>3000100000178 1001</p>									

### 2.2.8 Localización de los rodamientos en rodillos-prensa:

Para el proceso de producción en la etapa de chancado terciario del mineral de cobre sulfurado primario se utiliza 04 equipos rodillos-prensa idénticos denominados HPGR N°31, 32, 33 y 34, los cuales trabajan 24 horas diarias, durante los 365 días del año, teniendo una secuencia de parada por mantenimiento alternado de hasta 2 días mensuales sea por cambio de rodamientos o del revestimiento del rodillo en alguno de las chancadoras rodillos-prensa por causa de desgaste en dichas componentes.

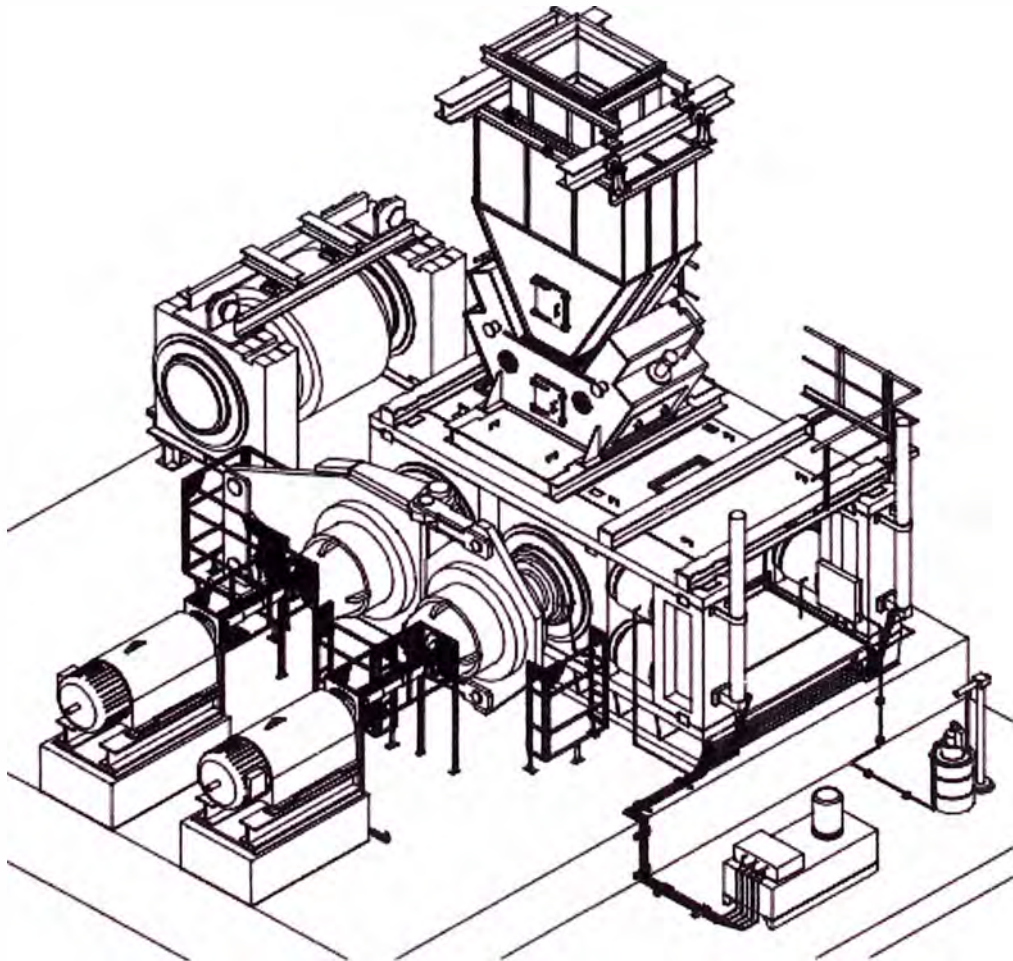


Fig. N° 2.15 Chancadora rodillos-prensa del proceso vista desde el lado accionamiento.

La disposición de los rodamientos montados en sus respectivos rodillos en las chancadoras terciarias tipo rodillos-prensa deben ser identificadas y etiquetadas para conocer sus antecedentes o registros operativos a lo largo del ciclo de vida útil, que permitirán realizar un análisis preliminar del desgaste de los rodamientos, así sus posiciones de orientación de referencia están de acuerdo a la localización de los rodillos y los rodamientos:

Posición de los rodillos:

- Rodillo fijo (Eje fijo): **FW**
- Rodillo móvil (Eje flotante): **LW**

Posición de los rodamientos:

- Rodamiento fijo: **FL**
- Rodamiento móvil: **LL**

Denominación de rodamientos en rodillos:

- Rodamiento fijo de rodillo móvil (A): **LW-FL**
- Rodamiento móvil de rodillo móvil (B): **LW-LL**
- Rodamiento fijo de rodillo fijo FUE: **FW-FL**
- Rodamiento móvil de rodillo fijo (D): **FW-LL**

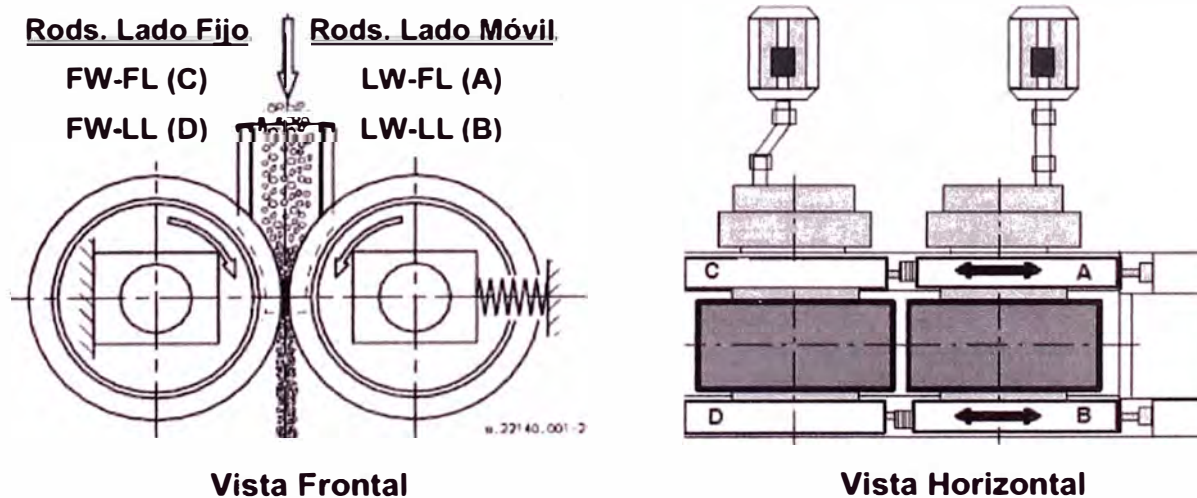


Fig. N° 2.16 Identificación de los rodamientos a través de localización en los rodillos.

El planeamiento del mantenimiento de cada uno de las chancadoras rodillos-prensa está basado en los históricos de operación y desgaste de los rodamientos, revestimiento de los rodillos-prensa y monitoreo de los niveles de temperatura y sólidos en suspensión encontrados en el análisis de la grasa lubricante. Por lo que los cambios de estas componentes sea por tiempo de servicio o fatiga prematura deberán estar incluidos en los programas de mantenimiento periódicos los cuales están coordinados generalmente en las paradas generales de planta con el área de operaciones, salvo que la falla sea catastrófica entonces se realizaría la parada inmediata del equipo generando costos por pérdida de producción debido a su indisponibilidad y riesgo de avería de alguna otra componente producto de esta parada imprevista.

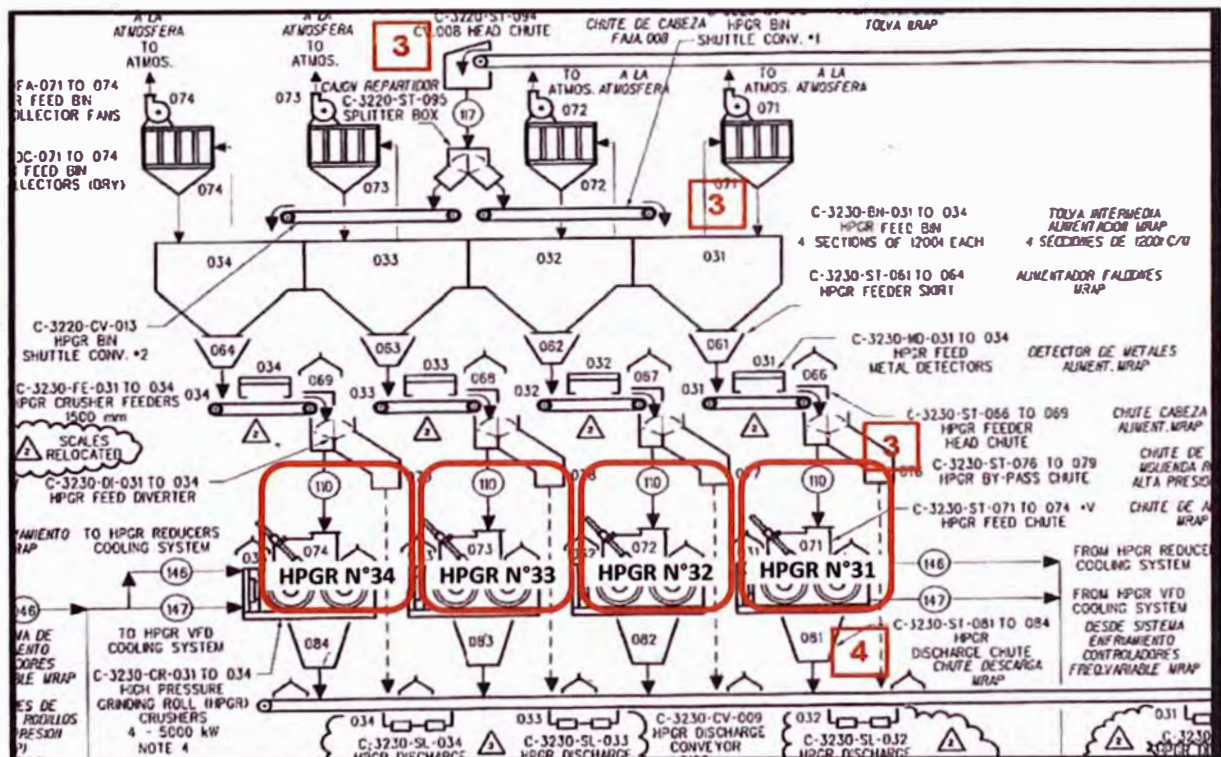


Fig. N° 2.17 Diagrama del proceso de molienda terciaria de las chancadoras rodillos-prensa.

## **CAPÍTULO 3**

### **IDENTIFICACIÓN DE PROBLEMAS DE DESGASTE PREMATURO EN RODAMIENTOS Y EL PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS DE TRABAJO BASADO EN LA IMPLEMENTACIÓN DE SUS TÉCNICAS DE INSPECCIÓN, ANÁLISIS DE FALLA PARA DIAGNÓSTICO CONFIABLE DE CAUSAS Y CALIFICACIÓN DE REMANUFACTURA**

#### **3.1 IDENTIFICACIÓN DE PROBLEMAS DE DESGASTE Y FALLAS PREMATURAS EN RODAMIENTOS USADOS EN CHANCADORAS TERCIARIAS DE RODILLO-PRENSA**

Desde el inicio de operación de la planta concentradora de esta mina en el 2007, según registros la producción llegó a ser de 105500 TPD siendo que su valor de diseño nominal fue de 108000 TPD, es decir trabajando al 97% de su capacidad nominal; y más aún con la puesta en servicio de muchos equipos nuevos, la sincronización entre ellos para trabajo continuo y a la familiarización del personal de mantenimiento y operaciones en el proceso llevó a una condición extrema de trabajo de los equipos y componentes de la planta.

Esta condición de operación llevó a sobrecargar los equipos que según los fabricantes en el proyecto estas se diseñaron bajo recomendación de operación continua como máximo al 80% de su carga nominal, pues ello produciría que sus componentes sufrirían desgaste prematuro debido a esta excesiva sobrecarga de



trabajo, pero estas recomendaciones no fueron tomadas en cuenta por la compañía minera y se dio mayor énfasis a la producción del cobre que al propio mantenimiento; razón por la cual comenzaron a tener sucesivas paradas de planta desde el inicio de sus operaciones.

Entonces una de las componentes que más causaron problemas debido a su indisponibilidad por sobrecarga y al costo mismo de su reemplazo y/o reparación fueron las chancadoras terciarias rodillos-prensa, las cuales poseen entre sus principales componentes de alto costo como activo, los rodamientos, que se convirtieron en el foco de atención a una problemática por las constantes averías que se producían antes de llegar a su tiempo de vida nominal de servicio a la que fueron diseñadas para estas aplicaciones es decir de 25000 a 30000 horas y por ende la disminución de horas de producción debido a estos eventos llegando a una disponibilidad electromecánica máxima de sólo 5000 horas anuales.

Por ello uno de los propósitos de parte del fabricante de los rodamientos como parte del soporte técnico era involucrarse para resolver esta problemática, siendo el autor del presente informe partícipe activo para buscar alternativas relativo a su producto para mejorar su performance; es así que se planteó como parte de una metodología de solución realizar un exhaustivo análisis causa-raíz de los desgastes y fallas prematuras encontrados en los rodamientos con un diagnóstico confiable para la toma de acciones correctivas y preventivas por el área de mantenimiento en coordinación con la parte operativa del equipo, y así aumentar el tiempo de vida de los rodamientos y la consecuente reducción de la frecuencia de paradas de la chancadora rodillos-prensa aumentando su disponibilidad para mayor producción.

### **3.1.1 Evaluación de la situación inicial:**

Desde inicios de su operación, se tienen registros de solicitud de servicios de evaluación para reacondicionamiento de rodamientos al mismo fabricante para esta aplicación, pero realizada a través del fabricante del equipo OEM (Original Equipment Manufacturer) con el propósito de mantener la garantía de operación con el usuario final o dueño de estos equipos y la nueva planta concentradora.

Pero fue después de casi 4 años al término de la primera garantía, el usuario final decidió usar el derecho de procura y adquisición propia de sus componentes y/o servicios directamente con los fabricantes de las componentes solicitando dicho servicio a través de un proceso de licitación entre los proveedores con la intención de reducir sus costos de compras.

Las causas que influenciaron esta opción de requerimiento especializado con solicitudes de servicio para evaluación de reacondicionamiento fueron:

- La evaluación especializada se realizaría localmente para reducir costos de traslado de viaje de algún especialista venido desde la fábrica matriz como lo realizaba anteriormente el fabricante del equipo OEM.
- El envío sin ninguna rótula de inspección y/o orden de servicio de rodamientos usados por parte del fabricante del equipo OEM a los talleres de reparación del fabricante de rodamientos creaba incertidumbre por la falta de información y comunicación con los dueños de los bienes; lo cual en muchos casos se perdían los rodamientos.

- Estas pérdidas eran por el costo de envío y el tiempo empleado administrativamente en su transporte, dado que se trataban de bienes de 3040 Kg. siendo que muchas de ellas eran recuperables, y que con una debida inspección especializada local se podría reducir enormemente estos gastos fijos.
- Otra causa era la reducción de los costos de tercerización de parte del fabricante del equipo OEM dado que debían generar algún margen por este negocio pues que no era parte de su know-how sino del fabricante de rodamientos.
- Finalmente con esta opción el usuario recibiría trato directamente del fabricante del rodamiento como un proveedor del servicios especializados, que incluiría reportes detallados de la evaluación de sus rodamientos que eran reparables, sustentado por su conocimiento en el rubro con diagnósticos confiables de los análisis de causa-raíz de las posibles fallas prematuras encontradas en cada rodamiento.

Dados estos antecedentes la finalidad de esta inspección especializada era de ofrecer al usuario final un valor agregado a sus activos relativamente usados con la tecnología de la recuperación a través del reacondicionamiento de ellos, así el desafío era disminuir todos estos costos innecesarios realizados anteriormente por el proveedor del equipo como parte de su garantía y demostrar que localmente se podía ofrecer este servicio especializado con similar performance que en la casa matriz.

Después de 3 años se obtuvo mayor apertura de parte del usuario final para acceder a realizar las primeras inspecciones visuales de los

rodamientos de la chancadora rodillos-prensa durante sus paradas de planta con la intención de conocer las principales causas que podían originar su degradación prematura.

Es por ello que gracias a esta continua cercanía con el cliente primero en sus oficinas y luego en planta en los 3 primeros años se pudo obtener mayor información del estado operativo de sus equipos ganando la confianza de los principales usuarios para colaborar en sus principales actividades laborales como soporte técnico post-venta en la gestión de rodamientos y sus buenas prácticas en mantenimiento.

Precisamente de acuerdo al nivel y frecuencia de uso del rodamiento que el cliente utilizaba en estas chancadoras se propuso usar una clasificación para su identificación según el tiempo de servicio u horas de operación registradas, este primer criterio permitiría determinar el grado de usabilidad para su reemplazo o cambio de parte del personal de mantenimiento, el significado de esta clasificación era:

- **Rodamiento nuevo (RN):** activo nuevo procedente de fábrica con horas de servicio iniciales hasta la intervención del equipo y montado por primera vez.
- **Rodamiento nuevo reusado (RNR):** activo con horas de servicio acumuladas hasta la intervención del equipo y montado más de una vez.
- **Rodamiento reparado (RR):** activo reacondicionado de fábrica con horas de servicio iniciales en esta segunda etapa de su vida alargada y montado por primera vez.

- **Rodamiento reparado reusado (RRR):** activo reacondicionado con horas de servicio acumuladas hasta una parada del equipo y montado más de una vez.

Posteriormente en coordinación con los usuarios se conoció que para la identificación del estado de estos rodamientos estas tenían una clasificación mejor definidas de acuerdo a su accesibilidad en el equipo respecto del lado operador según se muestran descritas en la Fig. N°2.16 del capítulo anterior siendo esta clasificación mejor entendida:

- **Rodamiento de rodillo fijo interior: FW-FL FUE**
- **Rodamiento de rodillo fijo exterior: FW-LL (D)**
- **Rodamiento de rodillo móvil interior: LW-FL (A)**
- **Rodamiento de rodillo móvil exterior: LW-LL (B)**



Fig. N°3.1 Chancadora terciaria rodillos-prensa lado operador (externo), posiciones B & D.

De acuerdo a la Chancadora de la figura Fig. N°3.1, los rodamientos de mayor accesibilidad tanto para inspecciones in-situ como para cambios durante una parada de equipo por mantenimiento programado se encuentran en las posiciones B y D es decir las contiguas a las tapas.

La intervención del equipo por cambio de rodillo o de rodamiento se realizaban de acuerdo al monitoreo de la temperatura y datos del análisis de muestras de la grasa lubricante del laboratorio.

En la figura Fig. N°3.2, se muestra las actividades de maniobra para retiro de la tapa del soporte del rodamiento exterior "B" de la chancadora rodillos-prensa denominada HPGR N°31 para su respectiva inspección visual de la condición de estado y grado de desgaste de la grasa lubricante.

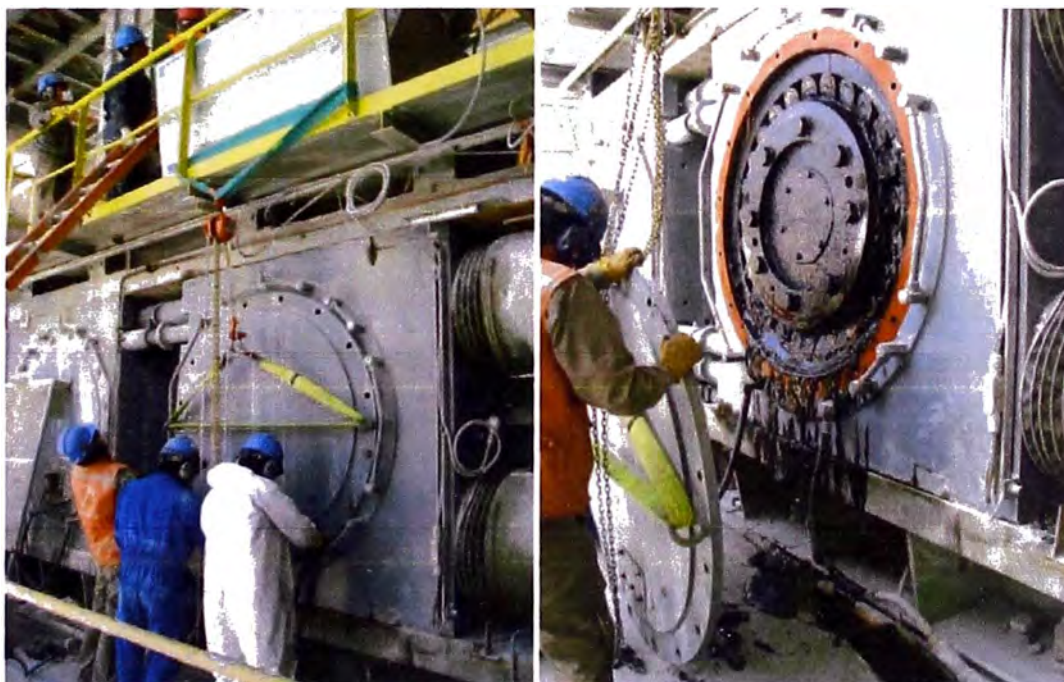


Fig. N° 3.2 Inspección del estado de rodamiento exterior (B) de HPGR N°31.

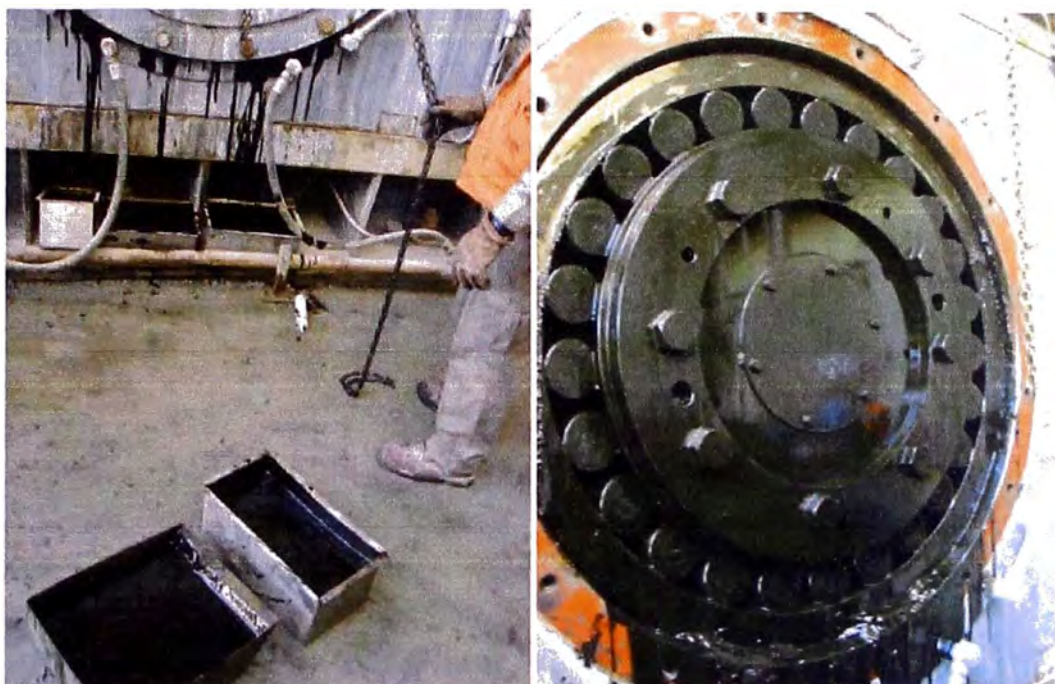


Fig. N° 3.3 Inspección del estado de rodamiento exterior (B) de HPGR N°33.

En la figura Fig. N°3.3 se muestra otra inspección realizada en la posición "B" de otro equipo denominado HPGR N°33, donde se pudo observar el estado de degradación de la grasa lubricante cayendo en forma líquida después de abrir la tapa que los contiene debido a la pérdida de su consistencia y disminución de la viscosidad por causa de la elevación de la temperatura, tal como indicaba en el monitoreo de condiciones de parte del área de mantenimiento predictivo.

De igual forma en la Fig. N°3.4 se puede observar una inspección realizada en el otro rodamiento exterior "D" asimismo la revisión de la calidad de la grasa lubricante de la misma chancadora en horas de la noche, actividad realizada de acuerdo a lo requerido por el área de mantenimiento predictivo. En cada uno de los casos luego de las inspecciones a los rodamientos se recomendó taparlos inmediatamente para evitar su contaminación por exposición al medio ambiente.



Fig. N°3.4 Inspección del estado de rodamiento exterior (D) de HPGR N°33.

En las últimas tres imágenes se muestran las actividades de inspección general durante una parada programada de dos equipos con la intención de revisar visualmente algún daño no sólo en el rodamiento sino también del nivel de revestimiento de los rodillos y de cualquier otra componente adyacente como el sistema de obturación y la calidad de la grasa lubricante con la toma de muestras para su análisis de laboratorio.

Estas actividades son realizadas de acuerdo a lo monitoreado por predictivo con la intención de estimar tiempos para programar alguna parada del equipo caso tenga los daños avanzados y cambiar alguna componente como los rodamientos antes de producirse alguna falla catastrófica, respaldado con el registro histórico de horas de operación.



Esta actividad de reemplazo de rodamientos requiere mayor tiempo de parada de por lo menos dos días, considerando la limpieza del circuito, el tiempo de enfriamiento del equipo, maniobras de desmontaje y traslado, asimismo la coordinación con el área de operaciones y disponibilidad del taller del fabricante del equipo OEM para suministrar como reemplazo el nuevo par de rodillos si es que existe desgaste en su revestimiento que amerite cambiarlos.

Cuando los rodamientos usados y retirados del equipo con desgaste y aparente deterioro en su superficie eran almacenadas, todas ellas eran acumuladas y después de cierto periodo eran destinadas todas juntas al taller de reparación de la fábrica sin la evaluación previa para su reacondicionamiento de acuerdo al procedimiento realizado por el fabricante del equipo OEM, lo cual no era muy eficiente técnica ni económicamente para el usuario final. Es por ello que era necesario ofrecer una alternativa de solución a esta necesidad del usuario que no era satisfecha por el fabricante del equipo de la chancadora OEM.

### **3.1.2 Situación futura deseada:**

Entre las mejoras con beneficio para el usuario que se deberían alcanzar con la elaboración de un procedimiento de “evaluación para reacondicionamiento” en la procura de recuperar sus bienes rodamientos y disminuir sus costos por activo fijo se pueden mencionar las siguientes ventajas:

- Reducción de los costos y tiempos por este servicio especializado directamente con el fabricante del rodamiento sin tercerización.

- Diagnóstico especializado local confiable del análisis causa-raíz de cada uno de los rodamientos realizados a través de la inspección visual.
- Aumento del tiempo de operación de los rodamientos con las recomendaciones realizadas en el diagnóstico de cada uno de ellas.
- Aumento de la vida de los rodamientos usados a través del reacondicionamiento con la misma garantía de vida que los nuevos.
- De lo anterior, la posibilidad de ahorro de hasta un 75% del costo de un rodamiento nuevo, además la mejor disponibilidad de tiempo de entrega.

Todos estos beneficios para el usuario final están sustentados y documentados en el desarrollo de este procedimiento técnico como una actividad especializada y llevada a cabo para un servicio de inspección de rodamientos requerida por un cliente minero; donde el autor participó directamente como uno de los especialistas locales del fabricante de rodamientos y que desea transmitir esta experiencia a través del presente informe, implementando un protocolo factible para la inspección confiable de rodamientos de gran tamaño con la determinación de su grado de reparación y reutilización como componente operativa de la chancadora.

### **3.2 PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS DE TRABAJO BASADO EN LA IMPLEMENTACIÓN DE SUS TÉCNICAS DE INSPECCIÓN, ANÁLISIS DE FALLA PARA DIAGNÓSTICO CONFIABLE DE CAUSAS Y CALIFICACIÓN DE REMANUFACTURA**

#### **3.2.1 Estructuración del Diagrama Medios-Fines como método descriptivo:**

A través de este método de investigación se plantea una solución sistemática de cómo organizar los procesos de cada actividad basado en los medios y fines, correlacionando sus logros en cada etapa desde el aspecto técnico hasta incluso el económico para la implementación óptima y coordinada de las fases que componen esta técnica de inspección calificada de rodamientos basada en la experiencia profesional para esta aplicación tal como se muestra en la matriz de la figura Fig. N°3.5, las principales componentes con sus logros parciales conforman el objetivo general de este procedimiento, los cuales se pueden especificar los siguientes:

3.2.1.1 Preparación de la logística y condiciones de trabajo.

3.2.1.2 Evaluación cualitativa de los rodamientos dañados.

3.2.1.3 Evaluación cuantitativa de los rodamientos dañados.

3.2.1.4 Diagnóstico del nivel de reacondicionamiento de los rodamientos.

3.2.1.5 Obtención de los costos de reacondicionamiento y estimación de los tiempos de entrega de los rodamientos.

#### **3.2.2 Planteamiento de la hipótesis de trabajo:**

De lo estructurado en la matriz de consistencia como método descriptivo de las etapas o componentes para desarrollar este procedimiento, la experiencia muestra que el éxito del proyecto de

reparación que envuelva la recuperación de rodamientos debe centrarse en tres fases importantes como es la mejora continua de la técnica de inspección propiamente dicha, luego el análisis de falla confiable para que finalmente la calificación de remanufactura sea lo más probable posible.

En la primera etapa el objetivo es lograr una óptima logística y adecuadas condiciones de trabajo en el taller o instalaciones de la planta donde se podrá dar inicio de forma segura el proceso de inspección visual de cada rodamiento, luego en la segunda y tercera etapa se determinará con evidencias gráficas el estado de conservación y la precisión del nivel de deterioro de cada rodamiento respectivamente desde el punto de vista cualitativo y cuantitativo, resultados que serán consolidados en la cuarta etapa para determinar el grado de reparación del rodamiento según su evaluación y diagnóstico para cada uno de ellos; y finalmente la etapa de la evaluación técnica-económica para la propuesta final para el usuario.

En base a los resultados obtenidos en la hipótesis de la matriz de consistencia Medios-Fines, se evaluará que el nivel de confiabilidad de la actividad sea calificada mayor del 75%, y dependerá del volumen de rodamientos recomendados localmente para su reparación y de la evaluación en el taller de la fábrica matriz; por ello en este informe se busca la eficiencia en el diagnóstico profesional antes que en la eficacia sobre las cantidades enviadas por el cliente.

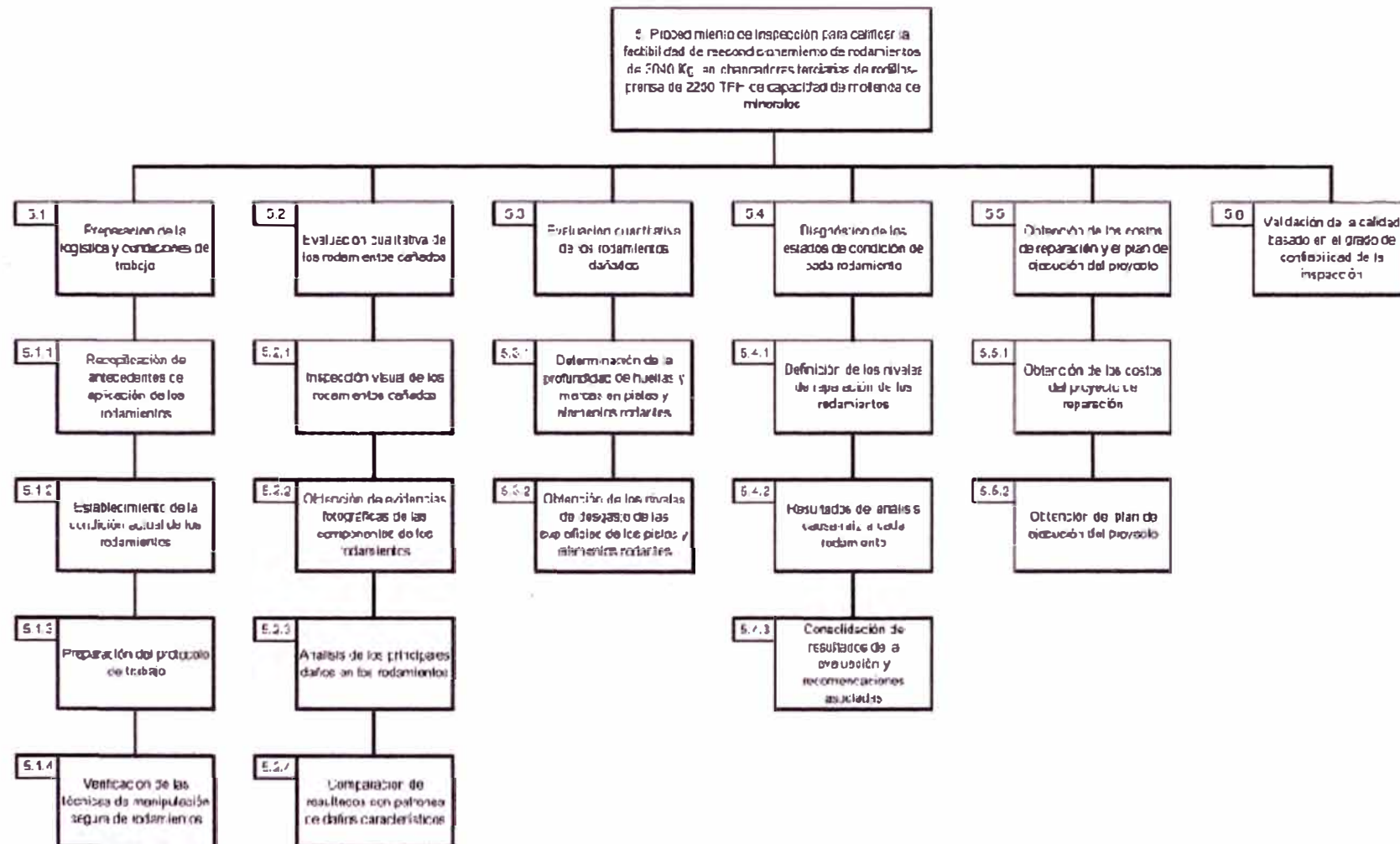


Fig. N° 3.5 Estructura del diagrama medios-fines del procedimiento de inspección

# CAPÍTULO 4

## FUNDAMENTO TEÓRICO

### 4.1 TEORÍA DE LA MECÁNICA DE CONTACTO

#### 4.1.1 Introducción a la teoría de Hertz:

La teoría de Hertz trata del contacto de dos cuerpos, donde se puede predecir la distribución de la presión y el área de contacto. Cuando dos cuerpos disconformes se presionan uno contra el otro, entran en contacto sobre un área que es pequeño en comparación con sus dimensiones totales.

Dos cuerpos pueden considerarse como disconformes cuando sus dimensiones son tan diferentes que sólo en un punto puede estar sin carga.

Ambos cuerpos se cargan por una distribución de presión sobre el área de contacto.

Si los cuerpos en contacto son dos esferas, una esfera y un plano, una esfera o dos cilindros con ejes transversales, entonces el área de contacto es una elipse. Si dos cilindros con ejes paralelos entran en contacto entonces el área de contacto será rectangular.

#### 4.1.2 Capacidad de carga de una esfera o rodillo sobre una pista de rodadura:

Por el principio de Hertz, la capacidad de carga de una esfera y de un rodillo, sobre los correspondientes caminos de rodadura pueden calcularse, dando por resultado el área deformada y la distribución de presiones sobre ella, en función de los radios principales de curvatura de ambas superficies en el punto de contacto y de sus respectivos valores de

los módulos de elásticos y de Poisson. Tales valores se modifican ligeramente en el caso de suponer, como así ocurre, una lubricación elastohidrodinámica (EHD).

Naturalmente los valores anteriores se refieren a esfuerzo elásticos.

En el caso de rodamientos, cada elemento de él, así como el camino de rodadura, está sometido a tensiones de Hertz variables en el tiempo. Ello provoca importantes tensiones de fatiga. En consecuencia la tensión provocada en el contacto no deberá sobrepasar ese límite.

En la práctica, sin embargo, ocurren varios fenómenos que perturban los resultados que podrían esperarse según la teoría de Hertz, tales como:

- Las deformaciones cambian de modo importante los radios de curvatura locales.
- Las deformaciones locales producen tensiones residuales que modifican el estado de tensiones, tanto en la superficie como en el interior (de rodamientos y anillo).
- En muchos casos hay que tomar en cuenta un deslizamiento considerable.

Como consecuencia de todo ello, los rodamientos y los caminos de rodadura son elementos fuertemente solicitados a la fatiga, lo que hace que su vida real tenga un límite determinado.

Experimentalmente la capacidad estática de carga de una bola o rodillo sobre un anillo esférico de rodadura ha sido definido por Stribeck como "la carga máxima que puede aplicarse sin que la deformación supere la diezmilésima parte del diámetro". Como es lógico, cuanto más íntimo sea el contacto entre la bola (o rodillo esférico) y el camino de rodadura, mayor

será la capacidad de carga del elemento. Stribeck demostró experimentalmente que:

$$f^0 = k \cdot d^2 : \text{Para esferas .....(1)}$$

$$f^0 = k \cdot d \cdot L : \text{Para rodillos.....(2)}$$

Donde:

k: constante que depende del tipo de rodamiento.

d: diámetro del elemento rodante.

L: Longitud del elemento rodante.

#### **4.2 INTRODUCCIÓN A LA VIDA DE LOS RODAMIENTOS BASADO EN LA TEORÍA DE LA FATIGA:**

Los rodamientos han tenido una gran influencia en el mundo industrializado.

La teoría de la vida del rodamiento ha sido desarrollado desde hace más de un siglo, comenzando desde las pruebas tribológicas en rodamientos realizado por Stribeck en 1896, seguido por el trabajo de Godman en 1912, pioneros en la investigación de esta tecnología.

Pero con el concepto de límite de fatiga introducida por Palmgren en 1924 fue que se colocaron las bases para su entendimiento y aplicación. En 1939, Weibull presentó su teoría estadística del esfuerzo de los materiales como una herramienta matemática para el análisis de la dispersión de la vida del rodamiento.

En los años 1947-1952, Lundberg y Palmgren publicaron su teoría de la vida de los rodamientos, el cual fue adoptado como la fórmula para la vida nominal de los rodamientos  $L_{10}$  en millones de revoluciones, el cual se detallará su contenido en los siguientes tópicos.

Entre las variables teorías sobre el tiempo de vida propuestas por investigadores de los grandes fabricantes de rodamientos en el mundo, en general están basadas en la fatiga del material como parámetro de análisis; nuestro



fundamento se basará en la variante de esta teoría dada por la compañía Schaeffler KG que en 1997 introdujo el “Cálculo ampliado de la duración de vida modificada” basado en la definición de la fatiga. Este procedimiento se normalizó por primera vez en DIN ISO 281 suplemento 1 y es desde el 2007 que forma parte de las normas internacionales ISO 281.

La base para el cálculo de la duración de vida, normalizada según ISO 281, es la teoría de la fatiga de Lundberg y Palmgren, que conduce siempre a la duración final de vida. Sin embargo, los modernos rodamientos, de alta calidad, en condiciones favorables de funcionamiento, pueden superar considerablemente los valores calculados de la duración de vida nominal. Al respecto, Ioannides y Harris han desarrollado un modelo sobre la fatiga en el contacto de rodadura, que amplía la teoría de Lundberg y Palmgren y describe mejor el rendimiento de los modernos rodamientos.

Este procedimiento “Cálculo ampliado de la duración de vida modificada” toma en cuenta las siguientes influencias:

- La magnitud de la carga.
- El límite de fatiga del material.
- El grado de separación de las superficies por el lubricante.
- La limpieza de la película de lubricante.
- Los aditivos del lubricante.
  
- La distribución interior de la carga y las condiciones de rozamiento en el rodamiento.

Las influencias externas, especialmente la suciedad, resultan muy complejas. Por ello para una evaluación exacta se requiere de mucha experiencia y un asesoramiento continuado de los servicios de ingeniería de aplicaciones de los fabricantes de rodamientos como Schaeffler KG. Las tablas y los diagramas

suministrados en los manuales técnicos de estos deben considerarse sólo como valores de referencia.

#### **4.2.1 Dimensionado de los rodamientos:**

Para la selección apropiada del tamaño necesario de un rodamiento se debe tomar en cuenta los siguientes requisitos:

- Duración de vida.
- Capacidad de carga (carga máxima permisible).
- Seguridad de funcionamiento.

#### **4.2.2 Capacidad de carga dinámica y duración de vida:**

La medida de la posibilidad de cargar un rodamiento es la capacidad de carga dinámica. Las capacidades de carga dinámica se basan en DIN ISO 281.

Las capacidades de carga dinámica para rodamientos se han adaptado al nivel de prestaciones acreditado en la práctica y están publicado en los catálogos del fabricante de los rodamientos.

El comportamiento del material frente a la fatiga determina la capacidad de carga dinámica de un rodamiento.

La capacidad de carga de un rodamiento se describe mediante la capacidad de carga dinámica y la duración de vida nominal. El duración de vida a la fatiga dependerá de:

- La carga.
- La velocidad de funcionamiento.
- La probabilidad estadística de que se produzca la primera avería.

Para rodamientos rotativos se aplica la capacidad de carga dinámica  $C$ :

- Para rodamientos radiales, una carga radial constante  $C_r$ ,

- o Una carga axial constante  $C_a$ , aplicada en el centro de los rodamientos axiales.

La capacidad de carga dinámica  $C$  es la carga de magnitud y dirección constantes, bajo la cual una cantidad suficientemente grande de rodamientos idénticos alcanza una duración de vida nominal de un millón de revoluciones.

Los métodos para el cálculo de la duración de vida son:

- o La duración de vida nominal  $L_{10}$  y  $L_{10h}$  según ISO 281.
- o La duración de vida modificada  $L_{na}$  según DIN ISO 281:1990 (no forma parte de ISO 281)
- o La duración de vida modificada y ampliada  $L_{nm}$  según ISO 281.

Las duraciones de vida nominal  $L_{10}$  y  $L_{10h}$  resultan de:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \dots\dots\dots 3$$

$$L_{10h} = \frac{16666}{n} \left(\frac{C}{P}\right)^p \dots\dots\dots 4$$

$L_{10}$ : <10<sup>6</sup> revoluciones> - Duración de vida nominal, en millones de revoluciones alcanzada o sobrepasada por el 90% de una cantidad suficientemente grande de rodamientos iguales, antes de que aparezcan los primeros indicios de fatiga en el material.

$L_{10h}$ : <h> - Duración de vida nominal, en horas de funcionamiento, según la definición de  $L_{10}$

$C$ : <N> - Capacidad de carga dinámica en Newton.

$P$ : <N> - Carga dinámica equivalente en Newton, para rodamientos radiales y axiales.

p: Exponente de duración de vida:

- o Para rodamientos de rodillos:  $p = 10/3$
- o Para rodamientos a bolas:  $p = 3$

n: <min-1> - Velocidad de funcionamiento en Revoluciones por minuto.

#### 4.2.3 Carga dinámica equivalente:

La carga dinámica equivalente P es un valor que se obtiene por cálculo. Este valor es una carga radial de magnitud y dirección constantes para rodamientos radiales y una carga axial centrada de magnitud y dirección constantes para rodamientos axiales.

Una carga P da como resultado la misma duración de vida que el colectivo de cargas combinadas que actúa en la realidad:

$$P = X \cdot F_r + Y F_a \dots \dots \dots 5$$

P: <N> – Carga dinámica equivalente.

$F_r$ : <N> – Carga radial dinámica.

$F_a$ : <N> – Carga axial dinámica.

X – Factor radial, de las tablas de medidas o de la descripción del producto.

Y – Factor axial, de las tablas de medidas o de la descripción del producto.

Este cálculo no se puede aplicar a rodamientos radiales de agujas, así como a rodamientos axiales de agujas, ni a rodamientos axiales de rodillos cilíndricos. Para estos rodamientos no son permisibles las cargas combinadas.

#### **4.2.4 Carga límite de fatiga:**

La carga límite de fatiga  $C_u$  según ISO 281 está definida como aquella por debajo de la cual, en condiciones de laboratorio, no se produce fatiga en el material.

#### **4.2.5 Duración de vida necesaria aplicada:**

Si no existen datos previos sobre la duración de vida, se pueden tomar valores de referencia de las tablas. Se recomienda no sobredimensionar los rodamientos. Si la duración de vida calculada es mayor a 60 000 horas, entonces se dice que la rodadura está sobredimensionada.

Se debe respetar la carga mínima de los rodamientos, para ello se debe revisar las instrucciones de diseño y seguridad de los manuales técnicos del rodamientos.

Un estimado de la duración de vida por ejemplo para molinos, chancadoras y cribas (zarandas) se puede referenciar en la siguiente tabulación de valores:

Tabla N°4.1 Valores recomendados de duración de rodamientos para aplicaciones pesadas.

Aplicación	Duración de vida recomendada en horas (h)			
	Rodamientos a bolas		Rodamientos de rodillos	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Chancadoras de mandíbulas	-	-	20000	35000
Chancadoras cónicas, trituradoras	-	-	20000	35000
Chancadoras de martillos	-	-	50000	110000
Molinos horizontales de bolas	-	-	50000	100000
Molinos vibratorios	-	-	5000	20000
Molinos de solera	-	-	50000	110000
Zarandas Vibratorias	-	-	10000	20000
Prensas para aglomerados	-	-	35000	50000
Rodillos-guía de hornos giratorios	-	-	50000	110000

#### 4.2.6 Duración de vida en servicio:

La duración en servicio es el tiempo realmente alcanzado por un rodamiento. Puede presentar una considerable desviación respecto a la duración de vida calculada. Las posibles causas que originan el desgaste o fatiga son:

- Parámetros de funcionamiento diferentes.
- Error de alineamiento entre el eje y el alojamiento.
- Juego de funcionamiento excesivamente reducido o demasiado elevado.
- Suciedad.

- Lubricación insuficiente o deficiente.
- Temperatura de funcionamiento excesivamente alta.
- Movimientos oscilantes del rodamiento, con ángulos de oscilación muy reducidos (formación de estrías).
- Solicitación por vibraciones y formación de estrías.
- Cargas a impulsos muy elevados (sobrecarga estática).
- Daños durante en el montaje.

Debido al gran número de posibilidades de montaje y de funcionamiento, no puede predecirse exactamente la duración de vida de los rodamientos. El método más seguro es la comparación con casos de aplicación semejantes.

#### **4.2.7 Capacidad de carga estática:**

Cuando una carga elevada se aplica en estado de reposo o en forma de golpes a un rodamiento, en las pistas de rodadura y en los elementos rodantes pueden producirse deformaciones plásticas. Estas deformaciones, referidas a los ruidos todavía admisibles en la marcha del rodamiento, conducen al concepto de capacidad de carga estática.

Los rodamientos sin movimiento, o con movimiento de rotación ocasional, se dimensionan en base a la capacidad de carga estática  $C_0$ .

Esta se define según DIN ISO 76:

- Para rodamientos radiales, una carga radial constante  $C_{0r}$
- Una carga axial constante  $C_{0a}$  aplicada en el centro de los rodamientos axiales.

La capacidad de carga estática  $C_0$  es la carga bajo la cual la presión de Hertz entre los elementos rodantes y las pistas de rodadura, en el punto de máxima carga, alcanza los siguientes valores límites:

- o En rodamientos de rodillos 4 000 N/mm<sup>2</sup>
- o En rodamientos a bolas 4 200 N/mm<sup>2</sup>
- o En rodamientos oscilantes de bolas 4 600 N/mm<sup>2</sup>

En condiciones normales de contacto, esta carga tiene como consecuencia una deformación permanente total de, aproximadamente, 1/10 000 del diámetro de los elementos rodantes.

#### **4.2.8 Coefficiente de seguridad estática:**

Adicionalmente, para el dimensionado según la duración de vida a la fatiga, es necesaria una comprobación del coeficiente de seguridad estática.

Se debe tener en cuenta los valores de referencia y las cargas de choque que se pueden producir durante el funcionamiento.

El coeficiente de seguridad estática  $S_0$  es la relación entre la capacidad de carga estática  $C_0$  y la carga estática equivalente  $P_0$ :

$$S_0 = \frac{C_0}{P_0} \dots \dots \dots 6$$

$S_0$  : Coeficiente de seguridad estática en Newton.

$C_0$  ( $C_{0r}$ ,  $C_{0a}$ ) : <N> - Capacidad de carga estática en Newton.

$P_0$  ( $P_{0r}$ ,  $P_{0a}$ ) : <N> - Carga estática equivalente en Newton, radial o axial.

#### **4.2.9 Carga estática equivalente:**

La carga estática equivalente  $P_0$  es un valor que se obtiene por cálculo. Corresponde a una carga radial en rodamientos radiales y a una carga axial y centrada en rodamientos axiales.

$P_0$  provoca la misma sollicitación en el punto de máxima carga, entre los elementos rodantes y las pistas de rodadura, que la carga combinada real:



$$P_0 = X_0 \cdot F_{0r} + Y_0 \cdot F_{0a} \dots \dots \dots 7$$

$P_0$  : <N> – Carga estática equivalente en Newton.

$F_{0r}$ : <N> – Carga radial estática en Newton.

$F_{0a}$ : <N> – Carga axial estática en Newton.

$X_0$ : Factor radial de las tablas de medida o de la descripción del producto.

$Y_0$ : Factor axial de las tablas de medida o de la descripción del producto.

#### **4.3 MARCO TEÓRICO RELACIONADO AL ANÁLISIS DE FALLA EN RODAMIENTOS:**

##### **4.3.1 Comportamiento irregular como indicio de averías durante operación:**

Generalmente las averías de los rodamientos se ponen de manifiesto por un empeoramiento paulatino del comportamiento en servicio. Son poco frecuentes los daños causados, por ejemplo, por defectos de montaje o por la falta de lubricante, que den lugar a una detención inmediata de la máquina. Según las condiciones de servicio, desde el inicio del deterioro hasta el fallo efectivo transcurren desde algunos minutos hasta, según las circunstancias, incluso meses. El tipo de control de los rodamientos depende del empleo y de las repercusiones de una avería del rodamiento sobre el funcionamiento de la máquina.

##### **4.3.1.1 Reconocimiento subjetivo de daños:**

En la mayoría de aplicaciones de rodamientos, para evitar daños mayores es suficiente con que el personal de servicio preste atención a los rodamientos por si se produjese una marcha irregular o ruidos inusuales; ver Tabla N° 4.2.

Tabla N°4.2 Chart para reconocimiento y diagnóstico práctico de daños en rodamientos.

Comportamiento en servicio	Posibles causas	Ejemplos
Funcionamiento irregular	<p>Deterioro de los aros y elementos rodantes</p> <p>Contaminación</p> <p>Juego excesivo del rodamiento</p>	<p>Automóviles: Oscilación creciente de las ruedas Aumento del ladoo Sacudidas de los elementos de dirección</p> <p>Ventiladores: Vibración de intensidad creciente</p> <p>Sierras: Choque y golpes de intensidad creciente en los tirantes</p>
Disminución de la precisión de trabajo	<p>Desgaste a consecuencia de contaminación o de lubricación insuficiente</p> <p>Deterioro de los aros y elementos rodantes</p> <p>Variación del ajuste (juego o precarga)</p>	<p>Torno: Aparición progresiva de marcas de vibraciones en la pieza mecanizada</p> <p>Rectificadoras: Aspecto ondulado de la superficie rectificada</p> <p>Tren de laminación en frío: Aparición de defectos superficiales generalmente periódicos, en el material laminado, como sombreados, huellas onduladas, y otros fenómenos similares</p>
<p>Ruido de servicio inusual: Ruido ululante o silbante</p> <p>Ruido en forma de ronquido o irregular</p> <p>Variación paulatina del ruido de servicio</p>	<p>Insuficiente juego interno de servicio</p> <p>Excesivo juego interno de servicio</p> <p>Daños en las superficies de los rodillos</p> <p>Contaminación</p> <p>Lubricante inadecuado</p> <p>Variación del juego interno de servicio por influencia de la temperatura</p> <p>Caminos de rodadura dañados (p.ej. por contaminación o fatiga)</p>	<p>Motores eléctricos</p> <p>Engranajes (en los engranajes, los ruidos de los rodamientos son difícilmente reconocibles, porque predomina por lo general el ruido de las ruedas dentadas)</p>

#### **4.3.1.2 Monitoreo de rodamientos con ayuda de medios técnicos:**

Los rodamientos cuyos daños representan un riesgo para la seguridad o que pueden dar lugar a una pérdida de producción relativamente importante requieren, a diferencia del caso anterior, una vigilancia minuciosa y continuada. Constituyen ejemplos a este respecto las turbinas de los aviones o las máquinas papeleras. En estos casos, para que el tipo de control sea fiable deberá estar orientado al tipo de daño que se puede esperar.

##### **4.3.1.2.1 Daños de gran superficie:**

El requisito fundamental para un funcionamiento sin problemas consiste en proporcionar el suficiente lubricante limpio. Las condiciones desfavorables se pueden detectar del modo siguiente:

- **Control del suministro de lubricante:**
  - Mirilla del nivel de aceite.
  - Medición de la presión de aceite.
  - Medición del caudal de aceite.
- **Medición de partículas procedentes del desgaste en el lubricante:**
  - De forma discontinua:
    - Tapón magnético.
    - Análisis espectral de muestras de lubricante.
    - Investigación de muestras de aceite en el laboratorio.

- De forma continua:
  - Emisor de señales magnético.
  - Determinación de la cantidad de partículas en circulación con un contador de partículas en línea.
- **Medición de la temperatura:** en general, con elementos termoeléctricos.

Un procedimiento muy fiable y de aplicación relativamente sencilla para el reconocimiento de daños debidos al lubricante es, sobre todo, la medición de la temperatura.

- **Comportamiento normal de la temperatura:**
  - Cuando se alcanza una temperatura de régimen en el funcionamiento estacionario, según figura Fig. N°4.1:

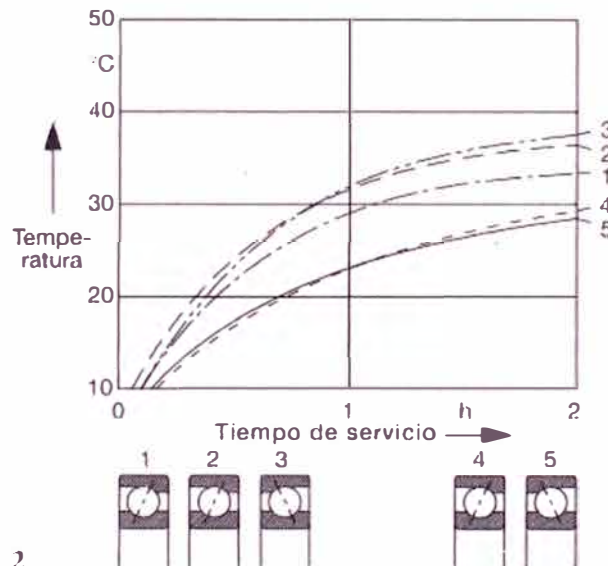


Fig. N° 4.1 Evolución de la temperatura para una máquina herramienta con apoyo de husillo principal en perfecto estado – Condición de ensayo:  $n \cdot d_m = 750\,000 \text{ min}^{-1} \times \text{mm}$

○ **Comportamiento anómalo:**

- Aumento repentino de la temperatura, causado por la falta de lubricante o por una excesiva precarga, radial o axial, del rodamiento, según figura Fig. N° 4.2.
- Evolución irregular de la temperatura, con valores máximos de tendencia ascendente, debido a un empeoramiento general del estado de la lubricación, por ejemplo al alcanzarse la duración de servicio del lubricante, como el comportamiento que se muestra en la figura Fig. N°4.3.

Sin embargo, las mediciones de la temperatura no son apropiadas para registrar con antelación daños locales, como ejemplo fatigas.

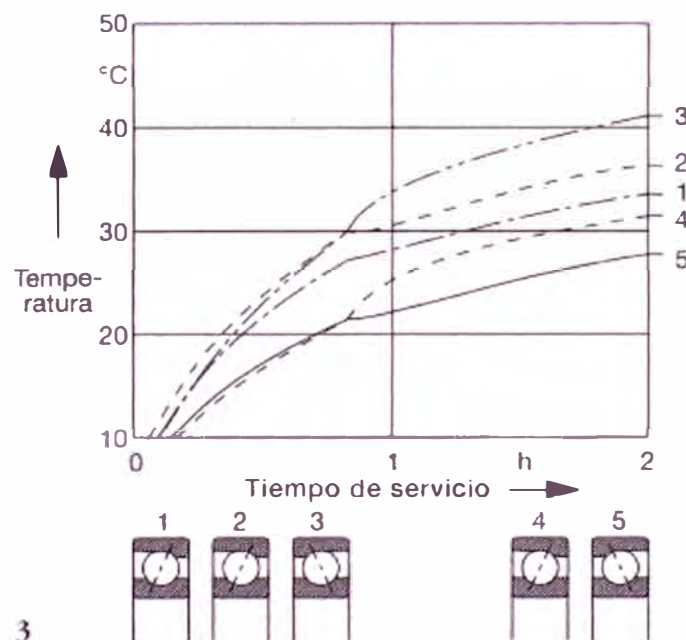


Fig. N° 4.2 Evolución de la temperatura con función de rodamiento libre alterada. Condición de ensayo:  $n \cdot d_m = 750\,000 \text{ min}^{-1} \times \text{mm}$ .

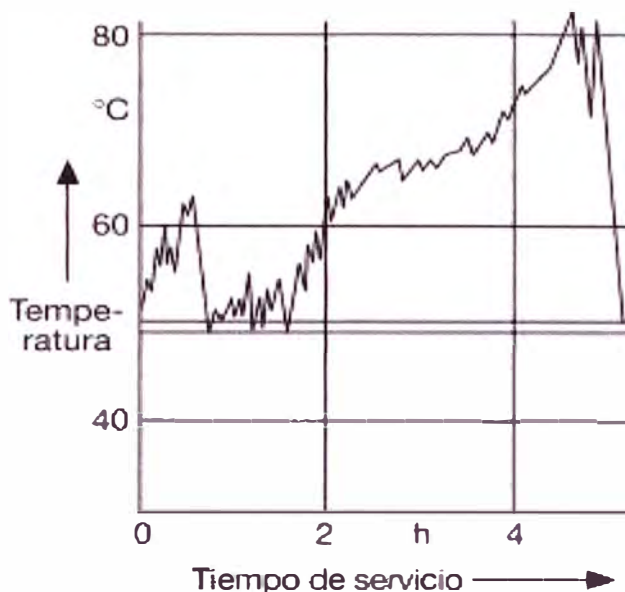


Fig. N° 4.3 Evolución de la temperatura en función del tiempo en caso de una lubricación con grasa deficiente. Condición de ensayo:  $n \times d_m = 200\,000 \text{ min}^{-1} \times \text{mm}$

#### 4.3.1.2.2 Daños puntuales:

Si en un rodamiento se producen daños estrictamente delimitados, como por ejemplo, impresiones en cuerpos rodantes, corrosión durante las paradas de servicio o roturas, la forma más rápida de reconocerlos es por medio de mediciones de vibraciones. En la rodadura sobre las impresiones locales se producen ondas de choque, que pueden ser registradas por captadores de desplazamiento, de velocidad o de aceleración.

Dependiendo de las condiciones de servicio y de la exactitud de la información, estas señales se pueden procesar ulteriormente de forma más o menos costosa.

Los procedimientos más difundidos son:

- Medición del valor efectivo.

- Medición del impulso de choque.
- Análisis de señal por detección de envolvente.

Sobre todo en el caso del último procedimiento mencionado se dispone de buenas experiencias en lo referente a fiabilidad operacional y empleo práctico.

Debido al tipo especial de preparación de la señal es posible incluso llegar a conclusiones sobre los componentes del rodamiento dañados; según figuras Fig. N° 4.4 y N° 4.5.

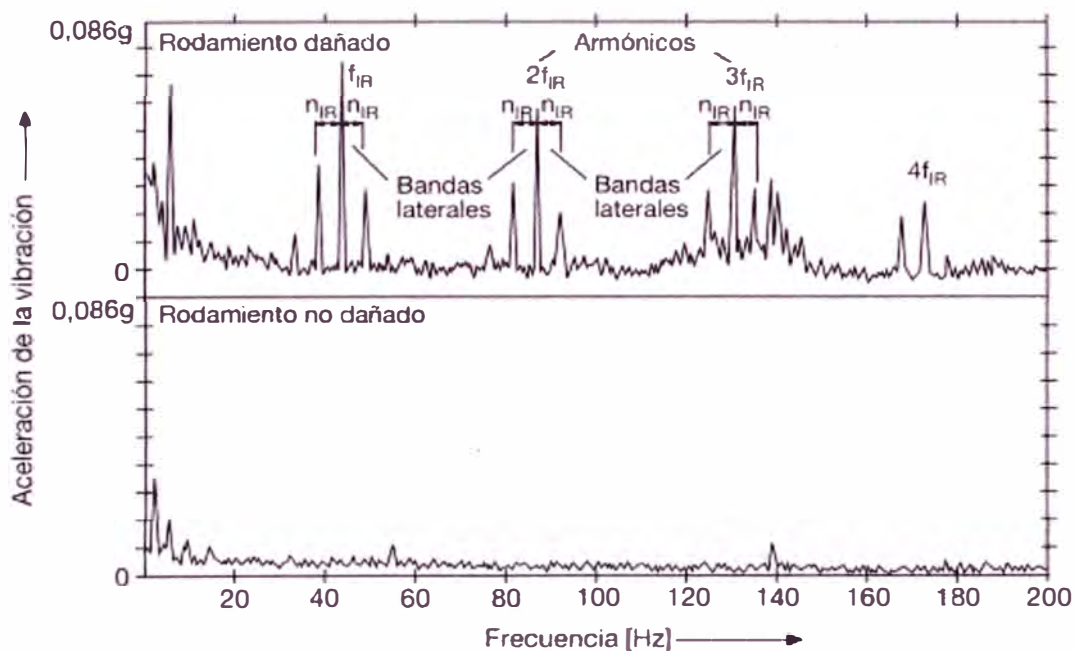


Fig. N°4.4 Espectro de frecuencia de la señal de la envolvente entre 0 y 200 Hz.  
 Abajo: rodamiento sin daños; arriba: rodamiento dañado –  $n_{IR}$ : Velocidad de rotación del aro interior [ $\text{min}^{-1}$ ] y  $f_{IR}$ : Frecuencia de la señal del aro interior (frecuencia de paso de los cuerpos rodantes) [Hz]

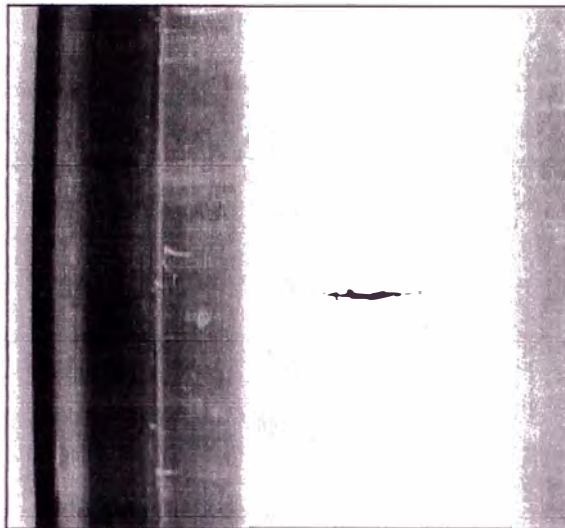


Fig. N° 4.5 Daños en el aro interior detectados por medio del procedimiento de envolvente en un rodamiento oscilante de rodillos de una máquina papelera

Los procedimientos de medición de la vibración son muy adecuados para determinar los daños por fatiga. El caso más fácil de aplicación de estos procedimientos lo constituyen los rodamientos con contacto puntual (rodamientos de bolas), pero con procedimientos de valoración más perfeccionados, como por ejemplo la detección de envolventes, se reconocen daños en rodamientos de rodillos con la misma seguridad. Sin embargo, estos procedimientos son menos empleados para la observación del estado de lubricación. Un fallo del suministro de lubricante se reconoce de forma fiable, como se describe arriba, mediante una medición de la temperatura. En la figura Fig. N° 4.6 se encuentra perfectamente detallado. En este caso, la medición del



impulso de choque reacciona de forma notablemente menos sensible que el sensor de la temperatura.

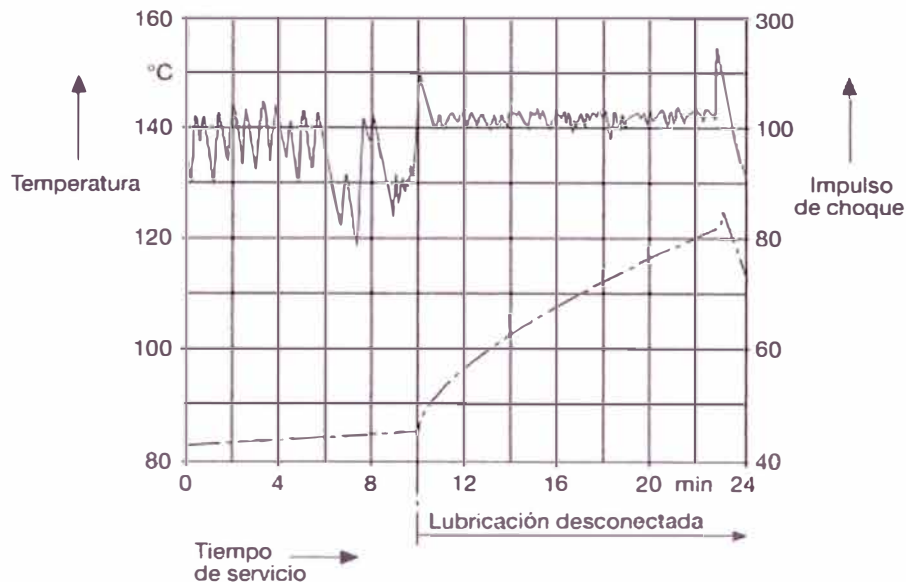


Fig. N° 4.6 Evolución de la temperatura e impulso de choque en función del tiempo después de la desconexión de la lubricación. Rodamientos para husillos B7216E.TPA;  $P/C = 0,1$ ;  $n = 9000 \text{ min}^{-1}$ ; aceite lubricante ISO VG100.

Así pues, sobre todo la medición de la temperatura y la medición de la vibración se complementan mutuamente con gran eficacia en las instalaciones técnicamente costosas.

#### 4.3.1.3 Urgencia en la sustitución de un rodamiento – Vida remanente:

Una vez que se ha reconocido un deterioro en el rodamiento, se plantea la cuestión de si es precisa una sustitución inmediata o si el rodamiento puede continuar en uso hasta la siguiente parada programada de la máquina. La respuesta a esta cuestión depende de una serie de condiciones. Así por ejemplo, si la disminución de la precisión de trabajo de una máquina herramienta es motivo para la sospecha de una avería en los rodamientos, la urgencia en la

sustitución del rodamiento depende en primer término de durante cuanto tiempo se pueden seguir fabricando piezas de calidad aceptable.

En el caso de rodamientos que se han gripado repentinamente por sobrecalentamiento a consecuencia de una interrupción no detectada del suministro de lubricante a velocidad de rotación elevada, es necesaria evidentemente una sustitución inmediata.

Sin embargo, en un gran número de casos, todavía es posible en principio que la máquina siga funcionando sin merma de la calidad del producto aunque exista un daño. El tiempo durante el cual esto es posible depende en este caso de la sollicitación de carga del rodamiento, la velocidad de rotación, la lubricación y la limpieza del lubricante. Se han realizado extensas investigaciones sobre la evolución de los daños con diversas condiciones de carga en rodamientos de bolas, los principales resultados obtenidos al respecto son:

- En caso de carga moderada, un deterioro progresa lentamente, de forma que se puede esperar a la siguiente parada programada para sustituir el rodamiento.
- Al aumentar la carga, el deterioro se extiende con mucha mayor rapidez.
- Al principio, el daño crece lentamente. Al aumentar el grado del daño aumenta también de modo considerable la velocidad de propagación.

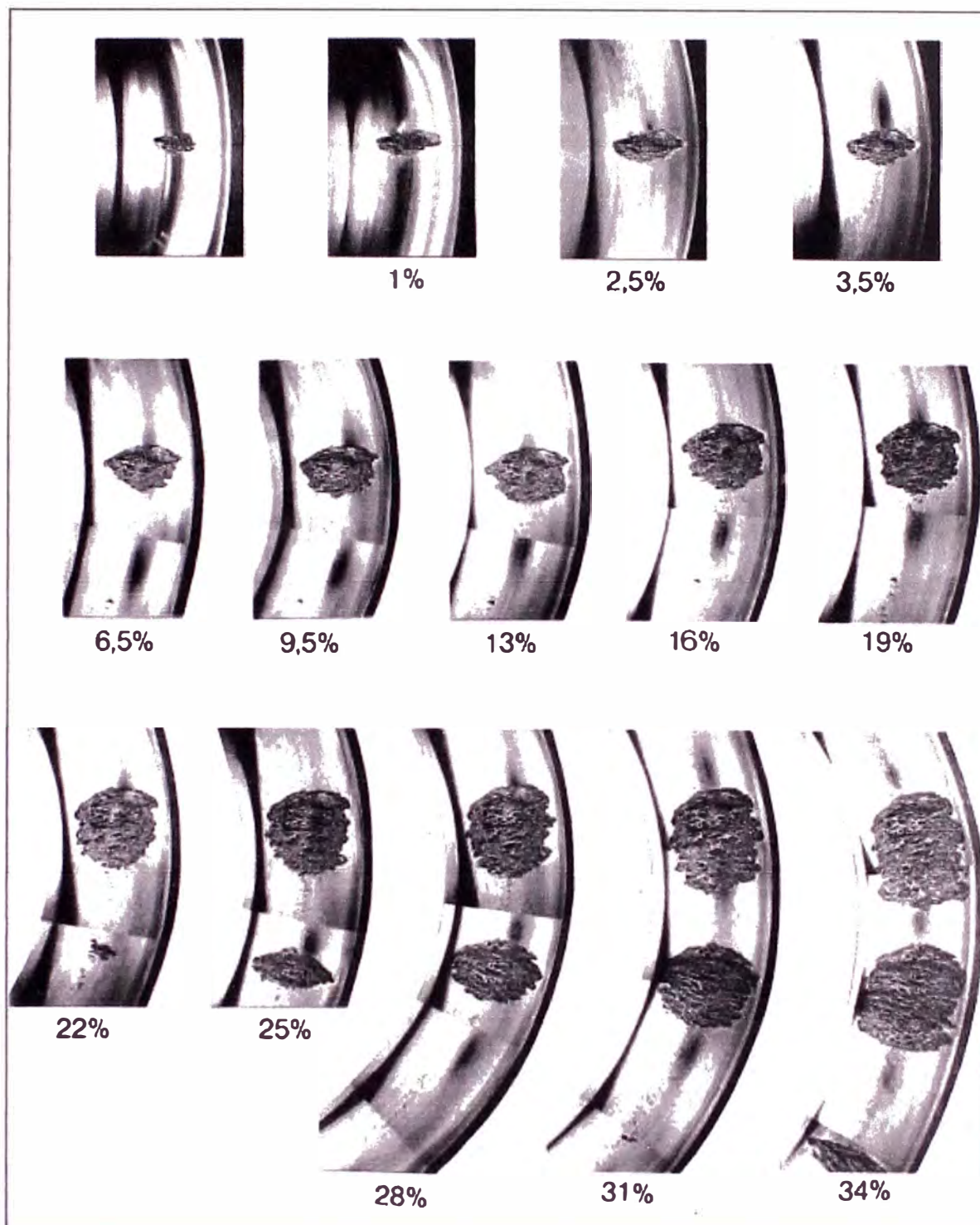


Fig. N° 4.7 Evolución de daños por fatiga en el camino de rodadura del aro interior de un rodamiento de bolas de contacto angular. El intervalo de tiempo entre las revisiones desde el inicio del daño está indicado en % del tiempo de duración nominal  $L_{10}$ .

#### **4.4 MARCO TEÓRICO RELACIONADO A LA GESTIÓN DE REPARACIÓN DE RODAMIENTOS:**

##### **4.4.1 Alcances de la evaluación del proyecto de reparación:**

Cuando un rodamiento está dañado, a menudo es retirado de servicio y reemplazado antes de que alcance su vida completa, útil y económica. Los avances en el diseño del rodamiento, materiales, su mantenimiento y sus métodos han mejorado grandemente el potencial de reparación de los rodamientos como un medio efectivo para extender su vida.

Un programa de reparación de alta calidad también puede direccionar el desafío de la determinación si y cuando un rodamiento puede ser reparado. Independientemente del fabricante original del producto, un amplio rango de servicios están disponibles para todos los tipos de rodamientos.

Un rodamiento reparado, dependiendo del nivel de servicio requerido, puede a menudo ser retornados a especificaciones casi nuevas en cerca de una tercera parte del tiempo y en unos ahorros de hasta 60% del costo de un rodamiento nuevo. Además, la experiencia ha mostrado que una reparación exitosa de un rodamiento puede operar un ciclo de vida comparable a aquel del primer ciclo de vida del rodamiento. La popularidad creciente de los programas de reparación en las industrias pesadas muestra un aumento en el entendimiento del valor significativo, tanto en tiempo como en costo, comparado al reemplazo de rodamientos

##### **4.4.2 Terminología usada comúnmente:**

Lo siguiente es una lista de términos industriales comúnmente usados para describir opciones de servicio de rodamientos. Estos términos

son usados intercambiamente a través de la industria, pero no necesariamente representa el mismo alcance de trabajo a ser realizado:

- **Reparación:** Describe una amplio rango de servicios que pueden ser realizados a un rodamiento. El término reparación es generalmente referido como un nivel de trabajo realizado al rodamiento.
- **Recertificación:** Certificación de un rodamiento por servicio. Esto generalmente aplica a un producto no usado con una vida útil obsoleta.
- **Reacondicionamiento:** Pulido, rectificado o enderezado de componentes del rodamiento para retirar defectos superficiales muy leves, principalmente óxido y corrosión, que podrían dar lugar a un daño más extenso si no se elimina.
- **Remanufactura:** Proceso de eliminación de daño agresivos de superficie por el uso de un afilado o proceso de torneado severo. También incluye el reemplazo de cualquiera de las componentes inservibles

#### **4.4.3 Determinación de la vida extendida del rodamiento:**

La reparación del rodamiento no es un concepto nuevo, pero se está incrementando en su uso factible con cliente de la industria pesada, proveyendo un valor tangible.

Cuando un rodamiento es dañado, la operación completa experimentará, resultando en costos adicionales, programas de trabajo de mantenimiento prolongados, paradas innecesarias, entrega a tiempo extendida a usuarios finales. En la mayoría de las aplicaciones industriales, los rodamientos son desechados del servicio antes de que ellos hayan

alcanzado su tiempo de vida útil y económica completa. Así la reparación de rodamientos puede ser un medio efectivo para extender su vida más allá de su vida teórica, haciéndolo una alternativa económica a la compra de uno nuevo como se muestra en la siguiente figura Fig. N° 4.8.

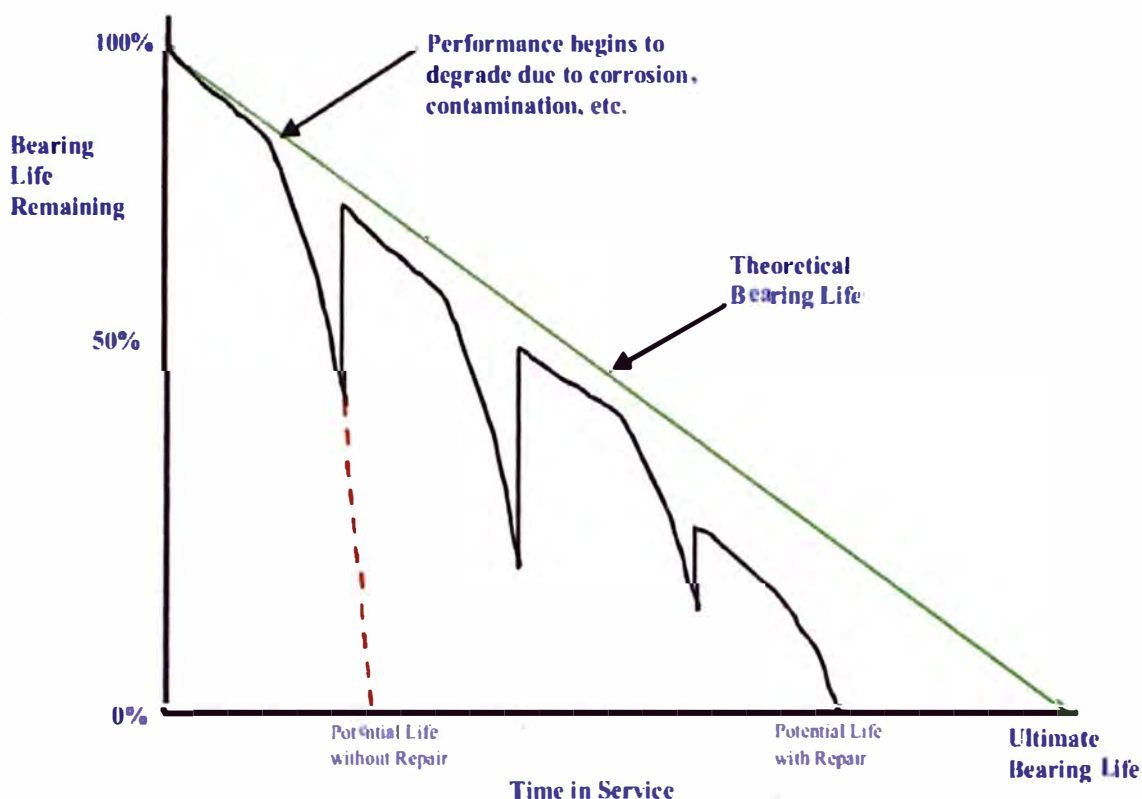


Fig. N° 4.8 Comparación del tiempo de vida del rodamiento extendido por reparación relativo a la teórica y de servicio.

#### 4.4.4 Análisis procesal de un caso típico de reparación:

El diseño inicial del rodamiento toma en cuenta el uso y la aplicación y establece una correspondiente predicción para la vida de servicio y fatiga. Independientemente del diseño o fabricante, los rodamientos a menudo se desvían de estas expectativas debido a factores tales como instalación inapropiada, contaminación, lubricación inadecuada o desalineamiento. De hecho, menos del 10% de rodamientos usados en una aplicación industrial pesada alcanza su diseño de vida  $L_{10}$ .

Los avances en la tecnología, materiales, monitoreo de condición y programas de mantenimiento centrados en confiabilidad combinado presiones económicas contribuyen a un potencial incrementado para exitosos programas de reparación de rodamientos.

Un programa de reparación de calidad puede a menudo devolver un rodamiento con especificaciones casi nuevas en alrededor de un tercio del tiempo que se necesita para adquirir uno nuevo. Dependiendo del alcance del trabajo, un rodamiento reparado puede ahorrar hasta el 60% del costo de compra de uno nuevo. Algunos centros de reparación de rodamientos también ofrecerán una garantía en su servicio.

Cuando se compara con la fabricación de un rodamiento nuevo, la reparación de un rodamiento se considera un procedimiento más respetuoso del medio ambiente, requiriendo menos consumo de energía y reduciendo también el consumo de materia prima y los residuos. La mayoría de energía requerida para fabricar un rodamiento nuevo – la fundición y refinación del acero, forjado y torneado del material, el tratamiento térmico y pulido – se conserva a través de la reparación del rodamiento.

En adición a los ahorros de costo y tiempo, la reparación del rodamiento maximiza la oportunidad de alcanzar el ciclo de vida teórico del rodamiento. Una pregunta común es si un rodamiento tendrá una duración tan larga como uno nuevo. Estudios realizados por fabricantes de rodamientos e investigadores independientes han mostrado que un rodamiento apropiadamente reparado funcionará un segundo ciclo operativo comparable a los del primero. Los rodamientos reparados a menudo reutilizan materiales que ya han probado fiabilidad en la aplicación, por tanto se reduce el riesgo de falla del rodamiento. También hay que señalar que es

fundamental que las partes de recambio se fabrican usando materiales y tolerancias especificados por el OEM. Cualquier desviación de las especificaciones del OEM aumentará el riesgo de falla prematura.

#### **4.4.5 Criterios para la elegibilidad de reparación de rodamientos:**

A pesar de que se ofrece muchos beneficios, la reparación no siempre es la mejor opción para un rodamiento dañado. El reto de utilizar adecuadamente los servicios de reparación de rodamiento es determinar si y cuando los rodamientos necesitan ser reparados y decidir que opción es la mejor opción económica y de largo plazo.

Dependiendo de las instalaciones de reparación, existen limitaciones en el tamaño mínimo y máximo de los rodamientos y sus tipos que pueden ser reparados. Hay muchos tipos diferentes de proveedores de reparación, que van desde pequeñas instalaciones limitadas a su alcance de trabajo y conocimiento a grandes fabricantes de rodamientos con una gama ilimitada de productos y servicios.

El ámbito del trabajo también limita el tamaño del rodamiento que puede ser reparado. Todos los tipos de rodamientos son elegibles para reparación, independiente de la fabricación original.

Un paso crítico en cualquier programa de reparación de rodamientos es reconocer problemas potenciales a través de la supervisión e inspección periódica. Una revisión cuidadosa de la producción ayudará a identificar la necesidad por reparar, tales como:

- El rodamiento está llegando o ha superado su expectativa de vida recomendada.
- Las temperaturas operativas han excedido los 90 °C.
- Exposición a vibración excesiva.



- Cambios sucesivos en lubricación y temperatura.
- Sonidos audibles de operación excesivos.
- Pérdida de la integridad del sello del rodamiento.

Personal debidamente entrenado y experimentado que participan en las inspecciones de rutina sirven como la primera línea en la decisión de si un rodamiento necesita reparación.

La detección temprana de un problema a través de controles de rutina, mantenimiento y predictivo, y análisis de vibración pueden reducir paradas y gastos innecesarios, y ayudar a sacar provecho de las capacidades y beneficios de la reparación de rodamientos.

#### **4.4.6 Proceso de remanufactura:**

Una vez que un producto es enviado al centro especializado de reparación, todos los rodamientos se someten a un proceso de limpieza, luego el rodamiento es desarmado, en este proceso personal técnico debidamente entrenado realizará las siguientes tareas:

- Registrar la información del rodamiento.
- Registrar los juegos internos actuales.
- Completar el desarmado y etiquetar con identificadores únicos.

Luego, se realizará una detallada una inspección de todas las componentes del rodamiento y los hallazgos serán registrados. La inspección inicial incluye la búsqueda de los problemas o daños mayores tales como fracturas, desprendimientos importantes, envejecimiento debido a daño por calor. Estos son indicadores que el rodamiento puede o no ser elegible para reparación. Las componentes también son examinados para determinar el alcance del trabajo requerido para retomarlos a una condición casi nueva.

Además, el personal técnico mide el agujero, diámetro exterior y el ancho del rodamiento, así como también el registro de la redondez de las principales componentes de rodadura. El tipo y grado del daño determinan si pueden ser reparados y el método apropiado de reparación. El nivel del detalle suministrado en este reporte de inspección depende de la instalaciones donde se realiza el trabajo.

Un amplio rango de servicios y métodos de reparación están disponibles. Dependiendo de las capacidades de la instalación y nivel del daño, algunas reparaciones pueden ser realizados in situ usando personal existente o un personal del servicio del fabricante del rodamiento. En general, programas in situ son adecuados para procesos de recertificación o reacondicionamiento, no para los procesos de remanufactura. Abajo sigue una descripción detallada de las acciones para cada nivel de servicio de reparación:

- **Recertificación:** Limpieza, examinado, verificación de juegos internos, preservación y embalaje.
- **Recuperación:** Pulido usando procesos vibratorios patentados, preservación y embalaje.
- **Reacondicionamiento:** Combina servicios de recertificación y recuperación.
- **Remanufactura:** Limpieza, examen, rectificado de pistas, fabricación de sets de rodillos nuevos y componentes principales si es requerido, reajuste de los juegos internos, preservación y embalaje.

Adicionales servicios disponibles incluyen:

- **Modificación:** Características especiales pueden ser adicionados a ensambles existentes o rodamientos nuevos para mejorar rendimiento, retroalimentación para aplicaciones especiales o actualización a los diseños de productos más recientes.

Una vez hecha la elección de la reparación apropiada y el proceso completado, los rodamientos son rearmados y embalados para almacenamiento y transporte. Generalmente una inspección final es realizada en el rodamiento para asegurar que reúne el criterio de ensamble especificado para el diseño del rodamiento. Otra vez debe ser señalado que diferentes proveedores realizan niveles diferentes de inspección y embalaje. Los fabricantes de rodamientos que realizan reparación a menudo siguen los mismos procedimientos como con rodamiento nuevo.

#### **4.4.7 Grados de daños:**

Los modos de daños específicos encontrados durante el servicio de reparación incluyen:

- **Corrosión de contacto (Fretting corrosion):** Por lo general aparece en óxidos de hierro rojo o negro que ocurre por condiciones del montaje; también llamado oxidación por fricción.
- **Raspado (Scuffing):** Deformado, cizallado o desgaste adhesivo es el resultado de metal removido o transferido de una componente del rodamiento a otro debido al contacto deslizante.
- **Manchado (Staining):** Decoloración de la superficie sin picadura, como de la oxidación del lubricante.

- **Desgaste (Wear):** Superficie de contacto degradado degradado o desgastado por la acción mecánica en uso.
- **Corrosión / Marcado (Etching):** Acción química (herrumbre) que ataca las superficies de las componentes del rodamiento.
- **Incrustación de residuo (Debris denting):** Depresiones superficiales localizadas causadas por residuos o material extraño.
- **Brinelado (Brinelling):** Deformación permanente (metal desplazado, no sólo desgastado) de las superficies del rodamiento en áreas de contacto de pista / rodillo causado por carga o impacto.
- **Astillado (Spalling):** Desprendimiento de metal en pista o elemento rodante en escamas o partículas del mismo aspecto escamoso, también llamado escamado, grano fino o desprendimiento de grano grueso.
- **Fatiga térmica (Heat checks):** grietas superficiales causados por el calor del contacto deslizante, usualmente formado en la dirección del movimiento.
- **Fractura (Crack):** Rotura superficial significativamente visible, usualmente causado por abuso o condiciones operativas inusuales.

Existen muchas publicaciones disponibles sobre la evaluación o interpretación de daño de los elementos rodantes del rodamiento. Un discutido tema común es como identificar los siguientes daños:

- **Daño químico:** Marcado, manchado, picadura de corrosión, herrumbre o corrosión de contacto.

- Daño por calor: Decoloración o fatiga.
- Daño eléctrico: Quemadura, corrugado o picadura.
- Daño mecánico: Escamado por fatiga, grieta y desprendimiento, fractura, defectos, depilado o deformado, brinelado, incrustado, cizallado, desgaste abrasivo, daño de instalación, falla por desalineado o lubricación.

La mayoría de manuales describen el daño y pueden ayudar a eliminar las causas, pero muchas veces, no emprenden la investigación hacia la relación entre daño y reparación. Por ello es siempre recomendado contactar a un técnico de servicio de reparación para asistirlo en cualquier evaluación de daño o para factibilidad de reparación.

#### **4.4.8 Métodos y opciones de reparación:**

Varias industrias y aplicaciones pueden demandar diferentes niveles de servicio de reparación del rodamiento según su clasificación detallada en el subcapítulo 2.1 y mostrada en el siguiente cuadro comparativo de la figura Fig. N°4.9 de acuerdo a sus actividades involucradas las cuales generalmente se agrupan en los 3 niveles más demandados por su factibilidad.



Fig. N° 4.9 Cuadro comparativo de las distintas etapas de reparación de rodamientos

Un servicio del tipo I generalmente describe la Recertificación o limpieza y la inspección del proceso de reparación.

El tipo 2 generalmente aplica al reacondicionamiento o proceso de reparación por pulido. Los rodamientos con daños más extendidos requieren un nivel de servicio tipo 3, referido a los procesos de remanufactura. Este nivel envuelve procesos extensivos, tales como mecanizado de pistas, reemplazo de componentes como rodillos o jaula e incluso puede incluir el reemplazo de una pista del rodamiento. A menudo, el mecanizado de las pistas requerirá la fabricación de rodillos sobredimensionados para

mantener la geometría y juego del rodamiento, donde el juego radial sea mantenido crítico. En casos donde el juego axial sea crítico, serían proveídos de rodillos sobredimensionados, nuevos espaciadores o cuñas adicionales.

Estos niveles de reparación han sido tradicionalmente los más adecuados para rodamientos mayores a 12 pulgadas (30,5 cm) de diámetro interior. Aunque también los cuidados del servicio de recuperación se dan para rodamientos tan pequeños como de 4 pulgadas (10,3 cm) de diámetro interior especialmente del rubro ferroviario estas se justifican según volumen de cantidad. La limpieza, inspección y la aplicación de un acabado de pulido pueden retornar rodamientos usados a una condición casi nuevas por una fracción del costo de reemplazo. Por ello es siempre buena práctica que el técnico de servicio de rodamiento revise a través de la inspección concienzuda antes que sean enviados a los centros especializado de reparación para estar seguro que sean económicamente factibles de reparar.

En un tiempo muy próximo el reacondicionamiento y la reparación puede llegar tomar de entre dos a cuatro semanas dependiendo del nivel de demanda y distancia respecto de los centros de reparación. Las compañías que utilicen el servicio de reparación para sus rodamientos siempre deben solicitar una cotización completa y detallada que incluya costos y tiempos estimados de reparación según tipo o nivel de reparación sugerida en las inspecciones calificadas.

#### **4.4.9 Expectativas y limitaciones de reparación:**

Aunque la reparación de rodamientos ha probado ser la solución rentable, como cualquier servicio, está sujeto a limitaciones.

Los rodamientos pueden ser reparados, a menudo más de una vez, pero no indefinidamente. Una regla general es que los rodamientos no deberían tener más de tres mecanizados. El mecanizado remueve material superficial, entonces necesita ser hecho cuidadosamente. El estándar de algunas compañías sugieren que la máxima eliminación de material en cualquier pista debería ser 0,25 pulgadas de su diámetro y para el tamaño del rodillo no debería exceder de 0,15 pulgadas de su diámetro del tamaño estándar del fabricante original del rodamiento. Estas recomendaciones ayudan a reducir el riesgo asociado con la alteración del diseño integral del rodamiento.

Si está hecho correctamente, los rodamientos reparados ofrecen rendimiento casi nuevo. Aunque es importante reconocer y entender como las opciones de reparación eliminan los modos de daños. Por ejemplo, el pulido puede eliminar a una variedad de modos de daños pero no es efectivo para la remoción de indentaciones residuales o desgaste. Por tanto, en tales casos no se espera un rendimiento como si fuera nuevo dado que el pulido no repara todo el daño.

Por ello es recomendado consultar con un representante del fabricante del rodamiento o un ingeniero de aplicaciones para ayudar a determinar las causas, extensión y reparación sugerida del daño. Es también crítico tener cualquier reparación del daño realizado por personal debidamente entrenado y experimentado por que las reparaciones



innecesarias pueden llevar a daños adicionales y vida del rodamiento limitado. Comunes errores de reparación incluyen:

- Técnicas de pulido inapropiadas que causan cambios a la geometría y/o perfiles que no corrigen geometría y condiciones de contacto desgastados.
- Técnicas y procesos de mecanizado inapropiados que pueden causar grietas superficiales y daños o geometría y/o perfiles inapropiados.
- Combinación de componentes pre ajustados.
- Ajustes inapropiados de los perfiles, geometría interna, acabados y juegos pueden causar falla del rodamiento.

En adición a la pericia y experiencia, un equipamiento apropiado es requerido para solucionar el problema y asegurar que el daño ha sido revisado y adecuadamente removido. El equipo de medición apropiado, tales como la máquina de trazado láser y perfilado. Tomos CMM y máquinas de medición precisas, son esenciales para realizar exhaustivas inspecciones en el producto a reparar.

# **CAPÍTULO 5**

## **DESARROLLO DE LAS ETAPAS DE LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA**

Este capítulo está basado en la descripción práctica de los procedimientos seguidos por los fabricantes en general para realizar la inspección visual de rodamientos usados para evaluar su reparación, en el caso del presente informe se conforma de etapas con actividades donde se explica en cada uno de ellos el proceso técnico de evaluación según los lineamientos seguidos y sugeridos por fábrica para cantidades mayores a dos rodamientos, en este caso para 12 rodamientos. La técnica de desarrollo del contenido está descrita metódicamente según la estructura del diagrama Medios-Fines.

### **5.1 PREPARACIÓN DE LA LOGÍSTICA Y CONDICIONES DE TRABAJO:**

Una vez que haya existido un primer interés del usuario final por este servicio sea como requerimiento realizado con previo conocimiento con la solicitud directa al fabricante o distribuidor comercial local para cotización del servicio de inspección para reparación del rodamiento, se procede a indagar antecedentes.

O cuando la solicitud de cotización por este servicio se ha recibido debido a un trabajo previo de convencimiento hacia el usuario final previa identificación del potencial de estos activos en calidad de reparables como una posible solución para disminuir sus costos por activos y aumento de disponibilidad de sus equipos, entonces también en este caso también se procede a consultar por los antecedentes.

### **5.1.1 Recopilación de antecedentes de aplicación de los rodamientos:**

Como primer antecedente requerido fue conocer las características de la aplicación de los rodamientos que fueron explicados en el Capítulo 2.2 donde se detalla el proceso operativo de las chancadoras de rodillo-prensa en un circuito de molienda terciario en la planta de chancado y molienda (Concentradora) compuesto por 04 equipos denominados HPGR- Rodillos de Molienda de Alta Presión; asimismo se explica las principales características de estos equipos y los rodamientos, y sus denominaciones para identificación en cada uno de los rodillos prensa de estos equipos.

Como solicitud adicional para realizar el servicio de inspección se requirió:

- Las horas de trabajo, fechas de fabricación y cambio de cada uno de los rodamientos según identificación basada en sus números de series.
- Registros de algún tipo de monitoreo de condiciones del equipo basado en confiabilidad como la historia de temperatura y vibraciones, análisis del lubricante y fechas de las paradas del equipo debido a cambio o reemplazo de los rodamientos o del mismo equipo (rodillo-prensa), como se muestra en la figura Fig. N°5.1.

REPORTE DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO		
Fecha	07 de ENERO de 2010	
Equipo	RODILLOS HPGR	
Componente	RODAMIENTOS	
Nivel de Severidad Diagnostico	31 FLUJO INTERIOR	Tendencia creciente en concentración de hierro (1854 ppm) y cromo (31 ppm) Contaminación con sílice (672 ppm) 2 2 /
	31 FLUJO EXTERIOR	No se observan concentraciones anormales
	31 MOVIL INTERIOR	No se observan concentraciones anormales
	31 MOVIL EXTERIOR	Tendencia creciente en concentración de hierro (2890 ppm) y cromo (43 ppm) Contaminación con sílice (556 ppm)
	32 FLUJO INTERIOR	Tendencia creciente en concentración de hierro Contaminación con sílice
	32 FLUJO EXTERIOR	Tendencia creciente en concentración de hierro (2935 ppm) y cromo (36 ppm) Contaminación con sílice (558 ppm) 5.14
	HPGR 32 MOVIL INTERIOR	No se observan concentraciones anormales
	HPGR 32 MOVIL EXTERIOR	No se observan concentraciones anormales
	33 FLUJO INTERIOR	No se observan concentraciones anormales
	33 FLUJO EXTERIOR	No se observan concentraciones anormales
	33 MOVIL INTERIOR	No se observan concentraciones anormales
	33 MOVIL EXTERIOR	Tendencia creciente en concentración de hierro (2002 ppm) y cromo (21 ppm) Contaminación con sílice (420 ppm) 2 2 /
	34 FLUJO INTERIOR	No se observan concentraciones anormales
	34 FLUJO EXTERIOR	No se observan concentraciones anormales
34 MOVIL INTERIOR	No se observan concentraciones anormales	
34 MOVIL EXTERIOR	No se observan concentraciones anormales	

Fig. N° 5.1 Seguimiento de tendencias de sólidos contaminantes encontrados en Chancadoras con denominación HPGR N°31, N°32 y N°33.

De acuerdo a lo requerido en el último párrafo, el usuario final accedió a la entrega de los históricos de los últimos nueve meses de los reportes gráficos de mantenimiento predictivo referido al análisis del lubricante según nivel de concentración de partículas tal como se muestra en la conclusiones de las tendencias monitoreadas según rodamiento localizado, exterior o interior en el rodillo móvil o fijo como se muestra la figura Fig. N°5.2.

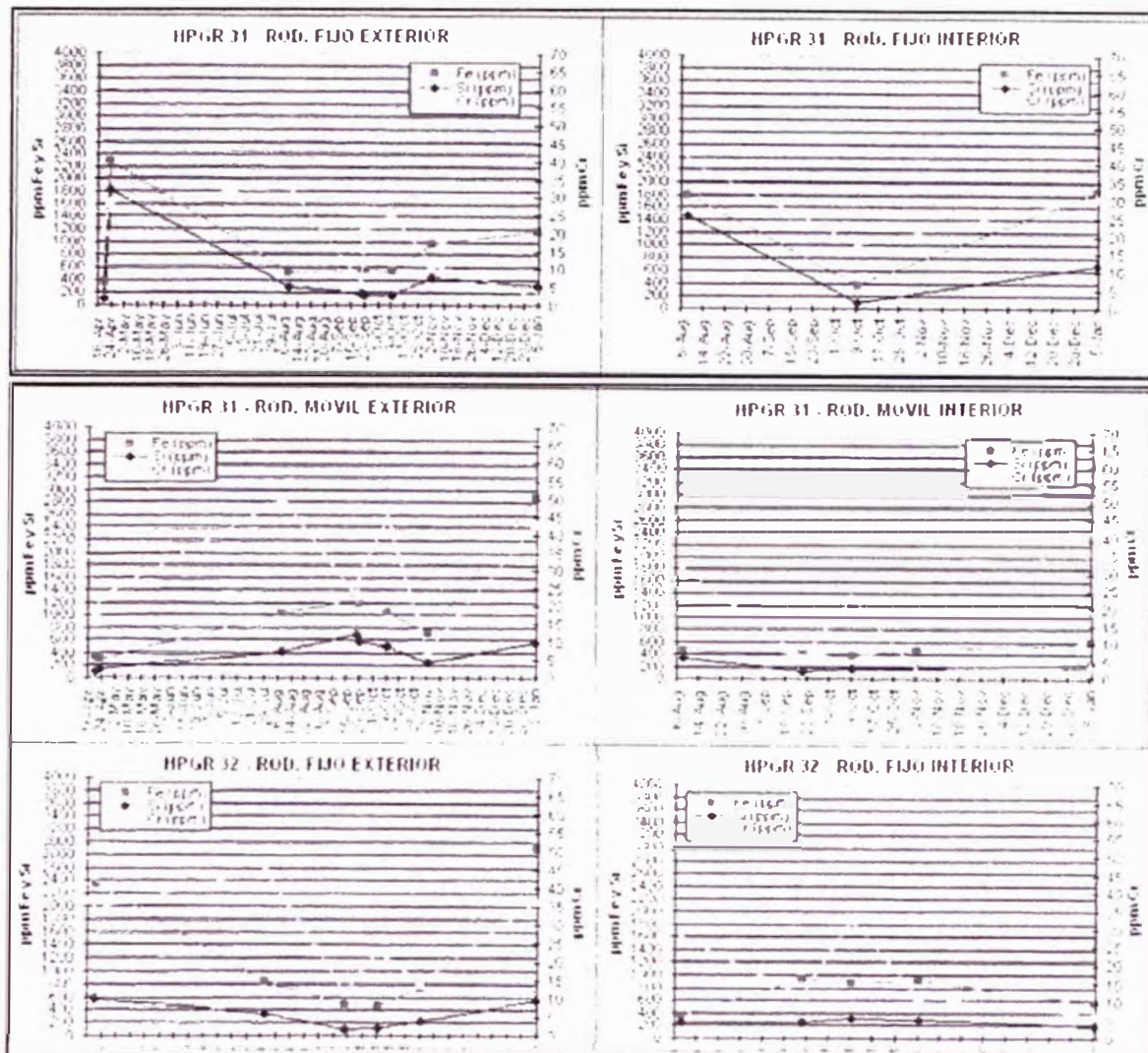


Fig. N°5.2 Registro de tendencias de monitoreo del lubricante según partículas contaminantes encontradas en análisis para Chancadoras HPGR N°31 y N°32

### 5.1.2 Establecimiento de la condición actual de los rodamientos:

Según requerimiento de cotización de servicios de parte del cliente minero SMCV por servicios especializados de inspección para evaluación de reparación de 12 rodamientos en calidad de usados para chancadoras terciarias Rodillo Prensa (HPGR N°31, 32, 33 y 34) se proporcionó como datos iniciales las horas operativas por número de serie de cada rodamiento para la determinación de condición actual según Tabla N°5.1. Asimismo el

lugar de localización donde los rodamientos están almacenados para su inspección:

- 10 Rodamientos en Taller de Polysius Perú en Matarani
- 02 Rodamientos en Taller de HPGR en SMCV Arequipa.

Tabla N°5.1 Registro de horas operativas y número de serie de rodamientos a inspeccionar.

N° Orden Inspección	N° Serie Rodamiento	Localización	N° Horas Operación
1	SNB61	Taller de Polysius Perú – Matarani	NSP
2	SND1	Taller de Polysius Perú – Matarani	7493
3	SNE4	Taller de Polysius Perú – Matarani	NSP
4	SND28	Taller de Polysius Perú – Matarani	NSP
5	SND4	Taller de Polysius Perú – Matarani	7493
6	SND35	Taller de Polysius Perú – Matarani	2459
7	SND18	Taller de Polysius Perú – Matarani	2459
8	SNE8	Taller de Polysius Perú – Matarani	2459
9	SND29	Taller de Polysius Perú – Matarani	2459
10	SND576	Taller de Polysius Perú – Matarani	13261
11	SND2	Taller HPGR – SMCV	7493
12	SND6	Taller HPGR – SMCV	7493

### 5.1.3 Preparación del protocolo de trabajo:

Para este requerimiento por servicios de inspección se envió un protocolo de trabajo previo, es decir un resumen de que actividades se realizarían indicando recomendaciones de equipos y herramientas solicitadas y condiciones seguras del área de trabajo.

El formato que se utilizó para este tipo de protocolos de inspección estándar pertenece a una oficina regional de un fabricante de rodamientos y se muestra en el Anexo N°4.

#### **5.1.4 Verificación de las técnicas de manipulación segura de rodamientos:**

De acuerdo a los recursos requeridos para esta actividad según el protocolo estándar para inspección de rodamientos del capítulo anterior N°5.1.3 se consideró tener en adecuadas condiciones operativas las siguientes herramientas, equipos e insumos:

- Grúa puente para movilización de rodamientos.
- Tecla para manipulación de componentes del rodamiento.
- Base rígida con dos rodillos móviles para apoyo seguro del rodamiento.
- Espátulas tipo cuchara para desarme parcial de rodillos del rodamiento
- Galgas de diferentes espesores de 30 cm. de longitud para medición del juego radial interno del rodamiento y desgaste superficial de jaula.
- Solvente derivado del petróleo no siliconado para limpieza de las componentes del rodamiento.
- Lupa microscópica para inspección de estado superficial del rodamiento.
- Solvente anticorrosivo para protección en embalaje del rodamiento.

- Micrómetro de exteriores para medición de desgaste superficial de rodillos.
- Lijas de agua de diferentes grano de rugosidad para primer pulido.
- Insumos enteros y secos para limpieza de componentes del rodamiento.
- Plumón indeleble o corrector blanco para marcado de zonas dañadas.
- Formato tipo chart de inspección visual por daño y componente.

Asimismo las instalaciones donde se almacenan estos rodamientos debe estar en buenas condiciones para realizar esta actividad como en la figura Fig. N°5.3 y también el personal idóneo con adecuado equipo de seguridad para protección personal para trabajar de forma segura tanto de parte del fabricante de rodamiento que realiza este servicio como del personal perteneciente al cliente debe tener las siguiente habilidades:

a) Para el personal técnico del fabricante del rodamiento:

- Conocimientos en tecnología de los rodamientos
- Análisis de falla de rodamientos
- Entrenamiento de reacondicionamiento de rodamientos
- Equipos de metrología para montaje de rodamientos
- Manejo de herramientas y equipos para montaje / desmontaje de rodamientos

b) Para el personal técnico del usuario final (compañía minera):

- Entrenamiento en manipulación de grúas y tecles.
- Experiencia en maniobras de izamiento y amarres con sogas.



- Conocimientos en herramientas hidráulicas y neumáticas como prensas y gatas.
- Manejo de equipos de metrología para montaje de rodamientos.



Fig. N°5.3 Instalaciones de almacenamiento de los rodamientos para inspección.


## 5.2 EVALUACIÓN CUALITATIVA DE LOS RODAMIENTOS DAÑADOS:

En esta etapa de la implementación de este proceso de inspección se considera la inspección visual de los rodamientos, la toma y selección de fotos mostrando detalles en primer plano de los daños encontrados, sus respectivos análisis y la comparación si es posible con patrones de fallas en rodamientos definidos.

### **5.2.1 Inspección visual de los rodamientos dañados:**

La inspección visual de estos rodamientos está basado en la revisión superficial de daños en sus componentes, primero identificándolos con evidentes señales de defecto que no amerita reparación debido a su avanzado nivel de desgaste o falla irreparable; y como segundo filtro con la evaluación concienzuda en detalle de cada componente registrándolo en una tabla estándar de identificación de los tipos de daños y su localización como se muestra en la Tabla N°5.2.

Tabla N° 5.2 Chart de identificación del tipo y localización de daños en componentes de cada rodamiento según datos de fabricación y número de serie.

		<b>Schaeffler-Reg.-No. :</b>										
		<b>Type :</b>										
		<b>Ser.-No./ Year of Manufacture :</b>		/ Wpt.								
Kind of damage	Damage	Outer ring				Inner ring				Rollers		Cage
		RW	OD	Face	Lip	RW	B-Ø	Face	Lip	RW	Face	
Fretting Corrosion Damages (Frotting Corrosion)	brown/ black spots in seating area Material Removal in contact area											
Corrosion Damages (Moisture)	Rust, Etching Standstill Corrosion											
Fatigue Damage	Micro Cracks Exfoliation/ Pittings Grey Spottiness Peelings/ Crumbings ?											
Wear Damages	shining surfaces opal/ waxy ? surfaces Scratches/ Creasings											
Slippage Damage	Soft Traces											
Foreign Particle Indentation	Indentations of soft foreign particles Indentation of foreign particles made from hardened steel Indentations of firm mineral foreign particles											
Standstill Indication	Indications on raceways in rolling bearing distance											
Melting Scratch + Corrugator / ripple? (Current Passage)	Melting scratches/ inter-run undercuts on contact areas of rolling partners axially parallel brown coloured indications											
Seizing Marks/ Sliding Wear	Cold welding on fitting surfaces/ turning marks											
Hot Running Damages	Strong discoloration of the stock item. Strong plastic deformation											
Fractures	Huge crackings and scratches											
Explanation: RW = Raceway - Ø / OD = Outside - Ø / B-Ø = Bore - Ø / Face = Face side / Lip = Lip Wall												
Remark: If the bearing is too worn for any refurbishment, we will scrap the bearing four weeks after sending out this report. Please, let us know, if you do not agree!												
Date: .....		Name: 0 .....										

### **5.2.2 Obtención de evidencias fotográficas de las componentes de los rodamientos:**

Para la evaluación de reparación de rodamientos se debe tener evidencias de las fallas o defectos encontrados en sus componentes por tanto se debe disponer de un equipo como una cámara fotográfica que registre imágenes con buena resolución y características especiales que logré mostrar en detalle el defecto localizado con el fin de identificarlo y presentarlo en el reporte al cliente y explicarle el diagnóstico a función al respectivo análisis de falla.

En las fotografías tomadas no debe reflejarse las imágenes de otras componentes cercanas que puedan alterar la tonalidad del acero donde se haría difícil identificar por ejemplo un desgaste superficial en la zona de carga de la pista externa del aro exterior afectado por la proximidad del rodillo de la chancadora terciaria HPGR según se muestra en la siguiente figura Fig. N°5.4



Fig. N° 5.4 Fotografía de un rodamiento con el reflejo de otra componente mecánica.

Para el proceso de obtención de buenas imágenes localizadas de cada defecto encontrado se deberá desarmar con criterio las componentes del rodamiento para identificar claramente la posición exacta de trabajo especialmente la del aro exterior y entender como ha estado sucediendo el desgaste durante su funcionamiento; durante el desarme se debe tener en cuenta lo sgte.:

- Marcar con lapicero corrector blanco la posición de apoyo sobre la base del aro exterior.
- Para cada posición según marcación del sentido horario retirar cuidadosamente 2 elementos rodantes contiguos en cada pista según posición 3 horas.
- Realizar lo mismo con el lado opuesto del aro interior, para equilibrar el contrapeso de la otra mitad de los elementos rodantes a las 9 horas.
- Este procedimiento se realiza con la intención de evitar la caída por desequilibrio de masa de los elementos rodantes.
- Considerar que cada elemento rodante pesa aproximadamente 20 Kg. entonces la caída de ellas puede afectar la integridad de la persona.
- Este proceso de retiro de elementos rodantes se debe continuar girando sucesivamente el aro interior y se termina cuando en el punto de apoyo del rodamiento queda sólo 04 elementos rodantes.
- Sobre estos últimos elementos rodantes se soporta todo el peso remanente del aro interior y la jaula maciza de latón las cuales mantendrán armada la estructura del rodamiento. Al respecto se

puede observar en la siguiente figura Fig. N°5.5 esta condición del desarme parcial del rodamiento con los elementos rodantes en una mesa.



Fig. N°5.5 Desarme parcial del rodamiento para inspección de sus componentes.

### **5.2.3 Análisis de los principales daños en los rodamientos:**

Una vez definido los criterios para manipulación segura de las componentes de los rodamientos y sus requerimientos para la evidencia fotográfica de los daños localizados, se procede a describir las imágenes más importantes registradas con sus defectos más notorios.

De acuerdo a la Tabla N°5.1 se realizará esta descripción según identificación de su número de serie y su orden que se muestra en esta tabla, el cual está en función de su localización física de acceso en el taller de reparación de acuerdo a la figura Fig. N°5.3.

### 5.2.3.1 Rodamiento N° SNB61:



Fig. N°5.6 Rodamiento de N° de serie SNB61 grabado en lateral de aro interior.



Fig. N°5.7 Marcas de corrosión de contacto en asiento de aro exterior, debido a desgaste en superficies por ajuste.



Fig. N°5.8 Desgaste normal y marcas de indentaciones suaves en pista de aro exterior debido a ingreso de contaminantes sólidos por obturación insuficiente.

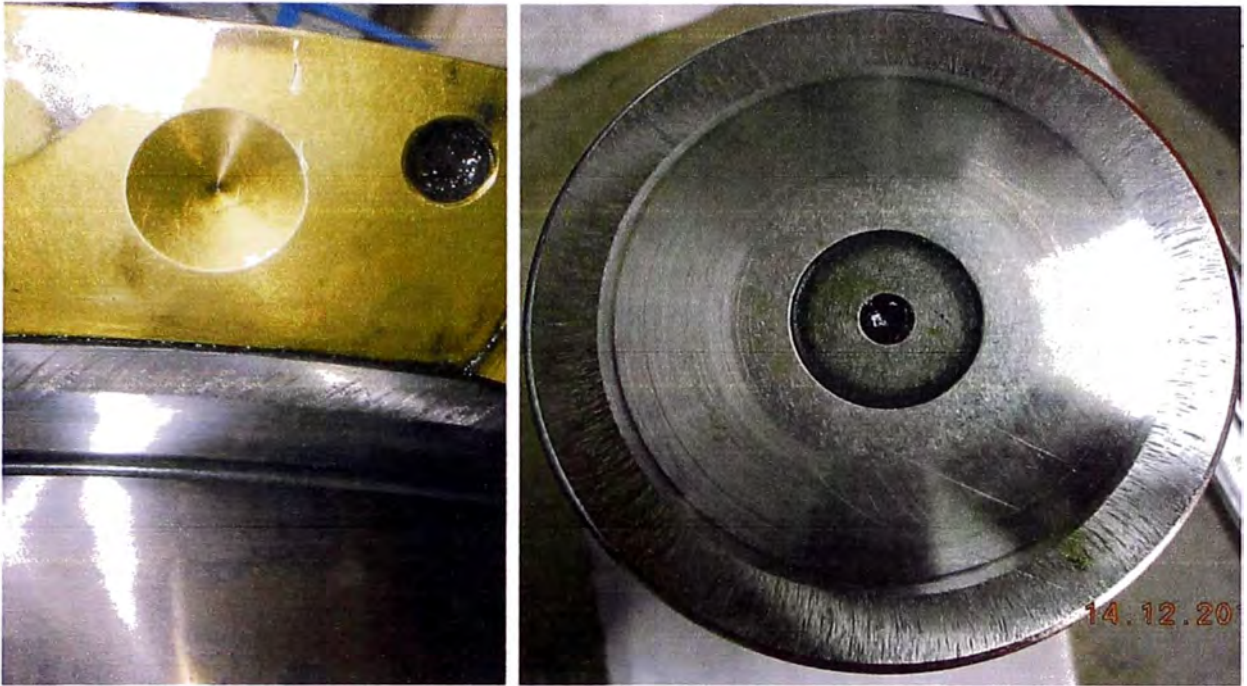


Fig. N°5.9 Rayas de desgaste en lateral de labio central de pista por atascamiento de rodillos debido a sobregiro de rodillo y deficiente lubricación y/o cargas elevadas.



Fig. N°5.10 Marcas de indentaciones suaves en rodillos y desgaste en bordes de alvéolo de jaula debido a deficiente lubricación.



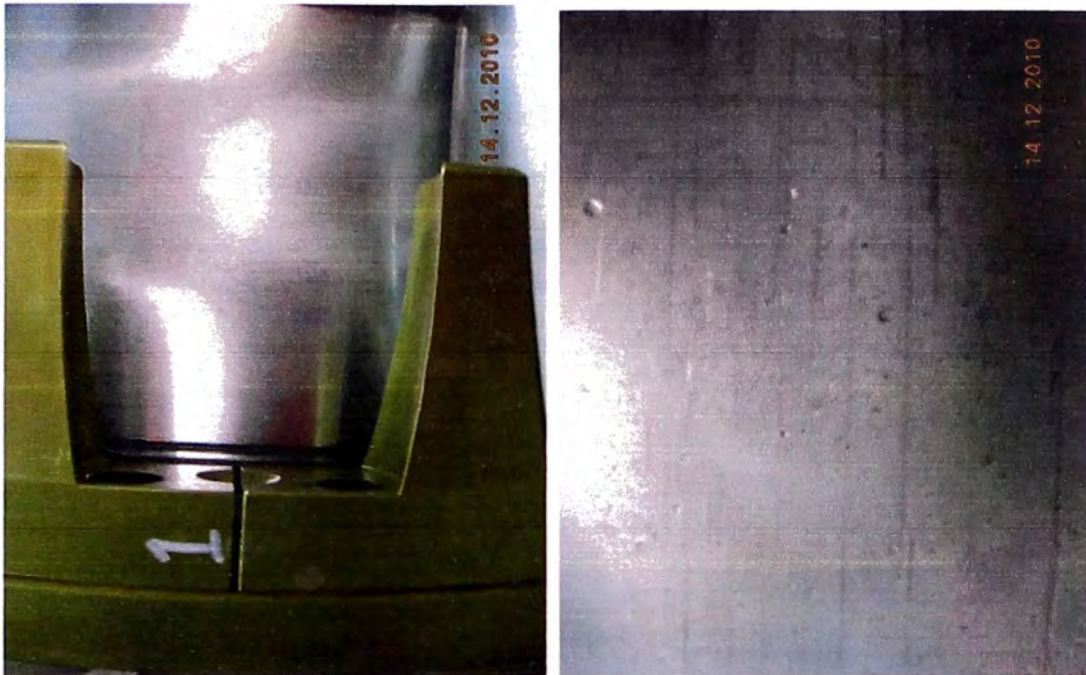


Fig. N°5.11 Desgaste normal por contacto de rodillos e indentaciones suaves en pista de aro interior debido a exceso de carga y contaminación respectivamente.

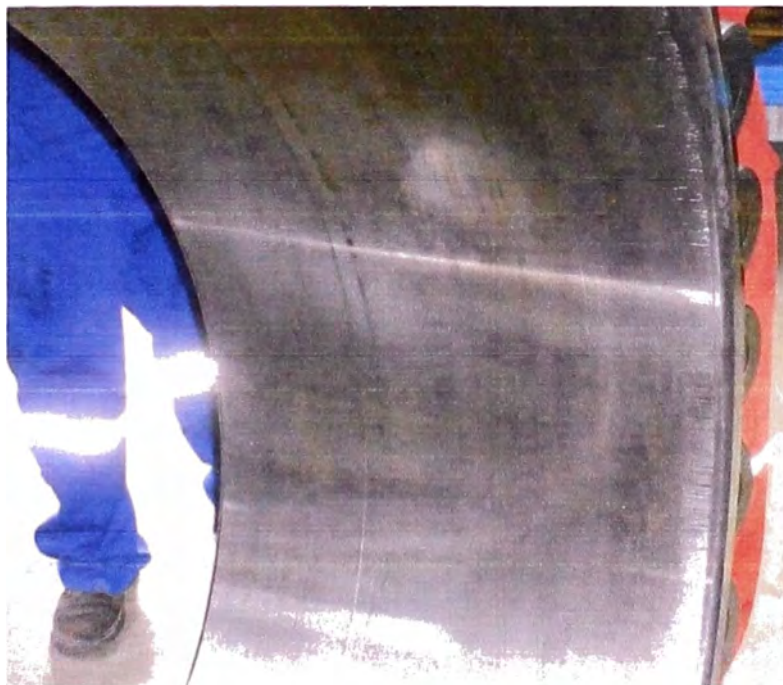


Fig. N°5.12 Oxidación de contacto localizada en diferentes zonas de agujero interior por ajuste deficiente y pequeñas rayas en su borde debido a manipulación en desmontaje.

### 5.2.3.2 Rodamiento N° SND1:

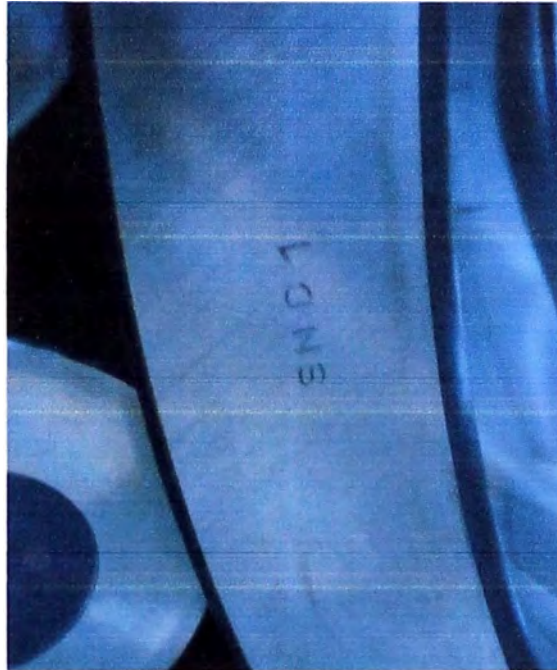


Fig. N°5.13 Rodamiento de N° de serie SND1 grabado en lateral de aro interior.



Fig. N°5.14 Oxidación de contacto en asiento de aro exterior y verificación de severidad con paso de lija suave sobre superficie dañada.



Fig. N° 5.15 Desgaste en zona de carga y corrosión contacto "Standstill" en pista exterior debido a humedad.



Fig. N°5.16 Desgaste por rozamiento de alvéolo de jaula y marca de oxidación de contacto "standstill".



Fig. N°5.17 Desgaste con rayas laterales por exceso de carga axial debido a atascamiento de rodillo en borde de labio central e indentaciones suaves en jaula.

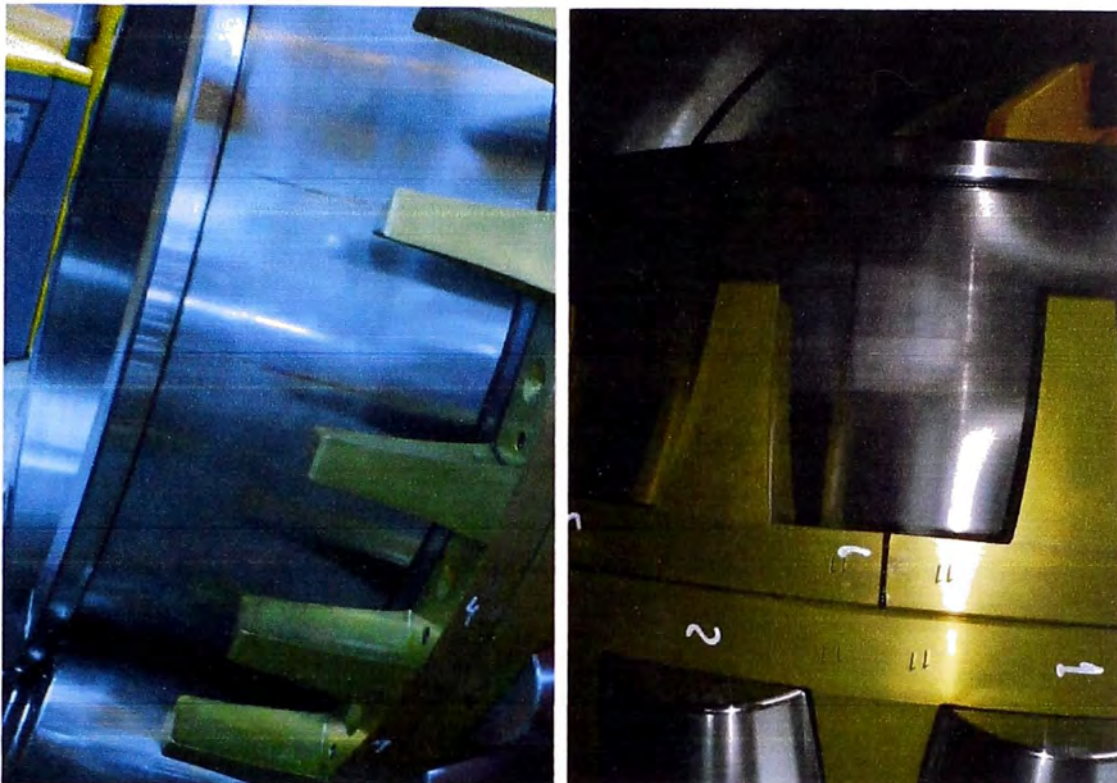


Fig. N°5.18 Marcas de oxidación de contacto "standstill" en pista de aro interior y desgaste con superficie brillante por contacto a presión de rodillo por sobrecarga.

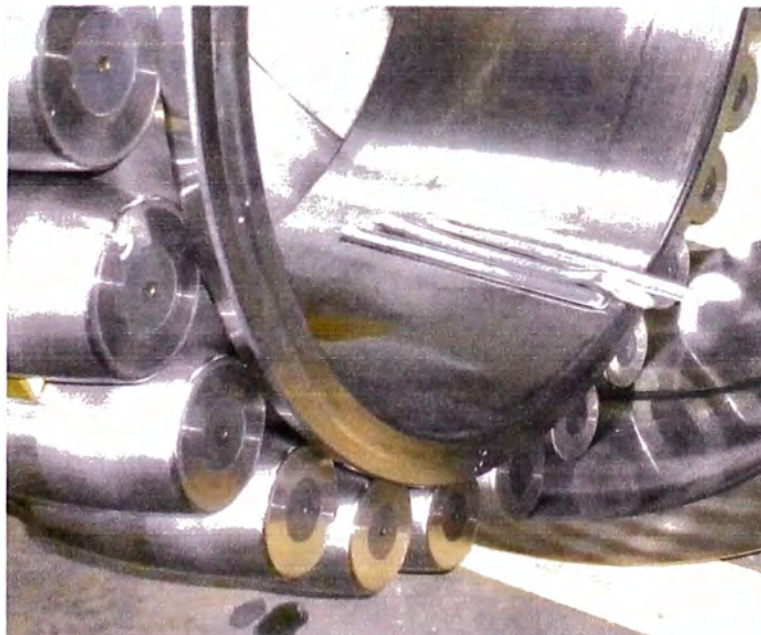


Fig. N°5.19 Desgaste según huella circular localizada en agujero por posible deslizamiento mínimo del aro interior en eje.

### 5.2.3.3 Rodamiento N° SNE4:

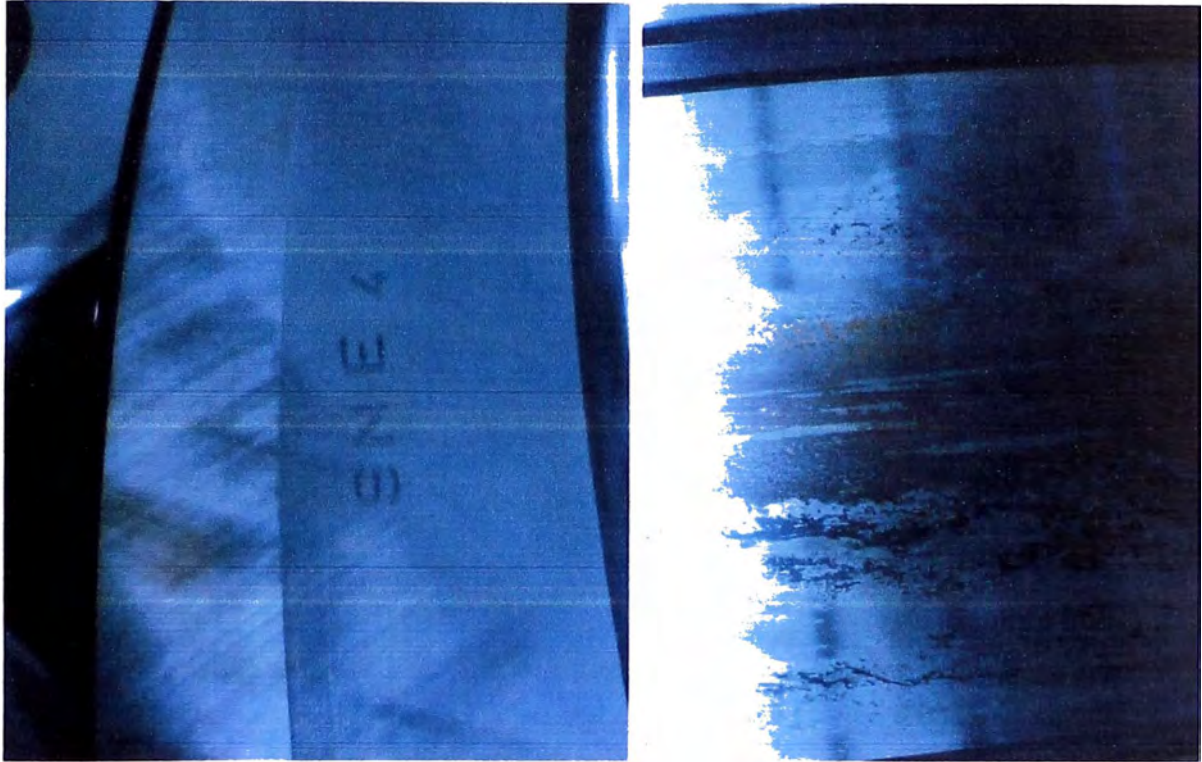


Fig. N°5.20 Rodamiento de N° de serie SNE4 grabado en lateral de aro interior.

Fig. N°5.21 Corrosión de contacto en asiento aro exterior por ajuste deficiente.

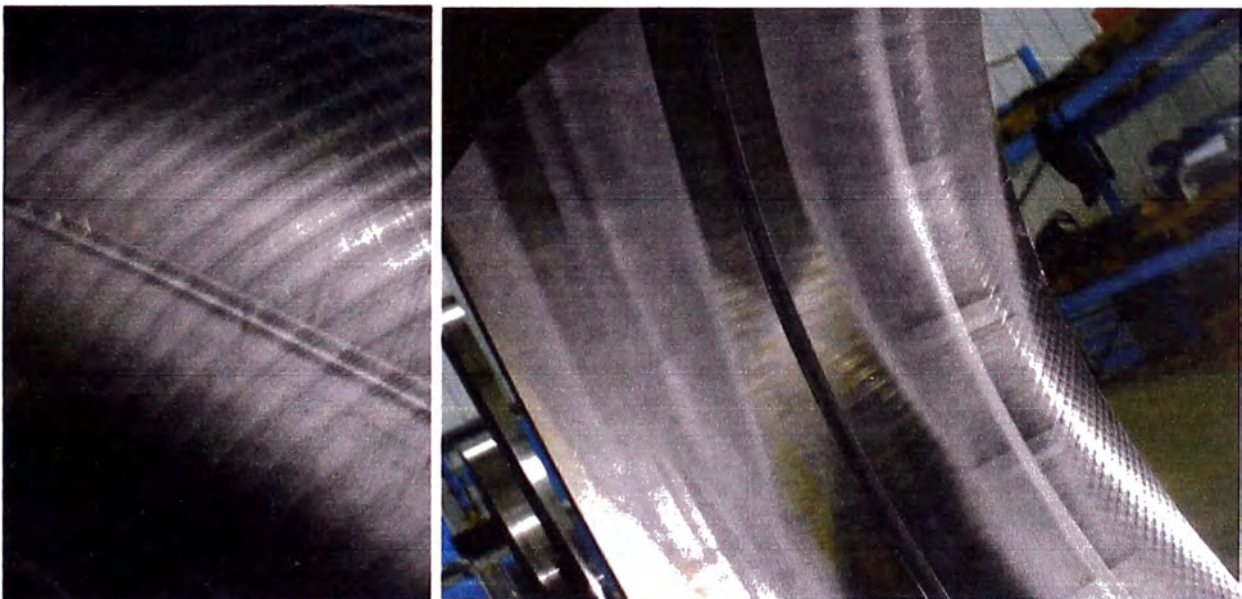


Fig. N°5.22 Desgaste uniforme (huellas cruzadas) al nivel de rectificado más intensa y mejor formadas en zona de carga de pista de aro interior.

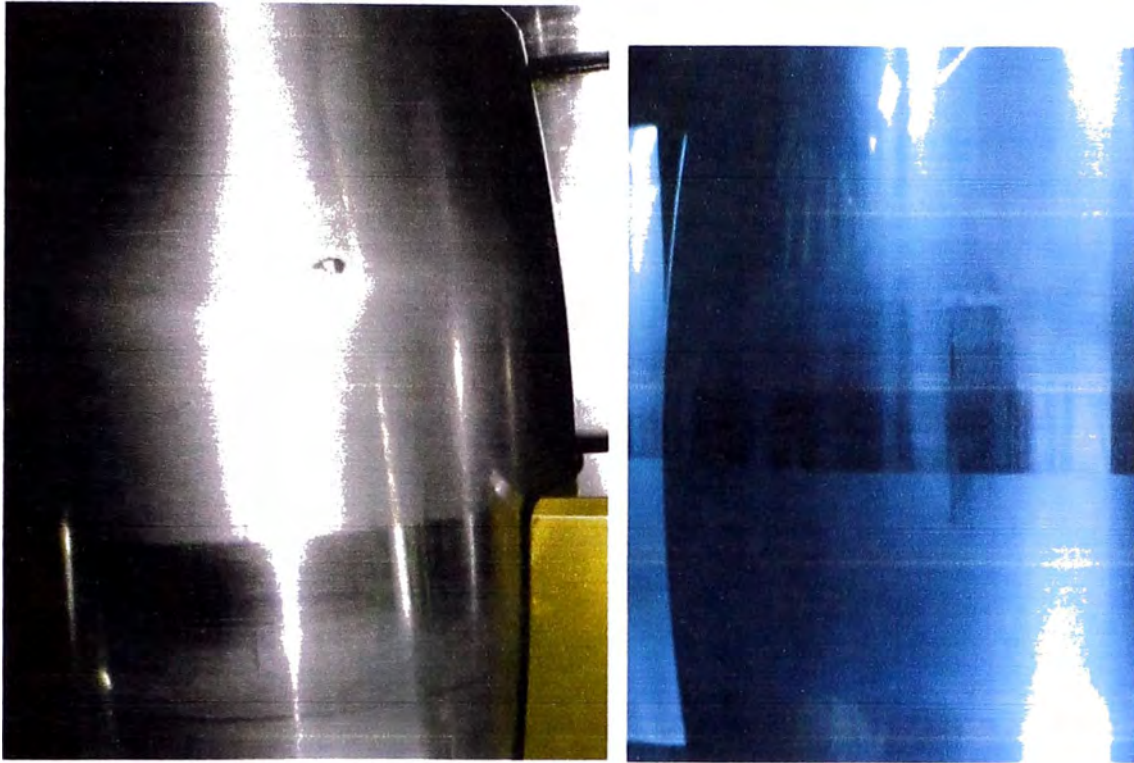


Fig. N°5.23 Indentaciones profundas en rodillos y huellas de desgaste en superficie de contacto de rodillo y alvéolos de jaula respectivamente.

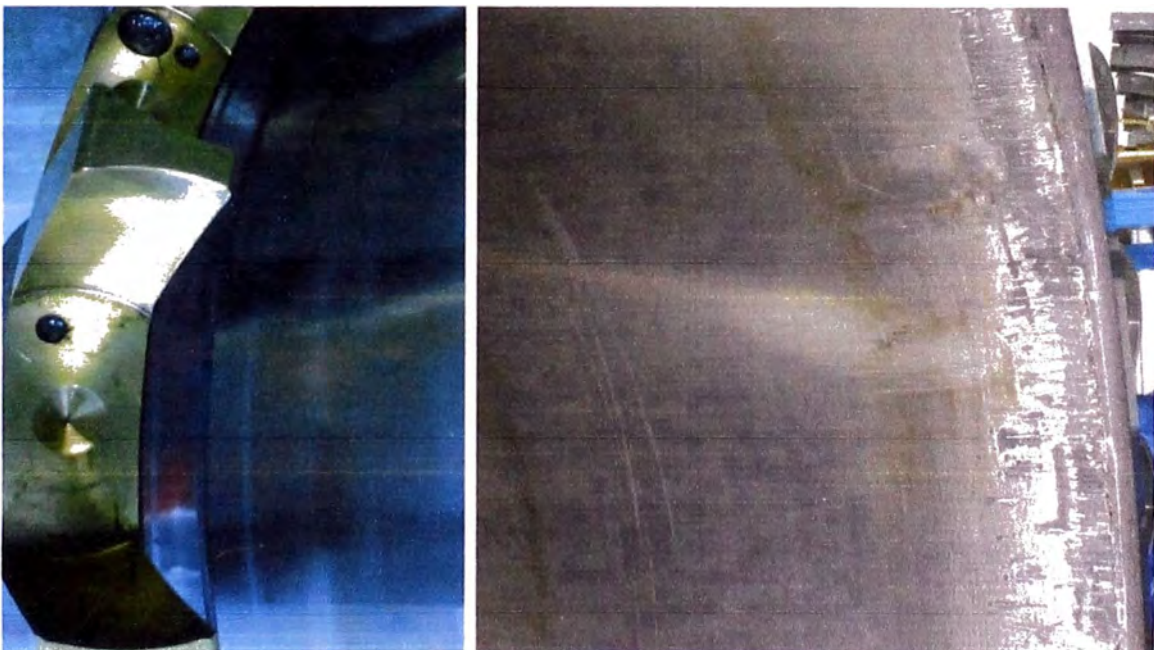


Fig. N°5.24 Desgaste por rodadura en pista de aro interior y huellas de contacto en alvéolo.

Fig. N°5.25 Corrosión de contacto mínimo y surcos en borde de agujero debido a ajuste y atascamiento en procesos de desmontaje.

#### 5.2.3.4 Rodamiento N° SND28:



Fig. N°5.26 Corrosión por contacto en diferentes posiciones (giro relativo) sobre asiento de aro exterior debido a ajuste deficiente (desgaste en alojamiento).



Fig. N°5.27 Huella de desgaste central de rodadura dejado en pista de aro exterior.



Fig. N°5.28 Indentaciones suaves y desgaste por contacto con jaula y lubricación deficiente.



Fig. N°5.29 Desgaste en arista de labio central de pista por carga axial excesiva de rodillo.



Fig. N°5.30 Desgaste en borde de alvéolos de jaula por lubricación deficiente.



Fig. N°5.31 Huella de desgaste normal con indentaciones suaves en pista de aro interior.



### 5.2.3.5 Rodamiento N° SND4:



Fig. N°5.32 Número de serie SND4 grabado en lateral de aro interior.



Fig. N°5.33 Corrosión de contacto en asiento de aro exterior por ajuste deficiente.

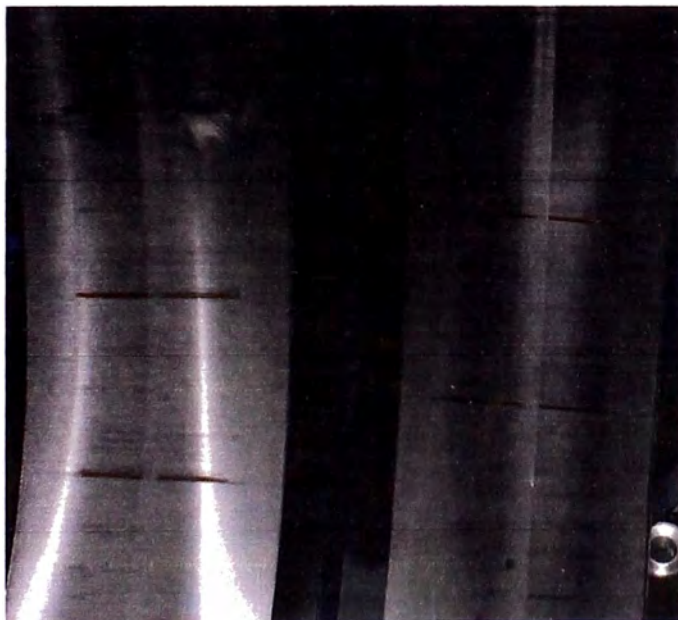


Fig. N°5.34 Desgaste leve y marcas de oxidación por humedad en pista de aro exterior debido a parada prolongada.



Fig. N°5.35 Indentaciones suaves y marca frontal de corrosión de contacto en rodillo por humedad.



Fig. N°5.36 Indentaciones suaves y superficie brillante con marca de corrosión por contacto "standstill".



Fig. N°5.37 Desgaste lateral en arista de labio central de pista por contacto de atascamiento de rodillo (sobregiro).



Fig. N°5.38 Marcas circunferenciales debido a microgiro por desgaste de superficie de agujero de aro interior respecto de eje.

### 5.2.3.6 Rodamiento N° SND35:



Fig. N°5.39 Número de serie SND35 grabado en lateral de aro exterior.



Fig. N°5.40 Corrosión por contacto en asiento de aro exterior debido ajuste deficiente.



Fig. N°5.41 Marcas de óxido por paradas a la distancia entre rodillos



"standstill" debido a humedad en zonas de contacto.

Fig. N°5.42 Desgaste en zona de carga y ligera huella lineal de óxido



por humedad en parada prolongada.



Fig. N°5.43 Desgaste uniforme en rodillo con marca de rozamiento con jaula.



Fig. N°5.44 Desgaste en borde de jaula debido a contaminación y lubricación deficiente.



Fig. N°5.45 Indentaciones y corrosión por contacto en pista (standstill) debido a humedad.

Fig. N°5.46 Marcas lineales en agujero de aro interior por maniobras en desmontaje.

### 5.2.3.7 Rodamiento N° SND18:



Fig. N°5.47 Número de serie SND18 grabado en lateral de aro interior.

Fig. N°5.48 Corrosión localizada en asiento de aro exterior debido a ajuste inadecuado.



Fig. N°5.49 Desgaste normal en zona de carga de pista de aro exterior.

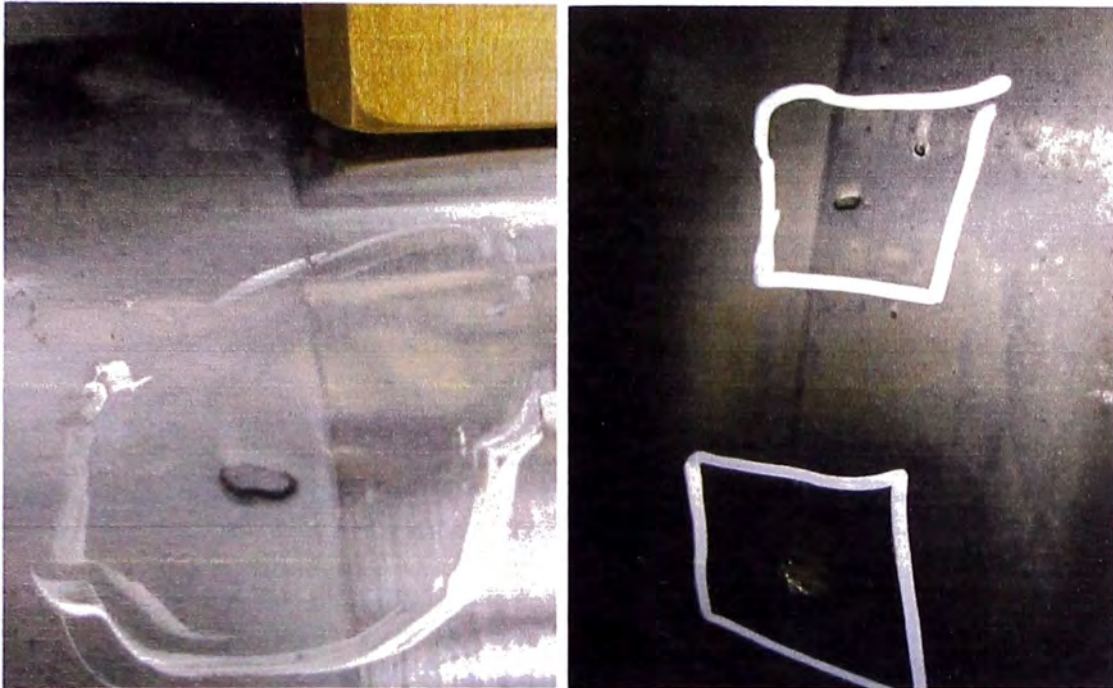


Fig. N°5.50 Indentación mediana en rodillo y fatiga en forma de desconchado en pista de aro interior por contaminación de partícula dura.



Fig. N°5.51 Desgaste con indentaciones (huellas medianas) en pista de aro interior.

Fig. N°5.52 Exfoliación e indentación severa en pista de aro interior por penetración de contaminante.



Fig. N°5.53 Desgaste con formación de óxido en agujero con microgiro en asiento de eje.

#### 5.2.3.8 Rodamiento N° SNE8:



Fig. N°5.54 Número de serie SNE8 grabado en lateral de aro exterior.



Fig. N°5.55 Oxidación de contacto (fretting corrosion) en varias locaciones de asiento de aro exterior por microgiros en alojamiento.

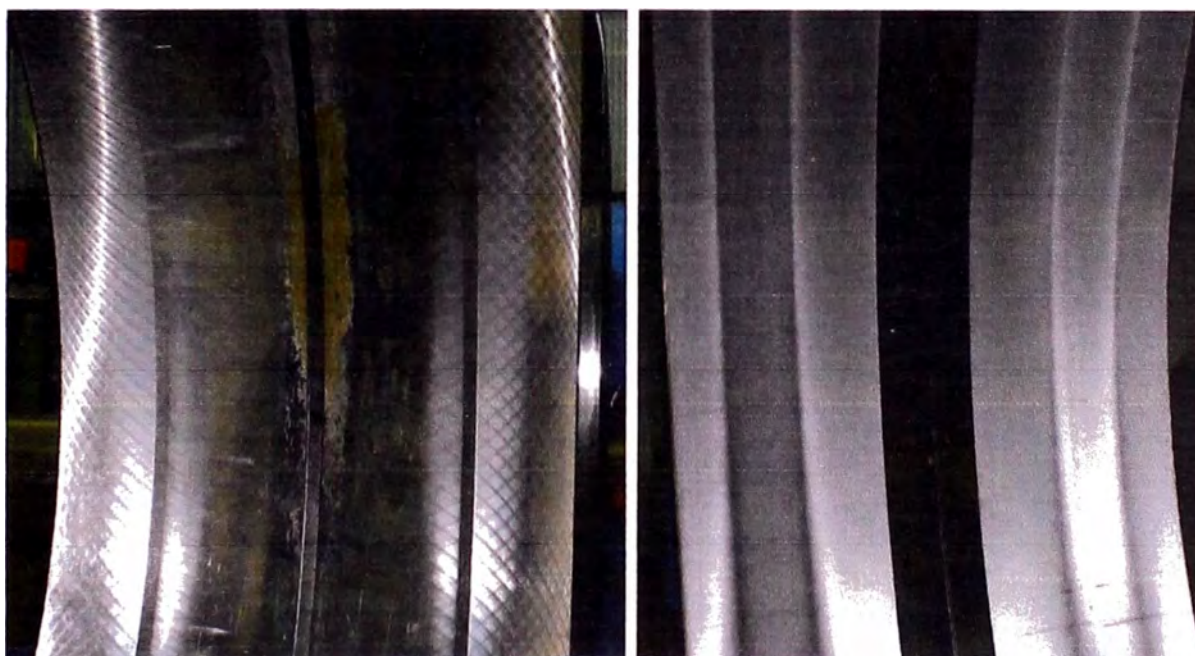


Fig. N°5.56 Desgaste con huellas de rectificado en pista de aro exterior (forma escamada y continua en zona cargada) y pequeña decoloración (óxido) por deposición de humedad.



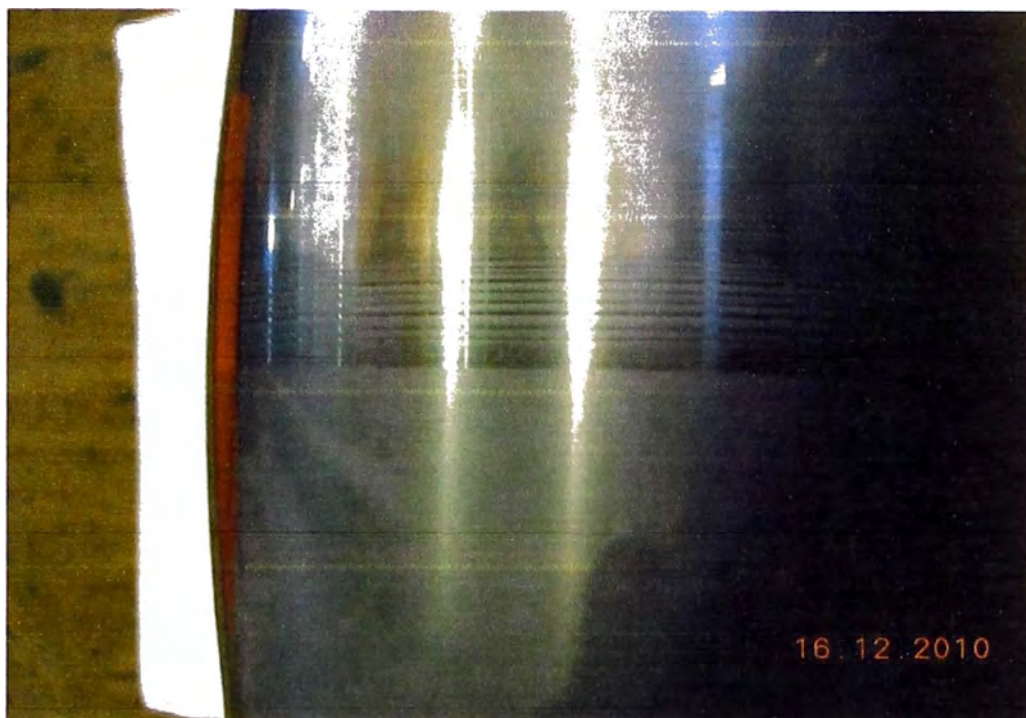


Fig. N°5.57 Marca de desgaste en rodillo por lubricación deficiente y contacto excesivo con alvéolo de jaula.

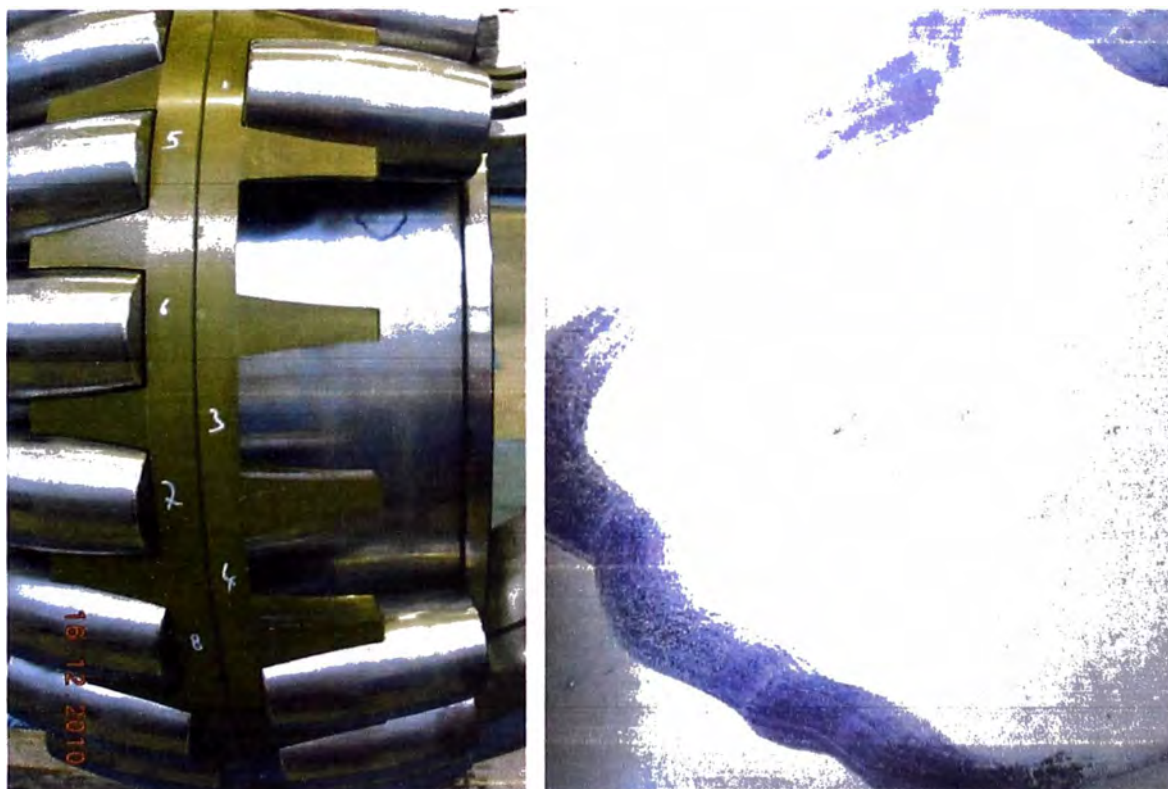


Fig. N°5.58 Indentación moderada en pista de aro interior por contaminación.

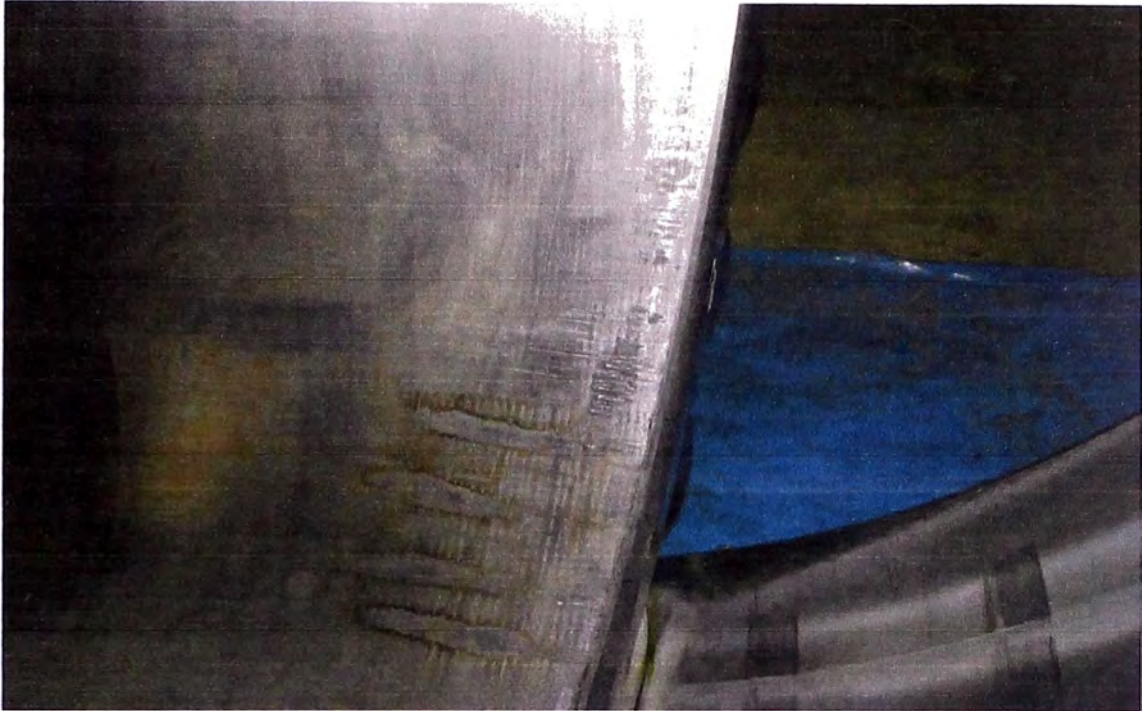


Fig. N°5.59 Huellas de corrosión por deposición de humedad debido a interferencia inadecuada de agujero y eje.

#### 5.2.3.9 Rodamiento N° SND29:

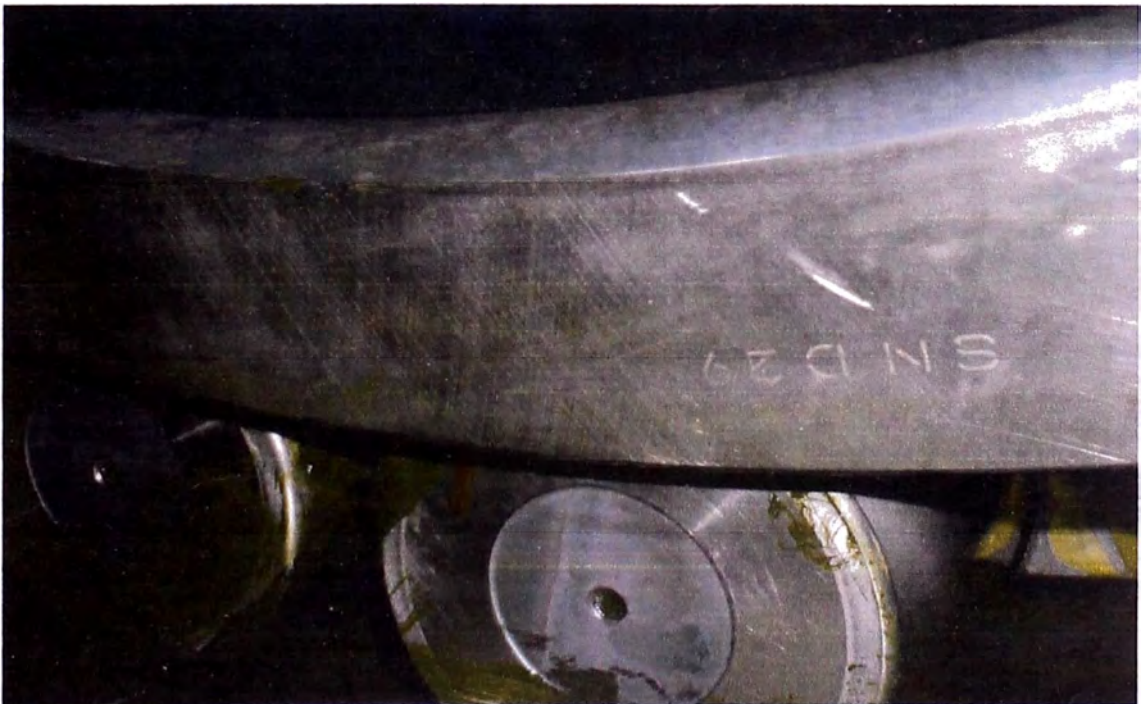


Fig. N°5.60 Número de serie SND29 grabado en lateral de aro interior.

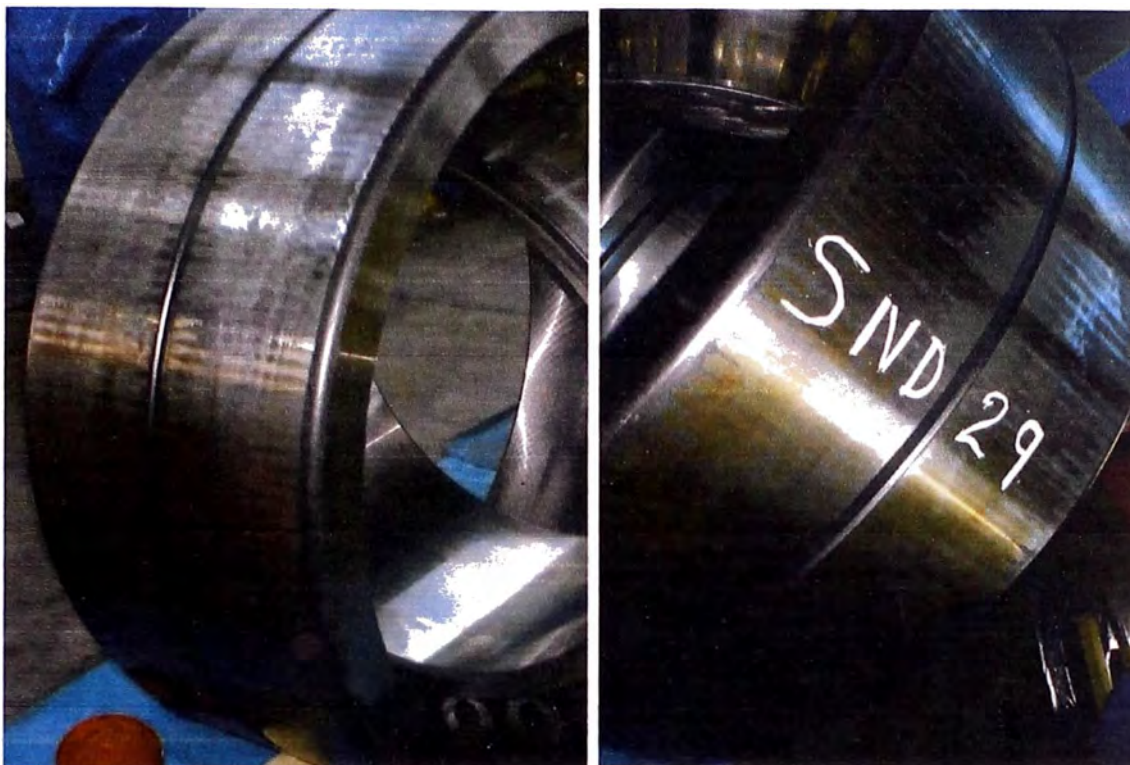


Fig. N°5.61 Corrosión localizada en asiento de aro exterior por mal ajuste.

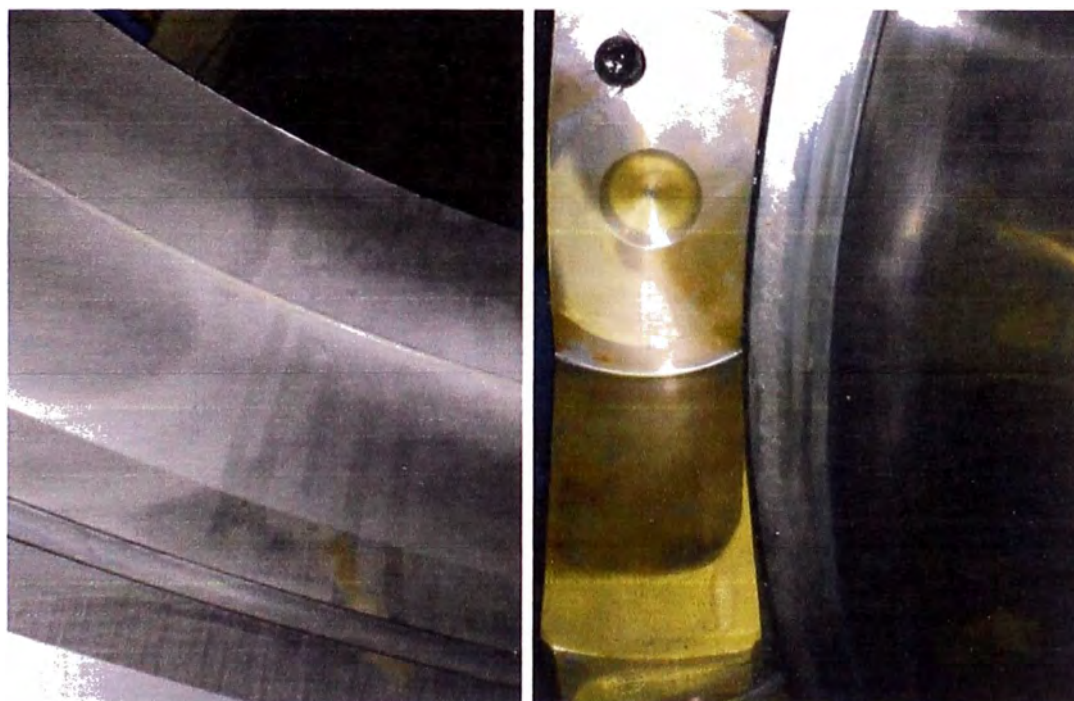


Fig. N°5.62 Desgaste normal en pista de aro exterior.

Fig. N°5.63 Rayas causadas por contacto de contaminación en rodillo con labio central de pista de aro interior.



Fig. N°5.64 Desgaste importante con indentación y marca de corrosión "standstill" en pista debido a humedad en parada.

Fig. N°5.65 Formación de condensado en agujero por interferencia deficiente en ajuste.

#### 5.2.3.10 Rodamiento N° SND576:



Fig. N°5.66 Número de serie SND576 y estado de reparación del rodamiento grabado con lápiz eléctrico en aro exterior.

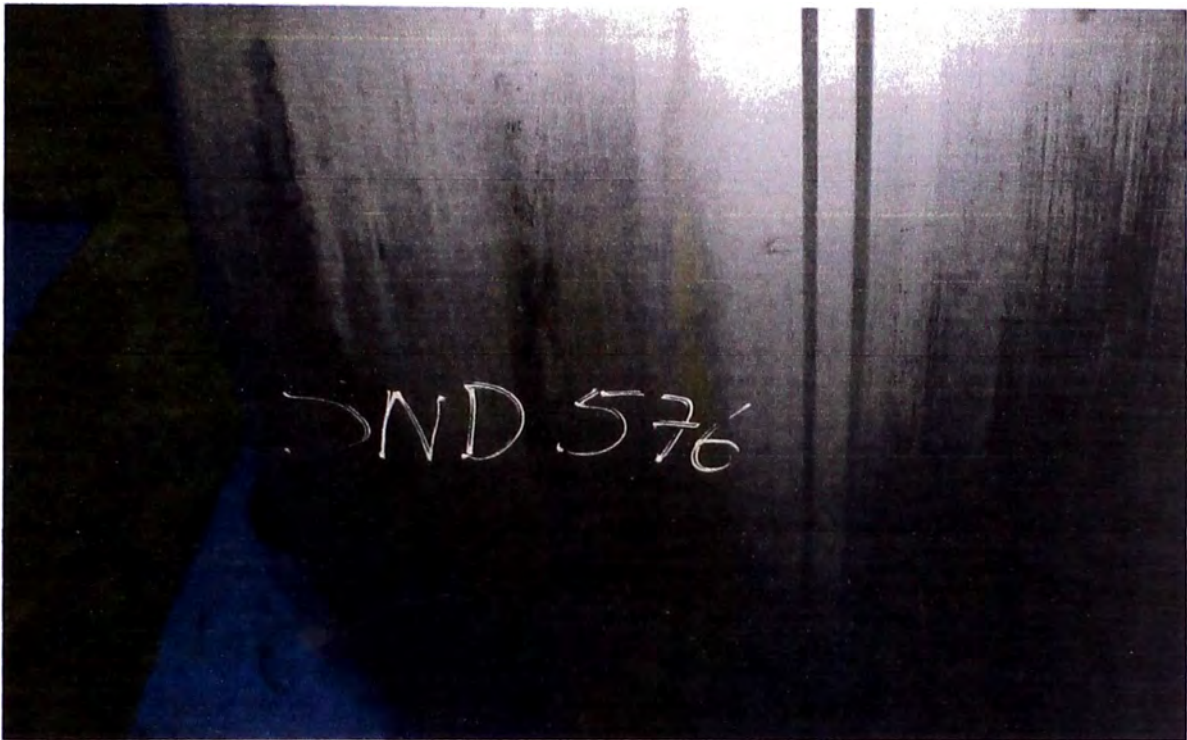


Fig. N° 5.67 Corrosión localizada admisible en asiento de aro exterior.



Fig. N°5.68 Descascarillado de material de pista por fatiga debido a contaminación.

### 5.2.3.11 Rodamiento N° SND2:



Fig. N°5.69 Oxido de contacto en asiento de aro exterior por defecto de ajuste.



Fig. N°5.70 Rayas de rodadura en pista desgastada y estriada en zonas específicas por lubricación deficiente.

Fig. N°5.71 Desgaste con indentaciones en zona de carga.



Fig. N°5.72 Indentaciones suaves y marca de rozamiento con alveolo de jaula debido a lubricación deficiente.

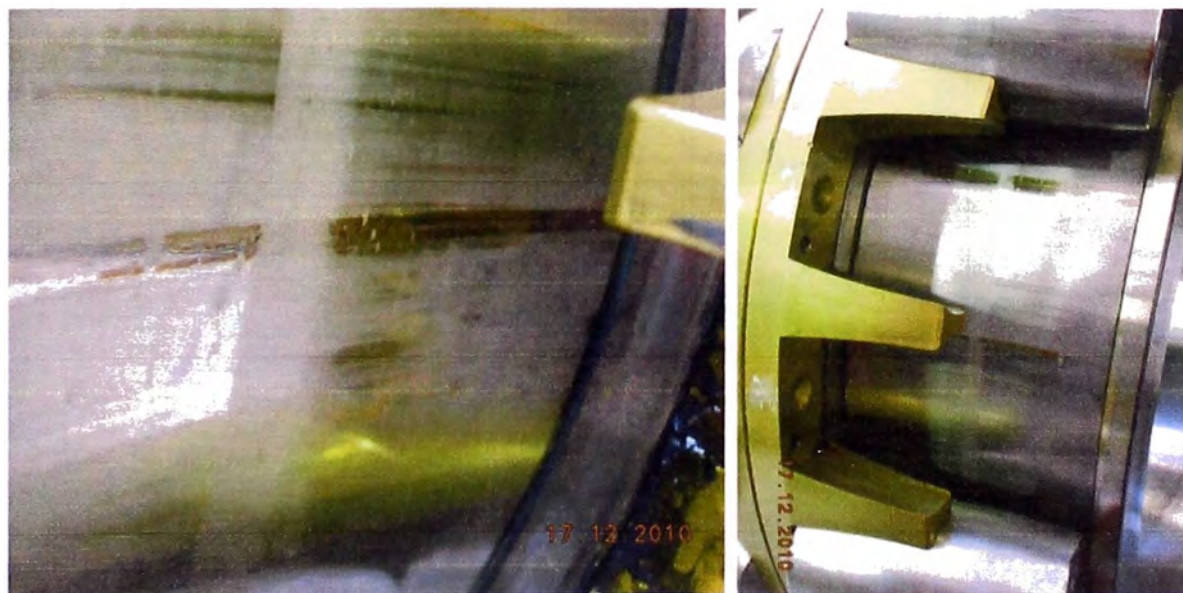


Fig. N°5.73 Rayas sensibles en pista de aro interior debido a vibración de equipo y humedad.



Fig. N°5.74 Marcas de Brinelling y Rayas en pista de aro exterior y rayas en borde de agujero por trabado con eje en desmontaje de rodamiento.

#### 5.2.3.12 Rodamiento N° SND6:



Fig. N°5.75 Número de serie SND6 grabado en lateral de aro exterior.

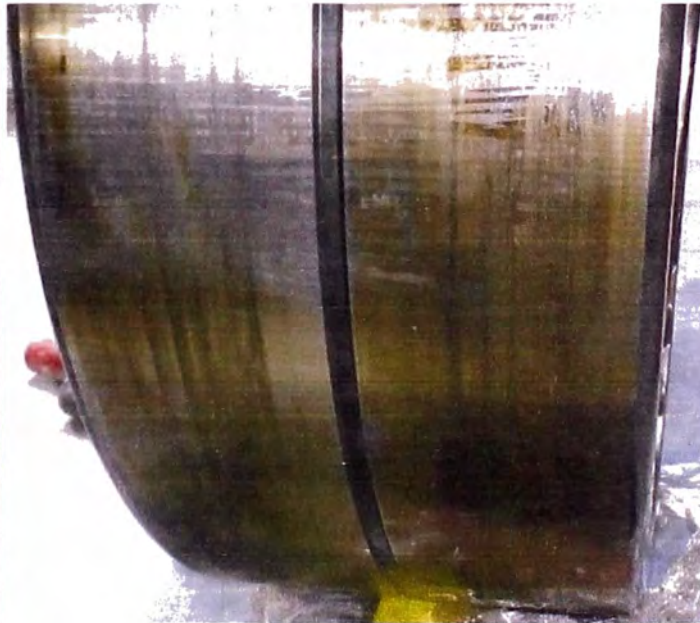


Fig. N°5.76 Corrosión de contacto en asiento de aro exterior por ajuste deficiente.





Fig. N° 5.77 Standstill – Corrosión localizada por contacto de rodillo a distancia de separación por efecto de humedad durante paradas prolongadas.



Fig. N°5.78 Indentaciones suaves en rodillo con marca de desgaste por rozamiento con alvéolo de jaula.

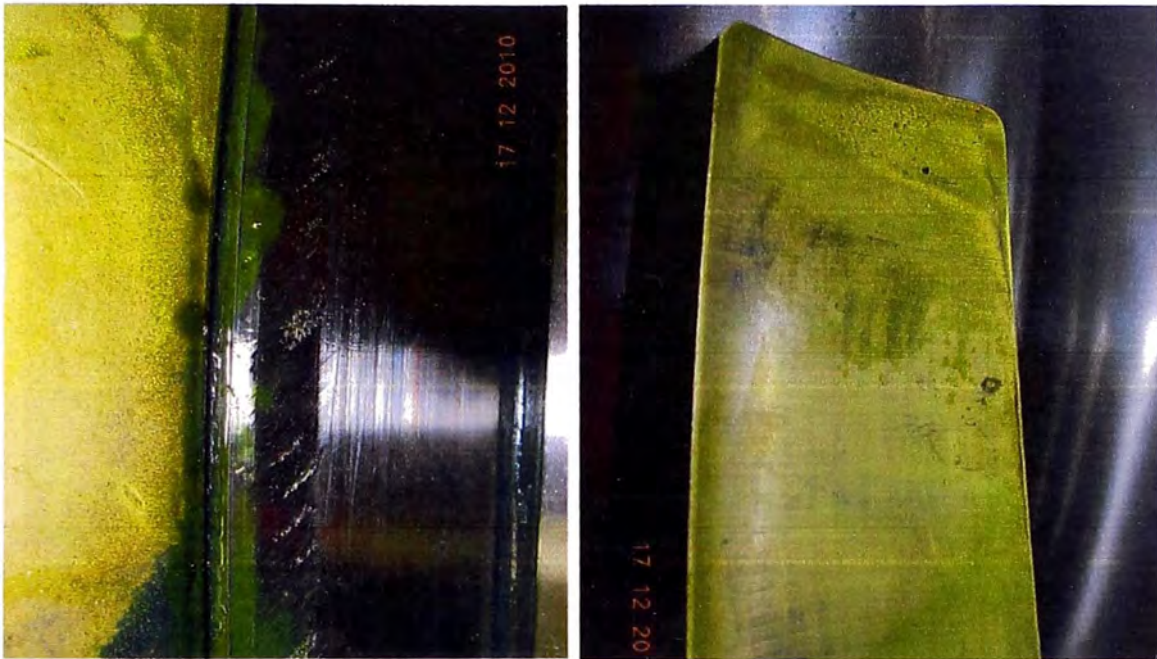


Fig. N°5.79 Desgaste axial en borde de labio central por trabado de rodillo debido a sobregiro (carga excesiva) y lubricación deficiente en alvéolo de jaula.

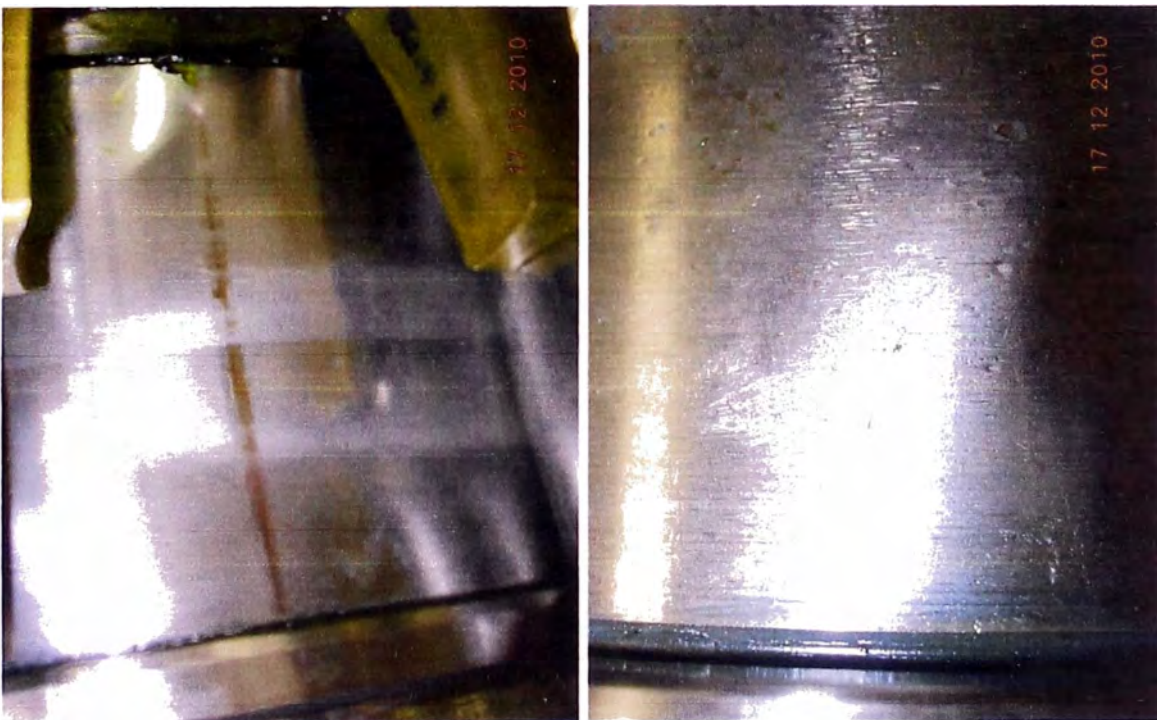


Fig. N°5.80 Formación de corrosión de contacto en pista de aro interior e indentaciones suaves debido a contaminantes y largas paradas.



Fig. N°5.81 Marcas circunferenciales de contacto en agujero debido a microgiro del aro interior en eje.

#### **5.2.4 Comparación de resultados con patrones de daños característicos:**

De la evaluación cualitativa de los rodamientos se identificaron algunos daños importantes y otros leves, estos registros están validados de acuerdo a la clasificación de modos de fallas como evidencias fotográficas según normas ISO 15243 adjuntas en el anexo N°3.

### **5.3 EVALUACIÓN CUANTITATIVA DE LOS RODAMIENTOS DAÑADOS:**

El siguiente paso es la cuantificación del análisis cualitativo de los rodamientos, este proceso consiste en la medición del desgaste total producido entre las superficies de contacto entre el conjunto de los elementos rodantes y la pista de rodadura del aro exterior en determinados puntos según dimensión del rodamiento y la posición de apoyo de la misma, midiendo el juego radial interno remanente a través de las galgas o láminas de diferentes espesores.

La técnica de medición de la reducción del juego interno radial consiste en medir este juego antes y después del montaje, en este caso después del desmontaje del rodamiento, procedimiento usado para rodamientos de tamaño mediano y grande.

Para rodamientos mayores (diámetro interior mayor a 500 mm.), especialmente aquellos con un aro exterior de pared delgada, las mediciones se pueden ver afectadas por la deformación elástica de los aros, a causa del peso del rodamiento o la fuerza requerida para pasar la galga por el espacio entre el camino de rodadura y un rodillo descargado. Para establecer en este caso un juego verdadero basado en 3 puntos se debe realizar el siguiente procedimiento según figura Fig. N°5.82:

- Medir el juego "a" en la posición de las 12 horas de las manecillas del reloj para un rodamiento de pie sin montar, o en la posición de las 6 horas para un rodamiento sobre un eje.
- Medir el juego "b" en la posición de las 9 horas y "c" en la posición de las 3 horas sin mover el rodamiento.
- Calcular el juego radial interno (verdadero) con precisión a través de la semisuma de las 3 medidas a, b y c según fórmula y apoyos sobre bases en 2 puntos (con bloque en "v"), o plano (en piso), o montado sobre el eje:

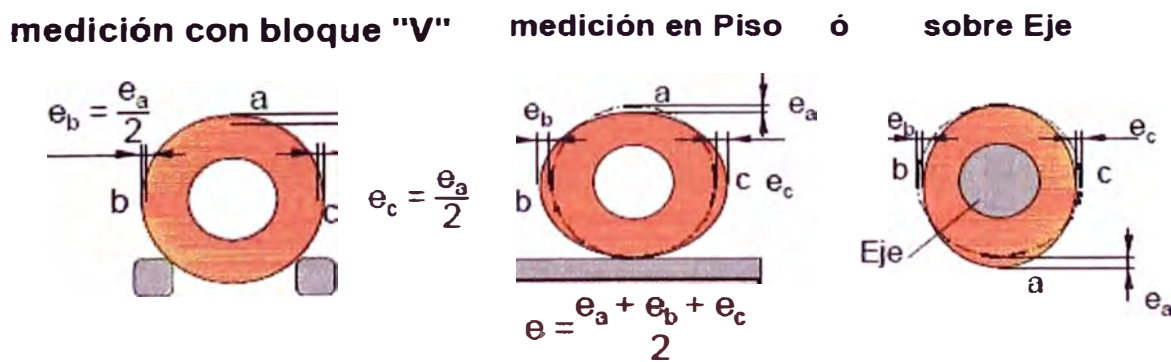


Fig. N°5.82 Métodos de medición del juego radial para rodamientos mayores.

### **5.3.1 Determinación de la profundidad de huellas y marcas en pistas y elementos rodantes:**

Para precisar hasta cuán profundo puede ser aceptable una huella o marca en las superficies de las pistas y elementos rodantes debido al daño o falla encontrada en el rodamiento existe una regla práctica que indica que esta no debe superar el espesor de la uña, entre 200 a 300 micras máximo. Entonces bajo estas condiciones las pistas podrían rectificarse con la intención de recuperar la uniformidad superficial.

### **5.3.2 Obtención de niveles de desgaste de las superficies de las pistas y elementos rodantes:**

De acuerdo a las técnicas de medición del juego radial indicadas a inicios del presente capítulo 5.3, el nivel de desgaste es determinada como la diferencia de la medida del juego radial medido durante la inspección y la tomada como referencia inicial es decir antes del montaje en el eje del equipo o nuevo, el cual debe ser registrada, caso contrario debe ser asumido como la media del rango de juego radial "C3" para tal tamaño, que según indicado en los datos de la hoja de montaje del rodamiento del anexo N°5 este valor está entre 840 y 1070 micras, entonces el valor medio sería 955 micras. Los valores tabulados para cada rodamiento fueron medidos y están indicados en el siguiente capítulo 5.4.

## **5.4 DIAGNÓSTICO DE LOS ESTADOS DE CONDICIÓN DE CADA RODAMIENTO:**

Teniendo los resultados de las inspecciones cualitativas y las mediciones cuantitativas de los daños encontrados durante la inspección visual se procedió a hacer el análisis de falla para encontrar la causa-raíz de cada rodamiento.

#### **5.4.1 Definición de los niveles de reparación de los rodamientos:**

De acuerdo a lo descrito en el capítulo 2.1 sobre los niveles de reparación posibles en rodamientos, durante la presente inspección se verificó que con nivel de desgaste encontrado en cada uno de ellos que casi todos tenían un nivel de reparación del tipo III, esto se detalla en el acápite 5.4.3 en la consolidación de resultados.

#### **5.4.2 Resultados del análisis causa-raíz de cada rodamiento:**

##### **5.4.2.1 Rodamiento N° SNB61:**

- Se observa corrosión de contacto (fretting corrosion) en el asiento del aro exterior (Fig. N°5.7) y agujero del aro interior (Fig. N°5.12), ellas se deben principalmente a problemas de ajuste entre las superficies de contacto (desgaste), así como errores de forma de los asientos.
- Se aprecia marcas de indentaciones en las pistas de rodadura del aro exterior (Fig. N°5.8), aro interior (Fig. N°5.11) así como en los elementos rodantes (Fig. N°5.10), ellas pueden estar relacionadas al ingreso de contaminación sólida externa, el cual afectó también la jaula desgastándola en diferentes zonas debido a una mala obturación o protección del rodamiento.
- La arista del labio central del aro interior posee desgaste en forma de rasguños (Fig. N°5.9) debido a atascamiento de rodillos por entregiro generalmente asociado a suministro deficiente de lubricante y/o cargas elevadas y

ella se refleja en el borde de la cara frontal del elemento rodante (por contacto).

#### **5.4.2.2 Rodamiento N° SND1:**

- La oxidación de contacto es mínimo en general y se observa en el asiento del aro exterior (Fig. N°5.14) con relativa intensidad en una zona pero se puede dilucidar su grado con una lija, asimismo en superficie de agujero de aro interior (Fig. N°5.19) se observa área con estado de desgaste con huellas circunferenciales.
- En la pista de rodadura del aro exterior se aprecia desgaste marcado pero uniforme (Fig. N°5.15), además de manchas de oxidación "standstill" debido a la humedad en los lugares de contacto con los rodillos (Fig. N°5.16) durante paradas prolongadas. En la pista de rodadura del aro interior también se observa reflejado este efecto con más frecuencia en la zona de carga (Fig. N°5.18).
- Indentaciones suaves en los elementos rodantes mínimas y desgaste en jaula pero con influencia importante debido a presencia de marcas de rayado en la arista del labio central del aro interior (Fig. N°5.17), esto por exceso de carga axial asociado a entregiro por el atascamiento de los rodillos con el contaminante

#### **5.4.2.3 Rodamiento N° SNE4:**

- Corrosión de contacto en asiento de aro exterior en muchas zonas (Fig. N°5.21) debido a ajuste deficiente en

superficies de contacto con desgaste así como en el agujero del aro interior (Fig. N°5.25) donde además se observa surcos longitudinales que podría deberse a atascamiento durante maniobras de desmontaje.

- Niveles de desgaste por presión de contacto son normales a moderados, siendo reflejadas con mayor intensidad en la pista de rodadura del aro exterior donde el nivel llega incluso al de rectificado de la pista con huellas entrecruzadas (Fig. N°5.22); asimismo la pista del aro interior muestra en menor escala este desgaste (Fig. N°5.24).
- Se encontró marcas de indentaciones intensas localizadas y de desgaste superficial en el área de contacto de algunos elementos rodantes (Fig. N°5.23) debido a contaminación de partículas sólidas fuertes, el cual se observa reflejado también en alvéolos de jaula

#### **5.4.2.4 Rodamiento N° SND28:**

- Las manchas de corrosión de contacto encontrada en el asiento del aro exterior es casi en toda su superficie (Fig. N°5.26), el cual presenta decoloración marrón – negra y podría deberse a giro relativo del aro sobre el alojamiento por ajuste flojo o desgaste de forma del alojamiento.
- La huella de desgaste por rodadura (presión) en la pista del elemento rodante es uniforme y centralizada (Fig. N°5.27) pero con marcas de indentaciones suaves en



ciertas zonas de la pista del aro interior (Fig. N°5.31) reflejado por la contaminación externa.

- Elementos rodantes poseen desgaste normal por rozamiento con alvéolos de jaula pero con indentaciones en la zona de contacto con la jaula (Fig. N°5.28), esta anomalía se observa reflejada débilmente y en ciertas zonas con desgaste con rayas en aristas de labio central (Fig. N°5.29) pero sin influencia importante.

#### **5.4.2.5 Rodamiento N° SND4:**

- Corrosión de contacto en el asiento del aro exterior (Fig. N°5.33) en varias zonas de contacto debido a ajuste deficiente o error de forma en el asiento. Asimismo huella de contacto por deslizamiento en borde del agujero del aro interior (giro relativo) sobre eje desgastado (Fig. N°5.38).
- Desgaste normal a leve por rodadura en pista de aro exterior (Fig. N°5.34), además de indentaciones mínimas en elementos rodantes; siendo la formación de marcas de óxido por humedad debido a paradas prolongadas "standstill" la principal causa de corrosión lineal producido en las pistas externa e interna (Fig. N°5.36) y algunos elementos rodantes con desgaste por contacto con jaula (Fig. N°5.35).
- Marcas de desgaste (huellas de rayas) en arista de labio central del aro interior por contacto y atascamiento de

rodillos en la rodadura debido a entregiro, exceso de carga axial (Fig. N°5.37)

#### **5.4.2.6 Rodamiento N° SND35:**

- Óxido de contacto en asiento de aro exterior (Fig. N°5.40) formándose una zona definida que sería la de carga pero con marcas en diferentes posiciones paralelas que podría deberse a giro relativo respecto del alojamiento. Asimismo se encontró marcas de rayas en borde de agujero del aro interior (Fig. N°5.46) por maniobras en desmontaje.
- Se aprecia desgaste moderado con formación de zona de carga en pista de rodadura del aro interior (Fig. N°5.42). Asimismo aparición de marcas de óxido debido a humedad retenida en zona de contacto por paradas prolongadas (standstill) en pistas de aro interior (Fig. N°5.45 y Fig. N°5.41) y algunos elementos rodantes (Fig. N°5.43).
- De lo anterior el desgaste por corrosión (standstill) reflejado por contacto en los rodillos (Fig. N°5.45), así como también se percibió un desgaste excesivo con juego radial elevado entre las jaulas y los rodillos en consecuencia la caída de alguna de ellas durante el manipuleo de ellas (Fig. N°5.44)

#### **5.4.2.7 Rodamiento N° SND18:**

- Corrosión de contacto en asiento de aro exterior en casi toda su superficie (Fig. N°5.48) así como formación de

óxido localizado similar a gripado debido a giro relativo del aro interior sobre eje (Fig. N°5.53).

- Pista de aro exterior con desgaste de ciertas marcas moderadas de nivel de rectificado (entrecruzado) y casi brillante de forma asimétrica especialmente en zona de carga (Fig. N°5.49)
- Desgaste con nivel de indentaciones severas en algunas zonas de pistas de aro interior (Fig. N°5.50) e incluso con pérdida mayor de material en forma de desconchado en pista interior por contacto de elemento rodante con surco de profundidad más de lo permitido (Fig. N°5.52), por lo que no es económico su reparación siendo atribuido tales desgastes al ingreso de contaminantes.

#### **5.4.2.8 Rodamiento N° SNE8:**

- Formación de óxido de contacto en diferentes locaciones de asiento del aro exterior debido a ajuste deficiente y giro relativo del alojamiento (Fig. N°5.55) por desgaste en su forma. Asimismo en alguna posición del agujero del aro interior se encontró concentración de humedad cerca de borde debido a eje con errores de forma.
- Huellas de óxido formado aparentemente en la parte más baja de pista de aro exterior, junto con desgaste elevado de la superficie al nivel de rectificado (Fig. N°5.56), en otra posición de la misma pista se presenta desgaste uniforme centralizado. Asimismo en pista del aro interior

se nota desgaste localizado e indentación moderada con inicio de fatiga por causa de contaminación (Fig. N°5.58).

- Elementos rodantes presentan marca de desgaste por rozamiento con alveolo de jaula debido al ingreso de contaminantes (Fig. N°5.57)

#### **5.4.2.9 Rodamiento N° SND29:**

- Manchas de corrosión por contacto frecuente en asiento de aro exterior (Fig. N°5.61) y huellas paralelas debido a desgaste por deslizamiento (gripado); asimismo formación de humedad en agujero en zona con deficiencia en ajuste o error de forma en el asiento del eje (Fig. N°5.65).
- Pista de aro exterior con desgaste uniforme y marcas de indentación en zona de carga (Fig. N°6.52) generalmente debido a contaminación de partículas sólidas, asimismo en la pista de aro interior incluido formación prematura de marcas de corrosión "standstill" atribuida a la humedad contenida durante alguna parada prolongada (Fig. N°5.64); esta marca de óxido también se refleja en algunos rodillos presentando también indentaciones suaves.
- En el borde del labio central de la pista interior se nota desgaste axial con rasguños y rayas leves (Fig. 5.63) debido principalmente a sobregiro del rodillos por atascamiento (exceso de carga y contaminación).

**5.4.2.10 Rodamiento N° SND576:**

- En general se notó en este rodamiento con corrosión localizada en asiento de aro exterior (Fig. N°5.67) y elevada cantidad de horas operativas presentando problema de descascarillado (exfoliación) de pista de aro exterior debido a fatiga del material por contaminación de partículas sólidas fuertes (Fig. N°5.68).
- En este rodamiento donde fue encontrada esta anomalía no fue necesario medir el juego interno radial ya que económicamente la reparación con cambio de aro exterior no trae ventajas para el usuario

**5.4.2.11 Rodamiento N° SND2:**

- En el asiento del aro exterior se presenta marcas de óxido de contacto (Fig. N°5.69) por ajuste deficiente, asimismo mínimas manchas en agujero donde sí se puede observar rasguños en borde por trabado durante el manipuleo de desmontaje (Fig. N°5.74).
- En la pista del aro exterior se nota rayas axiales sensibles (Fig. N°5.70) con desgaste en forma de estrías al nivel rugoso el cual se formó en zonas específicas de carga e indentaciones suaves debido a lubricación deficiente pues posee dos montajes, en ese sentido se encontró en la parte opuesta desgaste (Fig. N°5.71) con niveles intensos al de rectificado de la superficie (forma cruzada).
- En la pista del aro interior se encontró marcas de corrosión "standstill" (Fig. N°5.73) más intensas que en la

pista del aro exterior donde se entremezcla con las rayas sensibles (Fig. N°5.74). Estas marcas se ven en algunos rodillos con huellas de indentaciones suaves ínfimas (Fig. N°5.72) debido a la contaminación, afectando en el desgaste por contacto con jaula y en la pista de rodadura.

#### **5.4.2.12 Rodamiento N° SND6:**

- Se encontró formación de corrosión de contacto en asiento de aro exterior (Fig. N°5.76) en la mayoría de las zonas por las horas operativas y desgaste por re-uso, asimismo formación de corrosión en borde de pista del aro interior (Fig. N°5.81), ambos debido a errores de forma en el asiento del eje cónico en consecuencia ajuste deficiente en las superficies de contacto.
- Formación de corrosión de contacto longitudinal en pistas de aro exterior por efecto de humedad “standstill” debido a paradas prolongadas (Fig. N°5.77) a distancias entre rodillos, asimismo similares características en pista de aro interior incluido desgaste con indentaciones moderadas (Fig. N°5.80) debido a contaminación.
- Desgaste con rayas en arista de labio central de aro interior (Fig. N°5.79) por causa de contaminación generando atascamiento de rodillos por excesiva carga axial (sobregiro). Asimismo desgaste superficial en rodillo marcado por jaula e indentaciones suaves por ingreso de partículas sólidas (contaminantes).

#### **5.4.3 Consolidación de resultados de la evaluación y recomendaciones asociadas:**

De los resultados cualitativos y cuantitativos obtenidos de la inspección de los rodamientos se construyó una tabla de consolidación de los diagnósticos realizados para cada uno de ellos en función de su número de serie, el número de horas de operación, las condiciones del estado de desgaste encontrado, el juego radial interno y el nivel de reparación recomendada producto de la inspección especializada tal como se muestra en la Tabla N°5.3.

Además de los 2 criterios más importantes tomados en cuenta para decidir la reparación de un rodamiento, se debe considerar el antecedente de su vida operativa es decir los números de horas operativas. Así rodamientos con tiempo de operación entre 2500 y 3500 horas se podría considerar una reparación mínima de un nivel II pero según el daño localizado e identificado como desgaste avanzado se consideró una reparación nivel III por seguridad.

Orden Inspección	Número de Serie	Horas trabajadas	Taller de Ubicación	Condiciones de Desgaste de Componentes	Juego Interno Radial (mm)	Estado
1°	SNB61		Polysius	Labio central axial IR con desgaste Indentaciones suaves Desgaste Fretting corrosión	1,17	Reacondicionable Nivel III
2°	SND1	7493	Polysius	Standstill Indentaciones suaves Buenas condiciones generales Labio central axial IR con desgaste Fretting corrosión	1,025	Reacondicionable Nivel III
3°	SNE 4		Polysius	Indentaciones fuertes Fretting corrosión	0,92	Reusable por menor desgaste pero se recomienda reparación Nivel III
4°	SND28		Polysius	Desgaste Indentaciones suaves Fretting corrosión	0,94	Reacondicionable Nivel III
5°	SND4	7493	Polysius	Fretting corrosión Desgaste leve Standstill Labio central axial IR con desgaste	0,975	Reacondicionable Nivel III
6°	SND35	2459	Polysius	Fretting corrosión Desgaste moderado Standstill Alto juego entre jaula y rodillos	1,015	Buen estado general, pero se recomienda reacondicionar debido a alto desgaste entre jaula y rodillos. (Se caen por peso propio)
7°	SND18	2459	Polysius	Fretting corrosión Desgaste leve Indentaciones medianas Exfoliación severa	1,16	Reparación no recomendable (Pista Interior con exfoliación intensa)
8°	SNE 8	2459	Polysius	Fretting corrosión Desgaste moderado Indentaciones	0,975	Reacondicionable Nivel III
9°	SND576	13261	Polysius	Daño severo en OR	No Necesario	Reparación no recomendable (Descascarillado en Pista Externa).
10°	SND29	2459	Polysius	Fretting corrosión Desgaste alto	1,175	Reacondicionable Nivel III
11°	SND2	7493	Cerro verde	Fretting corrosión Indentaciones Rayas sensibles	1,09	Reacondicionable Nivel III
12°	SND6	7493	Cerro verde	Fretting corrosión Standstill Indentaciones Labio central axial IR con desgaste	1,05	Reacondicionable Nivel III

Tabla N° 5.3 Consolidación de resultados de inspección sobre condición de reparación



## **5.5 OBTENCIÓN DE LOS COSTOS DE REPARACIÓN Y EL PLAN DE EJECUCIÓN DEL PROYECTO:**

Los costos de la reparación están establecidos de acuerdo al nivel de reacondicionamiento o remanufactura establecido como factible según la inspección realizada a los 12 rodamientos. Pero de acuerdo a la decisión final del usuario esta cotización por el servicio de reparación podría variar según siguientes casos:

- Si el rodamiento tiene un nivel de reparación factible pero el usuario decide no realizarlo sea por motivos económicos o técnicos, entonces se procederá a cobrar por el costo de la inspección realizada.
- Si el rodamiento no tiene posibilidades de reparación según inspección realizada por los especialistas locales, entonces el usuario deberá también pagar por el servicio realizado por concepto de la evaluación técnica de la reparación.
- Si el rodamiento tiene un nivel de reparación factible y el usuario acepta las condiciones de la cotización según evaluación de la inspección local realizada, entonces no se cobrará la inspección local debido a que se considerará incluido como parte del costo de reparación recomendada por fábrica.

### **5.5.1 Obtención de los costos del proyecto de reparación:**

Para la obtención de los costos de inspección local especializada y de reparación del paquete de rodamientos se considerará cotización en moneda extranjera dólares según transacción financiera requerida por la contabilidad de las 2 compañías transnacionales con representaciones locales: el cliente minero y el fabricante de los rodamientos, asimismo según acuerdos mutuos llegados para el pago de cargos por transferencia monetaria.

La propuesta económica realizada al usuario por el concepto de inspección especializada de 12 rodamientos de 3040 Kg., localizados en 2 talleres distintos, uno en el puerto de Matarani y otra a 1 hora de la ciudad de Arequipa, y para ser llevada a cabo por 3 personas, con un tiempo de duración de 5 días es mostrada en las cotizaciones de la figura Fig. N°5.83 y tiene un valor de aprox. US\$ 12725, cuyos costos detallados están basados en el análisis de la Tabla N°5.4.

**Cot P80277-09-10.**

Fecha: 22 de Septiembre de 2010

Señoras: \_\_\_\_\_

Rut: \_\_\_\_\_

Dirección: \_\_\_\_\_ Tel.: \_\_\_\_\_

Contacto: Sr. \_\_\_\_\_ Fax: \_\_\_\_\_

Ref.: Requerimiento de cotización Q1027203 E-mail: \_\_\_\_\_

Item	Descripción	Cant.	Valor US	Total US
1	<b>SERVICIO DE INSPECCION DE RODAMIENTOS HPGR PARA DEFINICION DE NIVELES DE REACONDICIONAMIENTO.</b>  <b>Servicio considera:</b> > Se inspeccionarán los 9 rodamientos según N° de series entregados por SCM Cerro Verde. > 3 Ingenieros especialistas del área de rodamientos > Desarme parcial de rodamientos > Inspección visual y evaluación según protocolos de fábrica > Herramientas de inspección, metrología y desmontaje de rodamientos. > Se adjunta Protocolo de Inspección > Faenas de 8 hrs. durante 5 días  <b>Requerimientos para el cumplimiento de la programación.</b> > Rodamientos deben encontrarse limpios > Rodamientos deben ubicarse en áreas con capacidad de manipulación (puente grúa, tacle, etc) e inspección > Provisión de 3 ayudantes mecánicos, con herramientas para labores de soporte a ingenieros. > Se deberá proveer una 2a mesa de inspección como la ya existente en taller HPGR. Frente a la imposibilidad de proveerla, Schaeffler la fabricará (proporcionando ese costo integradamente a SCM Cerro Verde (Valor referencial US\$2.000.-))	1	\$ 10.925	\$ 10.925
<b>TOTAL US</b>			<b>\$ 10.925</b>	<b>\$ 10.925</b>

**CONDICIONES COMERCIALES**

1. Conversión de moneda: Valor USD Banco Central de Chile al día facturación
2. Forma de pago: Contado 30 días fecha factura
3. Validez de la oferta: 30 días calendario
4. Lugar de realización: En planta Cerro Verde, Taller de Mantenimiento HPGR's
5. Fecha de realización: A definir con el cliente, previa confirmación de 15 días hábiles
6. Pago a: Schaeffler Chile Rodamientos Ltda.

**Cot P80315-12-10.**

Schaeffler Chile Ltda.  
 Hernando de Aguirre 268 Of. 201  
 Providencia - Santiago  
 Tel: 56 2 477 5000 Fax: 56 2 435 9079  
 Rut: 76.261.830-2

Fecha: 24 de Octubre de 2010

Señoras: **SCM CERRO VERDE**

Rut: \_\_\_\_\_

Dirección: \_\_\_\_\_ Tel.: \_\_\_\_\_

Contacto: Sr. Dennis Velarde Fax: \_\_\_\_\_

Ref.: Inspección adicional de 3 rodamientos E-mail: \_\_\_\_\_  
 FAD - HPGR

Item	Descripción	Cant.	Valor US	Total US
1	<b>SERVICIO DE INSPECCION DE RODAMIENTOS HPGR PARA DEFINICION DE NIVELES DE REACONDICIONAMIENTO.</b>  <b>Servicio considera:</b> > Se inspeccionarán los 3 rodamientos adicionales ubicados en Talleres Polynius > 3 Ingenieros especialistas del área de rodamientos > Desarme parcial de rodamientos > Inspección visual y evaluación según protocolos de fábrica > Herramientas de inspección, metrología y desmontaje de rodamientos. > Se adjunta Protocolo de Inspección > Faenas de 8 hrs. durante 5 días	1	\$ 1.800	\$ 1.800
<b>TOTAL US</b>			<b>\$ 1.800</b>	<b>\$ 1.800</b>

**CONDICIONES COMERCIALES**

1. Conversión de moneda: Valor USD Banco Central de Chile al día facturación
2. Forma de pago: Contado 30 días fecha factura
3. Validez de la oferta: 30 días calendario
4. Lugar de realización: Taller de Mantenimiento HPGR's, Matarani
5. Fecha de realización: A definir con el cliente, previa confirmación de 15 días hábiles
6. Pago a: Schaeffler Chile Rodamientos Ltda.

Fig. N°5.83 Cotizaciones del servicio de inspección de 12 rodamientos mayores para evaluación técnica del nivel de reparación según requerimiento del usuario.

Tabla N°5.4 Valorización detallada del Costo de Inspección de Rodamientos

<b>OFERTA ECONÓMICA</b>					
<b>1. ESTRUCTURA DE PRECIO DE MANO DE OBRA</b>					
REMUNERACIONES	CANTIDAD PERSONAL	PRECIO W/H	HORAS REQUERIDAS	PRECIO	
Ingenieros especialistas	3.00	90.00	40.00	3.600.00	
<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>				<b>3.600.00</b>	
<b>2. UNIFORME E IMPLEMENTOS DE SEGURIDAD</b>					
UNIFORME/IMPLEM DE SEGURIDAD	CANTIDAD DE EPP	VIDA UTIL (MESES)	PRECIO UNITARIO DE CADA EPP	PRECIO TOTAL	
Guantes mecánicos	3.00	12.00	7.00	21.00	
Guantes nitrilo	3.00	12.00	5.00	15.00	
Antiparras	3.00	12.00	10.00	30.00	
<b>TOTAL UNIFORME/IMPLEM DE SEGUR</b>				<b>66.00</b>	
<b>3. EQUIPOS MAQUINARIAS Y HERRAMIENTAS PARA EL SERVICIO</b>					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD DE EQUIPOS	AÑO FABRICACION	PRECIO UNITARIO DEL EQUIPO	TIEMPO USO (HORAS o DIAS)	PRECIO TOTAL
Lupas de Inspección	3.00		150.00	5.00	450.00
Feelers gauges	3.00		120.00	5.00	360.00
Depth gauge	1.00		600.00	5.00	600.00
Espátulas para desmontar	3.00		30.00	5.00	90.00
<b>TOTAL EQ. MAQ. HERRA</b>					<b>1.500.00</b>
<b>4. RELACION DE MATERIALES E INSUMOS PARA EL SERVICIO</b>					
DESCRIPCION Y MARCA	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO DE LOS INSUMOS	PRECIO TOTAL		
Acabte preservación FAG Anticorrosion Oil	12.00	50.00	600.00		
Cinta de embalaje FAG	24.00	62.50	1.500.00		
<b>TOTAL MATERIALES E INSUMOS</b>			<b>2.100.00</b>		
<b>5. TRANSPORTE</b>					
DESCRIPCION (capacidad-marca)	CANTIDAD	AÑO FABRICACION	PRECIO DIA	PRECIO TOTAL	
Camioneta 4x4	1.00	2010	60.00	60.00	
Ticket aéreo Lima - Arequipa	2.00		300.00	600.00	
<b>TOTAL TRANSPORTE</b>				<b>1.080.00</b>	
<b>6. DIVERSOS</b>					
DESCRIPCION	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL		
Alimentación	15.00	30.00	450.00		
Alojamiento	10.00	90.00	900.00		
<b>TOTAL DIVERSOS</b>			<b>1.350.00</b>		
<b>7. RESUMEN (Todos los costos no incluyen I.G.V.)</b>					
RUBRO	PRECIO				
1. REMUNERACIONES	3.600.00				
2. EQUIPO DE PROTECCION DE SEGURIDAD	66.00				
3. EQUIPOS Y HERRAMIENTAS	1.500.00				
4. MATERIALES E INSUMOS	2.100.00				
5. TRANSPORTE	1.080.00				
6. DIVERSOS	1.350.00				
7. COSTOS DEL SERVICIO (1+2+3+4+5+6)	9.696.00				
8. GASTOS ADM. Y GASTOS GENE. (5%)	484.80				
9. UTILIDAD (20%)	2.545.20				
<b>PRECIO TOTAL DEL SERVICIO/OBRA (7+8+9)</b>	<b>12.726.00</b>				
<b>PLAZO DE ENTREGA DEL SERVICIO (DIAS CALENDARIOS)</b>	5.00				
<b>TIEMPO DE GARANTIA DEL SERVICIO</b>	6 meses				
<b>DISPONIBILIDAD PARA INICIAR LAS OPERACIONES (DIAS CALENDARIO)</b>	7.00				

Page 2 of 5

<b>PURCHASE ORDER</b>	
ORDEN COMPRA	ZV03JU-0002

<b>SUPPLIER / PROVEEDOR</b> SCHAEFFLER JOSE TOMAS RIVER 1051 PROVIDENCIA SANTIAGO tel. MIGUEL ALVAREZ	125307  FONDO 51-5-8429-1077 FAX: ID: 75761030-2	<b>ORDER DATE / FECHA ORDEN</b> 01-Dec-2010	<b>DELIVERY DATE / FECHA ENTREGA</b> 28-Feb-2011	<b>FORWARDER / TRANSPORTISTA</b>
		<b>WAREHOUSE / ALMACÉN</b>	<b>PORT OF DEPARTURE</b>	<b>PACKAGES MARKS / MARCAS DE BULTOS</b> ZV03JU
		<b>ORIGIN COUNTRY</b> CHILE	<b>VIA OF SHIPMENT</b> NACIONAL SIN COSTO	
<b>REPRESENTATIVE / REPRESENTANTE</b>  FONDO: FAX: ID:		<b>COUNTRY OF PURCHASE</b> CHILE	<b>PORT OF DISCHARGE</b>	<b>PAYMENT TERMS / PLAZO DE PAGO</b> 30 DIAS FIRECEPCION DE FACTURA
		<b>CURRENCY / MONEDA</b> DOLAR ESTADOUNIDENSE	<b>DELIVERY PLACE / LUGAR ENTREGA</b> OTRO	

ITEM	QUANTITY CANTIDAD	UNIT UNIDAD	DESCRIPTION / DESCRIPCION	CODE CODIGO	UNIT PRICE PRECIO UNIT.	TOTAL PRICE PRECIO TOTAL
001	1.00		ITEM FIELD RELEASE SERVICIO DE EVALUACION DE 09 RODAMIENTOS CHANCADORA TERCERA INGR. PROYECTA N° 193277-00-10. LSLUARDI JIMMY PONCE SE MODIFICA LA ORDEN PARA INCLUIR 03 RODAMIENTOS A BULTO DE JIMMY PONCE  DOCE MIL SETECENTOS VEINTE Y CINCO DOLAR ESTADOUNIDENSE	003937001	12,725.00	12,725.00
					Sub-Total	12,725.00
					Total	12,725.00

LUGAR DE ENTREGA:  
OTRO

**CLÁUSULAS ESTÁNDARES (CONDICIONES DE SERVICIO)**  
 Las cláusulas que se describen a continuación regirán y serán aplicables en todo su extensión, respecto del servicio que se prestará, según los términos y condiciones del presente documento denominado "Orden de Compra", y que también se denominará indistintamente "Orden de Servicio", por lo que la "Orden de Servicio", al contar con el consentimiento y aceptación de ambas partes, será considerado como un contrato para todos sus efectos.

**ANTECEDENTES**  
 es una empresa privada dedicada a la actividad minera en el que para el desarrollo de sus actividades necesita contratar el presente servicio, en el marco de lo establecido en la Ley General de Minería (D.S. 014-92-EM)

**PLAZO**  
 El plazo del presente servicio será el que se indica en la Orden de Servicio.  
 El tiempo es de esencial importancia con respecto a la ejecución del CONTRATISTA bajo el presente contrato. EL CONTRATISTA compromete a ejecutar los servicios de acuerdo al plazo establecido y procederá diligentemente a cumplir los servicios dentro del plazo indicado en el presente anterior.  
 EL CONTRATISTA (procederá y cumplirá que el plazo referido no abastaba para la ejecución de los servicios, y (el tiempo que le falta del CONTRATISTA de terminar los servicios dentro del plazo de ejecución del servicio podría generar daños y perjuicios)

**RETRIBUCIÓN Y FORMA DE PAGO**  
 GERRO VERDE Y EL CONTRATISTA acuerdan que la retribución que se realizará, por los servicios contratados será la que se indica en la Orden de Servicio.  
 El pago de la retribución se efectuará al finalizar el servicio y el procedimiento será como a continuación se detalla:

CAS CAS APPROVER / APROBADOR	CAS CAS SUPPLY AGENT / AGENTE ABASTECIMIENTO
---------------------------------	---

**ASIENTO | AREQUIPA - PERU FONDO (51-54) 381515**

Fig. N°5.84 Orden de Compra consolidada del cliente por el servicio de inspección de 12 rodamientos para ser evaluados su condición de reacondicionamiento o remanufactura.

Asimismo se indican los valores de los niveles de reparación del rodamiento según sea su condición: sólo inspección o recertificación (nivel I), reacondicionamiento (nivel I y II) o remanufactura (nivel III) en la figura Fig. N°5.85 como un porcentaje del valor del rodamiento en calidad nuevo, y como parte de una propuesta económica consolidada según evaluación para este caso para 10 rodamientos reparables y enviados a los talleres del fabricante de los rodamientos en Alemania tal como se muestra en la figura Fig. N°5.86.

Superintendente de Mantto Chancado - Concentradora  
Sociedad Minera Cerro Verde SA  
Av. Alfonso Ugarte 304  
Arequipa - Peru

10 de Julio del 2009

Ref.: **Precios Referenciales Rodamientos FAG - HPGR**  
CC/

Estimado Ing. I

Reciba un cordial saludo del Grupo Schaeffler, fabricante alemán de los rodamientos INA y FAG

En relación a información ofrecida respecto de precios referenciales de los rodamientos **FAG 241/900BK30.MB.C3** utilizados en los Molinos HPGH - Polycorn B, le detallo lo siguiente

Descripción	Venta Directa MRO (US\$)	Repair Level I MRO (US\$)	Repair Level II MRO (US\$)	Repair Level III MRO (US\$)
FAG 241/900BK30.MB.C3	112 650	11 270	47 320	64 490

Esta lista de precios son referenciales FCA Alemania, tanto para los rodamientos nuevos (Venta Directa) como para los rodamientos para reacondicionamiento según el nivel de reparación (Repair Level). Además puede variar según cantidad y disponibilidad por lo que es necesario colizar oficialmente cada solicitud.

Cabe mencionar que en el caso de reacondicionamientos estos costos sólo aplican a rodamientos FAG. Podemos trabajar en otras marcas sin problemas, pero el costo puede variar. En general el reacondicionamiento Nivel I, Nivel II y Nivel III es aprox. el 10%, 45% y 75% respectivamente del valor de un rodamiento nuevo.

Para determinar el nivel de reparación será necesario realizar una inspección de los rodamientos in-situ, procedimiento importante para finalmente ser evaluado en nuestros centros de competencia en Alemania. Adjunto Brochure de reacondicionamiento y reparación FAG

Aguardando que esta información ofrecida sea de interés para su evaluación, quedamos atento a cualquier consulta o información adicional.

Atentamente,

  
Miguel A. Alvarez A.  
FSE - Field Service Engineer

Schaeffler Group - Industrial  
Av. Los Ingenieros 306 - Of. 102  
La Molina, Lima 12, Peru  
Tel/Fax: + 51 1 276 1575  
Cell/Mex: + 51 1 9409 1077

Fig. N°5.85 Precios referenciales de los niveles de reparación de los rodamientos usados respecto de los nuevos para venta directa enviados por el fabricante al usuario final.

**Cot: P80318-01-11**

Fecha: 12 de Enero de 2011

Señores: \_\_\_\_\_

Rut: \_\_\_\_\_ Ing. a cargo: Miguel Angel Alvarez

Direccion: \_\_\_\_\_

Contacto: \_\_\_\_\_ Tel.: (51-54) 381515 Anx.4187

Ref.: Reacondicionamiento Rodamientos HPGR E-mail: FAG 241/900BK30MB.C3

Item	Descripcion	Cant.	USD	Total USD
1	Reacondicionamiento Nivel II de rodamientos de HPGR FAG 241/900BK30MB.C3  > Pulido de pistas y contornos de aros > Pulido de elementos rodantes y jaula > Desmagnetizado de componentes > Certificado dimensional. > Protección anticorrosión y reembalaje	8	36.477	291.818
2	Reacondicionamiento Nivel III de rodamientos de HPGR FAG 241/900BK30MB.C3  > Rectificado de pistas > Cambio de elementos rodantes redimensionados > Pulido de jaulas, aros y contornos > Desmagnetizado de componentes > Certificado dimensional > Protección anticorrosión y reembalaje	8	60.795	486.363
3				
<b>Neto</b>				<b>788.853</b>
<b>IVA 19%</b>				<b>150.072</b>
<b>Total</b>				<b>938.926</b>

**CONDICIONES COMERCIALES**

1. Conversion del valor: Dólar BCC fecha facturación.  
 2. Forma de pago: Contado 30 dias fecha factura  
 3. Validez de la oferta: 30 dias calendario  
 4. Condiciones del precio: Valores unitarios están condicionados a las cantidades señaladas  
 5. Lugar de entrega y despacho: Fábrica: Planta Wüppertal.  
Mettmanner Straße 79 42115, Wüppertal, Alemania.

6. Forma de envío: Embarcadores propios del cliente  
(DDU - ExWork) Proforma: indicando código de rodamientos, número de serie.  
Salida temporal por reparación, con agente de aduana  
Enviar con Atención Mr.

7. Fecha de entrega: Nivel II, aprox. 2-3 meses desde la recepción en fábrica.  
Nivel III, aprox. 4-5 meses desde la recepción en fábrica.

8. Garantía: Nivel II: Posterior confirmación en fábrica, 24 meses para defectos de los trabajos y 6 meses para defectos de material. Sólo para rodamientos  
Nivel III: Posterior confirmación en fábrica, 24 meses. Sólo para rodamientos

9. Contacto Comercial: Paula Torres, Customer Service

Fig. N° 5.86 Cotización por servicio de reacondicionamiento de rodamientos.

### **5.5.2 Obtención del plan de ejecución del proyecto:**

De acuerdo a las condiciones señaladas por el servicio de reacondicionamiento en la cotización de la figura Fig. N°5.86, el tiempo estimado de entrega es de 4 a 5 meses y dependerá de la disponibilidad del personal del área de reparaciones de la fábrica matriz en Alemania; por tanto el plan de trabajo del proyecto de remanufactura de los rodamientos que el cliente ha consentido según orden de compra emitida se debe realizar de la siguiendo un plan de actividades para el caso del nivel III recomendado para la reparación de rodamientos, recibidos estos en fábrica:

- a) Rectificado de pistas: De 10 a 30 días.
- b) Cambio de elementos rodantes redimensionados: De 30 a 90 días.
- c) Pulido de jaulas, aros y contornos: De 10 a 30 días.
- d) Desmagnetizado de componentes: 10 días.
- e) Certificado dimensional: 10 días.
- f) Protección anticorrosión y reembalaje: 20 días.

### **5.6 VALIDACIÓN DE LA CALIDAD BASADO EN EL GRADO DE CONFIABILIDAD DE LA INSPECCIÓN:**

Una vez realizada localmente la inspección especializada del paquete de rodamientos (12 piezas) y determinado el nivel de reparación recomendada para cada uno de ellos, que en este caso han sido 10 rodamientos factibles de reparar; se procede a enviar la cotización al cliente adjuntando el informe de análisis causa-raíz de las fallas y daños encontrados de cada uno de ellos; para obtener el V°B° de su aprobación.

Entonces a partir de ese momento los 10 rodamientos son enviados por cuenta del cliente según condiciones en cotización hacia los talleres de reparación



en la casa matriz en Alemania. Para ello deberán programar las actividades de inspección y reparación donde corresponda de acuerdo a lo especificado según su disponibilidad, esto es realizado con la intención verificar con su propia tecnologías los resultados enviados desde Perú respecto del primer filtro correspondiente a la inspección local.

Es bajo estas condiciones que se puede evaluar el grado de confiabilidad de la inspección local realizada, teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- Cantidad total de rodamientos solicitados por el cliente para inspección y evaluación del nivel de reparación (CT)
- Cantidad de rodamientos recomendados para ser enviados y reparados en Alemania según inspección local (CL)
- Cantidad de rodamientos finalmente reparables según inspección especializada de Alemania (CA)

Entonces la fórmula para determinar este grado de confiabilidad de inspección local (GCL) es:

$$GCL = \frac{CA}{CL} \times 100\% \dots \dots \dots 8$$

Según las inspecciones realizadas por Alemania, el resultado final de los rodamientos reparables factiblemente fueron de 8 piezas; entonces el grado de confiabilidad de la inspección local se podría decir según la ecuación 8 llegó a ser de 80%, medición que es realizada teniendo en cuenta el nivel de eficiencia por esta actividad específica.

## CONCLUSIONES

1. De acuerdo al análisis de falla de los daños encontrados en los rodamientos y la evaluación de la factibilidad de reparación final para 08 piezas de las 10 que fueron enviados a fábrica, se puede concluir que implementando un adecuado protocolo de inspección local se alcanza un nivel confianza mayor del 75%.
2. En el diagnóstico del análisis de daños en los rodamientos, la causa encontrada más importante está relacionada a problemas de lubricación; como la disminución de la viscosidad del lubricante producto de la temperaturas alta de trabajo, también la cantidad insuficiente de grasa o incluso hasta la ausencia de ella, evidencias recogidas durante las inspecciones en las paradas de planta.
3. Relacionado a lo anterior, se encontró bastante contaminación mezclado con grasa a causa del ingreso del polvo fino del mineral procesado a través de un sistema de obturación deficiente del equipo.
4. Otra causa probable del diagnóstico de daños es debido al trabajo excesivo de los rodamientos, es decir condiciones operativas de sobrecarga en el equipo.
5. Según el desgaste encontrado sobre las superficies del agujero y del aro exterior de los rodamientos, se concluye también que ha habido deficiencia en el ajuste del montaje debido a errores de forma de los asientos del eje y alojamiento.
6. Debido a malas prácticas de operación del equipo, las cargas de choque debido a cambios bruscos del régimen de trabajo normal y las cargas estáticas de

mineral acumuladas en los rodillos durante las paradas, son causa común para originar desgaste excesivo en la zona de carga de los rodamientos.

7. Finalmente, con una adecuada especialización se puede desarrollar un know-how local importante en técnicas de inspección de rodamientos basado en el diagnóstico confiable del análisis de fallas y extender el tiempo de vida de estos activos a través de la reparación y así aumentar la disponibilidad de planta.

## RECOMENDACIONES

1. En general este procedimiento técnico servirá como una herramienta para el desarrollo de actividades que involucren la evaluación de daños en componentes mecánicas de equipos críticos basado en el análisis causa-raíz, por lo que se recomienda usarlo sólo como guía básica dado que el comportamiento de un rodamiento es diferente al de otras componentes respecto a su dinámica y precisión.
2. La inspección especializada de rodamientos tiene como finalidad primordial dar un diagnóstico confiable de las causas del problema que origina estos daños, por lo que el usuario debe tomar en cuenta las recomendaciones dadas para mitigar o disminuir sus efectos.
3. La reparación de rodamientos es un servicio técnico especializado y requiere de bastante conocimiento y experiencia del personal además de equipamiento tecnológico adecuado que no cuentan las maestranzas locales, además de los datos de fabricación como los planos de medidas incluyendo tolerancias, por lo que se recomienda al usuario siempre acudir a los servicios del fabricante.
4. En la propuesta técnico-comercial al cliente se recomienda buscar nuevas alternativas o desarrollos tecnológicos diferentes a las existentes como estándar en torno al rodamiento, por ejemplo sugerir usar revestimiento de teflón en la superficie del aro exterior para darle mayor flotabilidad y disminuir el desgaste por corrosión de contacto, también el de mejorar el diseño del sistema de

obtención de la grasa para disminuir contaminación, o el de usar mejores lubricantes que no pierdan su nivel de consistencia de viscosidad a elevadas temperaturas de operación del rodamiento producto de sobrecarga.

## BIBLIOGRAFIA

1. Reacondicionamiento y reparación de rodamientos, TPI WL80-72 SB - Schaeffler Iberia S. L. / FAG Industrial Services GmbH Ed. 2007.
2. Handbook of operation and maintenance of High Pressure Grinding Rollers Polycom – Polysius a Company of Thyssenkrupp Technologies / Dipl. Ing. Wolfgang Partsch, Ed. 2007.
3. Large size bearings catalogue, Engineering Compendium GL1 – Schaeffler Group Industrial Ed. 2009.
4. Ball and roller bearings: Theory, design and application – Eschmann, Hasbargen and Weigand Willey & Son Ed. 1989.
5. Rolling contact fatigue and wear fundamentals for roller bearing diagnostics – J. Halme & P. Anderson / Technical Research Centre of Finland Ed. 2009.
6. Avería de los rodamientos: Reconocimiento de daños e inspección de rodamientos, WL82-102/2 SB/98/04/04 – FAG Sales Europe-Iberia Ed. 2004.
7. Bearing repair provides valuable alternative to bearing replacement for heavy industries – J. Alexander & R. Shaffer / Timken Industrial Service Center USA.
8. SKF General Catalogue, 2008.

## **ANEXOS**

1. International Standard ISO 281: Roller bearings - Dynamic load ratings and rating life – Second edition 2007.
2. Technical Report ISO/TR 10657: Explanatory notes on ISO 76 – First edition 1991.
3. International Standard ISO 15243: Rolling bearings – Damage and failures – Terms, characteristics and causes – First edition 2004.
4. Protocolo de inspección de rodamientos en chancadora HPGR.
5. Procedimiento de montaje de rodamientos específico para chancadora HPGR.

# INTERNATIONAL STANDARD

# ISO 281

Second edition  
2007-02-15

## **Rolling bearings — Dynamic load ratings and rating life**

*Roulements — Charges dynamiques de base et durée nominale*



Reference number  
ISO 281:2007(E)

© ISO 2007



# Contents

Page

Foreword.....	iv
Introduction .....	v
1 Scope .....	1
2 Normative references .....	1
3 Terms and definitions.....	2
4 Symbols .....	4
5 Radial ball bearings .....	6
5.1 Basic dynamic radial load rating.....	6
5.2 Dynamic equivalent radial load .....	9
5.3 Basic rating life .....	10
6 Thrust ball bearings.....	10
6.1 Basic dynamic axial load rating .....	10
6.2 Dynamic equivalent axial load.....	12
6.3 Basic rating life .....	13
7 Radial roller bearings .....	13
7.1 Basic dynamic radial load rating.....	13
7.2 Dynamic equivalent radial load .....	15
7.3 Basic rating life .....	16
8 Thrust roller bearings.....	16
8.1 Basic dynamic axial load rating .....	16
8.2 Dynamic equivalent axial load.....	19
8.3 Basic rating life .....	19
9 Modified rating life .....	20
9.1 General .....	20
9.2 Life modification factor for reliability .....	20
9.3 Life modification factor for systems approach .....	21
Annex A (informative) Detailed method for estimating the contamination factor .....	32
Annex B (informative) Calculation of the fatigue load limit .....	42
Annex C (informative) Discontinuities in the calculation of basic dynamic load ratings.....	47
Bibliography .....	51

## Introduction

It is often impractical to establish the suitability of a bearing selected for a specific application by testing a sufficient number of bearings in that application. However, life, as defined in 3.1, is a primary representation of the suitability. A reliable life calculation is therefore considered to be an appropriate and convenient substitute for testing. The purpose of this International Standard is to provide the required basis for life calculation.

Since ISO 281 was published in 1990, additional knowledge has been gained regarding the influence on bearing life of contamination, lubrication, internal stresses from mounting, stresses from hardening, fatigue load limit of the material, etc. In ISO 281:1990/Amd. 2:2000, a general method was presented to consider such influences in the calculation of a modified rating life of a bearing. This amendment is incorporated in this International Standard, which also provides a practical method to consider the influence on bearing life of lubrication condition, contaminated lubricant and fatigue load of bearing material.

ISO/TS 16281 [1] introduced advanced calculation methods which enable the user to take into account the influence on bearing life of bearing-operating clearance and misalignment under general loading conditions. The user can also consult the bearing manufacturer for recommendations and evaluation of equivalent load and life for these operation conditions and other influences as, for example, rolling element centrifugal forces or other high-speed effects.

Calculations according to this International Standard do not yield satisfactory results for bearings subjected to such application conditions and/or of such internal design which result in considerable truncation of the area of contact between the rolling elements and the ring raceways. Unmodified calculation results are thus not applicable, for example, to ball bearings with filling slots that project substantially into the ball/raceway contact area when the bearing is subjected to axial loading in the application. Bearing manufacturers should be consulted in such cases.

The life modification factors for reliability,  $a_1$ , have been slightly changed and extended to 99,95 % reliability.

Revisions of this document will be required from time to time, as the result of new developments or in the light of new information concerning specific bearing types and materials.

Background information regarding the derivation of equations and factors in this document is given in ISO/TR 8646<sup>1)</sup> and ISO/TR 1281-2<sup>2)</sup>.

1) Under revision. Will be published under the reference ISO/TR 1281-1.

# Rolling bearings — Dynamic load ratings and rating life

## 1 Scope

This International Standard specifies methods of calculating the basic dynamic load rating of rolling bearings within the size ranges shown in the relevant ISO publications, manufactured from contemporary, commonly used, high quality hardened bearing steel, in accordance with good manufacturing practice and basically of conventional design as regards the shape of rolling contact surfaces.

This document also specifies methods of calculating the basic rating life, which is the life associated with 90 % reliability, with commonly used high quality material, good manufacturing quality and with conventional operating conditions. In addition, it specifies methods of calculating the modified rating life, in which various reliabilities, lubrication condition, contaminated lubricant and fatigue load of the bearing are taken into account.

This International Standard does not cover the influence of wear, corrosion and electrical erosion on bearing life.

This document is not applicable to designs where the rolling elements operate directly on a shaft or housing surface, unless that surface is equivalent in all respects to the bearing ring (or washer) raceway it replaces.

Double-row radial bearings and double-direction thrust bearings are, when referred to in this document, presumed to be symmetrical.

Further limitations concerning particular types of bearings are included in the relevant clauses.

## 2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

ISO 76, *Rolling bearings — Static load ratings*

ISO 5593, *Rolling bearings — Vocabulary*

ISO/TR 8646:1985, *Explanatory notes on ISO 281/1-1977<sup>2)</sup>*

ISO 15241, *Rolling bearings — Symbols for quantities*

---

2) Under revision. Will be published under the reference ISO/TR 1281-1.

### 3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in ISO 5593 and the following apply.

#### 3.1

##### **life**

(of an individual rolling bearing) number of revolutions which one of the bearing rings or washers makes in relation to the other ring or washer before the first evidence of fatigue develops in the material of one of the rings or washers or one of the rolling elements

NOTE Life may also be expressed in number of hours of operation at a given constant speed of rotation.

#### 3.2

##### **reliability**

(in the context of bearing life) for a group of apparently identical rolling bearings, operating under the same conditions, the percentage of the group that is expected to attain or exceed a specified life

NOTE The reliability of an individual rolling bearing is the probability that the bearing will attain or exceed a specified life.

#### 3.3

##### **rating life**

predicted value of life based on a basic dynamic radial load rating or a basic dynamic axial load rating

#### 3.4

##### **basic rating life**

rating life associated with 90 % reliability for bearings manufactured with commonly used high quality material, of good manufacturing quality, and operating under conventional operating conditions

#### 3.5

##### **modified rating life**

rating life modified for 90 % or other reliability, bearing fatigue load, and/or special bearing properties, and/or contaminated lubricant, and/or other non-conventional operating conditions

NOTE The term "modified rating life" is new in this document and replaces "adjusted rating life".

#### 3.6

##### **basic dynamic radial load rating**

constant stationary radial load which a rolling bearing can theoretically endure for a basic rating life of one million revolutions

NOTE In the case of a single-row angular contact bearing, the radial load rating refers to the radial component of that load which causes a purely radial displacement of the bearing rings in relation to each other.

#### 3.7

##### **basic dynamic axial load rating**

constant centric axial load which a rolling bearing can theoretically endure for a basic rating life of one million revolutions

#### 3.8

##### **dynamic equivalent radial load**

constant stationary radial load under the influence of which a rolling bearing would have the same life as it would attain under the actual load conditions

#### 3.9

##### **dynamic equivalent axial load**

constant centric axial load under the influence of which a rolling bearing would have the same life as it would attain under the actual load conditions

**3.10****fatigue load limit**

bearing load under which the fatigue stress limit,  $\sigma_u$ , is just reached in the most heavily loaded raceway contact

**3.11****roller diameter**

(applicable in the calculation of load ratings) theoretical diameter in a radial plane through the middle of the roller length for a symmetrical roller

NOTE 1 For a tapered roller, the applicable diameter is equal to the mean value of the diameters at the imaginary sharp corners at the large end and at the small end of the roller.

NOTE 2 For an asymmetrical convex roller, the applicable diameter is an approximation of the diameter at the point of contact between the roller and the ribless raceway at zero load.

**3.12****effective roller length**

(applicable in the calculation of load ratings) theoretical maximum length of contact between a roller and that raceway where the contact is shortest

NOTE This is normally taken to be either the distance between the theoretically sharp corners of the roller minus the roller chamfers or the raceway width, excluding the grinding undercuts, whichever is the smaller.

**3.13****nominal contact angle**

angle between a plane perpendicular to a bearing axis (a radial plane) and the nominal line of action of the resultant of the forces transmitted by a bearing ring or washer to a rolling element

NOTE For bearings with asymmetrical rollers, the nominal contact angle is determined by the contact with the non-ribbed raceway.

**3.14****pitch diameter of ball set**

diameter of the circle containing the centres of the balls in one row in a bearing

**3.15****pitch diameter of roller set**

diameter of the circle intersecting the roller axes at the middle of the rollers in one row in a bearing

**3.16****conventional operating conditions**

conditions which may be assumed to prevail for a bearing which is properly mounted and protected from foreign matter, adequately lubricated, conventionally loaded, not exposed to extreme temperature and not run at exceptionally low or high speed

**3.17****viscosity ratio**

actual kinematic oil viscosity at operating temperature divided by the reference kinematic viscosity for adequate lubrication

**3.18****film parameter**

ratio of lubricant film thickness to composite r.m.s. surface roughness, used to estimate the influence of lubrication on bearing life

**3.19****pressure-viscosity coefficient**

parameter characterizing the influence of oil pressure on the oil viscosity in the rolling element contact

### 3.20

#### viscosity index

index characterizing the degree of influence of temperature on the viscosity of lubricating oils

## 4 Symbols

For the purposes of this document, the symbols given in ISO 15241 and the following apply.

$a_{ISO}$	life modification factor, based on a systems approach of life calculation
$a_1$	life modification factor for reliability
$b_m$	rating factor for contemporary, commonly used, high quality hardened bearing steel in accordance with good manufacturing practices, the value of which varies with bearing type and design
$C_a$	basic dynamic axial load rating, in newtons
$C_r$	basic dynamic radial load rating, in newtons
$C_u$	fatigue load limit, in newtons
$C_{0a}$	basic static axial load rating <sup>3)</sup> , in newtons
$C_{0r}$	basic static radial load rating <sup>3)</sup> , in newtons
$D$	bearing outside diameter, in millimetres
$D_{pw}$	pitch diameter of ball or roller set, in millimetres
$D_w$	nominal ball diameter, in millimetres
$D_{we}$	roller diameter applicable in the calculation of load ratings, in millimetres
$d$	bearing bore diameter, in millimetres
$e$	limiting value of $F_a / F_r$ for the applicability of different values of factors $X$ and $Y$
$e_C$	contamination factor
$F_a$	bearing axial load (axial component of actual bearing load), in newtons
$F_r$	bearing radial load (radial component of actual bearing load), in newtons
$f_c$	factor which depends on the geometry of the bearing components, the accuracy to which the various components are made, and the material
$f_0$	factor for calculation of basic static load rating <sup>3)</sup>
$i$	number of rows of rolling elements

3) For definitions, calculation methods and values of  $C_{0a}$ ,  $C_{0r}$  and  $f_0$ , see ISO 76.

$L_{nm}$	modified rating life, in million revolutions
$L_{we}$	effective roller length applicable in the calculation of load ratings, in millimetres
$L_{10}$	basic rating life, in million revolutions
$n$	speed of rotation, in revolutions per minute
$n$	subscript for probability of failure, in percent
$P$	dynamic equivalent load, in newtons
$P_a$	dynamic equivalent axial load, in newtons
$P_r$	dynamic equivalent radial load, in newtons
$S$	reliability (probability of survival), in percent
$X$	dynamic radial load factor
$Y$	dynamic axial load factor
$Z$	number of rolling elements in a single-row bearing; number of rolling elements per row of a multi-row bearing with the same number of rolling elements per row
$\alpha$	nominal contact angle, in degrees
$\kappa$	viscosity ratio, $\nu/\nu_1$
$A$	film parameter
$\nu$	actual kinematic viscosity at the operating temperature, in square millimetres per second
$\nu_1$	reference kinematic viscosity, required to obtain adequate lubrication condition, in square millimetres per second
$\sigma$	(real) stress, used in fatigue criterion, in newtons per square millimetre
$\sigma_u$	fatigue stress limit of raceway material, in newtons per square millimetre

## 6.3 Basic rating life

### 6.3.1 Life equation

The basic rating life for a thrust ball bearing is given by the life equation:

$$L_{10} = \left( \frac{C_a}{P_a} \right)^3 \quad (12)$$

The values of  $C_a$  and  $P_a$  are calculated in accordance with 6.1 and 6.2.

### 6.3.2 Loading restriction on the life equation

The life equation gives satisfactory results for a broad range of bearing loads. However, extra-heavy loads may cause detrimental plastic deformations at the ball/raceway contacts. The user should therefore consult the bearing manufacturer to establish the applicability of the life equation in cases where  $P_a$  exceeds  $0,5 C_a$ .

Very light loads may cause different failure modes to occur. These failure modes are not covered by this International Standard.

## 7 Radial roller bearings

### 7.1 Basic dynamic radial load rating

#### 7.1.1 Basic dynamic radial load rating for single bearings

The basic dynamic radial load rating for a radial roller bearing is given by

$$C_r = b_m f_c (i L_{we} \cos \alpha)^{7/9} Z^{3/4} D_{we}^{29/27} \quad (13)$$

where the values of  $b_m$  and  $f_c$  are given in Tables 6 and 7 respectively. They are maximum values applicable only to roller bearings in which, under a bearing load, the contact stress is substantially uniform along the most heavily loaded roller/raceway contact.

Smaller values of  $f_c$  than those given in Table 7 should be used if, under load, an accentuated stress concentration is present in some part of the roller/raceway contact. Such stress concentrations are to be expected, at the centre of the nominal contact points and at the extremities of the line contacts, in bearings where the rollers are not accurately guided and in bearings having rollers longer than 2,5 times their diameter.

**Table 6 — Values of  $b_m$  for radial roller bearings**

Bearing type	$b_m$
Cylindrical roller bearings, tapered roller bearings and needle roller bearings with machined rings	1,1
Drawn cup needle roller bearings	1
Spherical roller bearings	1,15



Table 7 — Maximum values of  $f_c$  for radial roller bearings

$\frac{D_{we} \cos \alpha}{D_{pw}}$ <sup>a</sup>	$f_c$
0,01	52,1
0,02	60,8
0,03	66,5
0,04	70,7
0,05	74,1
0,06	76,9
0,07	79,2
0,08	81,2
0,09	82,8
0,1	84,2
0,11	85,4
0,12	86,4
0,13	87,1
0,14	87,7
0,15	88,2
0,16	88,5
0,17	88,7
0,18	88,8
0,19	88,8
0,2	88,7
0,21	88,5
0,22	88,2
0,23	87,9
0,24	87,5
0,25	87
0,26	86,4
0,27	85,8
0,28	85,2
0,29	84,5
0,3	83,8

<sup>a</sup> Values of  $f_c$  for intermediate values of  $\frac{D_{we} \cos \alpha}{D_{pw}}$  are obtained by linear interpolation.

## 7.1.2 Basic dynamic radial load rating for bearing combinations

### 7.1.2.1 Back-to-back and face-to-face arrangements

When calculating the basic dynamic radial load rating for two similar single-row radial roller bearings mounted side by side on the same shaft, such that they operate as a unit (paired mounting) in a back-to-back or a face-to-face arrangement, the pair is considered as one double-row bearing.

### 7.1.2.2 Independently replaceable bearings in back-to-back and face-to-face arrangements

If, for some technical reason, the bearing arrangement is regarded as two bearings which are replaceable independently of each other, then 7.1.2.1 does not apply.

### 7.1.2.3 Tandem arrangement

The basic dynamic radial load rating for two or more similar single-row radial roller bearings mounted side by side on the same shaft, such that they operate as a unit (paired or stack mounting) in tandem arrangement, is the number of bearings to the power of  $7/9$ , times the rating of one single-row bearing. The bearings need to be properly manufactured and mounted for equal load distribution of the load between them.

### 7.1.2.4 Independently replaceable bearings in tandem arrangement

If, for some technical reason, the bearing arrangement is regarded as the number of single-row bearings which are replaceable independently of each other, then 7.1.2.3 does not apply.

## 7.2 Dynamic equivalent radial load

### 7.2.1 Dynamic equivalent radial load for single bearings

The dynamic equivalent radial load for radial roller bearings with  $\alpha \neq 0^\circ$ , under constant radial and axial loads, is given by

$$P_r = X F_r + Y F_a \quad (14)$$

where the values of  $X$  and  $Y$  are given in Table 8.

The dynamic equivalent radial load for radial roller bearings with  $\alpha = 0^\circ$ , and subjected to radial load only, is given by

$$P_r = F_r \quad (15)$$

NOTE The ability of radial roller bearings with  $\alpha = 0^\circ$  to support axial loads varies considerably with bearing design and execution. The bearing user should therefore consult the bearing manufacturer for recommendations regarding the evaluation of equivalent load and life for cases where bearings with  $\alpha = 0^\circ$  are subjected to axial load.

### 7.2.2 Dynamic equivalent radial load for bearing combinations

#### 7.2.2.1 Back-to-back and face-to-face arrangements of single-row angular contact roller bearings

When calculating the equivalent radial load for two similar single-row angular contact roller bearings mounted side by side on the same shaft, such that they operate as a unit (paired mounting) in a back-to-back or a face-to-face arrangement, and which, according to 7.1.2.1, is considered as one double-row bearing, the values of  $X$  and  $Y$  for double-row bearings given in Table 8 shall be used.

#### 7.2.2.2 Tandem arrangement

When calculating the equivalent radial load rating for two or more similar single-row angular contact roller bearings mounted side by side on the same shaft, such that they operate as a unit (paired or stack mounting) in a tandem arrangement, the  $X$  and  $Y$  factors for single-row bearings given in Table 8 shall be used.

Table 8 — Values of  $X$  and  $Y$  for radial roller bearings

Bearing type	$\frac{F_a}{F_r} \leq e$		$\frac{F_a}{F_r} > e$		$e$
	$X$	$Y$	$X$	$Y$	
Single-row, $\alpha \neq 0^\circ$	1	0	0,4	$0,4 \cot \alpha$	$1,5 \tan \alpha$
Double-row, $\alpha \neq 0^\circ$	1	$0,45 \cot \alpha$	0,67	$0,67 \cot \alpha$	$1,5 \tan \alpha$

### 7.3 Basic rating life

#### 7.3.1 Life equation

The basic rating life for a radial roller bearing is given by the life equation:

$$L_{10} = \left( \frac{C_r}{P_r} \right)^{10/3} \quad (16)$$

The values of  $C_r$  and  $P_r$  are calculated in accordance with 7.1 and 7.2.

This life equation is also used for the evaluation of the life of two or more single-row bearings operating as a unit, as referred to in 7.1.2. In this case, the load rating  $C_r$  is calculated for the complete bearing arrangement and the equivalent load  $P_r$  is calculated for the total loads acting on the arrangement, using the values of  $X$  and  $Y$  indicated in 7.2.2.

#### 7.3.2 Loading restriction on the life equation

The life equation gives satisfactory results for a broad range of bearing loads. However, extra-heavy loads may cause accentuated stress concentrations in some part of the roller/raceway contacts. The user should therefore consult the bearing manufacturer to establish the applicability of the life equation in cases where  $P_r$  exceeds  $0,5 C_r$ .

Very light loads may cause different failure modes to occur. These failure modes are not covered by this International Standard.

## 8 Thrust roller bearings

### 8.1 Basic dynamic axial load rating

#### 8.1.1 Basic dynamic axial load rating for single-row bearings

A thrust roller bearing is considered as a single-row bearing only if all rollers carrying load in the same direction contact the same washer raceway area.

Für diese Unterlage, kann die Aktualität nicht  
garantiert werden. Zur Aktualitätsprüfung,  
wenden Sie sich an die Normenabteilung.

---

---

## Explanatory notes on ISO 76

*Notes explicatives sur l'ISO 76*



Reference number  
ISO/TR 10657 : 1991 (E)

## Contents

Scope .....	1
Brief History .....	1
2.1 ISO/R 76 - 1958 .....	1
2.2 ISO 76 - 1978 .....	2
2.3 ISO 76 - 1987 .....	3
Basic Static Load Ratings .....	6
3.1 Basic static radial load rating $C_{or}$ for radial ball bearings .....	10
3.1.1 Radial and angular contact groove ball bearings .....	10
3.1.2 Self-aligning ball bearings .....	12
3.2 Basic static axial load rating $C_{oa}$ for thrust ball bearings .....	14
3.3 Basic static radial load rating $C_{or}$ for radial roller bearings .....	15
3.4 Basic static axial load rating $C_{oa}$ for thrust roller bearings .....	16
Static Equivalent Load .....	17
4.1 Theoretical static equivalent radial load $P_{or}$ for radial bearings .....	17
4.1.1 Single row radial bearings and radial contact groove ball bearings .....	17
4.1.2 Double row radial bearings .....	25
4.2 Theoretical static equivalent axial load $P_{oa}$ for thrust bearings .....	28
4.2.1 Single direction thrust bearings .....	28
4.2.2 Double direction thrust bearings .....	30
4.3 Approximate formulae for theoretical static equivalent load .....	32
4.3.1 Radial bearings .....	32
4.3.2 Thrust bearings .....	34

© ISO 1991

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher.

International Organization for Standardization  
Case postale 56 • CH-1211 Genève 20 • Switzerland

Printed in Switzerland

<b>4.4</b>	<b>Practical formulae of static equivalent load</b> .....	<b>35</b>
<b>4.4.1</b>	<b>Radial bearings</b> .....	<b>35</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Thrust bearings</b> .....	<b>40</b>
<b>4.5</b>	<b>Static radial load factor <math>X_0</math> and static axial load factor <math>Y_0</math></b> .....	<b>42</b>
<b>4.5.1</b>	<b>Radial bearings</b> .....	<b>42</b>
<b>4.5.1.1</b>	<b>Radial contact groove ball bearings</b> .....	<b>42</b>
<b>4.5.1.2</b>	<b>Angular contact groove ball bearings</b> .....	<b>44</b>
<b>4.5.1.3</b>	<b>Self-aligning ball bearings and radial roller bearings</b> .....	<b>47</b>
<b>4.5.2</b>	<b>Thrust bearings</b> .....	<b>48</b>
 <b>Annexes</b>		
<b>Annex A</b>	<b>Values for <math>\gamma</math>, <math>\chi</math> and <math>E(\chi)</math></b> .....	<b>50</b>
<b>Annex B</b>	<b>Symbols</b> .....	<b>53</b>
<b>Annex C</b>	<b>References</b> .....	<b>56</b>

## Foreword

ISO (the International Organization for Standardization) is a worldwide federation of national standards bodies (ISO member bodies). The work of preparing International Standards is normally carried out through ISO technical committees. Each member body interested in a subject for which a technical committee has been established has the right to be represented on that committee. International organizations, governmental and non-governmental, in liaison with ISO, also take part in the work. ISO collaborates closely with the International Electrotechnical Commission (IEC) on all matters of electrotechnical standardization.

The main task of ISO technical committees is to prepare International Standards. In exceptional circumstances a technical committee may propose the publication of a Technical Report of one of the following types:

- type 1, when the required support cannot be obtained for the publication of an International Standard, despite repeated efforts;
- type 2, when the subject is still under technical development or where for any other reason there is the future but not immediate possibility of an agreement on an International Standard;
- type 3, when a technical committee has collected data of a different kind from that which is normally published as an International Standard ("state of the art", for example).

Technical Reports of types 1 and 2 are subject to review within three years of publication, to decide whether they can be transformed into International Standards. Technical Reports of type 3 do not necessarily have to be reviewed until the data they provide are considered to be no longer valid or useful.

ISO/TR 10657, which is a Technical Report of type 3, was prepared by Technical Committee ISO/TC 4, *Rolling bearings*, Sub-Committee SC 8, *Load ratings and life*.

ISO/TR 10657 has been prepared for the guidance of users of ISO 76 : 1987, *Rolling bearings — Static load ratings*. It is a purely scientific document intended for use by specialists in this field, and it is not envisaged that it will become an International Standard.

Annexes A, B and C form an integral part of this Technical Report.

The formula applies to bearings with a cross-sectional raceway groove radius not larger than  $0,54 D_w$ .

The load-carrying ability of a bearing is not necessarily increased by the use of a smaller groove radius, but is reduced by the use of a larger groove radius. In the latter case, a correspondingly reduced value of  $f_o$  shall be used.

The smaller value  $C_{oa}$  calculated from equation (3-30) shall be adopted. For washers with  $f = 0,54$ , using the upper sign,

$$C_{oa} = f_o Z D_w^2 \sin \alpha \quad , \quad (3-31)$$

where

$$f_o = 10,362 \left( \frac{\sigma_{\max}}{4000} \right)^3 \kappa \left( \frac{E(\kappa)}{2 + \frac{\gamma}{1-\gamma} - 1,08} \right)^2 \quad . \quad (3-32)$$

The values of factor  $f_o$  on table 1 in ISO 76 are calculated from substituting the values for  $\kappa$ ,  $E(\kappa)$  and  $\gamma = D_w \cos \alpha / D_{pw}$  shown in table A.2, and  $\sigma_{\max} = 4200$  MPa into equation (3-32).

### 3.3 Basic static radial load rating $C_{or}$ for radial roller bearings

The curvature sum  $\sum \rho$  for radial roller bearings is given by the following equation,

$$\sum \rho = \frac{2}{D_{we}} \frac{1}{1 \mp \gamma} \quad . \quad (3-33)$$

Substituting equation (3-33) into equation (3-11) and adopting the smaller  $Q$ ,

$$Q = 1,3810867 \times 10^{-5} (1 - \gamma) L_{we} D_{we} \sigma_{\max}^2 \quad . \quad (3-34)$$



Substituting equation (3-34) into the following equation,

$$C_{or} = \frac{1}{S} Z Q_{max} \cos \alpha , \quad (3-15)$$

here

$C_{or}$  = basic static radial load rating, N ,

$Z$  = number of rollers per row ,

$Q_{max}$  = maximum normal force between rolling element and raceway, N ,

$S$  is a function of the loaded zone parameter  $\epsilon$ .

If one half of the rollers are loaded then  $S = 4,08$  applies.

A common value used in general bearing calculations is  $S = 5$ , which leads to a rather conservative estimate of the maximum roller load.

$\alpha$  = nominal contact angle, °,

$$C_{or} = 44,194774 \left( \frac{\sigma_{max}}{4000} \right)^2 (1 - \gamma) Z L_{we} D_{we} \cos \alpha .$$

Consequently, adopting  $\sigma_{max} = 4000$  MPa and introducing the number of rows  $i$  of rollers,

$$C_{or} = 44 \left( 1 - \frac{D_{we} \cos \alpha}{D_{pw}} \right) i Z L_{we} D_{we} \cos \alpha . \quad (3-35)$$

#### 3.4 Basic static axial load rating $C_{oa}$ for thrust roller bearings

The curvature sum  $\sum \rho$  of thrust roller bearings is given by the equation (3-33) and  $Q$  is given by the equation (3-34).

Substituting equations (3-33) and (3-34) into equation (3-29),

$$C_{oa} = 220,97387 \left( \frac{\sigma_{max}}{4000} \right)^2 (1 - \gamma) Z L_{we} D_{we} \sin \alpha .$$

Consequently, adopting  $\sigma_{max} = 4000$  MPa,

$$C_{oa} = 220 \left( 1 - \frac{D_{we} \cos \alpha}{D_{pw}} \right) Z L_{we} D_{we} \sin \alpha . \quad (3-36)$$

Table 4-8 Values of  $F_a/P_{oa}$  and  $F_r \tan \alpha / P_{oa}$  vs.  $F_r \tan \alpha / P_{oa}$  for double direction thrust bearings

$\epsilon_I$	$\epsilon_{II}$	ball bearings			roller bearings		
		$F_r \tan \alpha / F_a$	$F_a / P_{oa}$	$F_r \tan \alpha / P_{oa}$	$F_r \tan \alpha / F_a$	$F_a / P_{oa}$	$F_r \tan \alpha / P_{oa}$
0,5	0,5	$\infty$	0	0,4577	$\infty$	0	0,4906
0,6	0,4	2,0465	0,1744	0,3568	2,3908	0,1686	0,4031
0,7	0,3	1,0916	0,2782	0,3036	1,2101	0,2847	0,3445
0,8	0,2	0,8005	0,3445	0,2758	0,8229	0,3689	0,3035
0,9	0,1	0,6713	0,3900	0,2618	0,6340	0,4323	0,2741
1	0	0,6000	0,4244	0,2546	0,5238	0,4817	0,2523
1,25	0	0,4538	0,5044	0,2289	0,3600	0,5775	0,2079
1,67	0	0,3080	0,6067	0,1868	0,2333	0,6796	0,1586
2,5	0	0,1850	0,7240	0,1339	0,1372	0,7837	0,1075
5	0	0,0831	0,8558	0,0711	0,0611	0,8909	0,0544
$\infty$	0	0	1	0	0	1	0

### 4.3 Approximate formulae for theoretical static equivalent load

#### 4.3.1 Radial bearings

From a practical standpoint it is preferable to replace the theoretical curves in figures 4-1 and 4-3 for radial contact bearings with a constant contact angle by two straight line segments AB, BC and a straight line AC, respectively.

The static equivalent radial load  $P_{Or}$  given by the straight line segments and straight lines is shown in tables 4-9 and 4-10, respectively.

For radial ball bearings the contact angle of which varies with

Table 4-9 Approximate formulae for theoretical static equivalent radial loads for single row radial bearings (straight line segments AB and BC in figure 4-1)

bearing type	abscissa			approximate formulae of $P_{or}$	
	point A	point B	point C	segment AB	segment BC
single row ball bearings	1,22	2,21	4,37	$P_{or} = F_r$	$P_{or} = 0,494F_r + 0,229\cot\alpha F_a$
single row roller bearings	1,26	2,03	4,08	$P_{or} = F_r$	$P_{or} = 0,502F_r + 0,245\cot\alpha F_a$

Table 4-10 Approximate formulae for theoretical static equivalent radial loads for double row radial bearings (straight line AC in figure 4-3)

bearing type	abscissa of point C	approximate formulae of $P_{or}$
double row ball bearings	2,18	$P_{or} = F_r + 0,459\cot\alpha F_a$
double row roller bearings	2,04	$P_{or} = F_r + 0,490\cot\alpha F_a$

the load, the formulae given by tables 4-9 and 4-10 are approximately applicable if  $\cot\alpha'$  by equation (4-5) is substituted for  $\cot\alpha$  in the formulae.

For radial contact groove ball bearings replacing theoretical curve by straight line segments AB and BC in figure 4-2, the static equivalent radial load  $P_{or}$  may be given in table 4-11, and the value of  $\cot\alpha'$  in the table is given by the equation (4-7).

# INTERNATIONAL STANDARD

# ISO 15243

First edition  
2004-02-15

## **Rolling bearings — Damage and failures — Terms, characteristics and causes**

*Roulements — Détérioration et défaillance — Termes, caractéristiques et causes*



Reference number  
ISO 15243:2004(E)

© ISO 2004

# Contents

Page

Foreword .....	iv
Introduction .....	v
1 Scope.....	1
2 Normative references .....	1
3 Terms and definitions.....	1
4 Classification of failure modes occurring in rolling bearings.....	1
5 Failure modes .....	3
5.1 Fatigue.....	3
5.2 Wear.....	4
5.3 Corrosion .....	6
5.4 Electrical erosion .....	8
5.5 Plastic deformation.....	11
5.6 Fracture and cracking.....	13
Annex A (informative) Failure analysis — Illustrations of damage — Terms.....	16
Bibliography .....	41

## **Foreword**

ISO (the International Organization for Standardization) is a worldwide federation of national standards bodies (ISO member bodies). The work of preparing International Standards is normally carried out through ISO technical committees. Each member body interested in a subject for which a technical committee has been established has the right to be represented on that committee. International organizations, governmental and non-governmental, in liaison with ISO, also take part in the work. ISO collaborates closely with the International Electrotechnical Commission (IEC) on all matters of electrotechnical standardization.

International Standards are drafted in accordance with the rules given in the ISO/IEC Directives, Part 2.

The main task of technical committees is to prepare International Standards. Draft International Standards adopted by the technical committees are circulated to the member bodies for voting. Publication as an International Standard requires approval by at least 75 % of the member bodies casting a vote.

Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this document may be the subject of patent rights. ISO shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

ISO 15243 was prepared by Technical Committee ISO/TC 4, *Rolling bearings*.

## Introduction

In practice, damage or failure of a bearing can often be the result of several mechanisms operating simultaneously. The failure can result from improper assembly or maintenance or from faulty manufacture of the bearing or its adjacent parts. In some instances, failure is due to a design compromise made in the interests of economy or from unforeseen operating conditions. It is the complex combination of design, manufacture, assembly, operation and maintenance that often causes difficulty in establishing the primary cause of failure.

In the event of extensive damage to or catastrophic failure of the bearing, the evidence is likely to be lost and it will then be impossible to identify the primary cause of failure. In all cases, knowledge of the actual operating conditions of the assembly and the maintenance history is of the utmost importance.

The classification of bearing failure established in this International Standard is based primarily upon the features visible on rolling element contact surfaces and other functional surfaces. Consideration of each feature is required for reliable determination of the cause of bearing failure. Since more than one process may cause similar effects to these surfaces, a description of appearance alone is occasionally inadequate for determining the reason for the failure. In such cases, the operating conditions must be considered.

# Rolling bearings — Damage and failures — Terms, characteristics and causes

## 1 Scope

This International Standard defines, describes and classifies the characteristics, changes in appearance and possible causes of failure of rolling bearings occurring in service. It will assist in the understanding of the various forms of change in appearance and the failure that has occurred.

For the purposes of this International Standard the term "failure of rolling bearings" means the result of a defect or damage that prevents the bearing meeting the intended design performance.

Consideration is restricted to characteristic forms of change in appearance and failure, which have a well-defined appearance and which can be attributed to particular causes with a high degree of certainty. The features of particular interest for explaining changes and failures are described. The various forms are illustrated with photographs and diagrams, and the most frequent causes are indicated.

The failure mode designations shown in the subclause titles are recommended for general use, but similar expressions or synonyms are given within parentheses below the titles.

Examples of rolling bearing failures are given in Annex A, together with a description of the causes of failure and proposed corrective actions.

## 2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

ISO 5593:1997, *Rolling bearings — Vocabulary*

## 3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in ISO 5593 and the following apply.

### 3.1

#### **characteristics**

visual appearance resulting from service performance

NOTE Surface defects and types of geometrical change that occur during wear (appearance of wear) are partly defined in ISO 6601 and ISO 8785.

## 4 Classification of failure modes occurring in rolling bearings

Rolling bearing failures are classified strictly according to their primary causes. However, it is not always easy to distinguish between causes and characteristics (symptoms) or, in other words, between failure mechanisms and failure modes. The large number of articles and books written on the subject confirms this (see Bibliography).



The evolution of tribological research during recent decades has led to a remarkable increase of new knowledge describing failure mechanisms and failure modes. In this International Standard, failure modes are classified in six main groups and various sub-groups (see Figure 1).

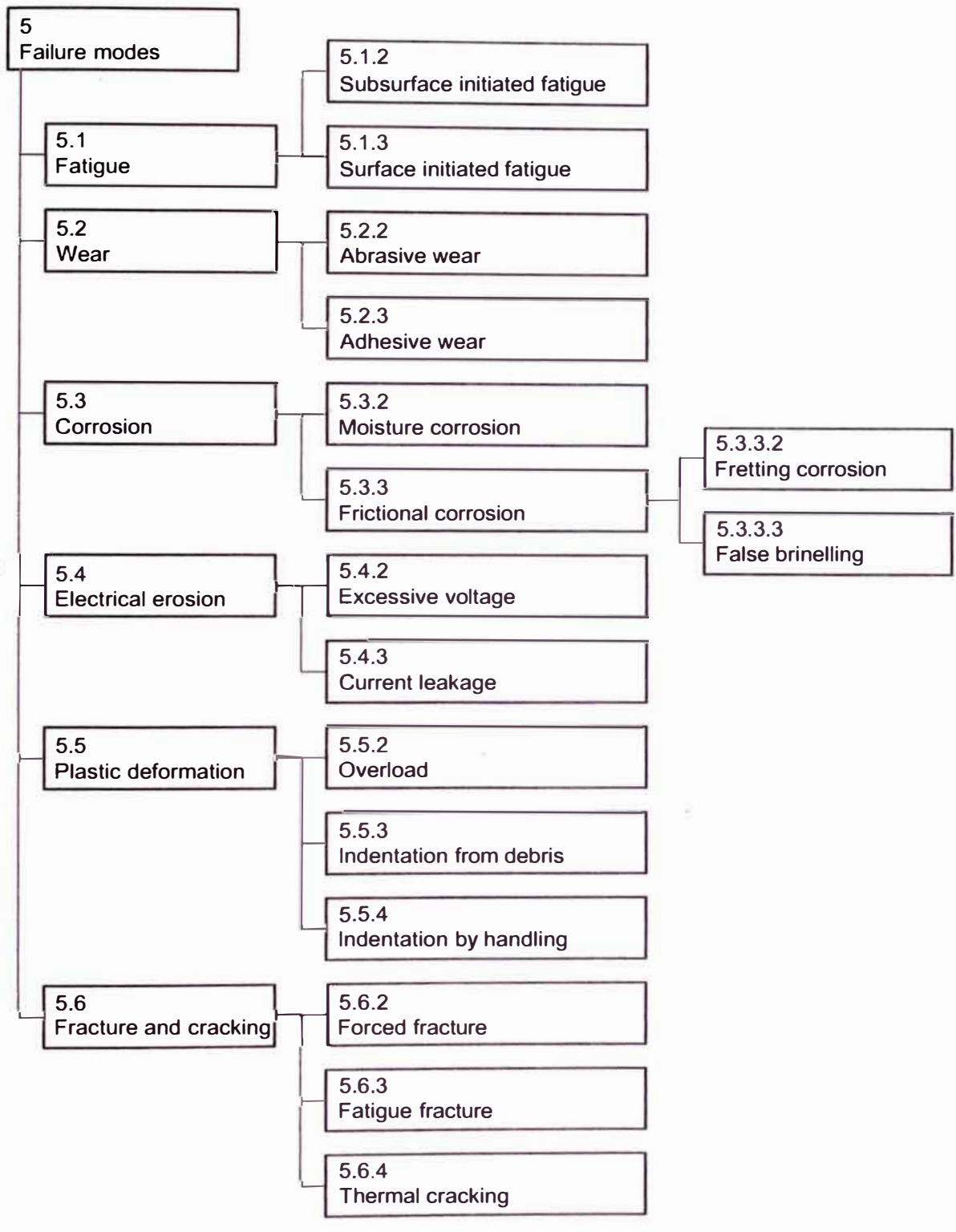


Figure 1 — Classification of failure modes

## 5 Failure modes

### 5.1 Fatigue

#### 5.1.1 General definition

The change in the structure, which is caused by the repeated stresses developed in the contacts between the rolling elements and the raceways, is described as fatigue. Fatigue is manifested visibly as a flaking of particles from the surface.

#### 5.1.2 Subsurface initiated fatigue

Under the influence of loads in rolling contacts, described by the Hertzian Theory, structural changes will occur and microcracks will be initiated at a certain depth under the surface, i.e. subsurface. The initiation of the microcracks is often caused by inclusions in the bearing steel (see Figure 2). The microcracks, which are observed at the edge of the white etched areas (butterflies), will normally propagate to the rolling contact surface producing flaking, spalling (pitting) and then peeling (see Figure 3).

**NOTE** The bearing life calculation in accordance with ISO 281 and ISO 281/Amd. 2 is based on subsurface initiated fatigue.

#### 5.1.3 Surface initiated fatigue

Fatigue initiated from the surface is, among other things, caused by surface distress.

Surface distress is the damage to the rolling contact metal surface asperities under a reduced lubrication regime and a certain percentage of sliding motion, causing the formation of

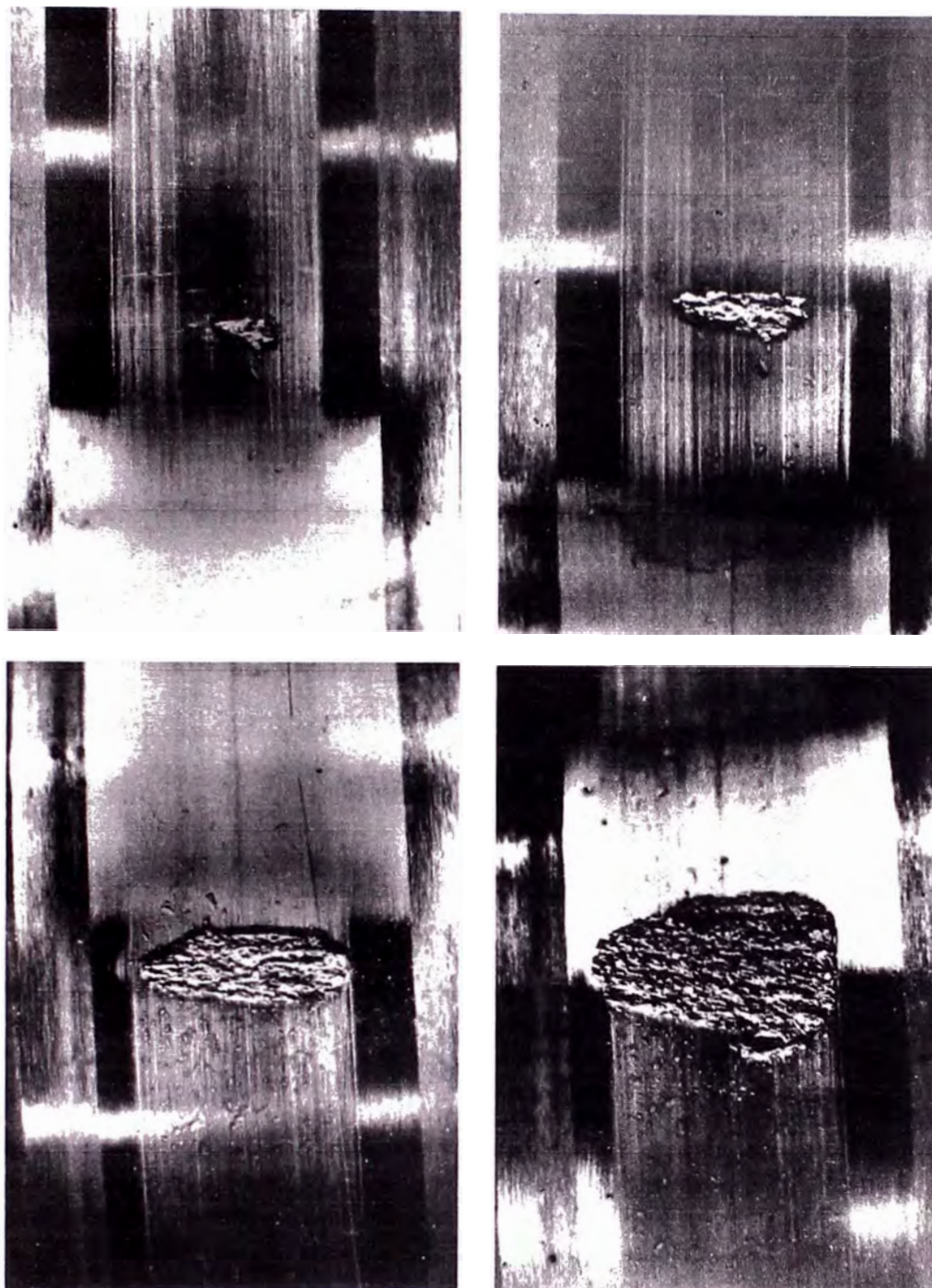
- asperity microcracks, see Figure 4;
- asperity microspalls, see Figure 5;
- microspalled areas (grey stained), see Figure 6.

Indentations in the raceways caused either by contaminant particles or by handling can also lead to surface initiated fatigue (see 5.5.3 and 5.5.4). Surface initiated fatigue caused by indentation arising from plastic deformation is shown in A.2.6.1 and A.2.6.3.

**NOTE** ISO 281/Amd. 2 includes surface related calculation parameters that are known to have an influence on the bearing life, such as material, lubrication, environment, contaminant particles and bearing load.



**Figure 2** — Subsurface microcrack with the “butterfly phenomenon” (white etched area) (Scale 500:1)



**Figure 3 — Progression of subsurface fatigue**

## **5.2 Wear**

### **5.2.1 General definition**

Wear is the progressive removal of material resulting from the interaction of the asperities of two sliding or rolling/sliding contacting surfaces during service.

### 5.2.2 Abrasive wear

(particle wear; three body wear)

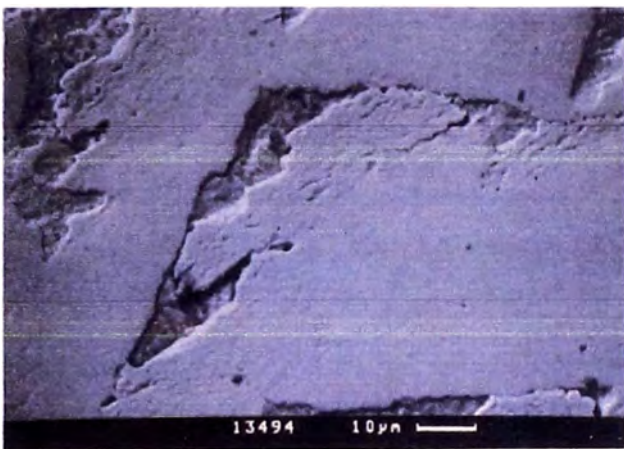
Abrasive wear is the result of inadequate lubrication or the ingress of foreign particles. The surfaces become dull to a degree, which varies according to the coarseness and nature of the abrasive particles (see Figure 7). These particles gradually increase in number as material is worn away from the running surfaces and cage. Finally, the wear becomes an accelerating process that results in a failed bearing.

**NOTE** The “running-in” of a rolling bearing is a natural short process after which the running behaviour, e.g. noise or operating temperature, stabilizes or even improves.

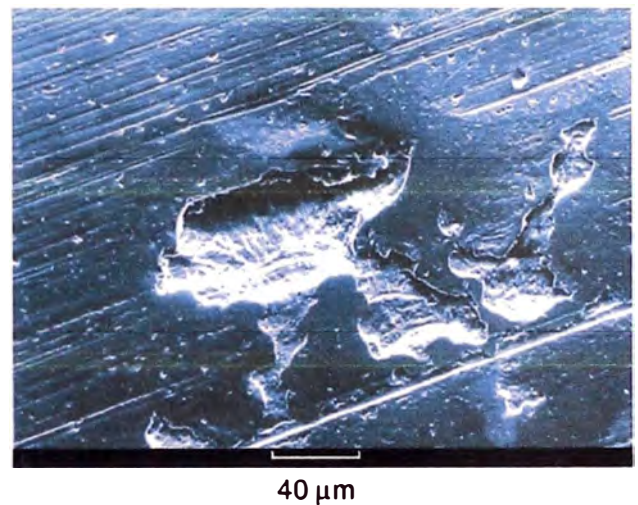
### 5.2.3 Adhesive wear

(smearing; skidding; galling)

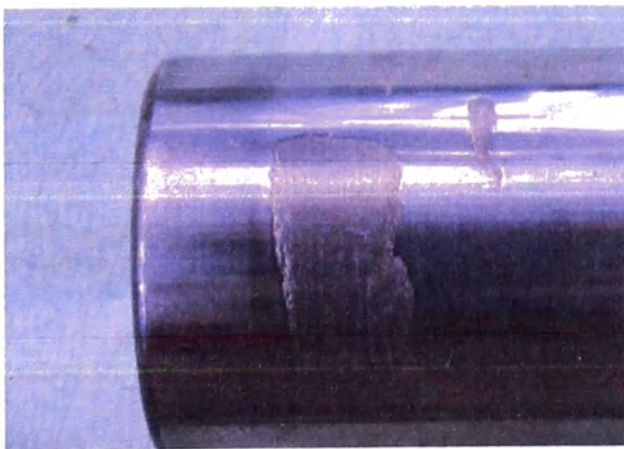
Adhesive wear is a transfer of material from one surface to another with frictional heating and, sometimes, tempering or rehardening of the surface. This produces localized stress concentrations with the potential for cracking or flaking of the contact areas.



**Figure 4 — Microcracks forming a “fish-scale” appearance**



**Figure 5 — Microspalls**



**Figure 6 — Heavy grey stained areas  
(Scale 1,25:1)**



**Figure 7 — Abrasive wear on the inner ring raceways of a double-row cylindrical roller bearing with central rib**

Smearing (skidding) can occur between rolling elements and raceways due to the fact that the rolling elements are lightly loaded and subjected to severe acceleration on their re-entry into the load zone (see Figure 8). Smearing can also occur between rolling elements and raceways when the load is too light in relation to the speed of rotation.

Smearing can occur on the guiding flange faces and on the ends of the rollers due to insufficient lubrication (see Figure 9). In full complement bearings (cageless), smearing can also occur in the contacts between rolling elements depending on lubrication and rotation conditions.

If a bearing ring "rotates" relative to its seating, i.e. mounting shaft or housing, then smearing can occur in the contact between the ring end face and its axial abutment, which can also cause cracking of the ring as shown in Figure 10. This type of damage generally occurs when the radial load on the bearing rotates relative to the bearing ring and the bearing ring is mounted with a very small clearance (loose fit) to its seating. Because of the minute difference in the diameters of the two components, they will have a minute difference in their circumferences and, consequently, when brought into contact at one point by the radial load, will rotate at minutely different speeds. This rolling motion of the ring against its seating with a minute difference in the rotational speeds is termed "creep".

When creep occurs, the asperities in the ring/seating contact region are over-rolled, which can cause the surface of the ring to take on a shiny appearance (see A.2.4.7). The over-rolling during creeping is often, but not necessarily, accompanied by sliding in the ring/seating contact, and then other damage will also be visible, e.g. scratches, fretting corrosion and wear. Under certain loading conditions and when the ring/seating interference fit is insufficiently tight, then fretting corrosion will predominate (see A.2.4.5).

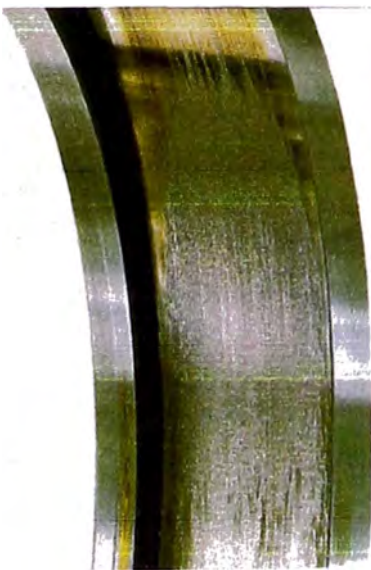


Figure 8 — Smearing on raceway surfaces



Figure 9 — Smearing of roller end

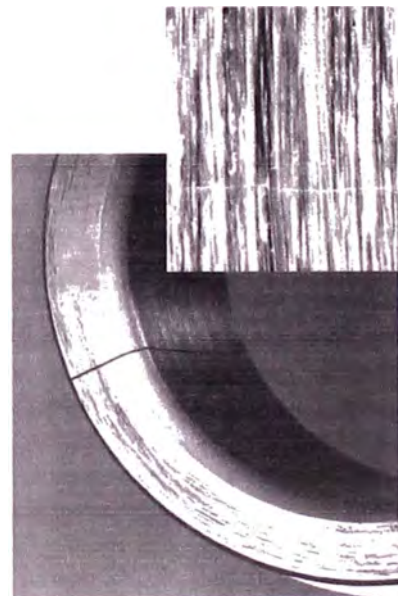


Figure 10 — Smearing on ring end face (ring is also fractured)

## 5.3 Corrosion

### 5.3.1 General definition

Corrosion is a chemical reaction on metal surfaces.

### 5.3.2 Moisture corrosion

(oxidation; rust)

When steel, used for rolling bearing components, is in contact with moisture, e.g. water or acid, oxidation of surfaces takes place. Subsequently the formation of corrosion pits occurs and finally flaking of the surface (see Figure 11).

A specific form of moisture corrosion can be observed in the contact areas between rolling elements and bearing rings where the water content in the lubricant or the degraded lubricant reacts with the surfaces of the adjacent bearing elements. The advanced stage will result in dark discolouration of the contact areas at intervals corresponding to the ball/roller pitch, eventually producing corrosion pits (see Figures 12 and 13).

### 5.3.3 Frictional corrosion

(tribocorrosion; tribo-oxidation)

#### 5.3.3.1 General definition

Frictional corrosion is a chemical reaction activated by relative micromovements between mating surfaces under certain friction conditions. These micromovements lead to oxidation of the surfaces and material, becoming visible as powdery rust and/or loss of material from one or both mating surfaces.



Figure 11 — Corrosion on a roller bearing outer ring

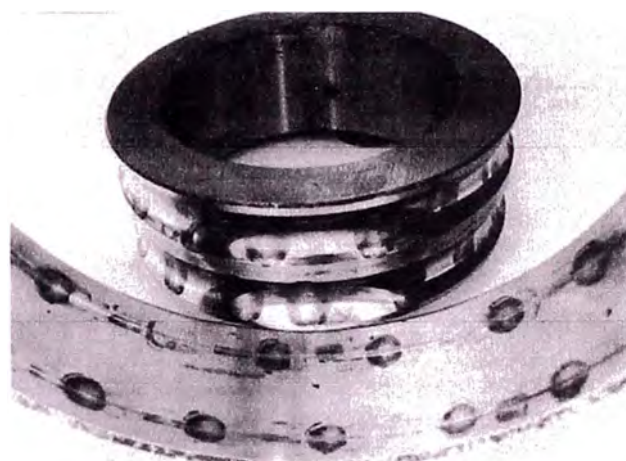


Figure 12 — Contact corrosion on a ball bearing inner ring and outer ring raceways



Figure 13 — Contact corrosion on a bearing raceway

### 5.3.3.2 Fretting corrosion (fretting rust)

Fretting corrosion occurs in fit interfaces that are transmitting loads under oscillating contact surface micromovements. Surface asperities oxidize and are rubbed off and vice versa; powdery rust develops (iron oxide). The bearing surface becomes shiny or a discoloured blackish red (see Figure 14). Typically, the failure develops in incorrect fits, either too light an interference fit or too high a surface roughness, in combination with loads and/or vibrations.

### 5.3.3.3 False brinelling (vibration corrosion)

False brinelling occurs in rolling element/raceway contact areas due to micromovements and/or resilience of the elastic contacts under cyclic vibrations. Depending on the intensity of the vibrations, the lubrication conditions and load, a combination of corrosion and wear occurs, forming shallow depressions in the raceways.

In the case of a stationary bearing, the depressions appear at rolling element pitch and can often be discoloured reddish or shiny (see Figure 15).

False brinelling caused by vibrations occurring during rotation shows itself in closely spaced flutes (see Figure 16). These should not be mistaken for electrically caused flutes (see 5.4.3 and Figure 19). The fluting resulting from vibration has bright or fretted bottoms to the depressions compared to fluting produced by the passage of electric current, where the bottoms of the depressions are dark in colour. The damage caused by electric current is also distinguishable by the fact that the rolling elements are also marked.

NOTE In this International Standard false brinelling is classified under corrosion. In other documents it is sometimes classified as wear.

## 5.4 Electrical erosion

### 5.4.1 General definition

Electrical erosion is the removal of material from the contact surfaces caused by the passage of electric current.



Figure 14 — Fretting corrosion in inner ring bore

## 5.5 Plastic deformation

### 5.5.1 General definition

Permanent deformation occurring whenever the yield strength of the material is exceeded.

Typically this can occur in two different ways:

on a macroscale, where the contact load between a rolling element and the raceway causes yielding over a substantial portion of the contact footprint;

on a microscale, where a foreign object is over-rolled between a rolling element and the raceway and yielding occurs over only a small part of the contact footprint.

### 5.5.2 Overload (true brinelling)

Overloading of a stationary bearing by static load or shock load leads to plastic deformation at the rolling element/raceway contacts, i.e. the formation of shallow depressions or flutes on the bearing raceways in positions corresponding to the pitch of the rolling elements (see Figure 22). Furthermore, overloading can occur by excessive preloading or due to incorrect handling during mounting (see Figure 23).

Inappropriate handling can also cause overloading and deformation of other bearing components, e.g. shields, washers and cages (see Figure 24).



**Figure 22 — Plastic deformation on a tapered roller bearing raceway produced by overloading**





Figure 23 — Overloading during mounting

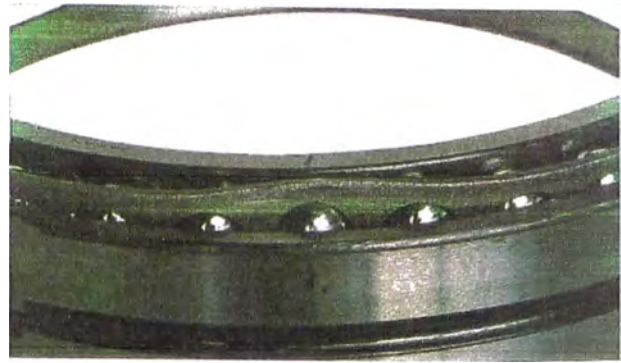


Figure 24 — Cage deformed by incorrect handling

### 5.5.3 Indentation from debris

When particles are over-rolled, indentations are formed on raceways and rolling elements. The size and shape of the indentations depend on the nature of the particles. See Figures 25 a), b) and c), which depict the following types of indentation:

- a) from soft particles, e.g. fibres and wood;
- b) from hardened steel particles, e.g. from gears and bearings;
- c) from hard mineral particles, e.g. from grinding wheels.

NOTE ISO 281/Amd. 2 describes the reduction of the bearing life by particle indentation.

### 5.5.4 Indentation by handling

Raceways and rolling elements can incur indentations and nicks caused by hard, possibly sharp, objects (see Figure 26).

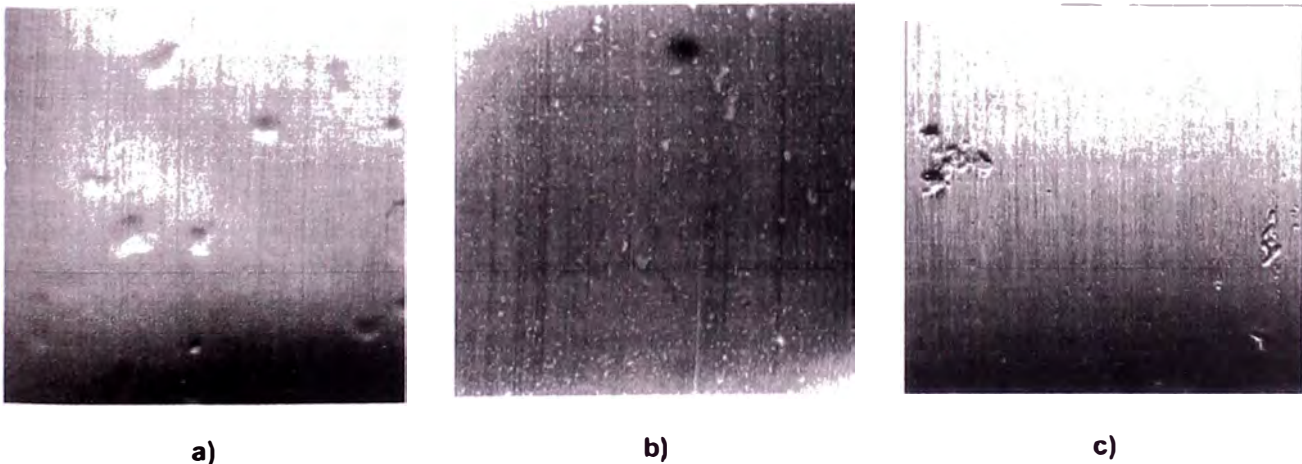


Figure 25 — Indentations caused by over-rolled particles

# PROTOCOLO DE INSPECCIÓN

## INDUSTRIAL AFTER MARKET – SCHAEFFLER CHILE

Cliente - SCM  
 Contacto  
 CC: Miguel Alvarez,

Santiago, Septiembre de 2010.

### DATOS DE APLICACIÓN

RODAMIENTO	FAG 2 4 1/9 0 0 B K 3 0 . M B . C 3
EQUIPO	HIGH PRESSURE GRINDING ROLLER HPGR
LUBRICANTE	Grasa
TIEMPO EN OPERACIÓN	
TEMPERATURA DESCANSO	°C
ROTACIÓN	rpm
TEMPERATURA AMBIENTE	

### ANTECEDENTES

Para establecer la condición actual de rodamientos en operación o almacenados en bodega para definir el nivel de reacondicionamiento requerido, nuestros ingenieros especialistas, inspeccionan los rodamientos de forma concienzudamente, generando un reporte particular para cada uno de ellos, en base a protocolos validados por nuestra compañía.

A continuación, un resumen de las etapas que considera la inspección:

- Limpieza acusiosa del rodamiento y sus componentes, con solventes compatibles con el lubricante utilizado, en base a derivados de petróleo y sin componentes siliconados.
- Individualización de cada rodamiento y certificación de originalidad (confirmación con planos de fabricación, según número de serie)
- Desarme parcial del rodamiento (retiro de elementos rodantes de ambas hileras)
- Inspección visual de todos sus componentes
- Metrología de componentes (Juego radial interno, profundidad de pitting, etc.).
- Reporte final de inspección y definición de nivel de reacondicionamiento requerido

Los recursos requeridos para esta actividad, entre otros son:

- Formatos de inspección
- Feeler gauges y micrómetros profundímetros
- Lupas de inspección
- Prensas de movilidad de elementos rodantes, herramientas de desmontaje, etc.

**Enrique Grez M.**  
**Technical Manager – Schaeffler Chile Ltda. / Industrial Services Coordinator**  
**Schaeffler Chile Ltda.**  
**TEL.: 56 41 2486760 / 56 2 477 5003**  
**[enrique.grez@schaeffler.com](mailto:enrique.grez@schaeffler.com)**

Schaeffler Chile Ltda.  
 Hernando de Aguirre, 268  
 Of. 201 – Providencia  
 Tel. +56 2 477 5000  
 Fax +56 2 435 9079  
[www.schaeffler.com](http://www.schaeffler.com)

# Procedimiento montaje rodamientos



Hoja técnica de montaje y resultado de tolerancias

Fecha	Firma proveedor del rodamiento	Firma montador del rodamiento
Feb. 2010		

## Reporte de Ingeniería

Medidas en micras ( $\mu\text{m}$ ).

Nombre del proyecto	Montaje de Rodamientos en HPGR N°31 & N°33
Cliente	Mantenimiento Planta Chancado Concentradora
Instrucciones de montaje	

Rodamiento	241/900B-K30.MB.C3			
Numero de Serie del Rodamiento	241/900			
Juego Radial Antes del Montaje				
Grupo de Juego Radial Antes del Montaje	Min.	840	Max.	1070
Disminución del Juego Radial	Min.	370	Max.	500
Manguito de Fijación				
Desplazamiento axial sobre el cono 1:12 (Eje)	Min.	14300	Max.	19500
Desplazamiento axial sobre el cono 1:12 (Manguito)	Min.		Max.	

## Reporte de montaje

Juego radial mínimo después del montaje	390			
Juego radial de servicio				
Desplazamiento axial sobre el cono 1:12 (Eje)	Min.		Max.	
Desplazamiento axial sobre el cono 1:12 (Manguito)	Min.		Max.	