

GUÍA PARA EL ESTUDIO DE LOS

ELEMENTOS DE MÁQUINAS

**BREVE INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE LAS CAUSAS
DE AVERÍAS EN LOS RODAMIENTOS**

**RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN LA
BIBLIOGRAFÍA ESPECIALIZADA DISPONIBLE CON LA
INCLUSIÓN DE MÁS DE 90 FOTOGRAFÍAS.**

Ing. Ricardo Mario Amé.
Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de
Zamora.
Año 2003.

INDICE GENERAL

PREFACIO	4
	6
CAPÍTULO I	
<i>AVERÍAS POR CAUSAS DEBIDAS AL USO NORMAL</i>	24
CAPÍTULO II	
<i>AVERÍAS PRODUCIDAS POR SITUACIONES AJENAS AL RODAMIENTO.</i>	
INTRODUCCIÓN	24
II-1.- DEFECTOS RELACIONADOS CON LA LUBRICACIÓN	29
II-1-A.- FALTA O EXCESO DE LUBRICANTE, O LUBRICANTE NO ADECUADO	29
II-1-B.- PARTÍCULAS EXTRAÑAS	39
II-1-C.- DESGASTE ADHESIVO	49
II-1-D.- DESGASTE ABRASIVO	51
II-2.- CORROSIÓN	53
II-2-A.- ACCIÓN DE AGENTES CORROSIVOS	53
II-2-B.- CORROSIÓN POR VIBRACIÓN	61
II-2-C.- CORROSIÓN POR FROTAMIENTO	69
II-3.- INSTALACIÓN INCORRECTA	73
II-3-A.- DISEÑO DEFECTUOSO DE LAS PARTES ANEXAS AL RODAMIENTO	73
II-3-B.- MONTAJE POR MÉTODOS NO CONVENIENTES	85
II-4- OTROS MOTIVOS DE DAÑO	91
II-4-A.- PASAJE DE CORRIENTE ELÉCTRICA	91
II-4-B.- ALTAS TEMPERATURAS	99
	101
CAPÍTULO III	
<i>SEÑALES FÍSICAS ENTRE CAUSAS Y EFECTOS DE LAS AVERÍAS</i>	
III-1- SIGNOS EXTERNOS QUE ANUNCIAN POSIBLES AVERÍAS	101
III-2- POSIBLE RELACIÓN ENTRE EL TIPO DE DAÑO OBSERVADO Y SU CAUSA Y ACCIONES PREVENTIVAS PROPUESTAS	102
	105
INDICE DE FIGURAS DEL TEXTO	
INDICE DE FIGURAS DEL CAPÍTULO I	105
INDICE DE FIGURAS DEL CAPÍTULO II	107
BIBLIOGRAFÍA Y DOCUMENTACIÓN CONSULTADA	111

PREFACIO

El tema de cojinetes de rodadura forma parte del programa de estudios de la Asignatura Elementos de Máquinas, que se dicta en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora, y en prácticamente todas las Facultades de Ingeniería e Institutos Técnicos de nuestro país y del exterior.

Elementos de Máquinas es, para la carrera de ingeniería mecánica, una de las materias pivot donde convergen saberes adquiridos en las ciencias y tecnologías básicas, y desde donde derivan las capacidades de análisis y metodologías de interpretación del funcionamiento de los dispositivos mecánicos más comunes de la ingeniería.

Como en todos los temas de la asignatura, también a los rodamientos se los estudia desde el punto de vista de las tensiones generadas, el fenómeno de la fatiga, el concepto de capacidad de carga estática y dinámica, su vida útil esperada, lubricación, etc., es decir aplicando conceptos de análisis de tensiones, estadística etc., que conforman el concepto de estudios superiores que debe impartir una facultad de ingeniería.

Estas capacidades adquiridas por el estudiante lo habilitan para interpretar el comportamiento, adecuado o no, de cualquier componente de máquina.

No obstante, se me ocurrió muy útil presentar un trabajo de recopilación de los antecedentes que dispongo sobre casos de daños producidos en los rodamientos ya sea por el normal uso, en condiciones apropiadas de tamaño, lubricación fijación etc., como de su uso en condiciones menos afortunadas.

La observación de las fotografías que en este trabajo se presentan y la explicación de la causa que probablemente causó el deterioro que las acompaña, es sumamente útil para que el estudiante compruebe cómo se hace realidad muchos de los conocimientos teóricos que adquirió; también considero muy útil para el diseñador de máquinas y para el profesional del mantenimiento.

Estaré muy satisfecho si éste trabajo resulta de consulta y favorece el conocimiento.

Ricardo Mario Amé.
Enero del 2003.

CAPÍTULO I

AVERÍAS POR CAUSAS DEBIDAS AL USO NORMAL

El rodamiento es por definición una pieza de fatiga, asegura SNR en su documento técnico [3], y agrega que, a pesar de que su geometría interna está diseñada para que el movimiento de sus elementos sea próximo a la rodadura pura, no debe por ello esperarse una vida infinita. En condiciones normales de uso, el rodamiento no se destruye, en consecuencia, por desgaste u otros efectos, sino por fatiga.

Leemos, entre otras, en la obra de Eschmann; Hasbargen y Weigand [2] que todos los rodamientos de bolas y de rodillos tienen una vida definida determinada por el número de ciclos de contacto y del nivel de carga aplicada a los caminos de rodadura por los elementos rodantes.

Continúan estos autores indicando que, cuando el rodamiento se acerca al final de su vida, manifiesta el fenómeno de la fatiga en las superficies de contacto entre los elementos rodantes y los caminos de rodadura.

Se observa en una o en varias zonas una falla conocida como exfoliación. (figura I-1 y figura I-2).



Figura I-1: exfoliación inicial por fatiga en la pista de rodadura interna de un rodamiento de bolas [2].

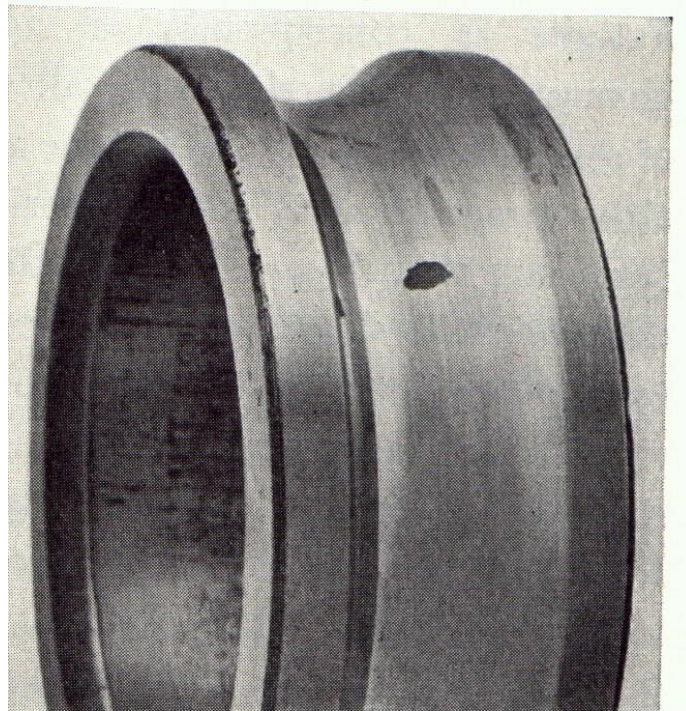


Figura I-2: exfoliación por fatiga en la zona de rodadura de un aro interno de un rodamiento de bolas [2].

Por su parte, Hans Schlicht [4] agrega que este daño representa una forma especial de desgaste y se diferencia del debido a la abrasión, al atascamiento, a la corrosión y al debido a cavitación, porque la exfoliación está provocada por la fatiga del material.

Los picados o “*pittings*” aparecen en forma muy variada, se los pueden subdividir según se produzcan las fisuras de fatiga debajo de la superficie del camino de rodadura y desde allí se propaguen hasta ella (figura I-3), o si se producen en la superficie misma del camino de rodadura y desde allí se dirigen hacia el interior del material.

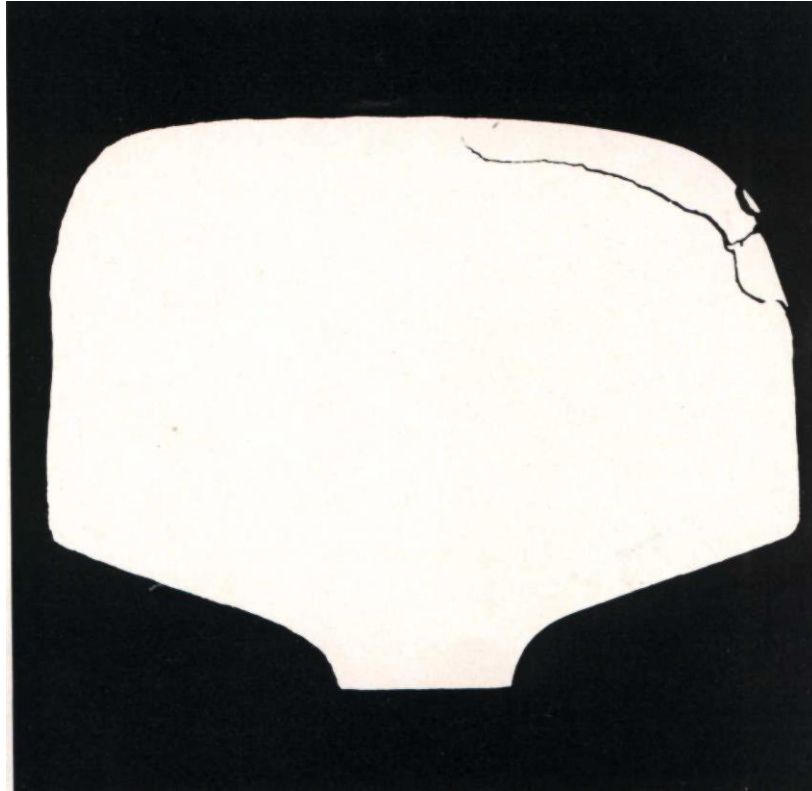


Figura I-3: fisura inicial por debajo de la superficie de contacto en la cabeza de un carril, colocado en una curva, sometido a una carga oblicua. Véase que la fisura tiene un curso paralelo a la superficie y a una profundidad determinada [4].

Otro ejemplo es la figura I-4, en donde se ve una bola de rodamiento en la cual la fisura comenzó por debajo de la superficie y se propagó hacia el exterior produciendo la exfoliación de una capa de un espesor prácticamente constante [4].



Figura I-4: exfoliación en la superficie de una bola de rodamiento [4].

Una vez iniciada, el área exfoliada se extiende rápidamente (figura I-5 y figura I-6).

Los pequeños fragmentos de material desprendidos se interponen entre las superficies en contacto causando sobrecargas localizadas y facilitando la extensión del daño o incluso causando la fractura de las pistas (figura I-7).

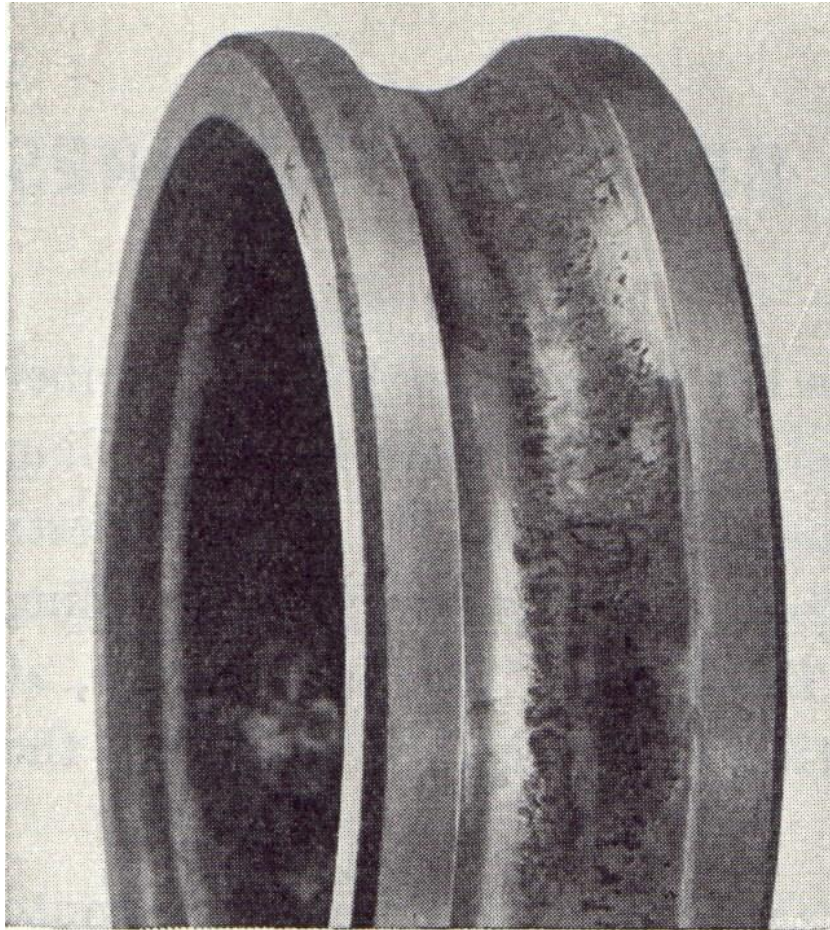


Figura I-5. avería por exfoliación avanzada en el camino de rodadura del aro interno de un rodamiento de bolas [2].

Estos autores indican que la fatiga es un fenómeno normal que sucede con todos los rodamientos. Si la fatiga ocurre luego de un período relativamente corto de funcionamiento y no es imputable a sobrecargas, se puede pensar en factores externos, como defectos del montaje, de la lubricación u otros (ver capítulo II).

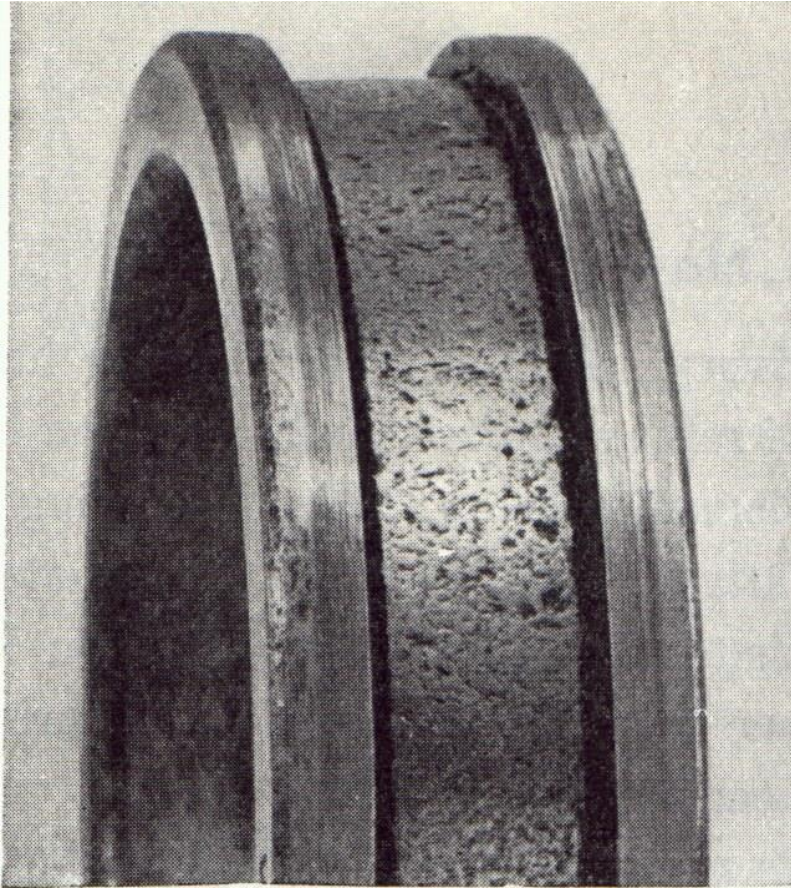


Figura I-6: avería por exfoliación avanzada en el camino de rodadura del aro interno de un rodamiento de rodillos [2]

Las exigencias de fiabilidad requeridas al funcionamiento de los rodamientos implica que sólo se admite una muy pequeña frecuencia de fallas tempranas.

La resistencia a la fatiga de los rodamientos por contacto rodante depende de numerosos factores externos e internos, según Andersson [12].

Son los factores internos: el diseño del rodamiento, su ejecución en la fabricación, el material, características de los aros, elementos rodantes y jaulas, variaciones en el tratamiento térmico, mecanización del material, la orientación de las fibras, la topografía, el endurecimiento y otros tratamientos de las superficies [12].



Figura I-7: fractura del aro interno de un rodamiento de bolas debido a las cargas concentradas puntuales producidas al paso de los elementos rodantes por sobre partículas metálicas desprendidas de la exfoliación [2].

De todos ellos, el factor decisivo siempre, según [12], es la pureza del material, que incluye el tipo de inclusiones, forma y distribución de tamaños, así como contenido de elementos residuales, particularmente oxígeno y titanio, que forman inclusiones duras y perjudiciales [12].

El material más utilizado para la fabricación de rodamientos es el acero aleado al cromo con un alto contenido de carbono, tipo SKF 3 (similar al SAE 52.100; DIN 100Cr6).

Por regla general se le da a este acero un tratamiento martensítico, mediante el cual el acero es templado hasta alcanzar una dureza de 58-65 HRC. [11].

Entre los factores esenciales para la obtención de una alta integridad estructural y una larga duración a la fatiga, cabe destacar un correcto diseño, ausencia de defectos superficiales y de fabricación, un nivel bajo de inclusiones perjudiciales no metálicas en el acero,

particularmente óxidos y carbonitruros, así como un control de la microestructura durante el tratamiento térmico. [11].

Las averías causadas por la fatiga se producen a menudo por las inclusiones duras no metálicas, tales como óxidos y carbonitruros.

El incremento en la duración del rodamiento conseguido en los últimos decenios se debe principalmente a una mejora considerable de la pureza del acero [10]. Esta afirmación se verifica por los ensayos efectuados por la casa SKF (ver referencia [10]).

Las inclusiones a que se hace referencia son: los óxidos de aluminio (Figura I-8); Aluminatos de calcio (figura I-9) y carbonitruros de titanio (figura I-10).



Figura I-8: Inclusión de óxido de aluminio en lugares de iniciación de fallas por fatiga que se han observado en ensayos de flexión rotatoria, en acero SKF 3. Fotografía de aumento x1000 [10].

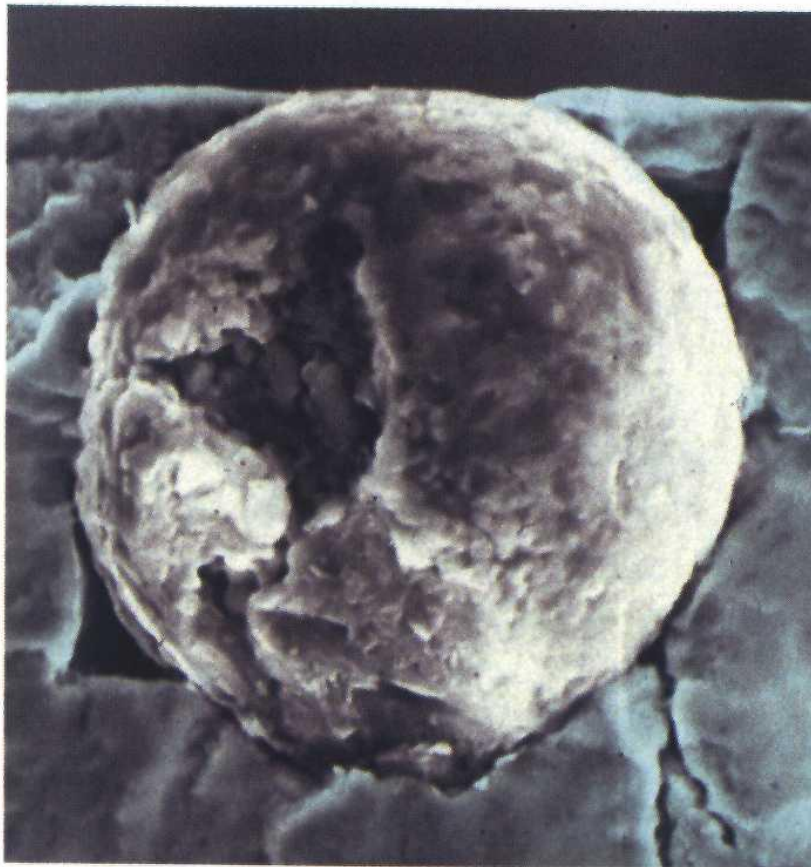


Figura I-9: Inclusión de aluminato de calcio en lugares de iniciación de fallas por fatiga que se han observado en ensayos de flexión rotatoria, en acero SKF 3. Fotografía de aumento x1000 [10].

En los ensayos de fatiga con viga giratoria, es posible determinar la causa de iniciación de una avería. Si se trata de inclusiones no metálicas, es posible especificar su análisis químico [10].



Figura I-10: Inclusión de carbonitruro de titanio en lugares de iniciación de fallas por fatiga que se han observado en ensayos de flexión rotatoria, en acero SKF 3. Fotografía de aumento x1000 [10].

Los métodos convencionales aplicados al cálculo teórico de la duración de los rodamientos se fundamentan en el trabajo realizado en los años 1930 y 1940 por Lundberg y Palmgren [11].

Este método es representativo de los materiales de aquella época, de su calidad de fabricación, lubricación y métodos de ensayo, y aunque se le han introducido factores que toman en consideración las mejoras alcanzadas, el método conserva el rasgo de predecir una duración finita en todas las aplicaciones, aún bajo esfuerzos de contacto muy pequeños [11].

Sin embargo, muchas aplicaciones modernas de rodamientos dejan entrever la posibilidad de que las fallas en funcionamiento raras veces están relacionadas con la fatiga.

Algunos ensayos efectuados sobre rodamientos sometidos a grandes cargas han mostrado que una duración prácticamente infinita es un concepto realista, siempre que los rodamientos se hayan fabricado con precisión, y utilizando aceros de alta calidad [11], además de otras consideraciones (ver capítulo II).

Por ejemplo, en una serie de pruebas sobre 92 rodamientos contruidos con el acero SKF MR, los cuales fueron sometidos a un nivel de esfuerzo bajo (carga = 15.057N correspondiente a $C/P=3,5$) y con una buena película de lubricación, sólo dos de ellos fallaron en el aro interior, luego de 185 y 375×10^6 revoluciones, mientras que 85 rodamientos funcionaron sin fallas hasta 1500×10^6 revoluciones [12].

Por su parte, Lorösch [7] afirma que para una separación completa de las superficies en contacto por medio de una película elasto-hidrodinámica y para un acero estándar vacuo desgasificado, se espera un aumento de cuatro veces en la duración nominal hasta la fatiga.

El primer informe sobre alteraciones en la microestructura en zonas debajo de la superficie data de 1946. Dentro de una zona limitada debajo del camino de rodadura, se observan diferencias al ataque ácido en la microestructura.

Si se observa a microscopio una sección transversal del camino de rodadura de un rodamiento sometido a ensayo, con un tiempo determinado de aplicación de carga, se observa una zona oscura lenticular (figura I-11) [4].

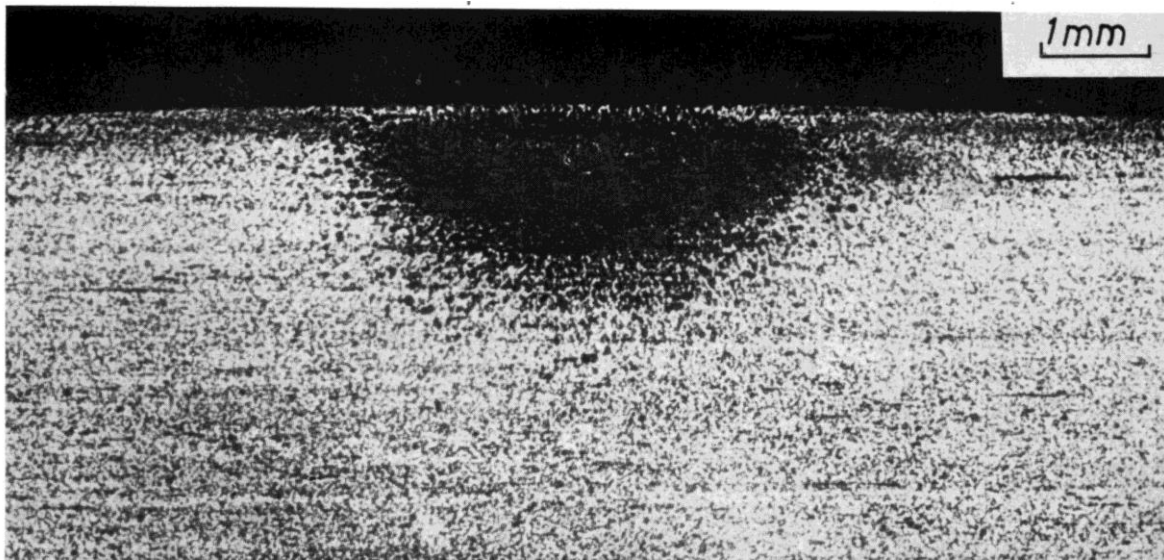


Figura I-11: zona con deformación debajo del camino de rodadura

Estas zonas son tanto más oscuras cuanto mayor sea el número de pasos de rodadura.

Obsérvese que la zona de color más intenso está situada a una determinada distancia por debajo del camino de rodadura.

La figura I-12 muestra la misma zona, pero en el plano diametral o normal al eje de giro de la pista.

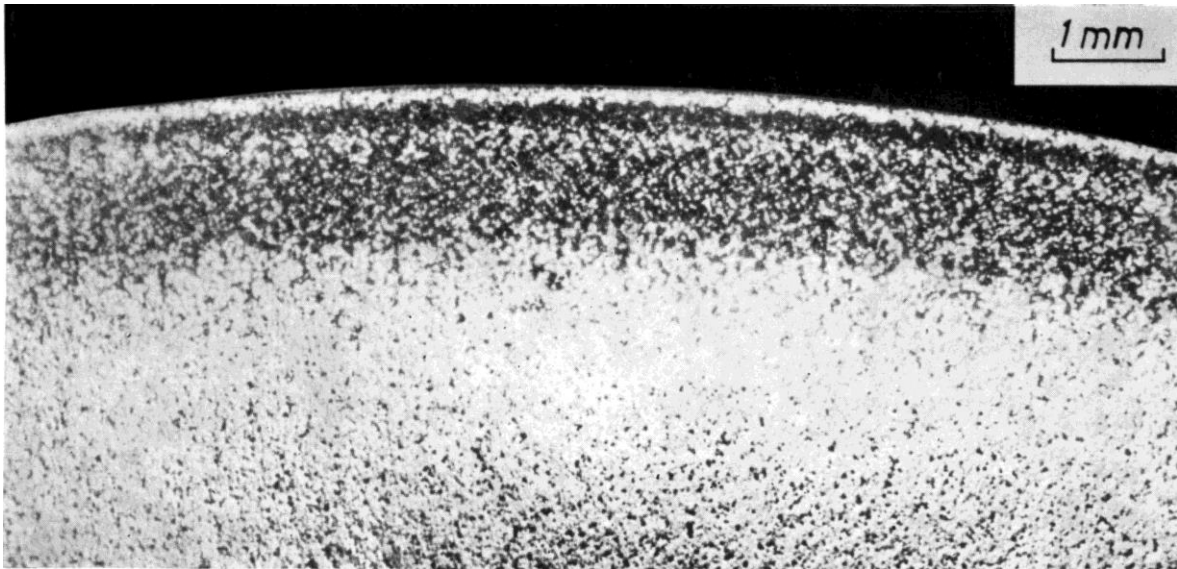


Figura I-12: vista longitudinal o diametral de la zona deformada por debajo del camino de rodadura [4]:

Los estudios de esta zona oscura, según H. Schlicht [4] revelan que pueden deberse a tres causas:

- 1- Martensita revenida a una temperatura más elevada, que es atacada por la corrosión.
- 2- Deformaciones plásticas que podrían haber dislocado la constelación de la martensita, la elevación de la energía interna conduce a un empeoramiento del comportamiento frente a la corrosión.
- 3- Una deformación plástica de la martensita podría haber conducido a la formación de surcos durante el ataque con el agente químico para la observación microscópica; relieves en la superficie exterior disminuirían la reflexión.

Otras observaciones microscópicas presentadas por este autor [4], muestran surcos creados por la martensita deformada plásticamente, orientados entre sí con un ángulo de 90° , como es de esperar cuando existen esfuerzos principales de cizalladura (figura I-13).

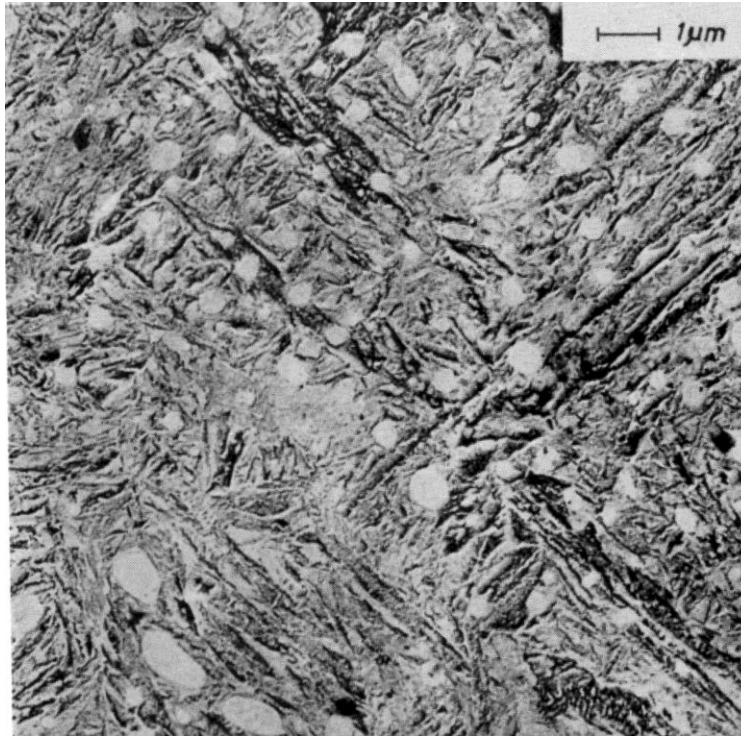


Figura I-13: martensita deformada plásticamente por debajo de la superficie de rodadura en un plano diametral [4].

Para los Srs. Hollox, Voskamp y Joannides [11], la medición de austenita residual presente a consecuencia de un tratamiento térmico normal martensítico es un indicador sensible de alteraciones incipientes en la microestructura.

Los cambios en el nivel de austenita residual como resultado de tensiones de contacto no constituyen la única medida de las alteraciones en las zonas debajo de la superficie.

Se desarrollan tensiones residuales de compresión en un plano paralelo al camino de rodadura, en direcciones paralelas a la dirección de rodadura y en ángulo recto a la misma [11].

En los rodamientos probados existen tensiones residuales de tracción en zonas limitadas debajo de la superficie, en una dirección en ángulo recto a la superficie.

Las tensiones residuales de tracción en combinación con la existencia de una orientación determinada en un campo limitado debajo de la superficie, constituye un factor potente en la propagación de fisuras, principalmente porque la orientación determinada es tal que el plano normal de fractura del acero es paralelo a la superficie y en ángulo recto a las tensiones de tracción desarrollada [11]

En caso de presiones extremas y en aceros “limpios”, con menos y más pequeñas inclusiones, se han podido observar fisuras o grietas debajo de la superficie, que se han propagado sobre grandes distancias sin causar fallas por fatiga tipo exfoliado (figura I-14).

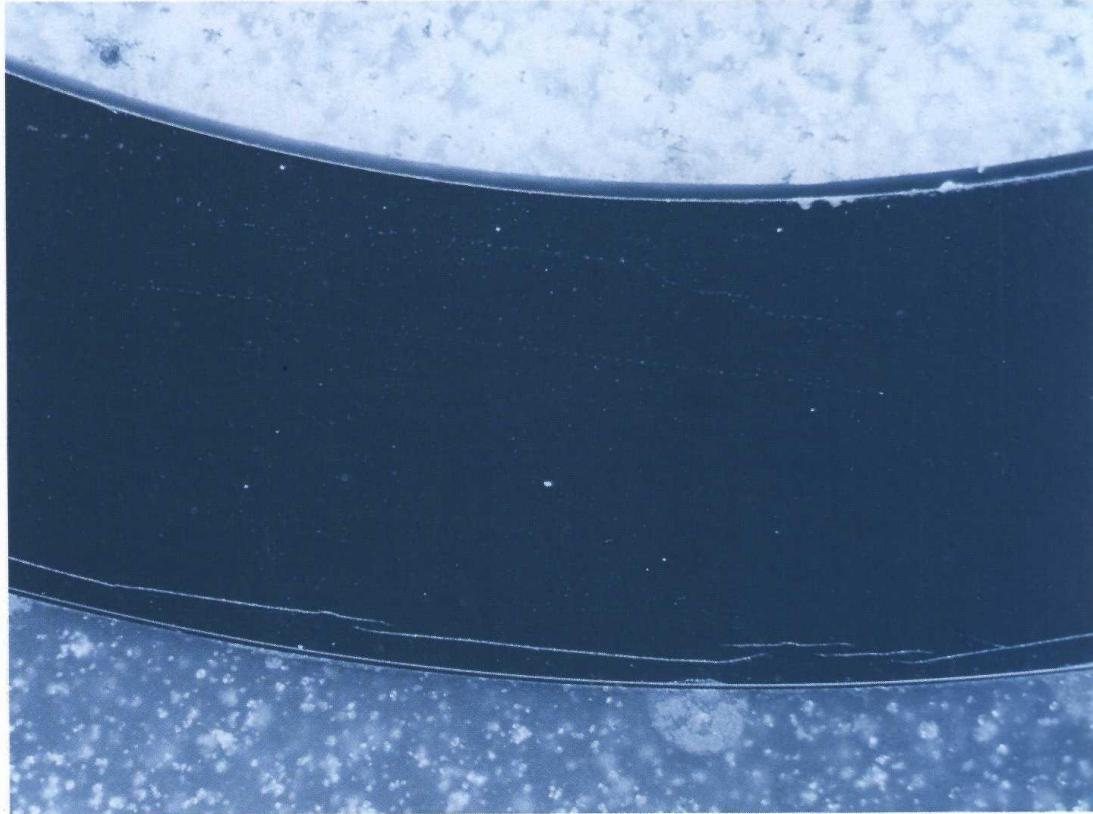


Figura I-14 Micro imagen óptica en la que se aprecian varias fisuras que se han desarrollado a 0.25-0.35 mm por debajo de la superficie de una sección axial a través del centro del camino de rodadura, que sin embargo no han causado falla de exfoliación por fatiga [11]

En aceros con alto contenido de inclusiones de óxidos, sometidos a prueba con esfuerzos reducidos, las exfoliaciones por fatiga muestran en fallas tempranas una tendencia a ser pequeñas y desiguales (figura I-15)

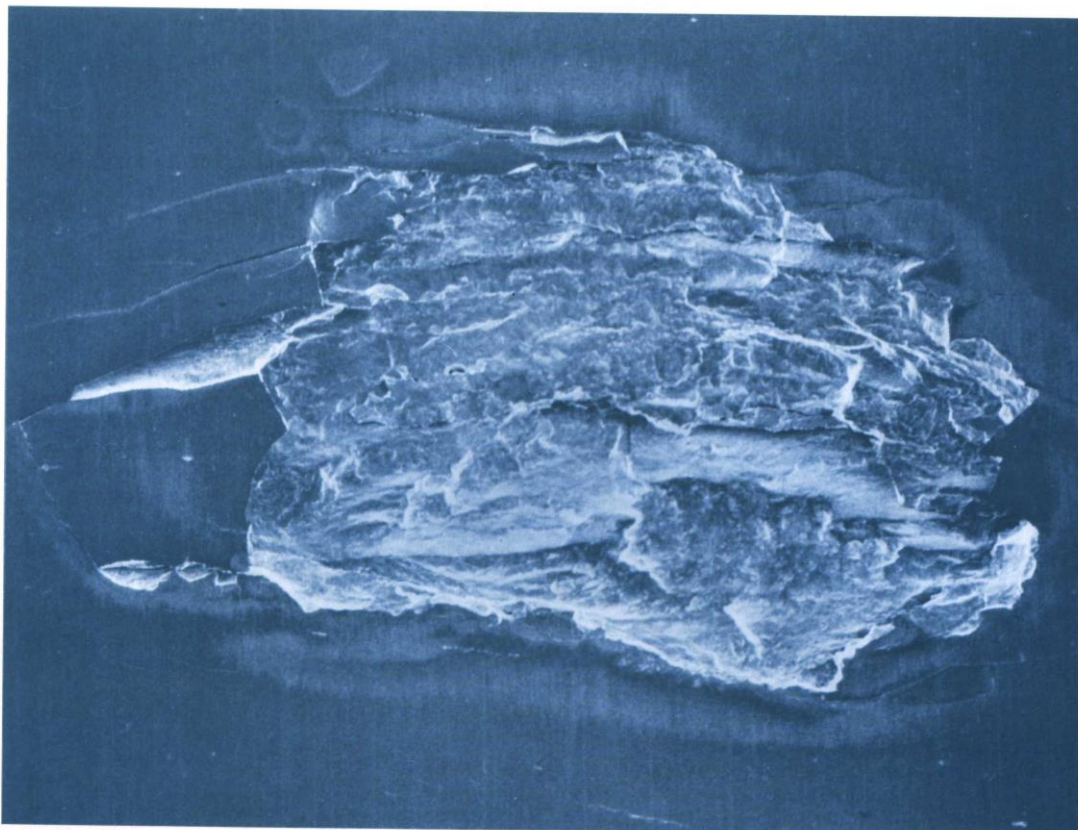


Figura I-15. Exfoliado por fatiga de carácter pequeño e irregular en relación con fallos tempranos, particularmente en aceros menos “limpios” [11]

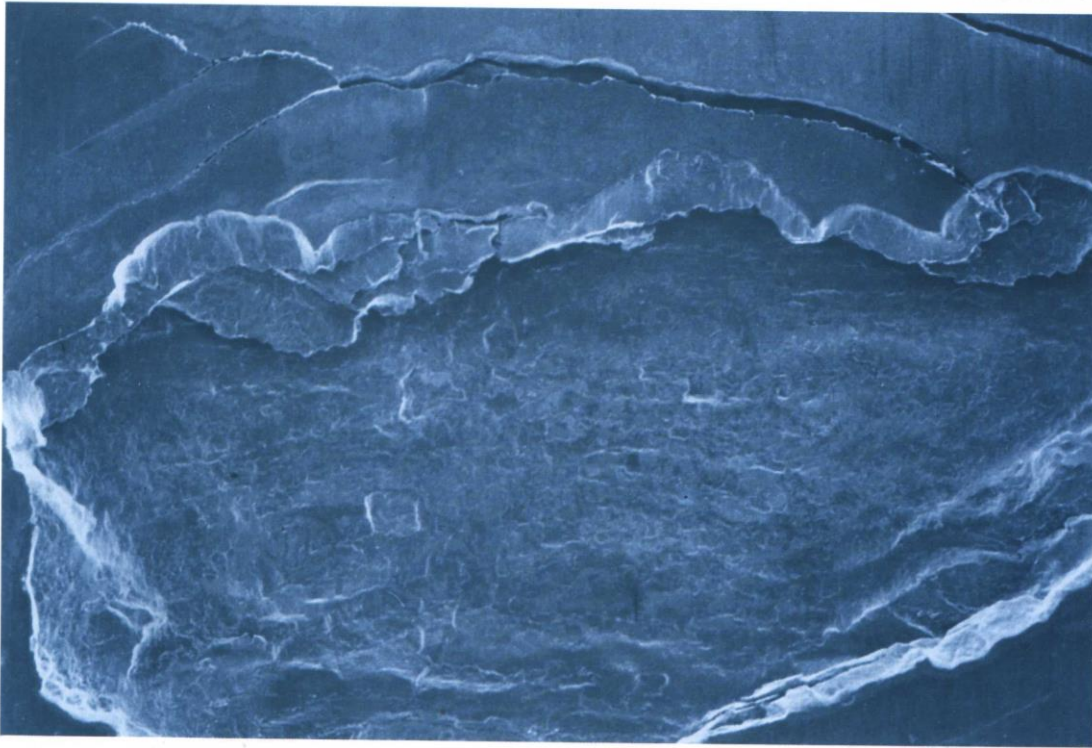


Figura I-16. Exfoliado por fatiga en fallas tardías, particularmente en aceros “limpios” tienen un aspecto de fondo plano. La forma pronunciada en “V” está relacionada con el desarrollo de las fisuras en un ángulo de 45° en relación con la dirección de rodadura.

Más del 95% de todas las fallas en los experimentos desarrollados por SKF, con aceros puros, tienen frecuentemente una forma pronunciada en “V”, con los laterales de la V cerca de 45° en relación con la dirección de rodadura, (figura I-16)

Como explicación a estas observaciones, Hollox, Voskamp y Koannides [11] indican que se ha sugerido que la iniciación de fisuras puede empezar en varios puntos cerca de inclusiones de óxido o de carbonitruros que concentran tensiones, y por ello puede producir una forma desigual de exfoliación.

En un acero “limpio” con menos y más pequeñas inclusiones, la deformación micro plástica hasta la inestabilidad y el desarrollo de una orientación determinada implican una formación más uniforme del exfoliado [11].

Los cambios en los campos debajo de la superficie de los rodamientos sometidos a prueba son una consecuencia de la concentración de deformación micro plástica por el efecto de los ciclos de esfuerzo.

La iniciación de la transformación depende de varios factores tales como la carga, la frecuencia y la temperatura.

Es importante saber que la duración del período de estabilidad disminuye con el incremento de la carga. Inversamente, bajo pequeños esfuerzos de contacto la transición a la inestabilidad prácticamente no ha empezado después de 10^8 revoluciones [11].

El proceso de fatiga de un material, según Schlicht [4], se produce a consecuencia de un esfuerzo alternativo y depende de la duración e intensidad de este esfuerzo.

Sin embargo, hasta ahora no se sabe qué clase de esfuerzos alternativos conduce por último a la formación de exfoliaciones.

De todas las hipótesis discutidas en el transcurso de los años quedan, en lo fundamental tres:

- la hipótesis del esfuerzo principal de cizalladura,
- la hipótesis del esfuerzo alternativo de cizalladura,
- la hipótesis de la energía de deformación.

Como conclusión de su trabajo, Hans Schlicht [4] ofrece una hipótesis de explicación del mecanismo de formación de los “*pittings*” debido a la fatiga en un rodamiento:

... en los elementos de rodadura que ruedan el uno sobre el otro sin resbalamiento, se inducen debajo del camino de rodadura tensiones tan grandes que los esfuerzos principales de cizalladura situados en un ángulo de 45° con respecto a la superficie, sobrepasan el límite de elasticidad de la matriz martensítica; así la martensita se deforma plásticamente.

Se produce un empeoramiento de la resistencia a la corrosión y un aumento del volumen específico. Este aumento del volumen específico se manifiesta en forma de esfuerzos de compresión que, como reacción, provocan, entre otros, esfuerzos de tracción inmediatamente debajo de la superficie del camino de rodadura.

Las deformaciones plásticas de la martensita crean las condiciones previas para la formación de fisuras: durante los esfuerzos alternativos, se acumulan grupos de desplazamiento, que en principio producen fisuras aún no suficientemente desarrolladas.

Su desarrollo posterior, hasta concluir en una fisura visible final dependerá de un aumento ulterior de las dislocaciones o por la actuación simultánea de fuerzas exteriores.

Por último, este autor indica que el esfuerzo de rodadura de un elemento favorece la formación de micro fisuras y disminuye continuamente la magnitud de la tensión crítica necesaria para la formación de fisuras. Si en un lugar por debajo del camino de rodadura se sobre pasa la tensión crítica, la fisura se propaga bruscamente y sobreviene la formación de un “*pitting*”.

Once años más tarde éste mismo autor publica [8] un artículo en el cual explica el proceso de la fatiga como sigue:

... la duración de un rodamiento acaba debido a que en los caminos de rodadura se exfolia el material.

Mucho antes de que aparezcan estos daños perceptibles, ya ha comenzado a modificarse la estructura del material.

Si una pieza se solicita a carga de tal manera que se superen las fuerzas de enlace de los átomos ordenados entre sí uniformemente en la estructura espacial, entonces se desplazan relativamente entre sí zonas individuales de esta estructura cristalina.

Esto significa que el material se deforma plásticamente. En la figura I-13 anterior, se ve la primera fase de la fatiga del material, o sea deslizamientos en la estructura martensítica de un aro de rodamiento.

En el caso de ser solicitado excesivamente a carga repetida, avanza la deformación plástica de la estructura y aumentan la cantidad y la extensión de los deslizamientos.

En la figura I-11 la zona oscura es la estructura cristalina deformada plásticamente. En esta parte se forman paulatinamente micro fisuras, designándose a este fenómeno como segunda fase del proceso de fatiga.

En la tercera y última fase aparecen fisuras cada vez más grandes, hasta que finalmente se exfolia el material.

CAPÍTULO II

AVERÍAS PRODUCIDAS POR SITUACIONES AJENAS AL RODAMIENTO.

INTRODUCCIÓN

Tal como se indicó en el capítulo I, el rodamiento, en teoría, no debería destruirse por ningún otro factor que no sea por la fatiga producida en sus materiales debido al funcionamiento normal.

Sin embargo, superponiéndose a ella, se observa que otros numerosos factores externos al rodamiento interfieren en la duración de vida teórica y tienden a reducirla, a veces poderosamente [3].

De la observación y del análisis en profundidad de las averías es posible, muy frecuentemente, obtener una enseñanza, según Dominique Rouget [13], incluso de aquellos cojinetes muy dañados. Existe un método de observación y de análisis que permite determinar las causas esenciales, que no siempre son los más evidentes, y requiere considerarlas juntamente con los posibles defectos de montaje. Este autor continúa indicando que existen medios complementarios de indagación tales como estudios metalúrgicos, observaciones por medio de microscopio, análisis de vibraciones y del lubricante, etc.

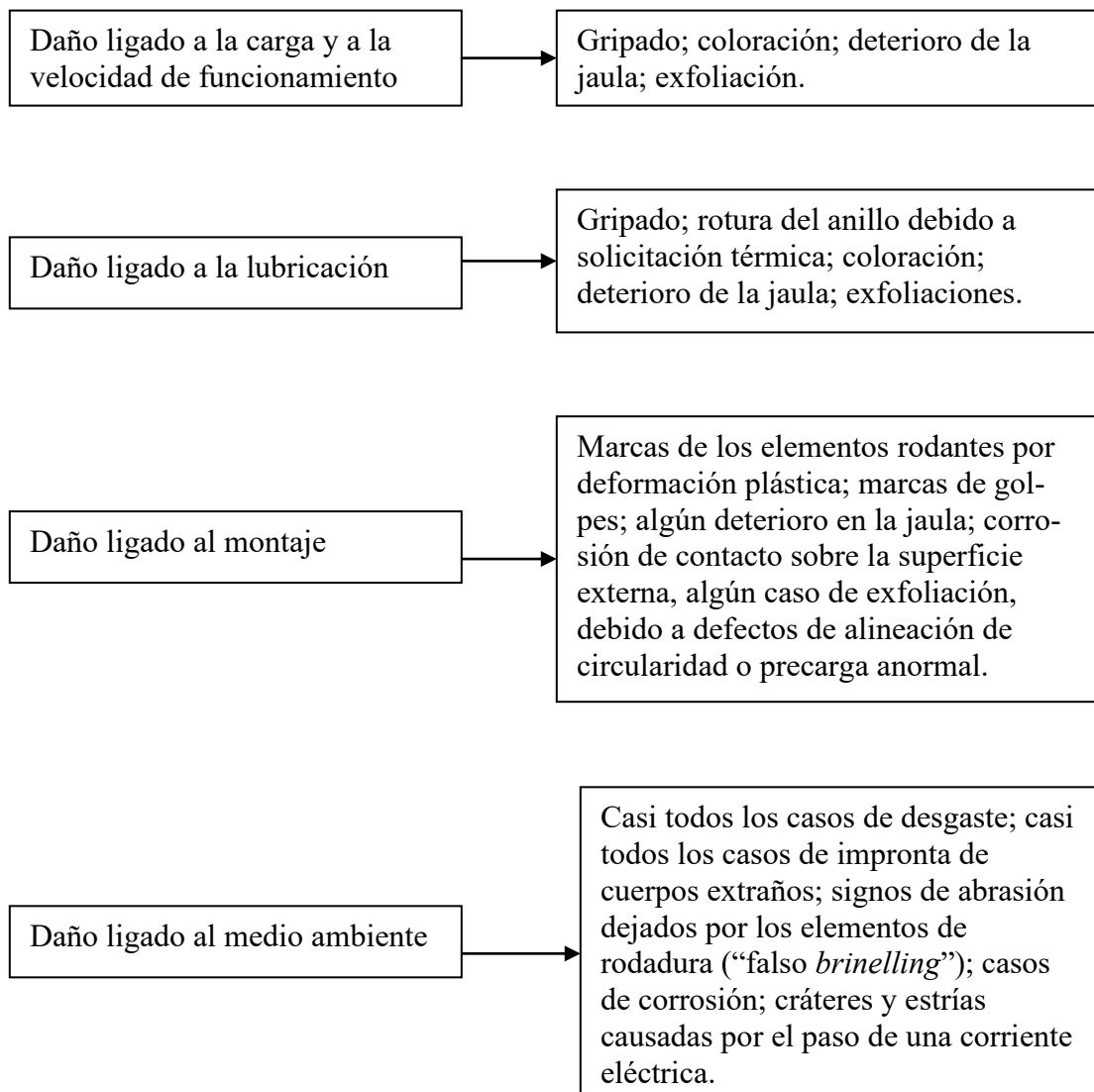
La identificación más exacta posible de las averías en un rodamiento es de fundamental importancia si se desea llegar a determinar las causas que la produjeron y evitarlas en un futuro [3].

Por último, Rouget indica que un gran número de anomalías se pueden evitar aplicando las reglas del buen arte del proyecto, de la manufactura y del mantenimiento, y aprovechar todos los conocimientos adquiridos de los resultados del análisis de los daños para mejorarlas.

Wilcock y Booser [1] enseñan que pueden detallarse una extensa variedad de averías mecánicas, muchas de las cuales se inician debido al manipuleo y montaje inapropiado, a la presencia de polvo, humedad y altas temperaturas.

Leemos en el trabajo de Hans-Karl Lorösch [6] que los rodamientos se averían fundamentalmente debido a deficiencias de mantenimiento, fallas en el diseño o calidad de la obturación que debe protegerlo del medio ambiente, envejecimiento del lubricante, desgaste, etc. En la mayoría de los casos la fatiga del material, en la cual se basa el método de cálculo de vida de los rodamientos, tiene solamente una importancia relativa.

Numerosos autores, y la mayoría de los grandes fabricantes, proponen su clasificación propia de averías [13]. La siguiente categorización se basa en el origen o en la naturaleza de la degradación y en su localización: anillos, elementos rodantes, jaula (exfoliación, impronta de cuerpo extraño). La mayor parte de la clasificación proviene de doce tipos principales de averías, que pueden agruparse en cuatro familias de causas.



En el documento técnico de la casa SNR [3] leemos una propuesta de clasificación de las averías. SNR propone tres categorías:

1.- Debidas a causas externas al rodamiento: montaje defectuoso o realizado sin cuidado; falta de mantenimiento; lubricación insuficiente o poco adecuada; sobrecarga; vibraciones; velocidad excesiva; temperatura excesiva; polución; etc.

2.- Debidas a una mala elección del tipo, tamaño o características funcionales del rodamiento.

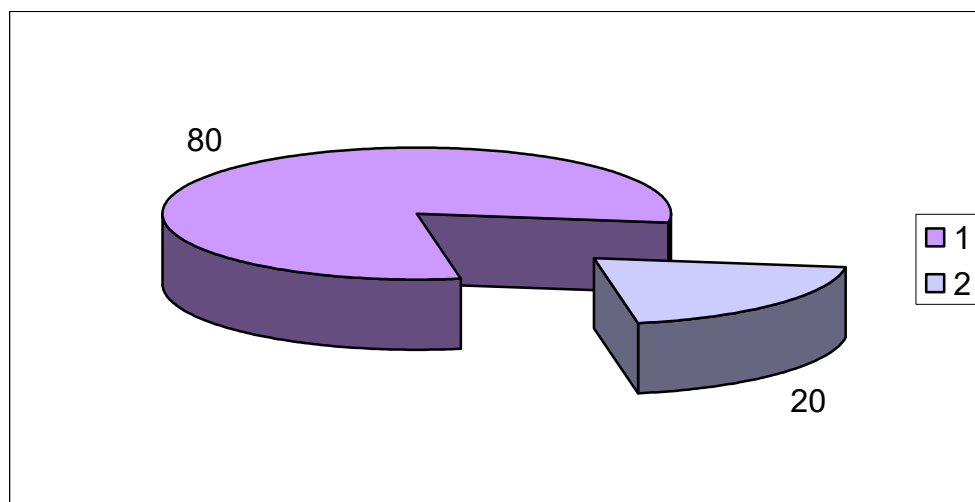
3.- Debidas a la propia calidad del rodamiento: aceros, estructura y composición; geometría interna, calidad de las jaulas, de las juntas.

Según SNR las causas externas constituyen más del 90% de los motivos de las fallas.

En línea con este criterio, Rudolf W. Seufert [14] indica que:

- el 80% de las fallas están relacionadas con la lubricación:
 - 20% debidos a impurezas en el lubricante;
 - 15% por falta de lubricante;
 - 20% por lubricante no adecuado;
 - 20% por lubricante contaminado.
- 20% por otros motivos:
 - 10% por elección incorrecta del rodamiento;
 - 5% y por errores de montaje;
 - 5% por causas desconocidas.

La figura siguiente sintetiza esta clasificación:



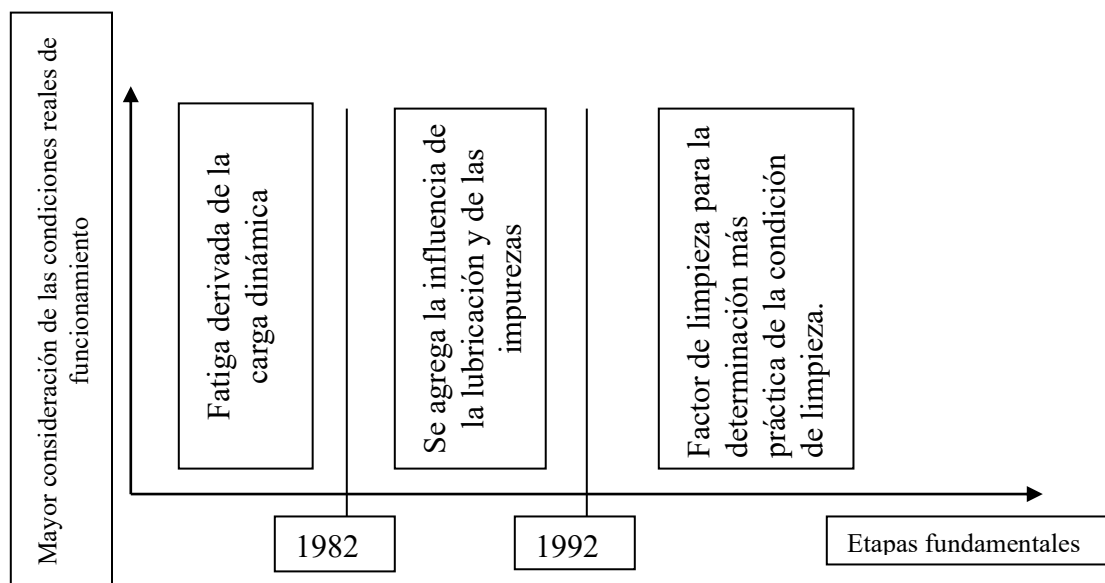
Clasificación de los motivos de averías según Rudolf W. Seufert [14]: 80% relacionadas con la lubricación y 20% por otros motivos.

Debe contemplarse que diversas causas, por separado o en conjunto, pueden dar lugar a averías de aspecto muy similar, o incluso del mismo tipo.

La aspiración de hacer funcionar los rodamientos hasta que se averíen a consecuencia exclusiva de la fatiga del material está muy lejos de conseguirse, pues ya podemos ver que son demasiados diversos los factores que influyen en la fatiga y sus efectos recíprocos [6].

Es interesante el comentario de Rudolf W. Seufert [14] en cuanto a que el cálculo teórico de la duración del rodamiento ha ido evolucionando con el tiempo con el fin de incorporar los nuevos conocimientos que se fueron adquiriendo por medio de ensayos y de situaciones reales. Este mismo comentario, con las ecuaciones y factores apropiados para su cálculo lo podemos leer en casi todas las referencias de artículos técnicos de las casas SNR y SKF indicados en la bibliografía, de todos modos, no es el objetivo de este trabajo.

El gráfico siguiente es el presentado por Seufert en [14].



En este gráfico se muestra cómo ha ido evolucionando el concepto de cálculo de vida útil del rodamiento mediante la incorporación de otros factores, más allá de los meramente relacionados con la fatiga del material. Así, a partir del año 1982 se incorpora la importancia de la lubricación y de las impurezas que ella contenga, y luego la influencia de otros agentes exteriores tales como el medio ambiente.

Como conclusión de esta introducción se desea rescatar la importancia de los agentes exteriores al rodamiento que afectan su vida útil.

Este trabajo apunta a intentar identificarlos mediante el daño que producen, de modo de entregar argumentos de análisis para intentar eliminarlos.

II-1.- DEFECTOS RELACIONADOS CON LA LUBRICACIÓN.

II-1-A.- FALTA O EXCESO DE LUBRICANTE, O LUBRICANTE NO ADECUADO.

Entre los factores que influyen en la duración a fatiga analizados por Lorösch [6], está el de la lubricación.

La teoría indica que es posible separar los cuerpos rodantes mediante una película lubricante que se aprende con la teoría elástico-hidrodinámica. Este autor estudió qué influencia tiene el espesor de esta capa de lubricante y hasta qué punto la formación de una película perfecta de lubricante o el grado de contacto metálico conducen a una variación de los tiempos de utilidad del rodamiento. Sus conclusiones son que, con una relación entre el espesor de película lubricante e y la rugosidad h de $e/h=3$ veces, es decir lubricación total, se puede conseguir el doble de la duración estimada, sin embargo, agrega, esta ventaja se pierde cuanto peor sea la lubricación. Por ejemplo, para una relación de $e/h=0,5$ se han podido constatar daños superficiales en rodamientos axiales oscilantes de rodillos.

Por su parte, Hans Schlicht [8] indica que si disminuye el espesor de la capa lubricante se presenta el rozamiento mixto con contacto metálico, lo que permite la aparición de fuerzas tangenciales en los caminos de rodadura. Según aumenta el coeficiente de rozamiento, las tensiones se hacen mayores. Esto tiene como consecuencia un aumento del esfuerzo en el material.

Wilcock y Booser [1] enseñan que una grande porción de las fallas en los rodamientos industriales de bolas y de rodillos se deben a una lubricación insuficiente. Si bien la cantidad de grasa o aceite que requiere un cojinete de rodadura es pequeña, de todos modos, es absolutamente necesaria.

Cuando la provisión de lubricante se reduce, la fricción por deslizamiento comienza a ser destructiva y el rodamiento comienza a transitar por una serie de eventos [1]:

- Temperatura localizada en las áreas de frotamiento.
- Bajo juego radial debido a la diferente dilatación térmica causada por la excesiva fricción.
- Cargas internas al rodamiento.
- Ablandamiento de los elementos rodantes y las pistas con “quemadura” de las superficies.
- Atoramiento del rodamiento y destrucción final de la jaula.

Si la potencia de la máquina es suficiente, el rodamiento puede ser obligado a continuar en funcionamiento más allá de estos pasos con el consiguiente daño a la instalación mecánica circundante.

Otro tipo de daño puede ser causado por exceso de grasa lubricante. El calor generado por el batimiento del exceso de grasa frecuentemente conduce a la falla del rodamiento y a la necesidad de su reemplazo. [1].

En todos los rodamientos las fricciones internas producen una elevación de la temperatura [3]. Este calor es normal, y en un rodamiento, utilizado adecuadamente, transita a través de los órganos vinculados con él y se disipa al exterior. El lubricante no es ajeno a este equilibrio térmico, pues sirve de vehículo al calor hacia el órgano más frío [3]. Si el lubricante se halla en cantidad insuficiente, no cumple con esta función y la temperatura en el interior del rodamiento se eleva.

Por otra parte, una lubricación demasiado abundante, con una grasa muy consistente, en un espacio reducido, también produce elevación de la temperatura, pues si no existe la posibilidad de evacuar el exceso de grasa ésta actúa como freno al giro normal y el rodamiento se recalienta [3].

La figura II-1-1, extraída de la referencia [1] muestra una secuencia fotográfica de la progresión de la avería debido a lubricación escasa.

En ella, y siguiendo lo indicado en el documento técnico de SNR [3], tenemos una exfoliación incipiente, en la cual aparecen pequeñas lesiones en la superficie sin estar aún unidas entre ellas; el perfil general de las piezas se mantiene, figura **b**. La figura **c** muestra una exfoliación avanzada, las lesiones tienden a unirse, pequeñas partes metálicas se desprenden, se mezclan con el lubricante y colaboran con la aceleración del proceso destructivo. Finalmente, la figura **d** muestra un estado de exfoliación final, en el cual el deterioro a cubierto gran parte de la superficie de rodadura y el perfil ha perdido su geometría.

La falta de lubricante o un lubricante no adecuado produce el daño conocido como exfoliación superficial, tal como se explicó más arriba, y también puede aparecer gripado, desgaste, coloración etc. como veremos en este texto más adelante.

La severidad del daño variará desde un desgaste de las pistas de rodadura y algún manchado de las superficies de fricción de las jaulas hasta la completa destrucción de sus partes como estado final.

A pesar de disponer de una buena lubricación, las sobrecargas instantáneas o permanentes o la desaparición del juego interno del rodamiento, pueden romper la película lubricante dejando al descubierto y en contacto las superficies de las pistas y los cuerpos rodantes [3].

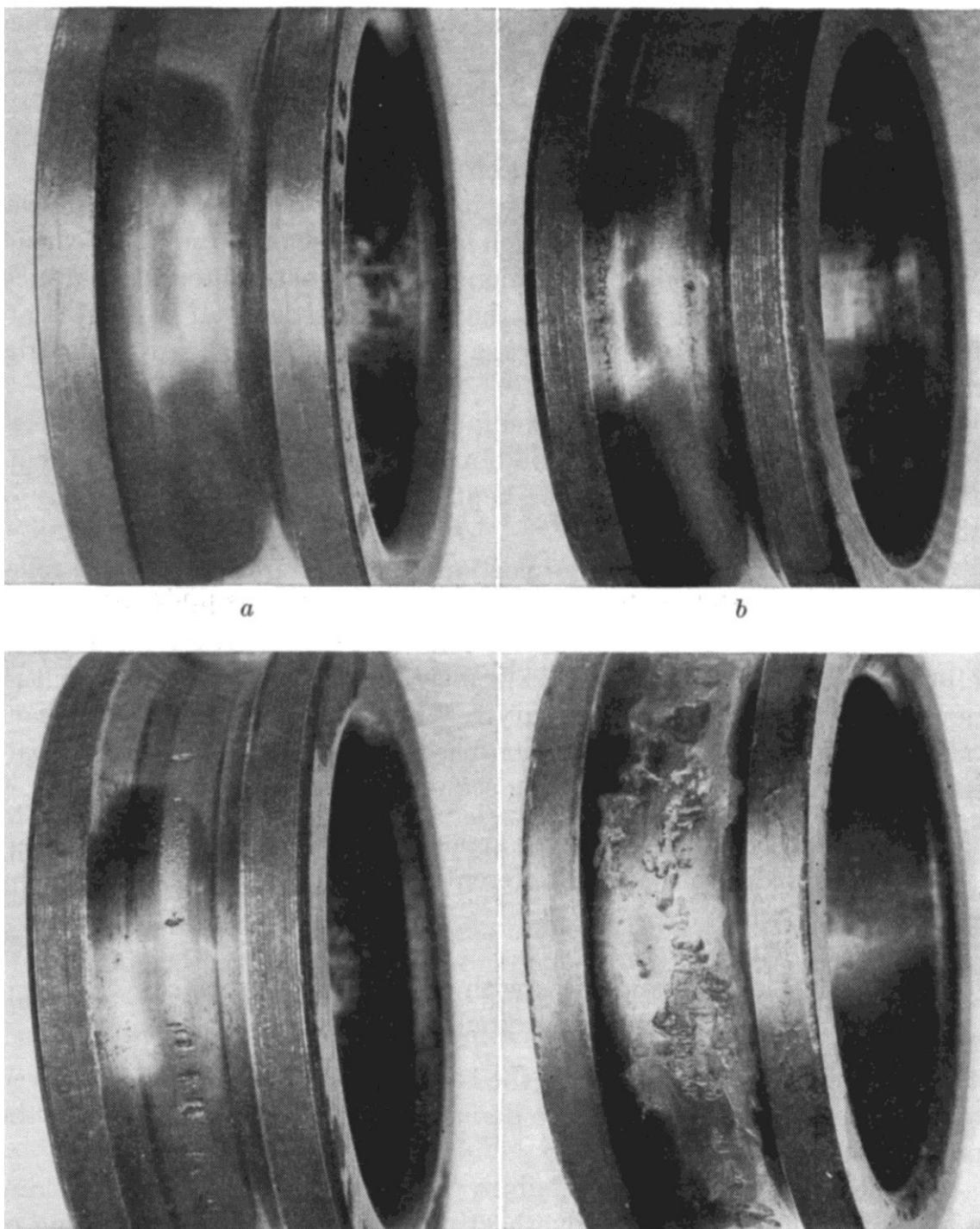


Figura II-1-1: vistas de la progresión de avería por falta o escasez de lubricante [1].

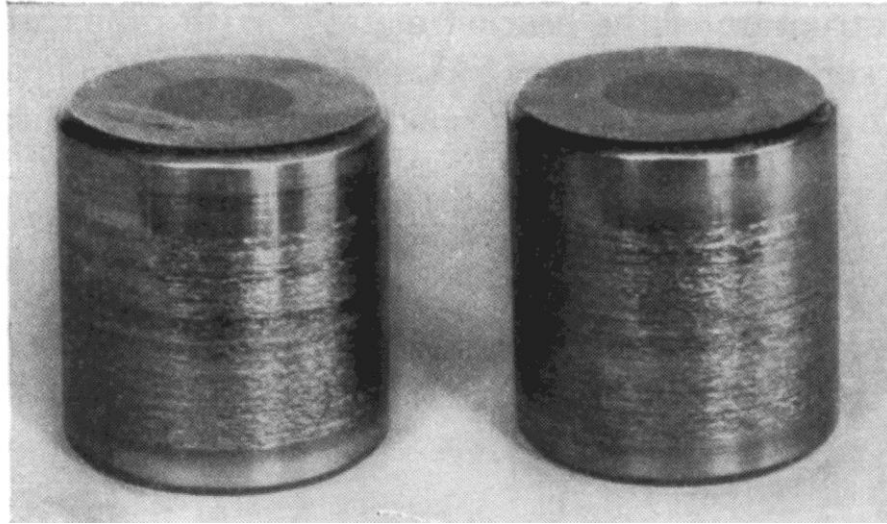


Figura II-1-2: Daño en rodillos cilíndricos causados por lubricación ineficiente correspondientes a la jaula de la figura II-1-3 [1]

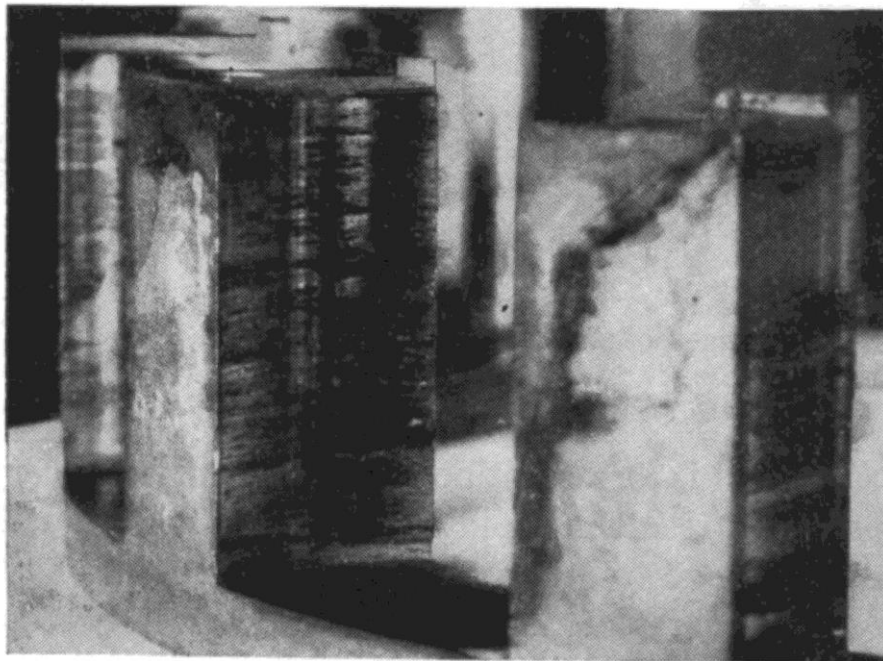


Figura II-1-3: Daño en jaula por lubricación ineficiente [1]

Las micro soldaduras que se producen y los subsiguientes arranques de material van dejando las huellas que se observan en las figuras II-1-1 hasta la II-1-4.

Por lo tanto, no se trata de un problema de fatiga del material, sino de un fenómeno que sólo afecta a la superficie [3].



Figura II-1-4: diferentes ejemplos de exfoliaciones superficiales debidas a deficiencias en la lubricación [3]

Si el daño se observa repartido uniformemente en todo el ancho y desarrollo de la pista, el problema puede resultar de una falta de lubricante o de una sobrecarga momentánea o continua (ver la figura II-1-5).



Figura II-1-5: exfoliación distribuida en la totalidad de la pista de rodadura debida a falta de lubricante o sobrecarga momentánea o continua [3].

Otro daño relacionado con defectos de lubricación es el conocido con el nombre de gripado. El gripado es una elevación de temperatura debido a un fuerte rozamiento interno del rodamiento producido especialmente por falta de lubricación, aunque, también, puede ocurrir por precargas excesivas, giro de los aros sobre sus apoyos, velocidades excesivas combinadas con cargas livianas, etc. También puede producirse gripado bajo carga puramente radial si se utiliza un lubricante muy consistente, pues, en los rodamientos de rodillo, los que están fuera de la zona de carga se ven fuertemente frenados y tienden a deslizarse en lugar de rotar [3].

Los daños por gripado pueden consistir en arranques superficiales de material acompañados de zonas de color mate (figura II-1-6); transferencia de material, por ejemplo, en los rodamientos de rodillos cónicos entre éstos y la pista (figuras II-1-7 y II-1-8), fundición y arrastre de los elementos rodantes (figura II-1-9); soldadura total de los elementos rodantes a los anillos y destrucción de las jaulas (figuras II-1-10 y II-1-11).

Las figuras siguientes muestran ejemplos de daños por gripado.



Figura II-1-6: daño por gripado consistente en arranques superficiales de material acompañados de zonas de color mate [3].



Figura II-1-7: gripado consistente en transferencia de material entre los rodillos cónicos de la figura II-1-8 y la pista interior [3].

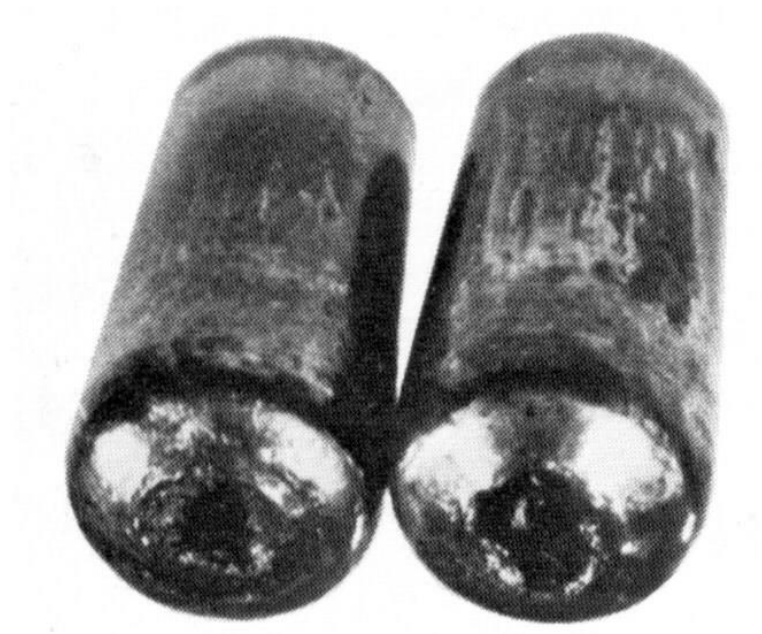


Figura II-1-8: gripado en los rodillos cónicos y transferencia de material con el anillo de la figura II-1-7 [3].

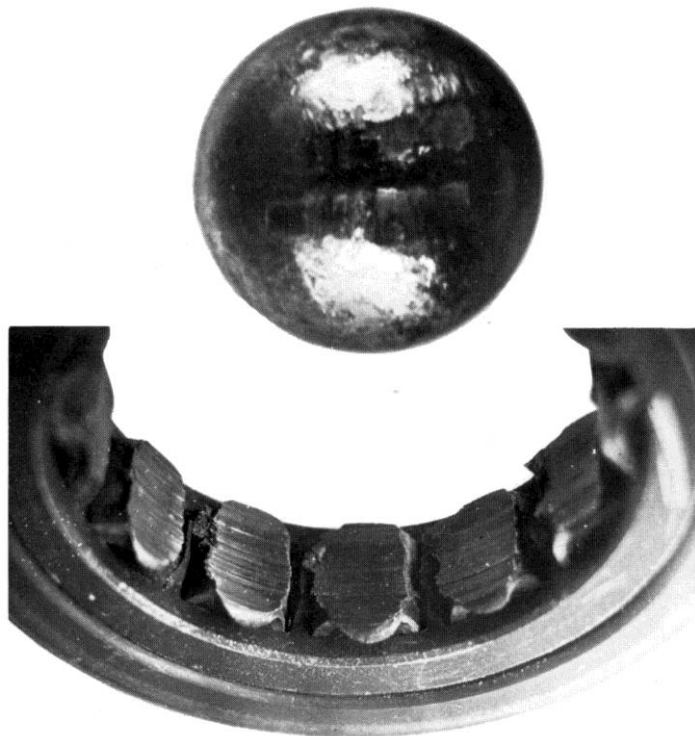


Figura II-1-9: fundición y arrastre de los elementos rodantes [3].



Figura II-1-10: gripado consistente en la soldadura total de los elementos rodantes a los anillos y destrucción de las jaulas [3].

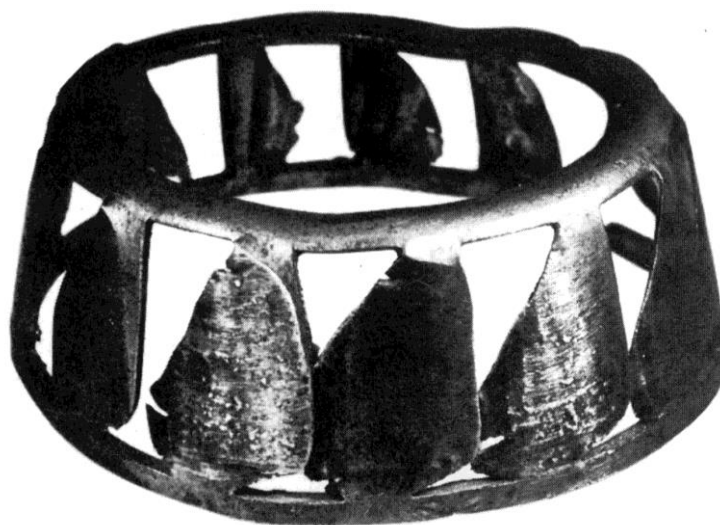


Figura II-1-11: daño de la jaula debido a lubricación defectuosa [3].

II-1-B.- PARTÍCULAS EXTRAÑAS

En otro artículo de Lorösch, pero de unos cinco años más tarde [7], amplía el concepto anterior al indicar que las condiciones de montaje y de servicio determinan, en gran medida, el buen funcionamiento de los rodamientos.

Un caso no muy raro en la práctica muestra que la duración de un rodamiento disminuye notablemente sólo a causa del paso del elemento rodante por sobre impurezas duras aisladas.

Debido a las impurezas interpuestas entre los caminos de rodadura y los elementos rodantes se producen daños superficiales, improntas con levantamientos en los márgenes.

Observaciones con microscopio (Figura II-1-12) mostraron, en zonas donde aún no existían fallas por fatiga, daños por penetración de impurezas duras.



Figura II-1-12: daño en la superficie de rodadura debido a un cuerpo extraño duro. La superficie aún no presentaba síntomas de fatiga [7].

Las impurezas sólidas se encuentran en todos los sitios y, debido al desconocimiento o descuido, no se tiene suficientemente en cuenta su influencia.

En los ensayos efectuados, se encontraron hoyuelos en forma de flecha, con daños superficiales delante de los mismos [7].

Se entendió que estos daños sólo podían proceder de la rodadura sobre una impureza sólida de gran tamaño. Este estudio del daño muestra que el límite de la fatiga irremediablemente aún no se ha alcanzado.

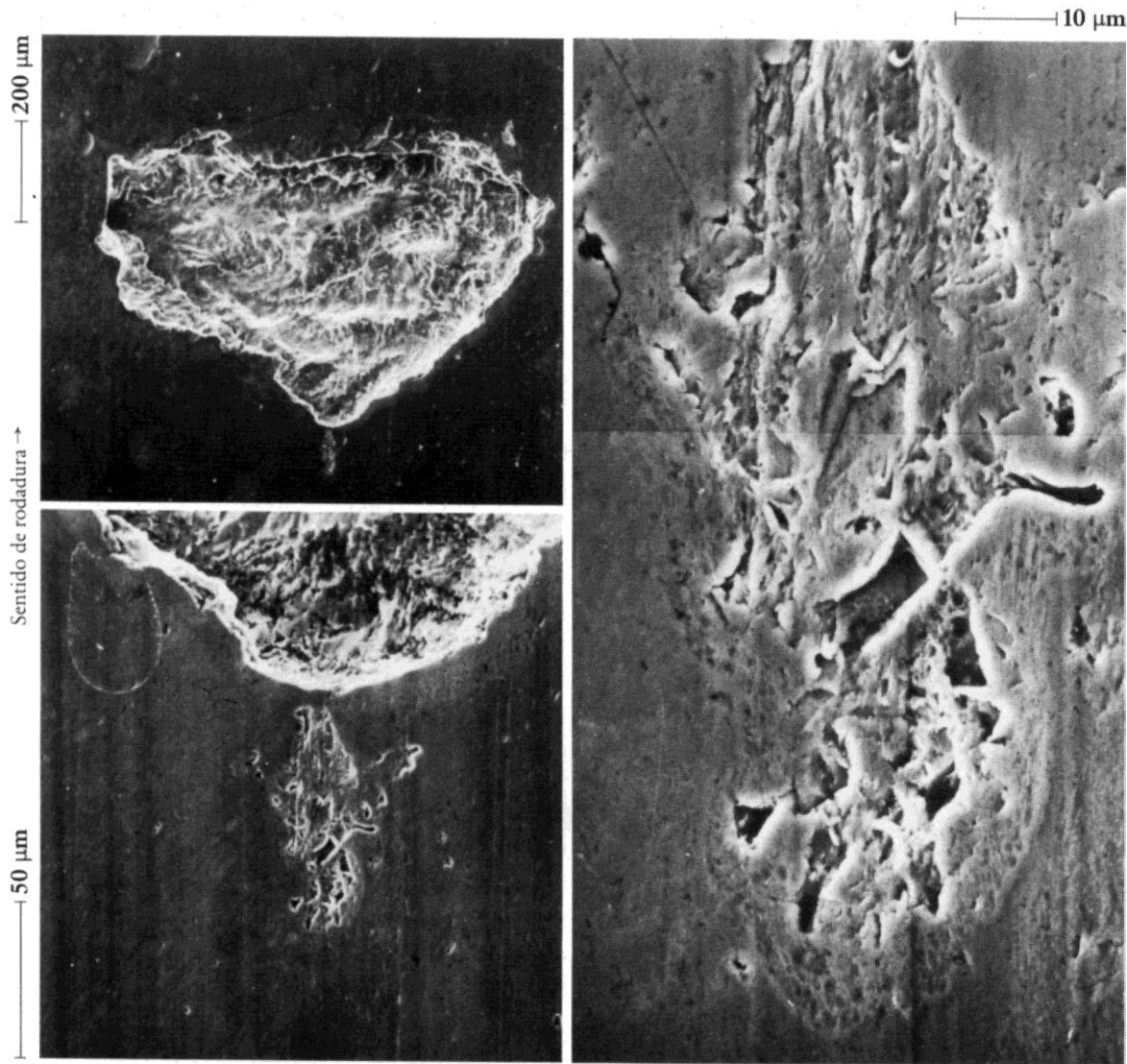


Figura II-1-13: formas típicas de aparición de una exfoliación después de un daño del camino de rodadura producido por cuerpos extraños [8].

La figura II-1-13 muestra una exfoliación originada por una impresión de cuerpo extraño. Obsérvese la forma típica de V y su ubicación inmediatamente después de la impresión

(considerando el sentido de avance del elemento rodante) [8]. Las tres figuras son: abajo a la izquierda se ve la impronta del cuerpo extraño, y ampliada en la figura de la derecha. Arriba a la izquierda se observa la exfoliación producida a continuación de la impronta (que en esa figura se observa muy pequeña).

La figura II-1-14 muestra el daño superficial generado a partir de la impronta producida intencionalmente mediante el cono de un durómetro Rockwell. El punto delante del daño superficial tiene un diámetro de 0,1mm.

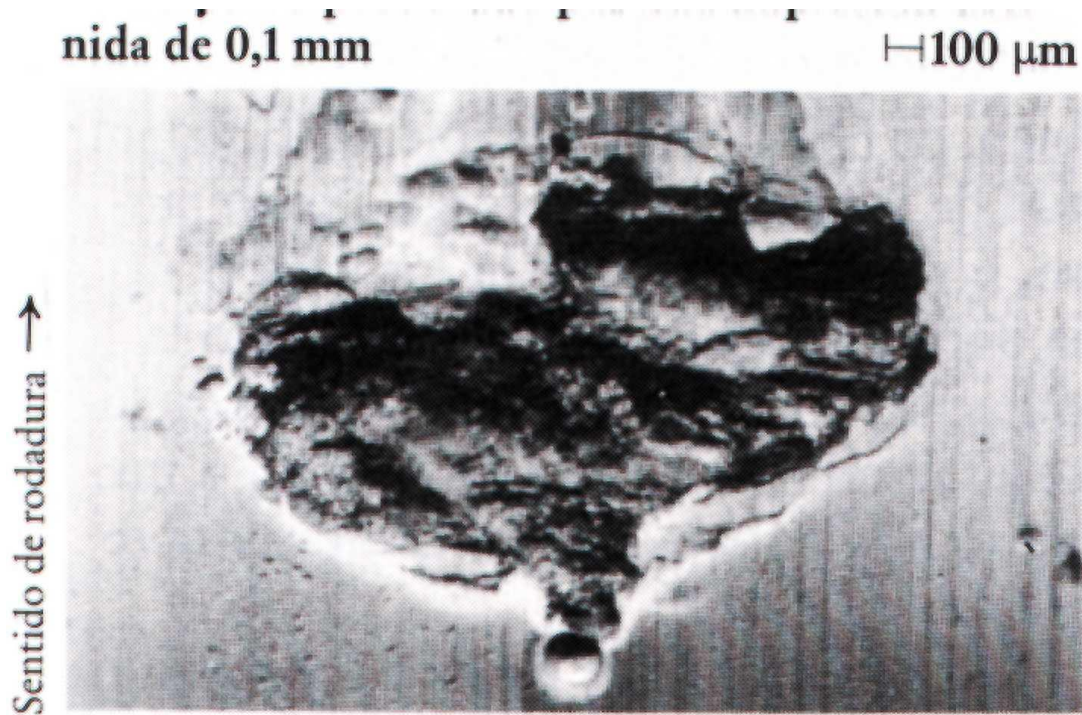


Figura II-1-14: daño superficial posterior a la impronta de diámetro 0,1 mm producida intencionalmente en la pista de rodadura [7].

En el artículo publicado por G. Bergling de la casa SKF [9] leemos los resultados de una serie de ensayos para determinar la adecuada viscosidad de la grasa lubricante de un rodamiento utilizado en un molino de caña de azúcar. En particular es interesante observar el resultado sobre las pistas de una película lubricante de escaso espesor (figura II-1-15).

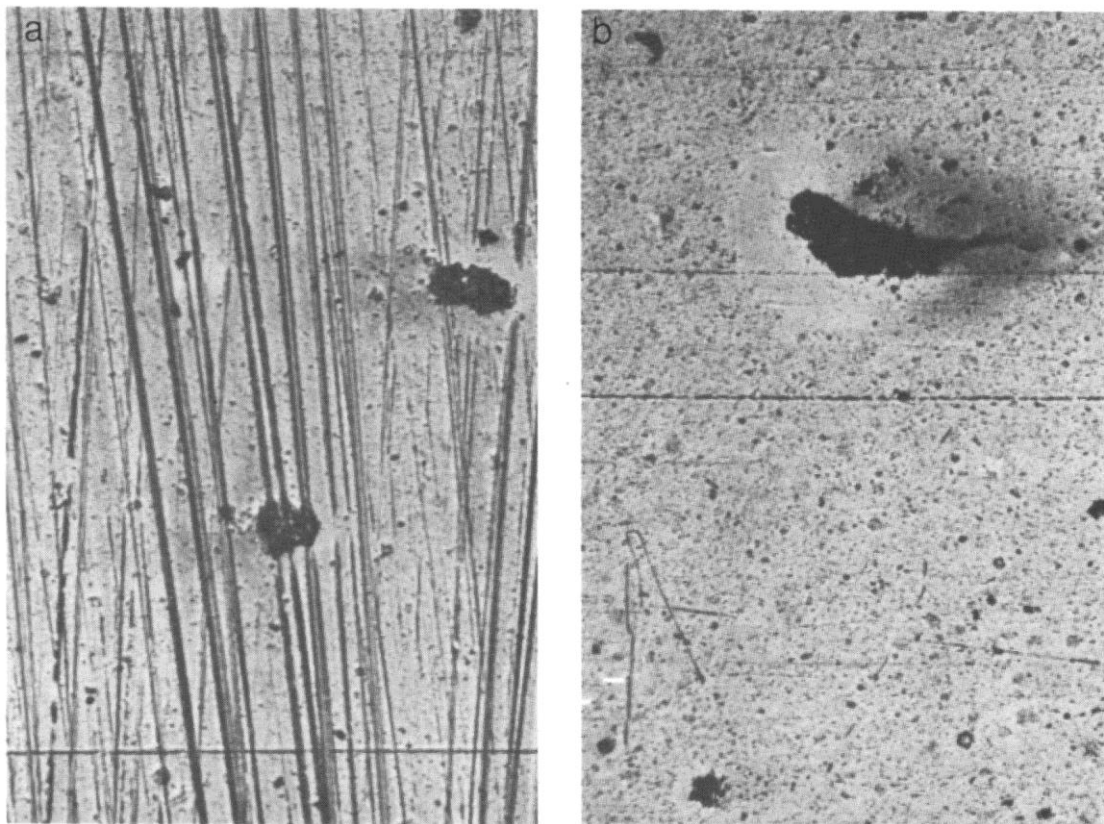


Figura II-1-15: estado de la zona de rodadura del aro exterior (izquierda) y del aro interior (derecha) luego de una prueba con un aceite de baja viscosidad.

La película de lubricante ha sido rota y se produjo el contacto metálico, de tal modo que la superficie mecanizada está marcada. Las improntas que se observan están causadas por partículas contenidas en la grasa.

En el artículo escrito por Massimo Cavacece y Alberto Introini [15], demuestran cómo es posible detectar mediante el análisis de vibraciones, la avería insipiente en rodamientos.

De este trabajo extraemos dos fotos interesantes, las Figuras II-1-16 y II-1-17.

El trabajo está orientado hacia la aplicación del análisis de vibraciones, en una caja de engranajes cónicos, por lo que los autores no especifican claramente el motivo de las averías. No obstante, explican que la máquina de ensayo disponía de un sistema de detección de partículas extrañas en el lubricante, y fue dicho sistema quien indicó la necesidad de detenerlo.

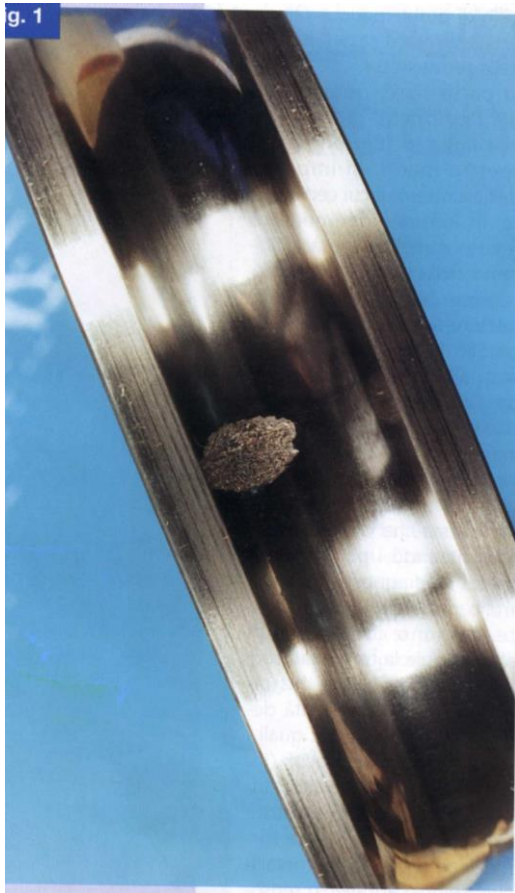


Figura II-1-16: exfoliación en el borde de la pista interior de un rodamiento de bolas, posiblemente causado por una impureza [15].

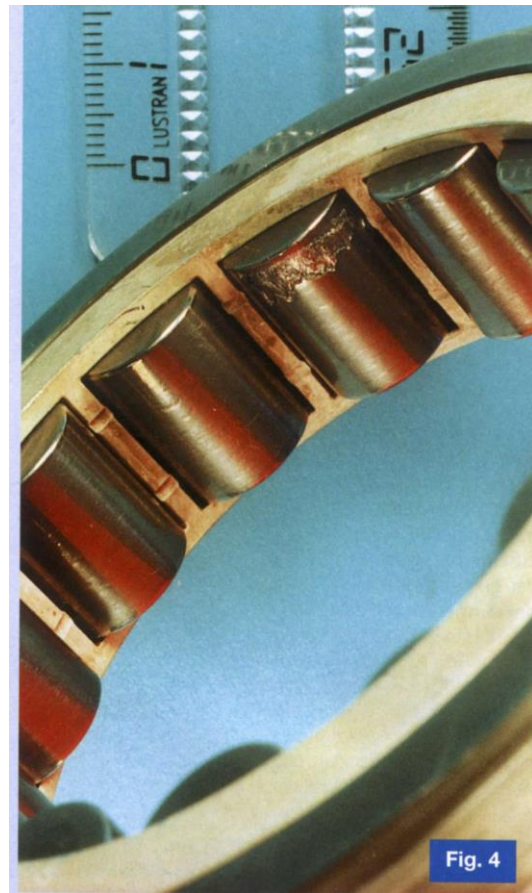


Figura II-1-17: exfoliación en el elemento rodante de un cojinete de rodillos con inicio en el borde de este y tendencia de crecimiento hacia el centro [15].

También leemos en Eschmann; Hasbargen y Weigand [2] que, como causa de averías, se contempla el ingreso de material foráneo en el rodamiento por insuficiencia en los sellados y obturaciones, además de las impurezas del lubricante cuando se comparte con engranajes u otros componentes mecánicos, debido a lo cual se puede esperar que cierta cantidad de finas partículas metálicas se infiltren entre las superficies de rodadura del cojinete.

Partículas abrasivas tales como, granos de polvo, sílice, etc., desgastan y generan una superficie tosca y rugosa, el perfil del camino de rodadura se altera y aumenta el juego interno.

La figura II-1-18 muestra la pista interna de un rodamiento doble con marcas de cuerpos extraños

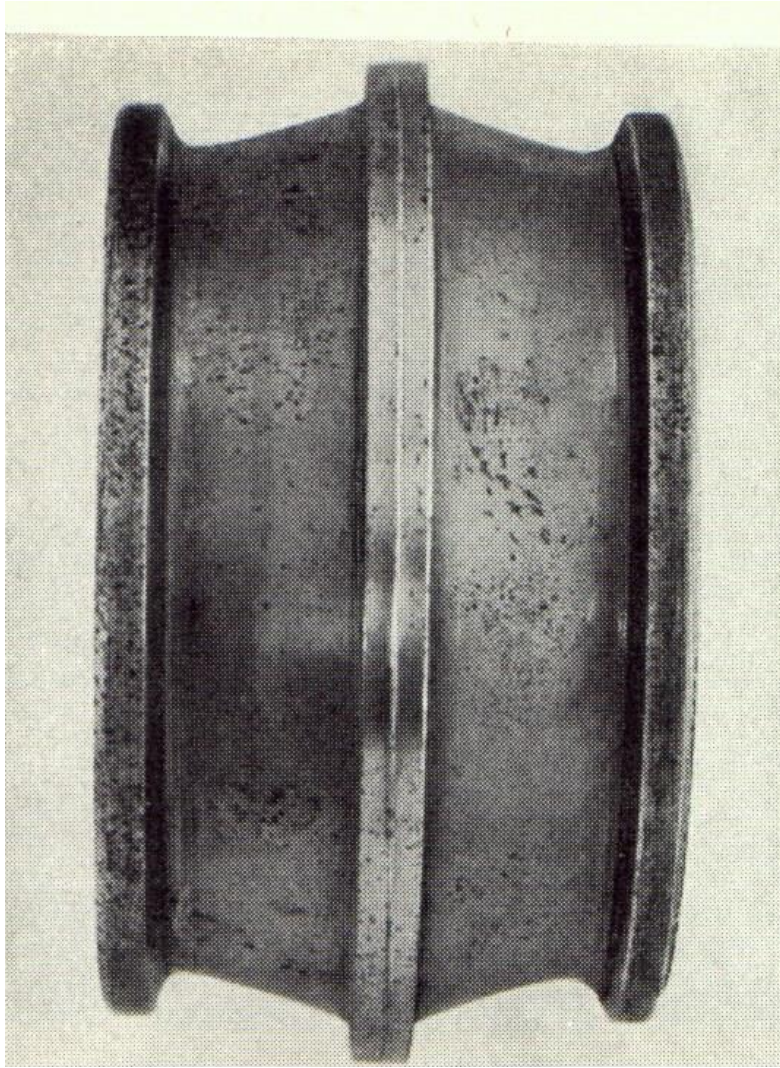


Figura II-1-18: Muestra daños causados por cuerpos extraños [2]

La presencia de partículas en los rodamientos queda evidenciada, usualmente, por la presencia de hendiduras, marcas o rayas, o desgaste de las jaulas y de las superficies de rodadura [1].

Aunque una observación visual del daño es de todos modos adecuada, es conveniente una observación con lupa o microscopio con el fin de diferenciar el daño producido por una partícula extraña del causado por el pasaje de corriente eléctrica, corrosión o fatiga [1].

En la figura II-1-19 se observa (ampliado cien veces) las improntas con bordes elevados debidas a partículas duras y que fueron generadas por sucesivos pasajes del elemento rodante por sobre ellas.



Figura II-1-19: Improntas por partículas duras [1]

En la figura II-1-20 se ven improntas en el camino de rodadura que pueden estar causadas por partículas blandas [1], considérese que materiales como bronce, aluminio o incluso madera o papel pueden dejar marcas sobre la superficie de rodadura.

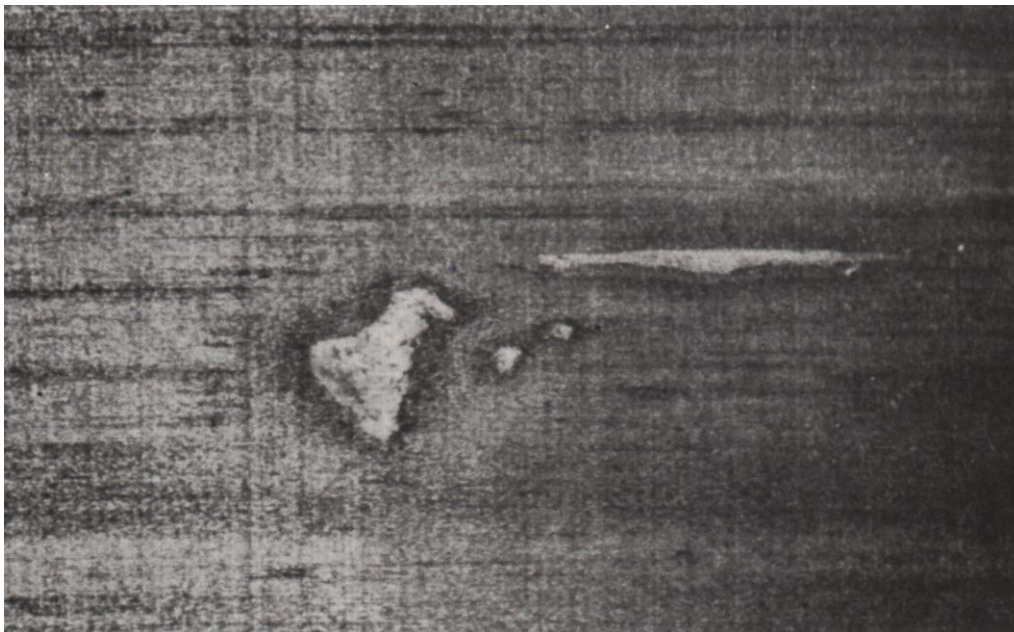


Figura II-1-20: Marcas debidas a partículas extrañas blandas

Por su parte, en el Documento Técnico de SNR se muestra una serie de averías que, según este manual, están derivadas de la presencia de cuerpos extraños.

Este informe indica que es posible observar rozaduras más o menos intensas en los cuerpos rodantes y las pistas, pudiendo presentar éstas últimas, un surco longitudinal continuo o sectorizado (figura II-1-21); aumento del juego interno y desequilibrios dinámicos, desgaste de las jaulas y por supuesto, huellas de pequeñas dimensiones en las pistas de los anillos (figura II-1-22) [3].



Figura II-1-21: surco producido por impurezas [3]

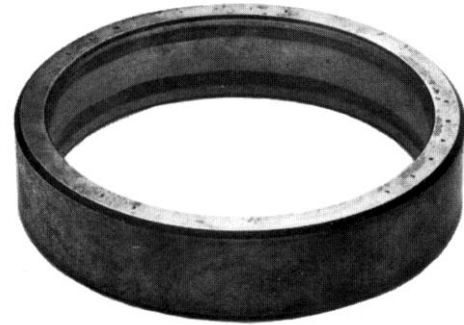
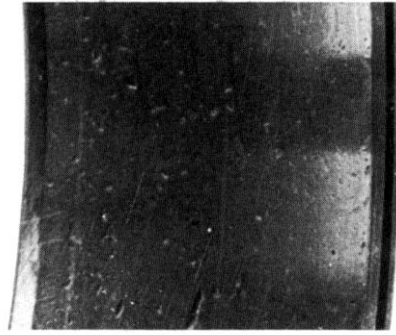


Figura II-1-22: puntos y surcos producidos por impurezas

II-1-C.- DESGASTE ADHESIVO

Cuando la lubricación es extremadamente deficiente, en el camino de rodadura de un rodamiento se presenta desgaste adhesivo [8].

La figura II-1-23 muestra una imagen ampliada de esta avería.

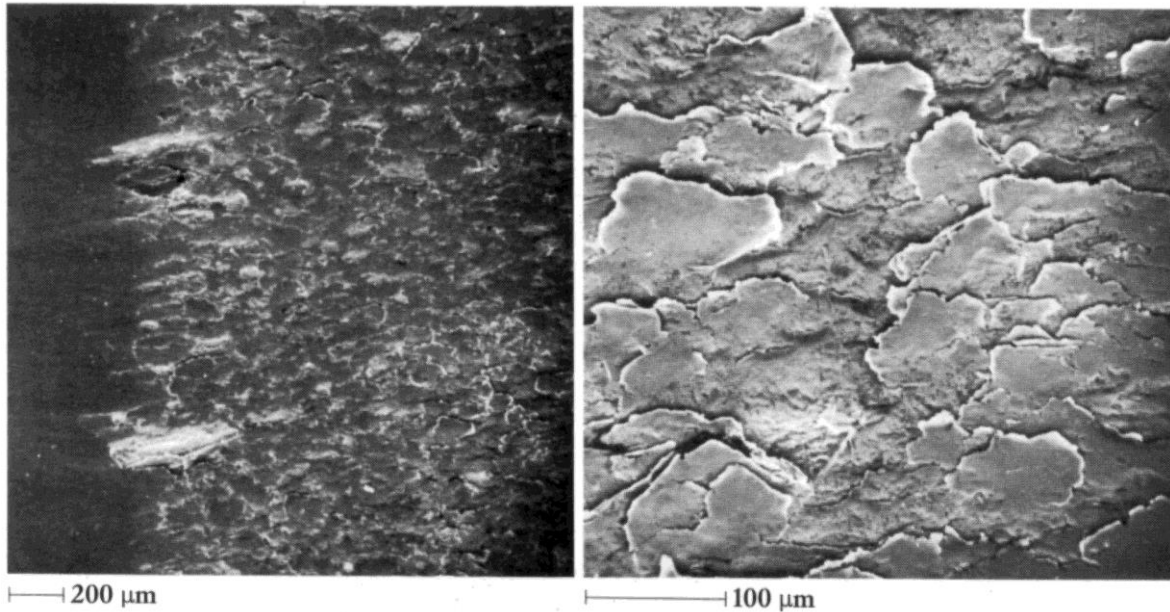


Figura II-1-23: Ampliación de averías por desgaste adhesivo, formación de “leguas” a causa de soldaduras locales [8].

Durante el proceso de desgaste adhesivo, los cuerpos rodantes son apretados entre sí y las capas superficiales se deforman plásticamente tanto que en algunos puntos se sueldan [8].

II-1-D.- DESGASTE ABRASIVO

En el desgaste abrasivo, se levanta material de la capa superficial [8].

La causa de ello puede ser la existencia de impurezas que han penetrado en el interior del rodamiento, o bien lubricación deficiente. De esta forma, se produce contacto metálico y se destruyen las superficies funcionales.

En las jaulas, el desgaste abrasivo produce un cambio más o menos pronunciado en la geometría de los alvéolos, en sus diámetros interior y exterior [3].

Sucede que la jaula, que en origen está centrada en las bolas, toma un juego excesivo y se desequilibra dinámicamente. Así, el diámetro exterior de la jaula comienza a rozar contra el diámetro interior del anillo exterior y el diámetro interior de la jaula contra el anillo interior, este roce acelera el desgaste llegando incluso a su rotura (figura II-1-24).



Figura II-1-24: rotura por desgaste abrasivo intenso [3].

II-2.- CORROSIÓN

II-2-A.- ACCIÓN DE AGENTES CORROSIVOS.

Leemos en el trabajo de G. Bergling [9] el relato de una experiencia de corrosión en una máquina de un ingenio azucarero. El autor indica que el jugo de caña crudo, de naturaleza fuertemente corrosiva, es particularmente peligroso y si se deja que permanezca algún tiempo en el rodamiento es causa de un acortamiento de su vida útil.

En las dos figuras II-2-1 se observa el resultado de la acción del jugo de caña en las pistas de un rodamiento de rodillos a rótula. En él, la grasa había absorbido un 6% de agua y de jugo de caña crudo, con el resultado de la corrosión que se observa en las zonas en que existía contacto entre los elementos rodantes y la pista luego un largo período de inactividad entre dos zafras.

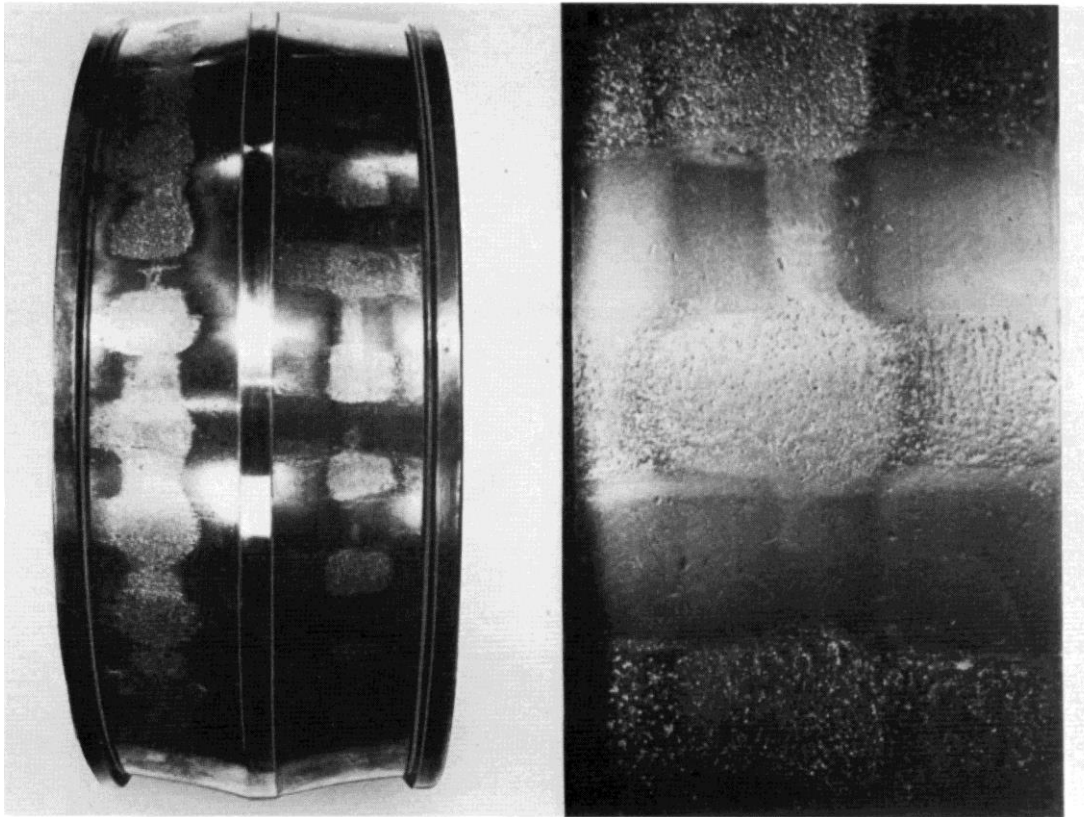


Figura II-2-1: corrosión y fatiga de los caminos de rodadura, debido a la acción del 6% de agua y jugo de caña de azúcar en la grasa de lubricación, luego de un largo período de inactividad [9].

El análisis efectuado por autor en su trabajo le permite aseverar que la avería se produjo debido a la baja viscosidad de la grasa utilizada y a defectos en el diseño de la obturación, que permitieron el ingreso de agua y jugo, sumado a largos períodos entre reemplazos de lubricante.

En la figura II-2-2 se observa la pista de un rodamiento axial de bolas la cual ha sido severamente corroída debido a la presencia de agua [2]

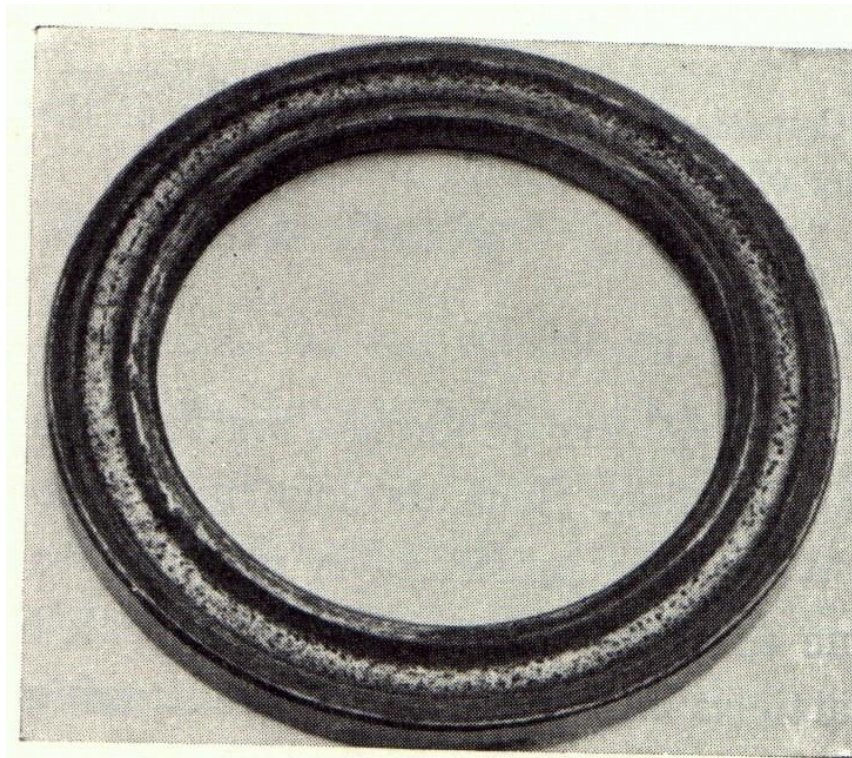


Figura II-2-2: Aro de rodamiento axial corroído por la presencia de agua [2]

En la figura II-2-3 vemos el aro interno de un rodamiento cónico proveniente de la punta de eje de la rueda de un camión, donde se ve la acción de la corrosión. En este caso también hubo una falla de los sellos que lo protegían.

Las partículas desprendidas durante la corrosión tienen una acción abrasiva y causan desgastes de las superficies de contacto.

Los daños de corrosión son puntos de partida para subsiguientes exfoliaciones, las cuales decididamente acortan la vida útil del rodamiento [2].

La corrosión no es motivo solamente por la presencia de agua o líquidos ácidos, sino también causada o promovida por lubricantes ácidos.

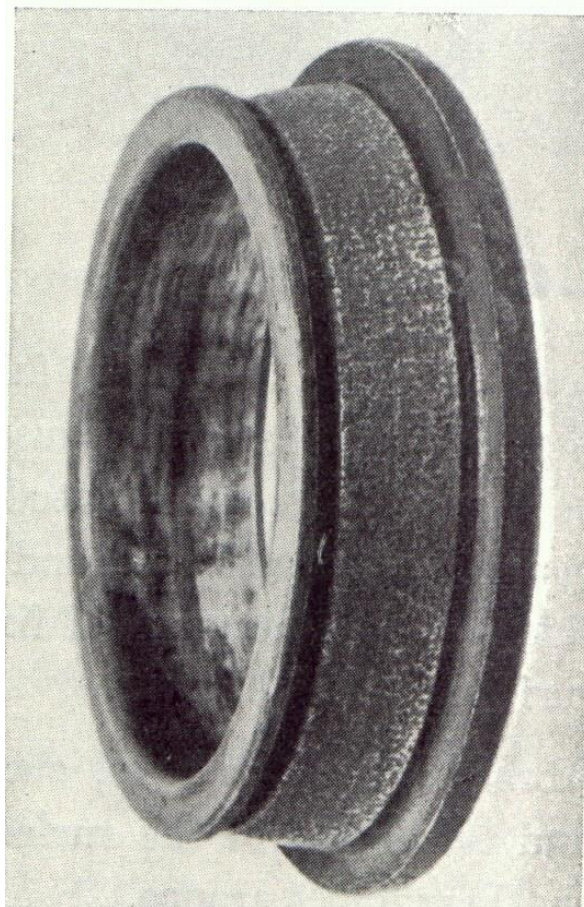


Figura II-2-3: Daño por corrosión en pista interna de rodamiento cónico [2]

Leemos en Willcock y Booser [1] que, humedad, sulfuros, y gases de cloro en la atmósfera y lubricantes corrosivos atacan a los elementos rodantes si no están fabricados en material especial, tales como acero inoxidable.

Cuando la corrosión ataca al rodamiento durante la operación produce superficies irregulares con puntos concentradores de tensión sujetos a fatiga.

En operación se pueden proteger mejor a los rodamientos manteniéndolos revestidos con un aceite libre de agua y ácidos o mediante grasa, la cual lo mantiene aislado de la humedad. Estas grasas también funcionan como inhibidores de la corrosión [1].

Cuando el rodamiento se enfría, luego de su temperatura de trabajo, en presencia de humedad relativa ambiente, la condensación resultante formará corrosión [1]; [3]. La

renovación frecuente de este ciclo produce el depósito de una cantidad de agua que al mezclarse con la grasa no desaparece totalmente durante la próxima fase de calentamiento [3].

La figura II-2-4 muestra las marcas de corrosión en la pista de rodadura del aro exterior de un rodamiento de bolas a rótulas debido al uso de una grasa inadecuada, la cual causó fuerte corrosión en los puntos de contacto entre las bolas y la pista luego de un prolongado período de inactividad.



Figura II-2-4: Marcas de corrosión entre los elementos de rodadura y la pista, debidos a una grasa inadecuada

En la figura II-2-5 vemos los flancos de un rodillo corroído por un lubricante contaminado con humedad.

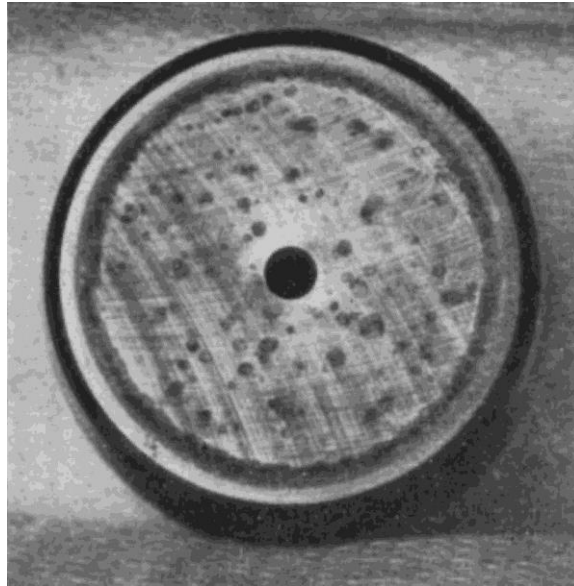


Figura II-2-5: Corrosión laterales de un rodillo debido a un lubricante contaminado con humedad [1]

En la figura II-2-6 vemos picaduras superficiales sobre un rodillo, resultante del trabajo con un lubricante contaminado con ácidos y humedad.

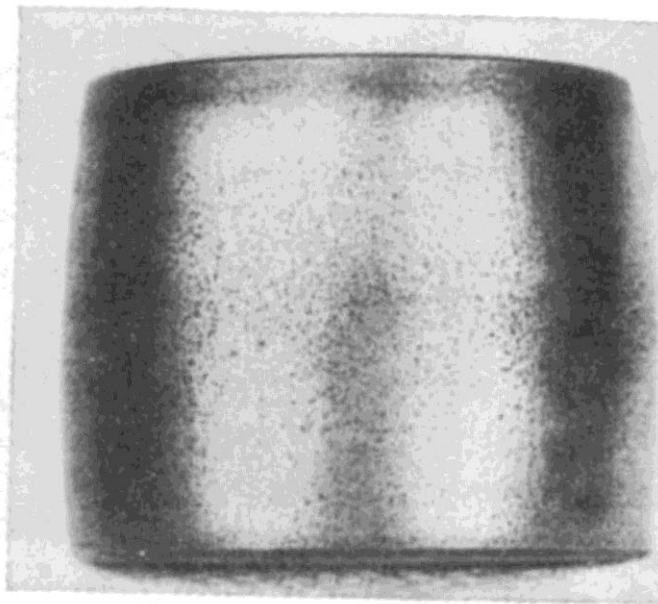


Figura II-2-6: Picado superficial debido a corrosión producida por grasa contaminada con ácidos y humedad [1]

En el período inicial, las manchas de corrosión son de color rojizo o negro y no afectan únicamente a las partes vivas del rodamiento, sino a su conjunto, comprendiendo las caras, diámetros y jaulas [3].

En las figuras II-2-7 a II-2-10 vemos más ejemplos de corrosión.



Figura II-2-7: marcas por corrosión [3].

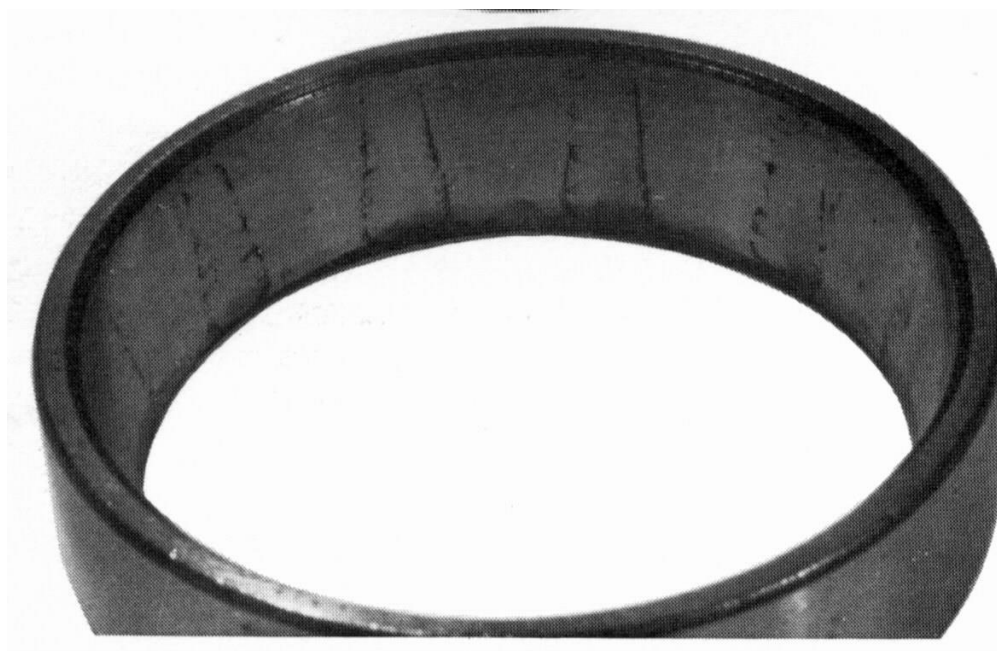


Figura II-2-8: corrosión, posiblemente combinado con un largo período de inactividad [3].



Figura II-2-9: Corrosión en la superficie exterior del aro de un rodamiento de bolas a rótula [3].



Figura II-2-10: daño muy avanzado por corrosión [3].

II-2-B.- CORROSIÓN POR VIBRACIÓN.

Leemos en Wilcock y Booser [1] que el *brinelling* es una deformación permanente causada ya sea debido a una elevada carga estática o a una carga de impacto severa sobre los rodamientos mientras éstos no rotan, las cuales pueden causar marcas en los caminos de rodadura y en los elementos rodantes.

Un manipuleo inapropiado, golpes y cargas sobre los aros externos durante el montaje sobre el eje son causas frecuentes del *brinelling* en los rodamientos de bolas (ver parágrafo II-3-B).

En cambio, el “*falso brinelling*” es un fenómeno de desgaste muy singular. Ocasionalmente se observan marcas de elementos rodantes en las pistas de rodamientos a pesar de una dureza adecuada del material [2]. Las marcas están regularmente distribuidas en toda la circunferencia de la pista de rodadura.

Este daño puede ocurrir si el rodamiento de bolas o rodillos está expuesto a vibraciones mientras no gira.

La figura II-2-11 muestra un caso de este tipo de avería en un aro de rodamiento de bolas a rótula.

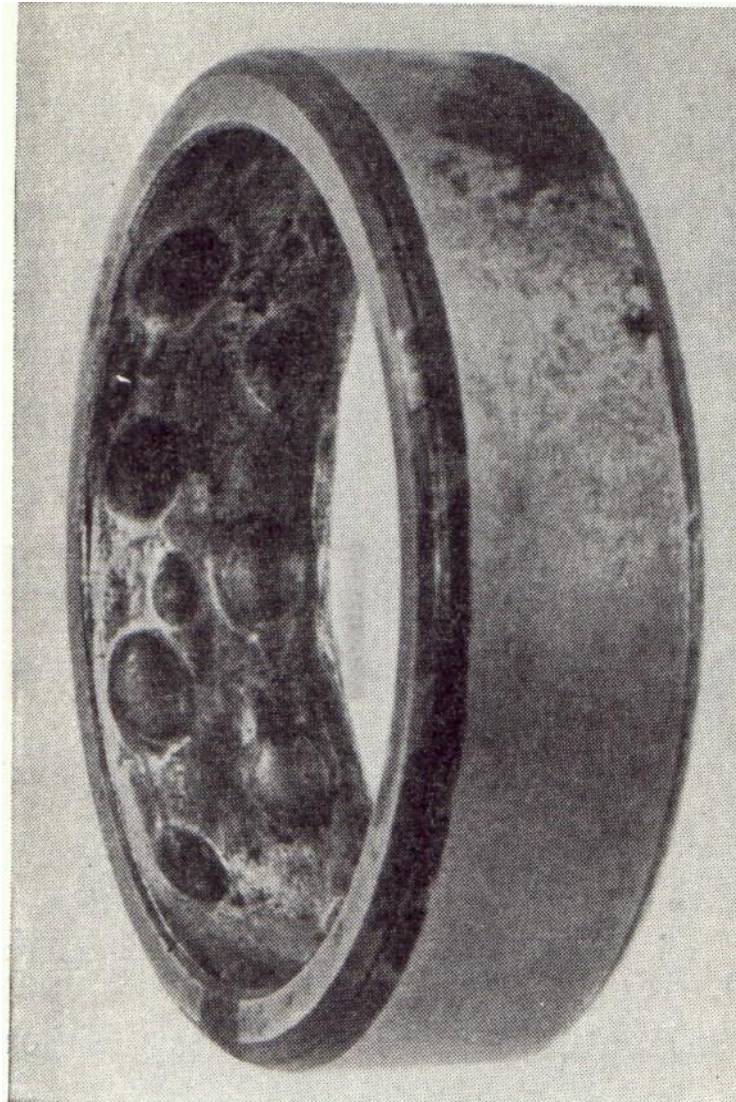


Figura II-2-11: marcas por corrosión por vibración en la pista de rodadura externa de un rodamiento de bolas a rótula [2].

La figura II-2-12 muestra otro ejemplo de corrosión por vibración, en este caso vibración axial.

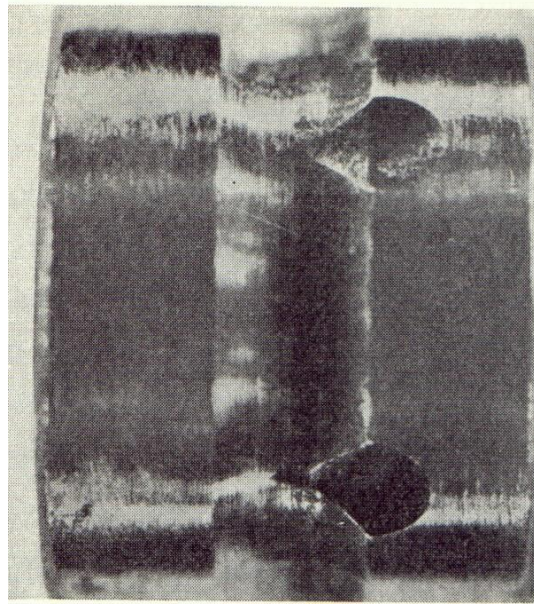


Figura II-2-12: corrosión por vibración axial en la pista interna de un rodamiento de bolas [2].

Las huellas de corrosión que se observan tanto en la pista interior como en la pista exterior del cojinete radial de rodillo de la figura II-2-13 son atribuidas al mismo efecto de vibración.

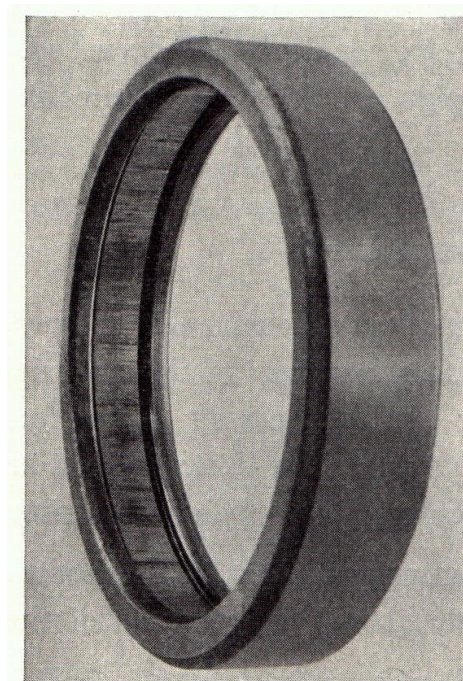
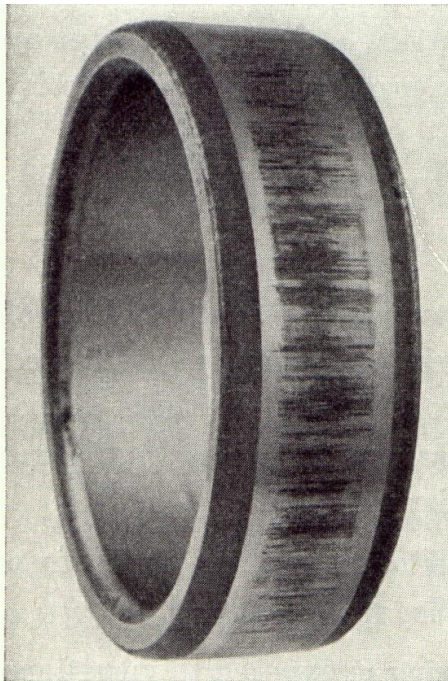


Figura II-2-13: huellas de corrosión por vibración del mismo cojinete radial de rodillos. Véase las huellas en la pista interior y exterior [2].

En la figura anterior, la gran cantidad de huellas puede deberse a eventuales movimientos giratorios del cojinete. No obstante, siempre es posible encontrar entre ellas la distribución equivalente a la separación entre los elementos de rodadura como en los casos anteriores [3].

La figura II-2-14 muestra una avería de falso *brinelling* en la pista interior de un rodamiento radial de rodillos causado por un pequeño movimiento de oscilación mientras soportaba carga [1]

Las investigaciones teóricas han mostrado que tales marcas son causadas por un tipo especial de desgaste el cual se lo conoce como corrosión por vibración o “*falso Brinelling*” [2].

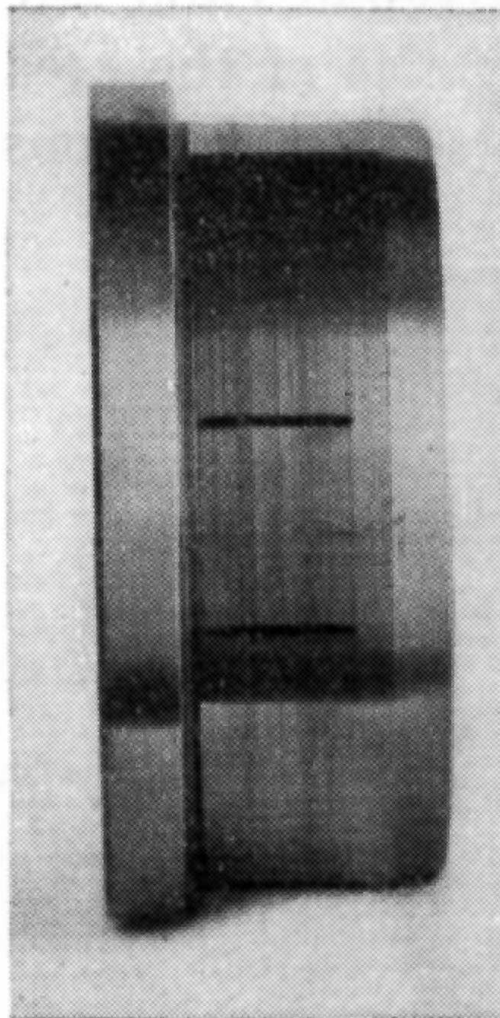


Figura II-2-14: Avería de falso brinelling en la pista interior de un rodamiento radial de rodillos [1]

Este desgaste se origina en la periferia de las superficies en contacto, y son causadas por fuerzas tangenciales de fricción que se producen allí durante las deformaciones elásticas [2].

Un examen con gran aumento de las zonas afectadas demuestra que las huellas se deben a una desaparición del material y no a una hendidura (*brinelling*) como en el caso de choques o sobre cargas [3].

El *falso brinelling* afecta a los rodamientos en situación estática o en oscilación de pequeña magnitud, pero siempre en presencia de vibraciones [3].

Bajo el efecto conjunto de una presión, incluso débil, y de vibraciones, el lubricante tiende a escaparse la zona de carga dejando en contacto a las superficies.

La energía de vibración presente produce micro soldaduras o micro adherencias con arranque de material. Las partículas arrancadas se oxidan acelerando luego el proceso.



Figura II-2-15: falso *brinelling* en la pista interior de un rodamiento radial de rodillos [3].



Figura II-2-16: falso *brinelling* en la pista interior de un rodamiento de bolas [3].



Figura II-2-17: falso *brinelling* en ambas pistas de un rodamiento rígido de bolas [3].

Este tipo de falla sucede, por ejemplo, durante un largo transporte de maquinaria en camiones por caminos irregulares; en los rodamientos de los grupos electrógenos de reserva acoplados en la misma plataforma que el grupo en funcionamiento; motores eléctricos parados sobre máquinas que giran; en ventiladores de reserva acoplados con ventiladores en uso; etc. o, genéricamente, en cualquier caso en el cual el cojinete esté expuesto a vibraciones mientras se encuentre en estado estacionario [2]; [3].

El excesivo juego interno del rodamiento promueve la aparición de esta avería [2]; consecuentemente el juego interno debe ser lo más pequeño como sea posible. Ésta es una de las razones por la cual algunos rodamientos se precargan [2].

Es también importante cambiar el lubricante cuya consistencia no sea demasiado alta ya que dicho lubricante provee una mejor protección contra la corrosión por vibración en los puntos de contacto [2].

También es útil mantener en movimiento giratorio, incluso lento, a las máquinas en reposo ubicadas en zonas de vibraciones, lo cual facilita el reparto del lubricante [3].

Es útil sujetar los ejes lo suficiente para prevenir su movimiento con respecto a los apoyos.

El falso *brinelling* no puede prevenirse mediante una reducción de la presión de contacto [2].

II-2-C.- CORROSIÓN POR FROTAMIENTO

Un montaje no lo suficientemente fijo, ya sea sobre el eje o sobre el soporte puede permitir un movimiento relativo entre las partes. La vibración y la debilidad del ajuste pueden producir una oxidación superficial normalmente conocida como corrosión por frotamiento, por contacto o corrosión por ludimiento. Este fenómeno es tratado en diversos libros de elementos de máquinas (por ejemplo, Faires, V. M. Diseño de Elementos de Máquinas. Montaner y Simon SA. Página 168). Un movimiento relativo pequeño entre las partes da lugar a que pequeñas partículas metálicas se desprendan y oxiden, y que al mezclarse con la grasa puede causar algún tipo de dificultad [1].

La vibración de las piezas ensambladas es una causa común de corrosión por contacto.

En los alojamientos de los aros exteriores, los cuales por lo general no están rectificados, la rugosidad superficial favorece este fenómeno [3].

La figura II-2-18 muestra un ejemplo de este problema.

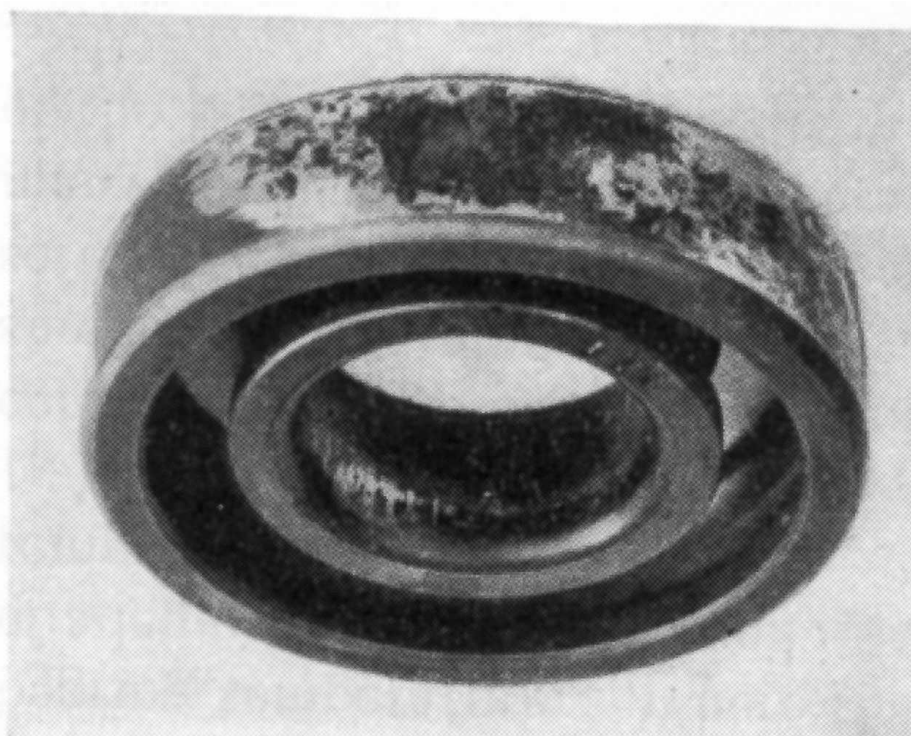


Figura II-2-18: corrosión en la superficie externa de un aro externo de rodamiento causado por la falta de uniformidad en la fijación del mismo al soporte [1].

SNR, en su documento Técnico [3] indica que la corrosión de contacto se presenta bajo la forma de manchas color rosa, oscuras o negras más o menos extensas. Se localizan en el diámetro interno, externo o en las caras de apoyo del rodamiento. Al observar dichas manchas con lente de aumento, se ve un ataque más o menos profundo de las superficies, al frotarlas dejan señales de óxido. En los casos avanzados el óxido mezclado al lubricante forma una pasta oscura (y abrasiva). Las figuras II-2-19 y II-2-20 muestran más ejemplos de este daño.



Figura II-2-19: corrosión de contacto [3].



Figura II-2-20: corrosión de contacto muy avanzada con pérdida de material [3].

En la figura II-2-20 se ve la evidencia de un proceso de fuerte corrosión de contacto debido a la debilidad con que fue bloqueado axialmente el rodamiento. Es también un ejemplo claro de lo que puede suceder en casos severos de corrosión con pérdida de material lo cual puede causar el debilitamiento de las pistas y su posterior rotura [3].



Figura II-2-21: corrosión de contacto [3].

II-3.- INSTALACIÓN INCORRECTA

II-3-A.- DISEÑO DEFECTUOSO DE LAS PARTES ANEXAS AL RODAMIENTO

Eschmann; Hasbargen y Weigand en la parte E de su libro [2] indican que el defecto más frecuente ocurre en la instalación especialmente debido a una excesiva precarga interna, reconocible por la forma y ubicación de las huellas dejadas por los elementos rodantes.

Sabemos que en algunos casos la precarga es necesaria y en esos casos su valor está definido por el fabricante del rodamiento, en otros casos donde no es necesaria o donde se excede su valor se produce un daño.

Una precarga radial interna excesiva puede deberse a un montaje sobre el eje con elevada interferencia o debido a una dilatación de valores distintos de los apoyos del aro interior respecto del anillo exterior.

Si existe una buena alineación entre el eje y su soporte, las huellas dejadas por los elementos rodantes debido a una excesiva precarga se observan en toda la extensión de los caminos de rodadura. Véase la figura II-3-1.

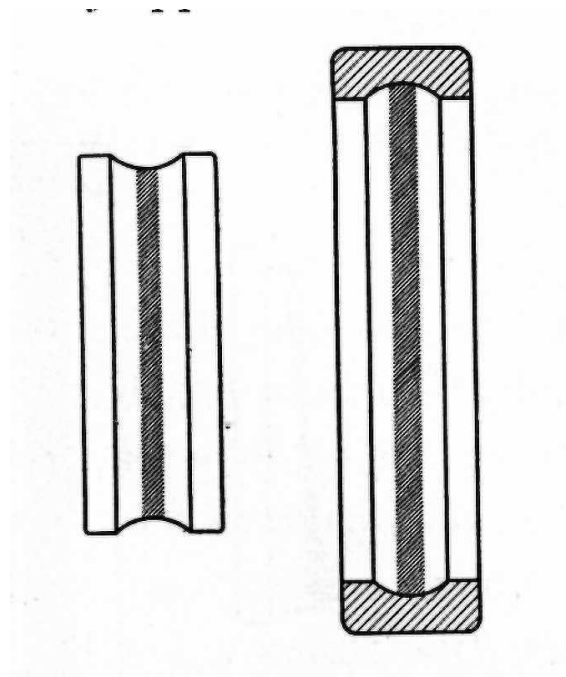


Figura II-3-1. huellas dejadas por los elementos rodantes en toda la extensión de los caminos de rodadura [2].

Una precarga que anule el juego interno produce elevación de la temperatura de funcionamiento. La figura II-3-2 [2] muestra un aro interno de un rodamiento de bolas en el cual la elevación de temperatura permitió que el material haya sido rolado y desplazado hacia los contornos de la pista. Las marcas adicionales de los elementos rodantes que se observan en la figura pueden deberse a una súbita carga sobre el rodamiento.

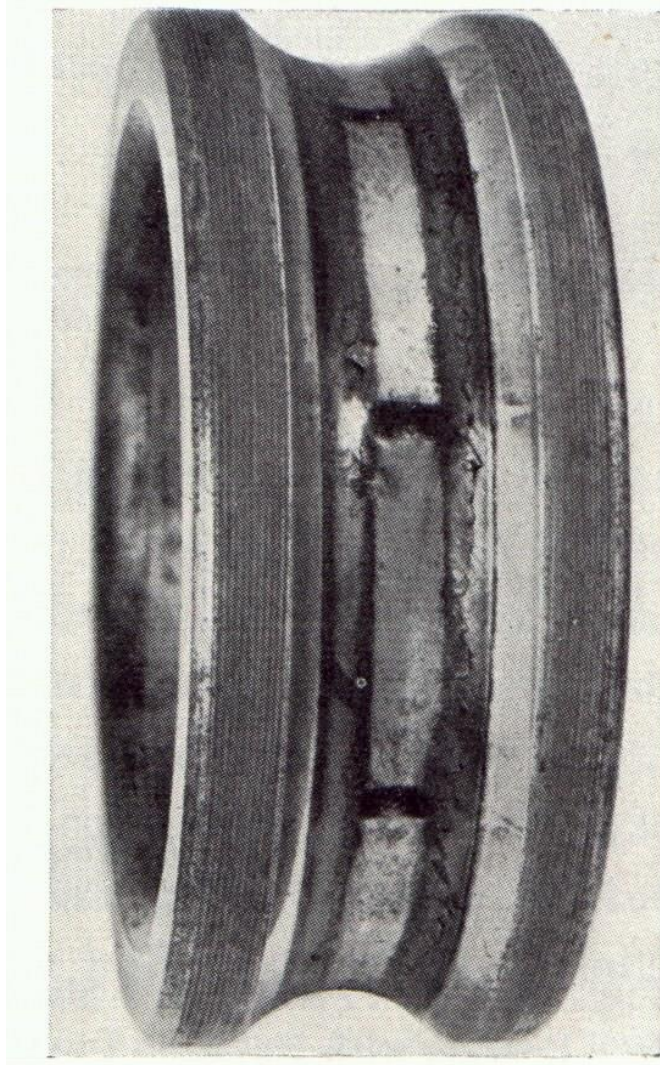


Figura II-3-2: marcas del daño producido en el aro interior de un rodamiento de bolas debido a un sobrecalentamiento.

Otro daño debido al exceso de apriete es la exfoliación de las pistas en todo su desarrollo, inclusive en la posición opuesta a la dirección de la carga para aquellos aros que no rotan

en relación con la misma (ver figura II-3-3). Las sobre tensiones de contacto producidas al reducirse o eliminarse el juego interno aceleran el proceso de fatiga del material.

Este tipo de avería puede llegar a confundirse con el mostrado en la figura II-1-5, por ello es importante conocer la historia del uso del rodamiento y los detalles de su entorno, diseño de las partes anexas, mantenimiento, etc.

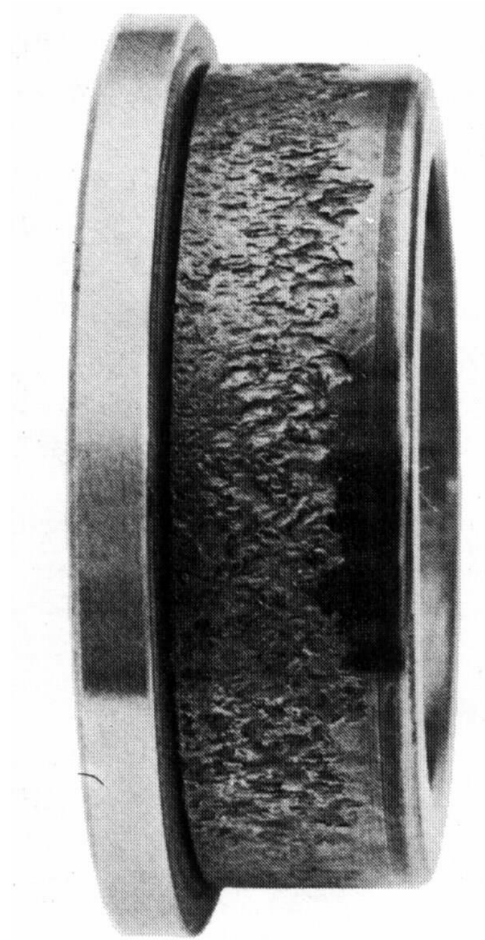


Figura II-3-3: exfoliación en la totalidad de la pista de un anillo fijo respecto de la dirección de la carga debido exceso de ajuste de montaje [3].

Si la interferencia dimensional entre el agujero del rodamiento y el diámetro exterior del eje es muy importante se puede llegar directamente a causar la rotura del aro interno del rodamiento (figuras II-3-4 y II-3-5)

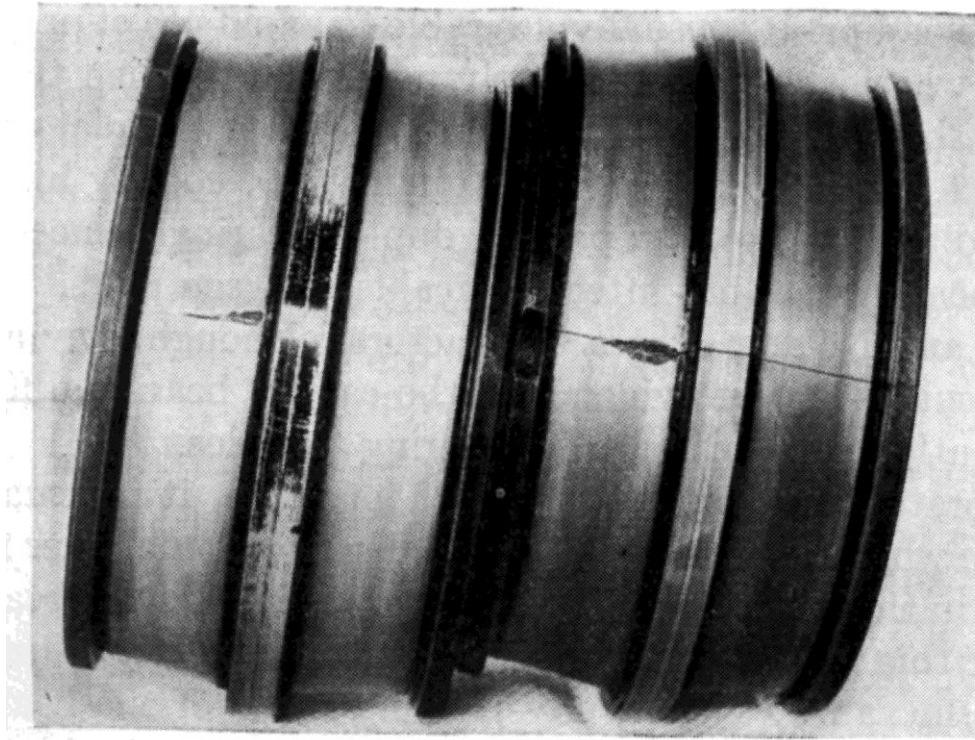


Figura II-3-4: Rotura de pista interior debido a excesiva interferencia de montaje sobre el eje [1]



Figura II-3-5: rotura por exceso de interferencia de montaje [3].

Otro tipo de precarga interna se produce por el formato oval de las pistas [2]. Ello sucede cuando los apoyos han sido mecanizados con deficiencia en su circularidad. Los aros de los rodamientos se adaptan a esas deficiencias.

Las figuras II-3-6 y II-3-7 muestran ejemplos de avería debidas a este defecto.

Obsérvese en la II-3-6 las marcas enfrentadas diametralmente en correspondencia con la zona de menor diámetro interno

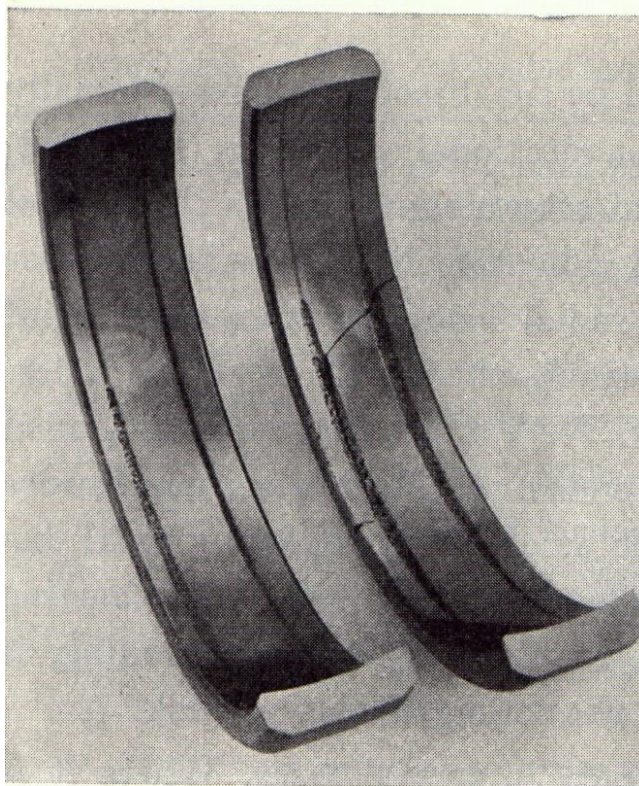


Figura II-3-6: avería por precarga interna debido a una deformación oval del aro externo de un rodamiento por defecto de mecanizado del apoyo [2].

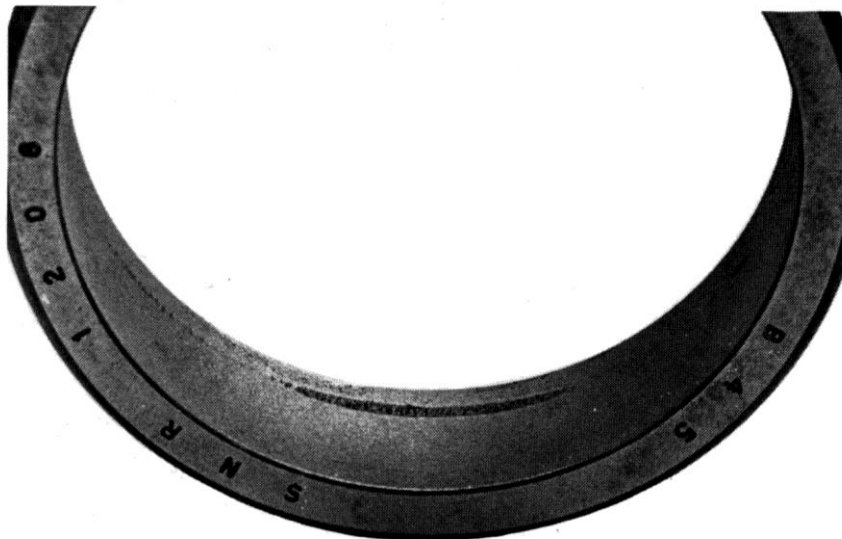


Figura II-3-7: exfoliación localizada debido al formato oval del apoyo [3].

Otro defecto de mecanizado de los ejes o alojamientos, aunque poco común, es la conicidad. Por ejemplo, en la figura siguiente se observa un daño por exfoliación localizada en el aro interno de un rodamiento cónico debido a este defecto.



Figura II-3-8: exfoliación localizada debido a mecanizado cónico del apoyo [3].

Otro problema común de instalación, que genera sobrecarga en el rodamiento, es la desalineación. Los rodamientos que no toleran desalineación pueden presentar averías prematuras debido a la sobrecarga que este error de montaje les produce.

Las figuras II-3-9 y II-3-10 muestran las huellas típicas que dejan los elementos rodantes debido a este error.

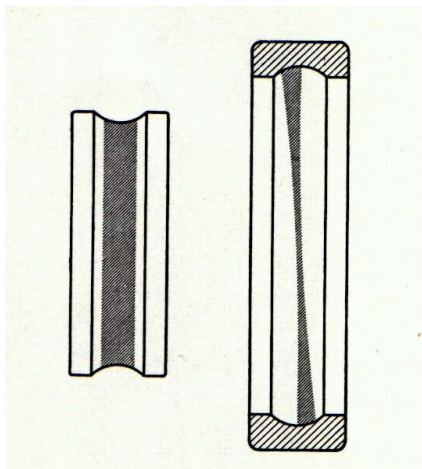


Figura II-3-9: huellas dejadas por los elementos rodantes en un caso de sobrecarga por desalineación cuando el anillo interior es el rotante [2].

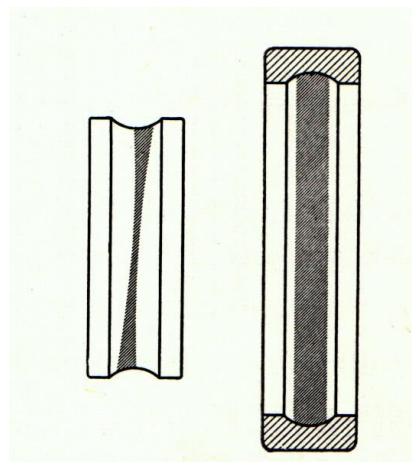


Figura II-3-10: huellas dejadas por los elementos rodantes en un caso de sobrecarga por desalineación cuando el anillo exterior es el rotante [2].

Las figuras II-3-11 y II-3-12 muestran casos de averías debidas a sobrecargas por desalineación.

La II-3-11 es un aro interno de un rodamiento de bolas en el cual el aro externo es el rotante [2].

La figura II-3-12 muestra la avería en un aro interno de un rodamiento cónico también debido a desalineación [2].

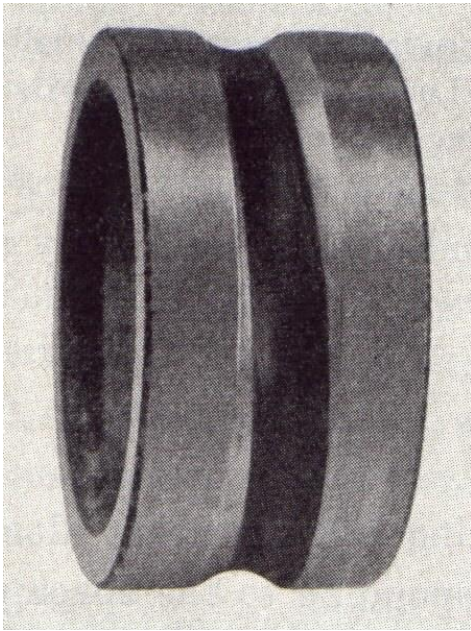


Figura II-3-11 huella por sobrecarga debida a desalineación en un aro interno de un rodamiento de bolas en el cual el aro externo es el rotante [2].

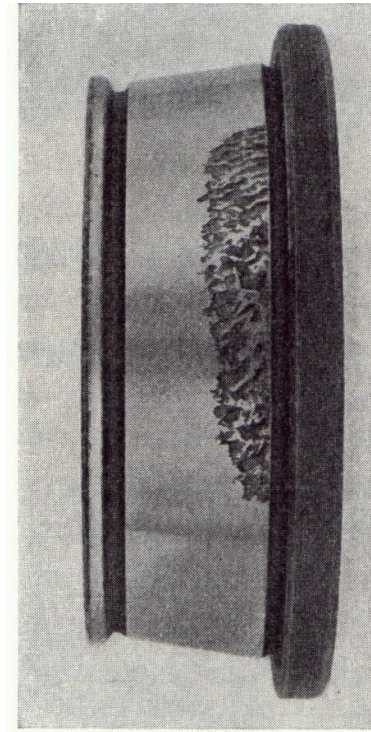


Figura II-3-12 muestra la avería por sobrecarga debida a desalineación en un aro interno de un rodamiento cónico [2]

La figura II-3-13 muestra otros casos de daños por desalineación.



Figura II-3-13: exfoliación debido a concentración de carga sobre determinados sectores de las pistas por desalineación [3].

La desalineación también puede ser axial, la que genera sobre tensiones y averías prematuras [2].

El motivo de la sobrecarga axial puede resultar de un montaje o diseño de la fijación axial inadecuado o bien puede aparecer durante el funcionamiento cuando el juego interno del rodamiento se reduce por dilataciones dispares entre el eje y el soporte [2].

La figura II-3-14 muestra un aro externo de un rodamiento de bolas a rótula cargado axialmente. Las huellas dejadas por los elementos rodantes en este tipo de avería son continuas en toda la periferia de la pista.

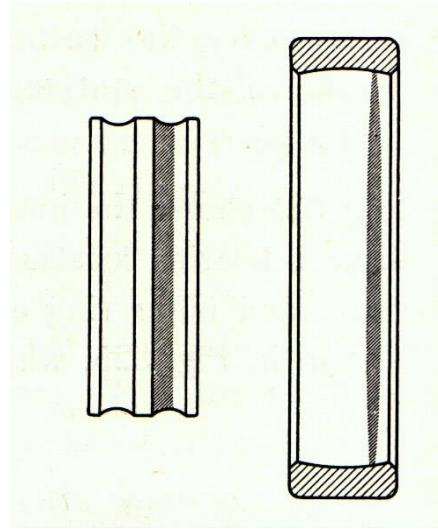
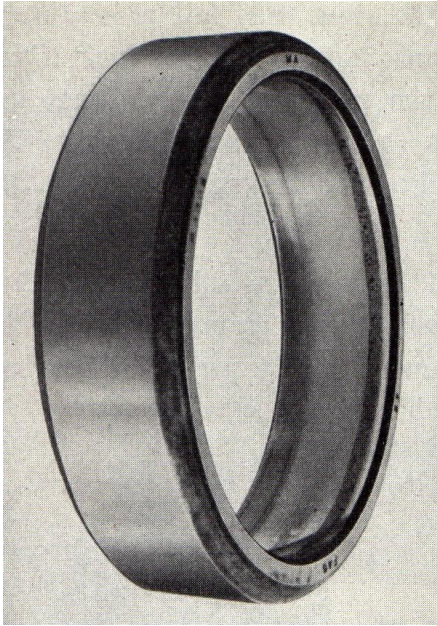


Figura II-3-14: ejemplo de huella dejada por los elementos rodantes debido a una sobrecarga por desalineación axial en un rodamiento de bolas a rótula [2].

II-3-B.- MONTAJE POR MÉTODOS NO CONVENIENTES

Dentro de este párrafo referido a instalación incorrecta, analizaremos el método por el cual se coloca al rodamiento sobre el eje y sobre el soporte.

En la figura II-3-15 se observa el estado de una pista interna de un rodamiento de rodillos a rótula que fue colocado a martillazos sobre el eje. Las vibraciones producidas por dichos golpes se transmitieron a través de los rodillos y éstos rompieron el borde de contención del aro interno.

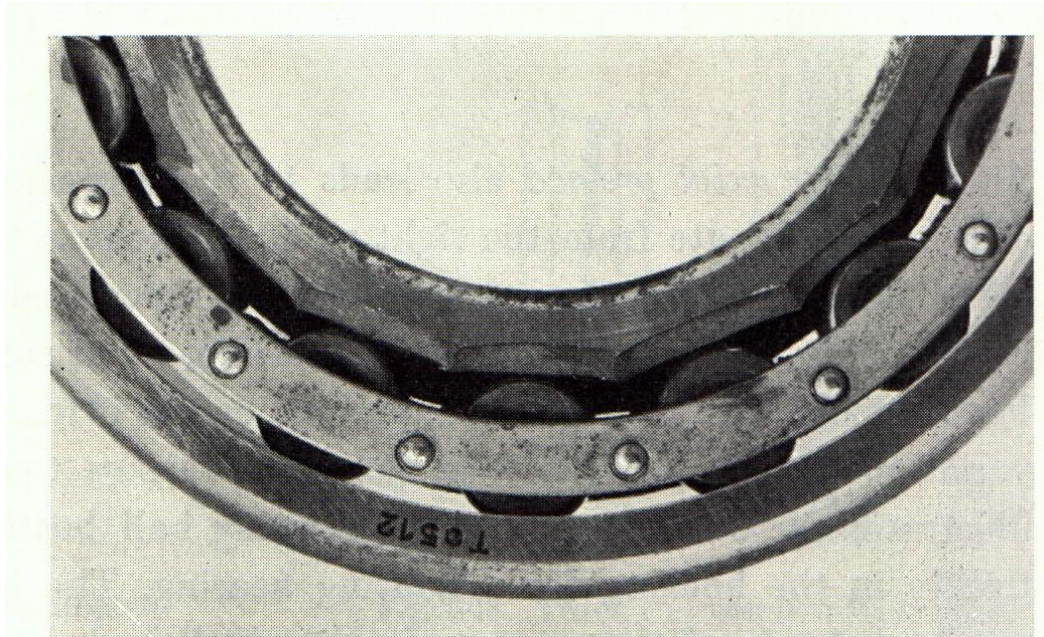


Figura II-3-15: rotura del borde de contención de los rodillos debido a un montaje a golpes [2].

Las figuras II-3-16 y II-3-17 también son ejemplos de daños producidos por golpes durante el montaje.



Figura II-3-16: rotura del borde de la pista por percusión durante el montaje [3].

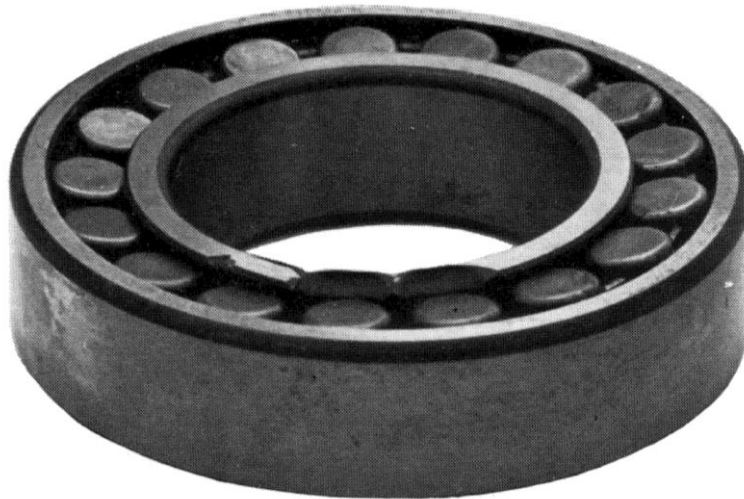


Figura II-3-17: rotura del borde de una pista por percusión durante el montaje [3].

Las jaulas son los elementos particularmente más expuestos a los golpes durante el montaje. Sus daños son frecuentemente de difícil identificación, pues están enmascarados por importantes efectos secundarios tales como: calentamientos, laminado de las jaulas bajo los cuerpos rodantes, gripados etc. [3].

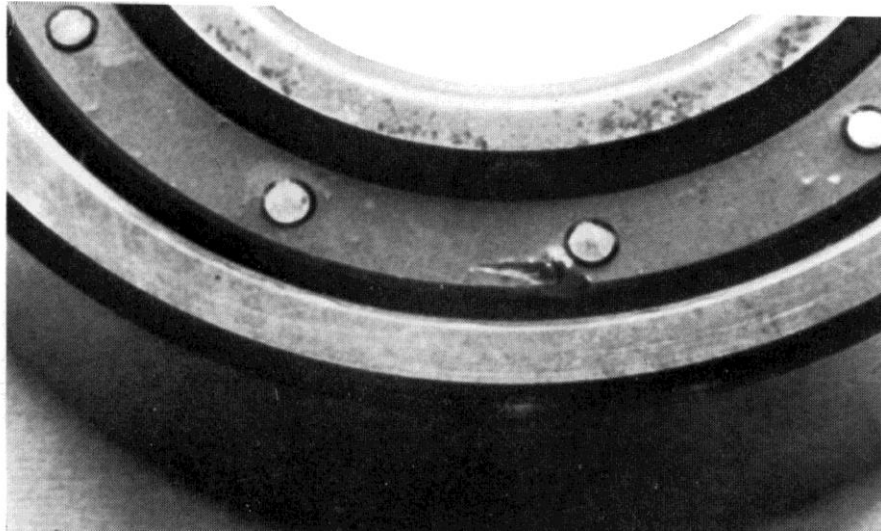


Figura II-3-18: deterioro de la jaula debido a golpes durante el montaje [3].

Otro efecto del montaje a golpes, o con una fuerza de prensa excesiva (también producto de una elevada interferencia dimensional entre el rodamiento y sus apoyos), son las marcas que dejan los elementos rodantes sobre las pistas (*brinelling*).

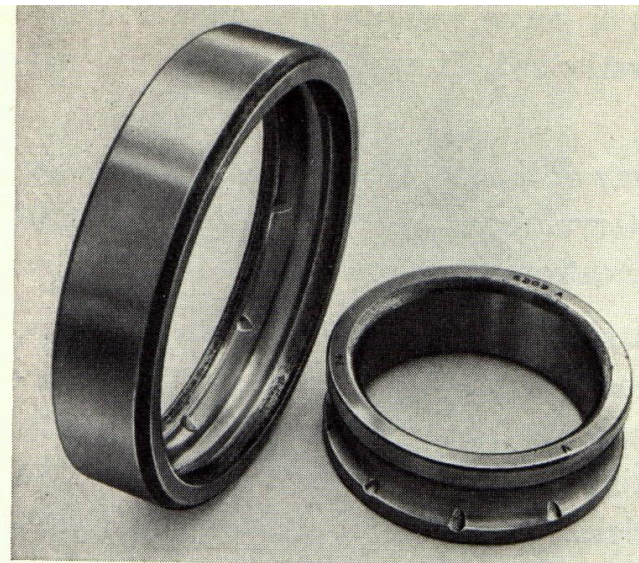


Figura II-3-19: marcas de los elementos rodantes causados por una carga excesiva durante el desmontaje [2].

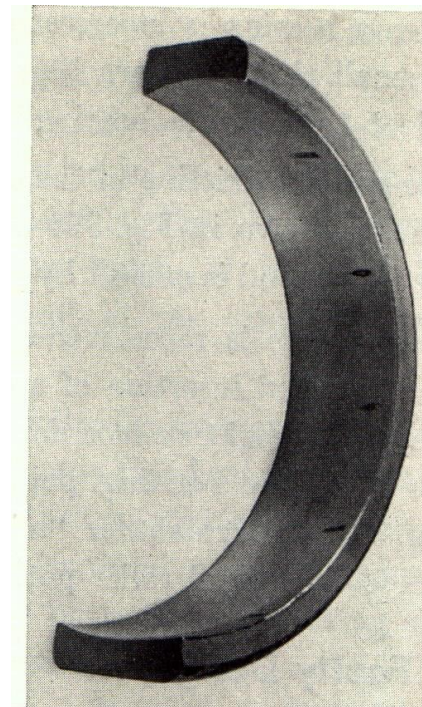


Figura II-3-20: marcas de los rodillos en la pista externa.

La carga o golpes aplicados a los aros se transmiten a los elementos rodantes y de ellos a las pistas causando deformaciones plásticas en forma de marcas.

Las figuras II-3-19 y II-3-20 muestran dos ejemplos.

Estas marcas pueden llegar a ser tan pequeñas que pasan por alto a una observación visual simple [2].

En ciertos casos los golpes producen fisuras, e incluso directamente roturas [3]. Las fisuras son más perniciosas, pues pueden no aparecer inmediatamente, y luego durante el funcionamiento desprenden partículas que al introducirse entre los elementos rodantes generan los daños ya estudiados.

La figura II-3-21 muestra un ejemplo de esta avería.

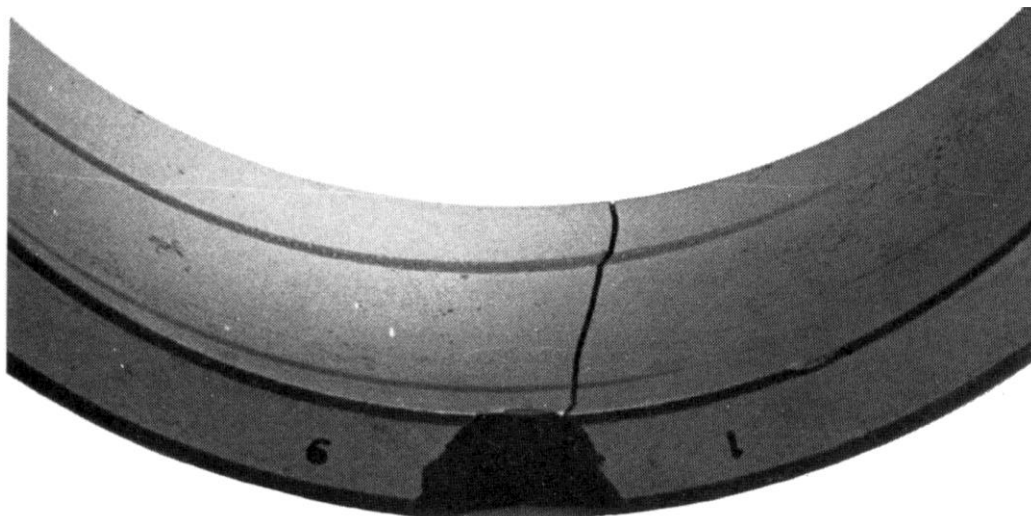


Figura II-3-21: fisura y rotura por golpes durante el montaje [3].

Durante la instalación de rodamientos de rodillos cilíndricos, si el aro exterior, ya colocado sobre el soporte, ha reducido su diámetro interno debido a la interferencia de montaje, puede suceder que el resto del rodamiento, al ser introducido tienda a acunarse.

Si se fuerza la colocación por presión o percusión, el resultado es una línea de arranque de material tanto en la periferia del rodillo y en sentido paralela a su generatriz como en la pista de rodadura [3].

Las figuras II-3-22 y II-3-23 muestran un ejemplo de este tipo de daño.



Figura II-3-22: marcas por arranque de material en la generatriz del rodillo de un rodamiento radial de rodillos debido a la introducción forzada en la pista de la figura II-3-23.



Figura II-3-23: marcas por arranque de material en la pista de rodadura del aro exterior de un rodamiento radial de rodillos debido a la introducción forzada de la pieza de la figura II-3-22

Los aros de los rodamientos deben estar soportados en forma completa, pues si el apoyo es incompleto (o con el defecto de forma oval, como ya hemos visto más arriba), se generan sobrecargas localizadas [2].

En la figura II-3-24 vemos el deterioro de un aro exterior el cual fue asegurado en forma incorrecta por medio de un tornillo, a modo de prisionero, para evitar que gire. Consecuentemente se produjo una sobre tensión localizada provocando su rotura.

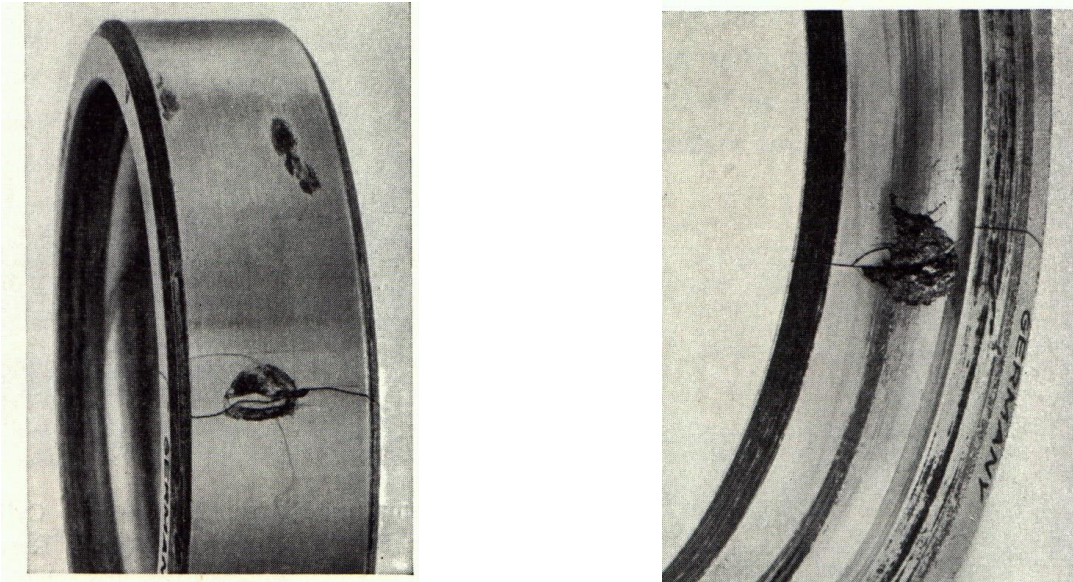


Figura II-3-24: avería producida por la presión de un tornillo de fijación radial en el aro exterior de un rodamiento, vista exterior y vista interior.[2]

De la figura anterior se observa que la sobrecarga localizada sobre la pista de rodadura produjo fatiga y exfoliación previo a la rotura final.

II-4- OTROS MOTIVOS DE DAÑO.

II-4-A.- PASAJE DE CORRIENTE ELÉCTRICA.

Leemos en Wilcock y Booser [1] que cuando existe una diferencia de potencial de 0,5 a 1 Volt o más entre el eje y el soporte de un rodamiento, ya sea de corriente continua o alterna, es probable que aparezca un daño en las superficies.

Debido al movimiento continuo de los elementos rodantes, el pasaje de la corriente se interrumpe y se genera un arco eléctrico y una chispa; lo cual produce puntos microscópicos de alta temperatura que funden el material y dejan pequeñas picaduras [1].

Este tipo de dificultad en los rodamientos es bastante frecuente en equipamientos eléctricos donde corrientes eléctricas errantes o circuitos eléctricos desbalanceados pueden generar que el rotor de una máquina se encuentre a diferente potencial que su estator.

Estas dificultades pueden también presentarse en unidades mecánicas de altas velocidades en las cuales se generan corrientes estáticas [1].

La avería típica del pasaje de corriente eléctrica por un rodamiento son marcas distribuidas regularmente con forma de estrías [2].

Para SNR [3] existen dos tipos de daños vinculados al pasaje de una corriente eléctrica: cráteres y estrías.

En su documento Técnico define a los cráteres como picaduras de bordes netos unidas en series más o menos largas, e indican fusión localizada de material.

Las estrías, según SNR, es una sucesión de hendiduras estrechas una junto a otra que dan la impresión de canales que se suceden en la zona de las pistas sometidas a carga, o incluso en los elementos rodantes.

Las figuras II-4-1 y II-4-2 muestran ejemplos de este fenómeno.

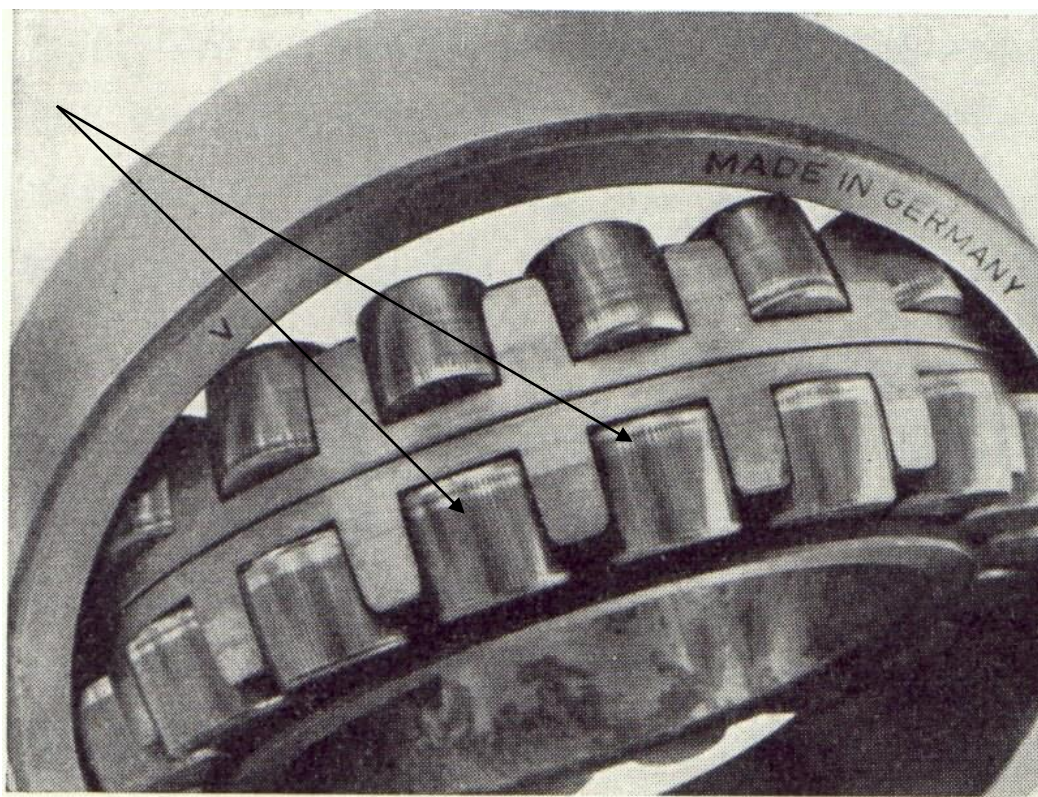


Figura II-4-1: estrías en los rodillos de un cojinete de rodillos a rótula derivadas del pasaje de una corriente eléctrica [2].

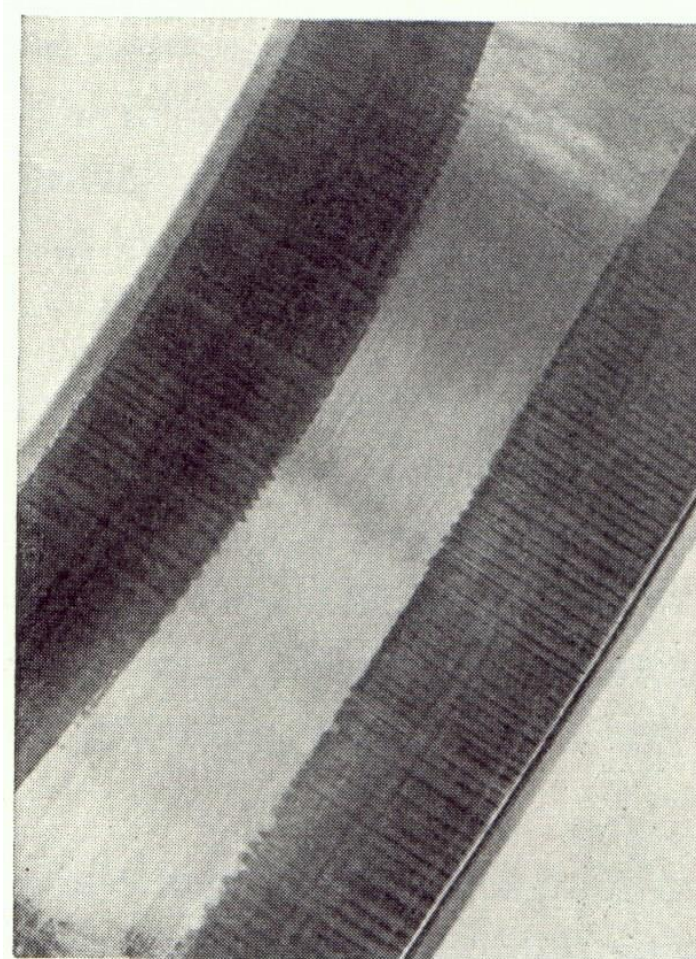


Figura II-4-2: estrías formadas en la pista exterior de un cojinete de rodillos a rótula debidas al pasaje de una corriente eléctrica [2].

En la figura II-4-3 vemos el picado superficial sobre un rodillo esférico causado por el pasaje de una corriente eléctrica relativamente grande [1].

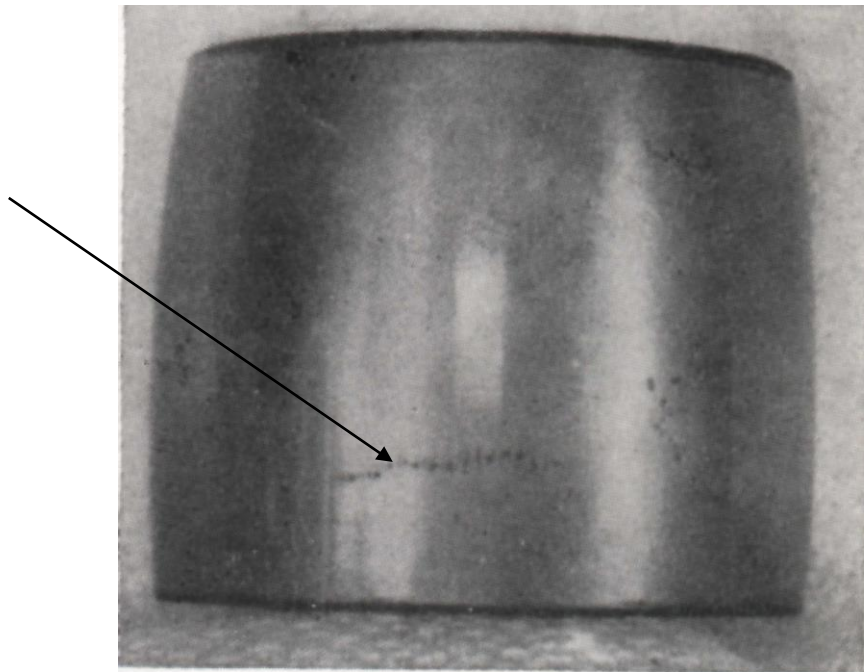


Figura II-4-3: picado superficial sobre un rodillo esférico causado por el pasaje de una corriente eléctrica relativamente grande [1].

Una vista ampliada de la zona del rodillo de la figura II-4-3 afectada por el pasaje de la corriente eléctrica, nos permite observar la tipología del daño. Ver figura II-4-4.

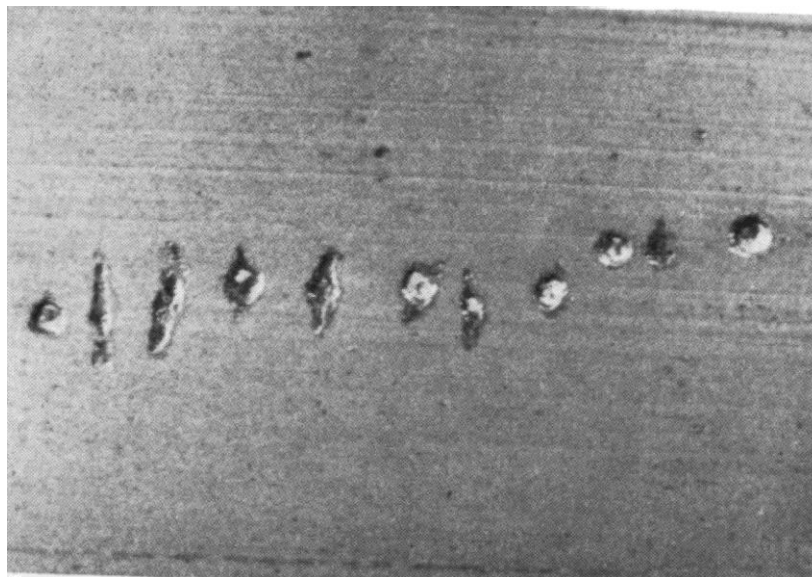


Figura II-4-4: detalle ampliado de la zona afectada por el paso de una corriente eléctrica en el rodillo de la figura II-4-3 [1].

El constante pasaje de una pequeña corriente eléctrica que se mantiene en unos pocos miliamperes da como resultado una multitud de pequeños cráteres sobre la superficie del rodamiento [1].

La figura II-4-5 muestra cráteres en una bola y la II-4-6 en el interior de un aro de un rodamiento de bolas [3].

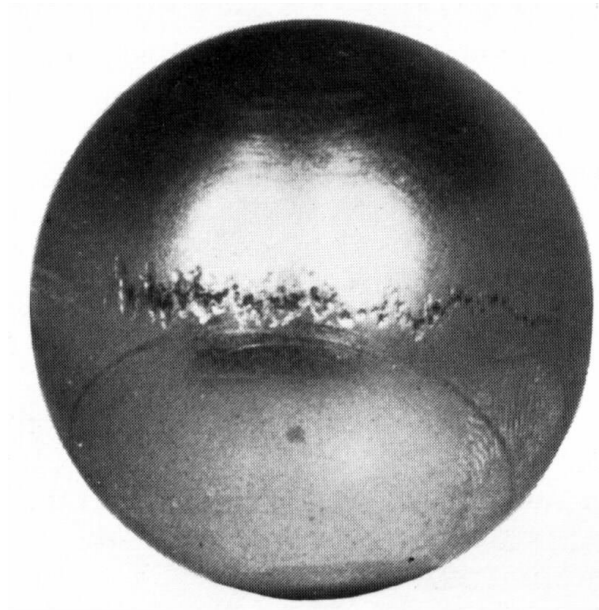


Figura II-4-5: cráteres, según SNR [3].



Figura II-4-6: cráteres según SNR [3]

En las figuras II-4-7 y II-4-8 vemos más ejemplos de estrías.

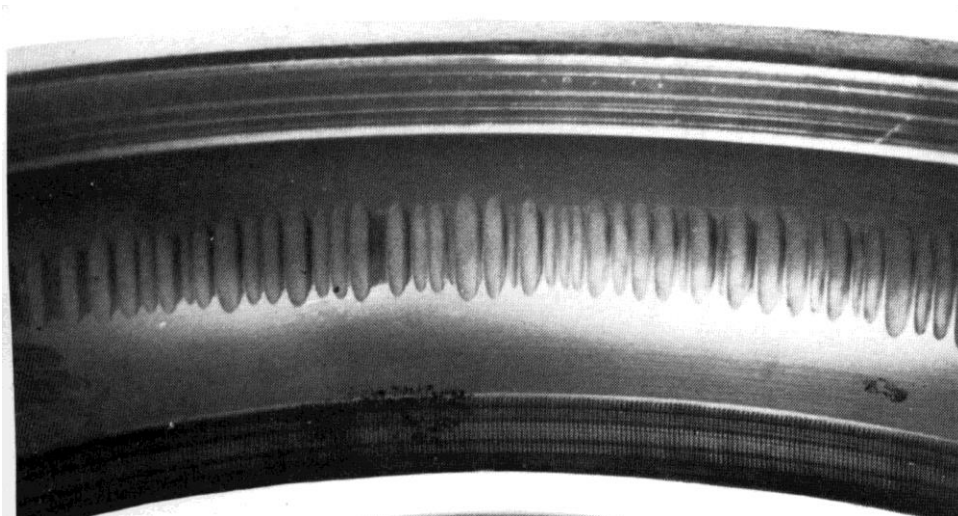


Figura II-4-7: estrías por pasaje de corriente [3].

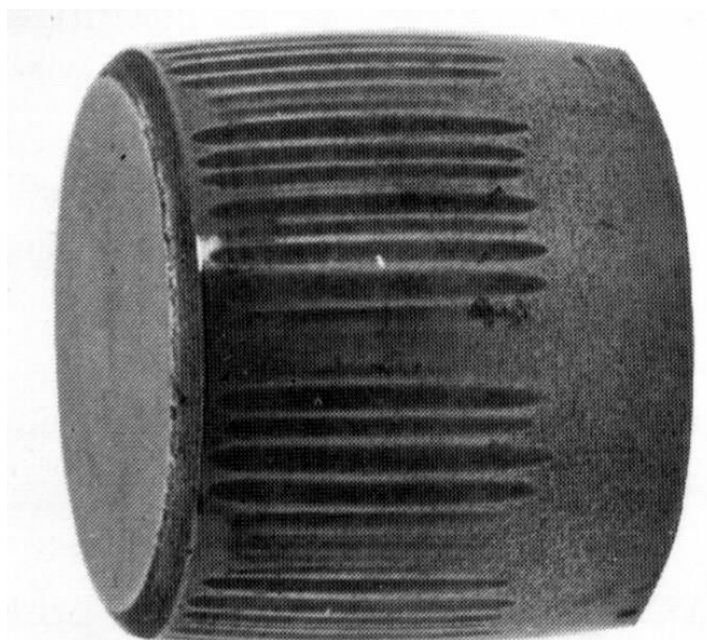


Figura II-4-8: estrías en elemento rodante [3].

En la figura II-4-9 se muestra un caso combinado de vibración y pasaje de corriente eléctrica

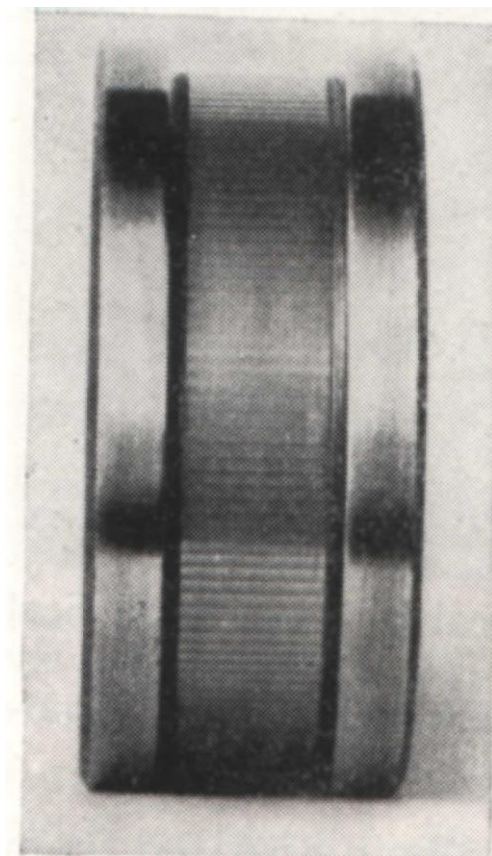


Figura II-4-9: Estrías sobre la pista interior de un rodamiento radial de rodillos, causadas por el pasaje prolongado de una pequeña corriente eléctrica en presencia de vibración [1]

En la figura II-4-10 se muestra una vista ampliada de la zona de estrías de la figura anterior.

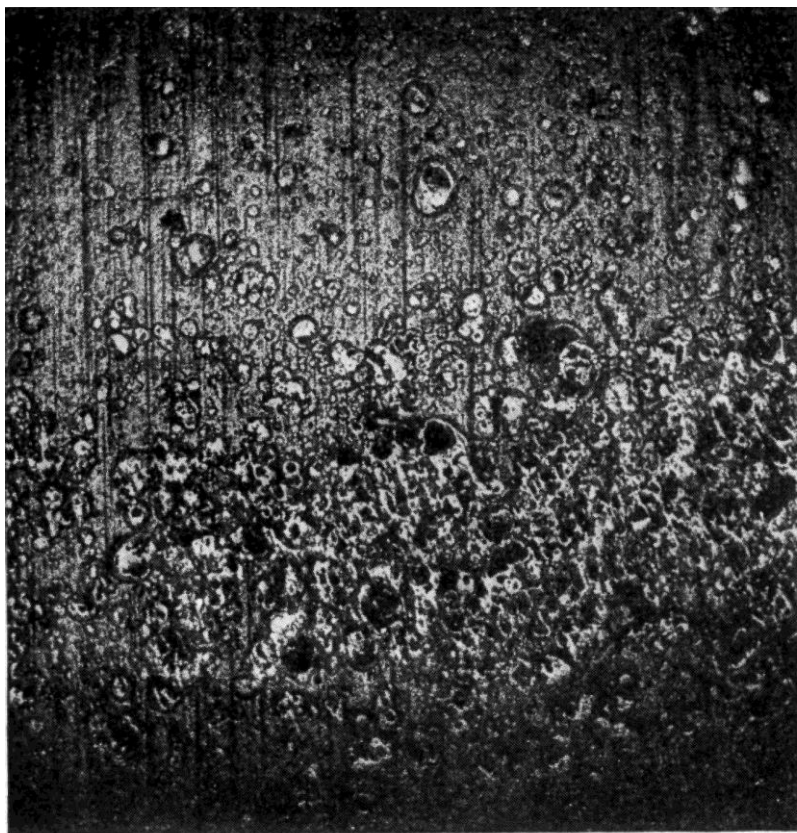


Figura II-4-10 vista ampliada de la zona de estrías de la figura II-4-9 [1].

Un posible remedio para evitar el pasaje de la corriente por el rodamiento puede ser, o bien aislando el soporte del rodamiento, o bien conectando a tierra el eje a través de escobillas [1].

II-4-B.- ALTAS TEMPERATURAS.

Entendemos el trabajo de los rodamientos en un ambiente circundante de alta temperatura, y no la que puede generar el propio rodamiento por su funcionamiento o por defectos derivados de otros factores ya expuestos.

Por ejemplo, en los rodamientos ubicados en los ejes de los cilindros secadores, en motores de las fundiciones cercanos a los hornos, en carros de traslación dentro de los hornos de cocción o secado, etc. [3].

Así, los rodamientos que trabajan a altas temperaturas presentan deterioros en varias de sus partes constitutivas [1]: las jaulas comienzan a oxidarse, los elementos rodantes y sus pistas pierden dureza, y la grasa o aceite utilizados como lubricantes se deteriora.

Un rodamiento sometido a altas temperaturas presenta una coloración marrón tanto de los anillos como de los cuerpos rodantes debida a una oxidación superficial y a la polimerización a alta temperatura del lubricante [3].



Figura II-4-11: coloración superficial debido a la exposición a alta temperatura [3].

El daño producido por las altas temperaturas deriva en daños similares a los ya vistos.

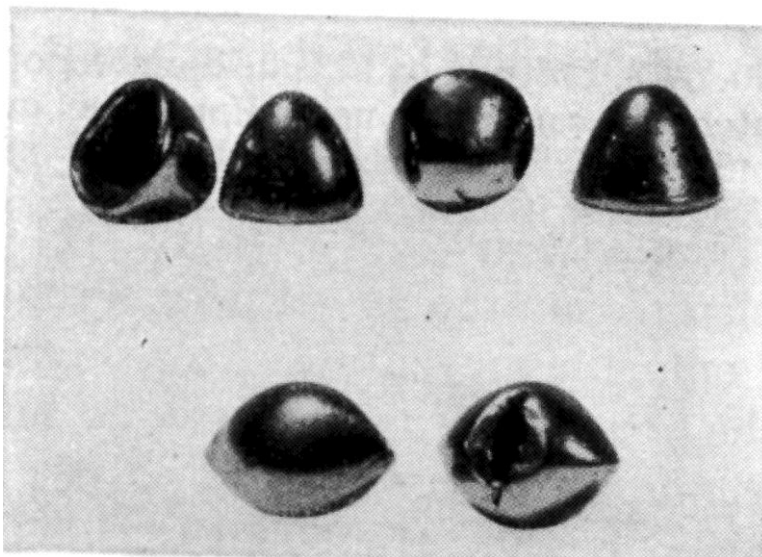
Según Wilcock y Booser [1], la máxima temperatura que puede soportar un rodamiento, construido en acero 52100 es de 250°F (121°C).

Para rodamientos en condiciones de operación con altas temperaturas, las fallas provienen de una fatiga precoz o por disminución de sus tolerancias internas [1].



Figura II-4-12: coloración debido a la exposición a altas temperaturas [3].

La figura II-4-13 muestra casos extremos de deformación plástica de las bolillas de un rodamiento sometido a altas temperaturas.



La figura II-4-13 deformación plástica de las bolillas de un rodamiento sometido a altas temperaturas [1].

CAPÍTULO III

SEÑALES FÍSICAS ENTRE CAUSAS Y EFECTOS DE LAS AVERÍAS.

III-1- SIGNOS EXTERNOS QUE ANUNCIAN POSIBLES AVERÍAS.

SIGNO EXTERNO	EVIDENCIA	POSIBLE AVERÍA
Vibraciones	Pueden percibirse a mano o por medio de analizadores especiales.	Exfoliaciones. Abrasión, cuerpos extraños. Corrosión. Desequilibrios debidos a desgastes. Excesivo juego interno. Montaje con insuficiente ajuste.
Ruidos	Ruidos anormales inmediatos a la puesta en marcha. Ruidos de amplitud variable en función del tipo de avería. El desequilibrio dinámico no produce ruido audible, pues su frecuencia coincide con la del conjunto giratorio	Marcas de cuerpos rodantes. Exfoliaciones. Falso <i>brinelling</i> . Cuerpos extraños. Corrosión. Falta de juego interno. Rotura de la jaula o de un cuerpo rodante.
Elevación anormal de la temperatura	Todo aumento de temperatura por encima de la considerada normal debe ser considerada indicador de avería.	Ausencia o exceso de lubricante. Ausencia de juego interno. Sobrecarga axial accidental o inducida por montaje incorrecto.
Aumento anormal del par de rotación.	Todos los sistemas sobre rodamientos presentan un par resistente a la rotación, más aún con protecciones. Un aumento del par, generalmente acompañado por elevación de temperatura, debe ser considerado como anormal.	Deterioro de la jaula. Deterioro del lubricante. Desplazamiento o rotura de la jaula.

III-2- POSIBLE RELACIÓN ENTRE EL TIPO DE DAÑO OBSERVADO Y SU CAUSA Y ACCIONES PREVENTIVAS.

DAÑO OBSERVADO	POSIBLE MOTIVO	ACCIONES PREVENTIVAS
Exfoliaciones	Poco o falta de lubricante. Sobrecarga. Desalineación. Montaje con ajuste demasiado prieto. Defectos de mecanizado en apoyos y ejes.	Verificar la provisión de lubricante. Verificar si existen pérdidas del mismo. Revisar las cargas sobre el cojinete o la existencia de sobrecargas. Verificar la alineación entre eje y apoyo. Revisar la construcción de los apoyos, su circularidad y conicidad. Revisar el apriete por interferencia. Evitar el excesivo apriete de la tuerca o dispositivo de fijación axial de los rodamientos no rígidos.
Gripado	Exceso o falta de lubricante. Excesiva velocidad. Defectos de mecanizado en apoyos y ejes.	Verificar la provisión y calidad adecuada al uso del lubricante. Verificar si existen pérdidas del mismo. Revisar el apriete por interferencia.
Huellas de cuerpos rodantes por deformación o arranque de material. Marcas de golpes, fisuras, roturas	Descuido en el manipuleo. Método no apropiado en el montaje o desmontaje.	Cuidado al montaje, utilizar las herramientas adecuadas, empujar (o extraer) el aro correspondiente, evitar golpes. No forzar la introducción de una parte del rodamiento sobre una pista ya colocada. Calentar (80° a 90°) para facilitar el montaje o desmontaje. Verificar el ajuste prieto, eventualmente utilizar rodamientos de mayor juego interno.

DAÑO OBSERVADO	POSIBLE MOTIVO	ACCIONES PREVENTIVAS
Falso <i>brinelling</i> o abrasión por vibración	Vibraciones combinadas con inactividad	Calar los ejes de las grandes máquinas durante el transporte. Mantener en lenta rotación a aquellos equipos en zonas bajo vibración. Almacenar los rodamientos en forma horizontal en aquellos depósitos con vibraciones. Utilizar lubricantes más fluidos que se interpongan entre las superficies internas del rodamiento.
Desgaste. Huellas de cuerpos extraños.	Descuido durante el manipuleo. Introducción de suciedad o lubricante infectado.	Trabajar durante el montaje con absoluta limpieza. No lavar los rodamientos nuevos. Almacenar los rodamientos en sus envases originales o protegidos del polvo. Verificar el estado de las protecciones circundantes al cojinete.
Cráteres o estrías	Pasaje de corriente eléctrica	Colocar a tierra los equipos. Verificar el aislamiento de los equipos.
Corrosión de contacto, por frotamiento o ludimento	Ajuste flojo, micro movimientos relativos	Verificar las tolerancias del eje y apoyo. Asegurar un montaje prieto. Controlar la circularidad y conicidad del eje y apoyo. Verificar el apriete de la fijación axial.
Corrosión por agentes químicos.	Ambiente corrosivo. Lubricante contaminado.	Asegurar las protecciones contra el medio ambiente corrosivo. Mejorar la calidad del ambiente. Utilizar lubricante que no emulsione con el agua.

DAÑO OBSERVADO	POSIBLE MOTIVO	ACCIONES PREVENTIVAS
Coloración	Ajuste demasiado prieto que elimina el juego interno. Excesiva velocidad. Temperatura elevada del entorno. Exceso o lubricación inadecuada.	Evitar el exceso de grasa y adoptar el más adecuado a la aplicación y medio ambiente. Evitar las precargas anormales. Si es posible refrigerar el cojinete. Mejorar la calidad del ambiente
Deterioro de las jaulas	Golpes durante el montaje o desmontaje. Derivado de defectos de mecanizado de los apoyos. Ajuste demasiado prieto que elimina el juego interno. Excesiva velocidad. Elementos abrasivos en el lubricante. Falta o inadecuada lubricación.	Asegurar un montaje con los métodos adecuados. Asegurar la limpieza del lubricante y de las partes mecánicas anexas. Verificar y asegurar la buena obturación de los sellos o protecciones mecánicas.

INDICE DE FIGURAS DEL TEXTO

INDICE DE FIGURAS DEL CAPÍTULO I

Descripción	Pág.
Figura I-1: exfoliación inicial por fatiga en la pista de Rodadura interna de un rodamiento de bolas [2].	4
Figura I-2: exfoliación por fatiga en la zona de rodadura de un aro interno de un rodamiento de bolas [2].	5
Figura I-3: fisura inicial por debajo de la superficie de contacto en la cabeza de un carril, colocado en una curva, sometido a una carga oblicua. Véase que la fisura tiene un curso paralelo a la superficie y a una profundidad determinada [4].	6
Figura I-4: exfoliación en la superficie de una bola de rodamiento [4].	7
Figura I-5: avería por exfoliación avanzada en el camino de rodadura del aro interno de un rodamiento de bolas [2].	8
Figura I-6: avería por exfoliación avanzada en el camino de rodadura del aro interno de un rodamiento de rodillos [2]	9
Figura I-7: fractura del aro interno de un rodamiento de bolas debido a las cargas concentradas puntuales producidas al paso de los elementos rodantes por sobre partículas metálicas desprendidas de la exfoliación [2].	10
Figura I-8: Inclusión de óxido de aluminio en lugares de iniciación de fallas por fatiga que se han observado en ensayos de flexión rotatoria, en acero SKF 3. Fotografía de aumento x1000 [10].	11
Figura I-9: Inclusión de aluminato de calcio en lugares de iniciación de fallas por fatiga que se han observado en ensayos de flexión rotatoria, en acero SKF 3. Fotografía de aumento x1000 [10].	12
Figura I-10: Inclusión de carbonitruro de titanio en lugares de iniciación de fallas por fatiga que se han observado en ensayos de flexión rotatoria, en acero SKF 3. Fotografía de aumento x1000 [10].	13
Figura I-11: zona con deformación debajo del camino de rodadura	14
Figura I-12: vista longitudinal o diametral de la zona deformada por debajo del camino de rodadura [4]:	15
Figura I-13: martensita deformada plásticamente por debajo de la superficie de rodadura en un plano diametral [4].	16
Figura I-14: Micro imagen óptica en la que se aprecian varias fisuras que se han desarrollado a 0.25	17
Figura I-15: Exfoliado por fatiga de carácter pequeño e irregular en relación con fallos tempranos, particularmente en aceros menos “limpios” [11]	18
Figura I-16: Exfoliado por fatiga en fallas tardías, particularmente en aceros “limpios” tienen un aspecto de fondo plano. La forma pronunciada en “V” está relacionada con el desarrollo de las fisuras en un ángulo de 45° en relación con la dirección de rodadura.	19

INDICE DE FIGURAS DEL CAPITULO II

Descripción	Pág.
Figura II-1-1: Vistas de la progresión de avería por falta o escasez de lubricante [1].	28
Figura II-1-2: Daño en rodillos cilíndricos causados por lubricación ineficiente correspondientes a la jaula de la figura II-1-3 [1]	29
Figura II-1-3: Daño en jaula por lubricación ineficiente [1]	29
Figura II-1-4: Diferentes ejemplos de exfoliaciones superficiales debidas a deficiencias en la lubricación [3]	30
Figura II-1-5: Exfoliación distribuida en la totalidad de la pista de rodadura debida a falta de lubricante o sobrecarga momentánea o continua [3].	31
Figura II-1-6: Daño por gripado consistente en arranques superficiales de material acompañados de zonas de color mate [3].	32
Figura II-1-7: Gripado consistente en transferencia de material entre los rodillos cónicos de la figura II-1-8 y la pista interior [3].	32
Figura II-1-8: Gripado en los rodillos cónicos y transferencia de material con el anillo de la figura II-1-7 [3].	33
Figura II-1-9: Fundición y arrastre de los elementos rodantes [3].	33
Figura II-1-10: Gripado consistente en la soldadura total de los elementos rodantes a los anillos y destrucción de las jaulas [3].	34
Figura II-1-11: Daño de la jaula debido a lubricación defectuosa [3].	34
Figura II-1-12: Daño en la superficie de rodadura debido a un cuerpo extraño duro. La superficie aún no presentaba síntomas de fatiga [7].	35
Figura II-1-13: Formas típicas de aparición de una exfoliación después de un daño del camino de rodadura producido por cuerpos extraños [8].	36
Figura II-1-14: Daño superficial posterior a la impronta de diámetro 0,1 mm producida intencionalmente en la pista de rodadura [7].	37
Figura II-1-15: Estado de la zona de rodadura del aro exterior (izquierda) y del aro interior (derecha) luego de una prueba con un aceite de baja viscosidad.	38
Figura II-1-16: Exfoliación en el borde de la pista interior de un rodamiento de bolas, posiblemente causado por una impureza [15]	39
Figura II-1-17: Exfoliación en el elemento rodante de un cojinete de rodillos con inicio en el borde del mismo y tendencia de crecimiento hacia el centro [15].	39
Figura II-1-18: Muestra daños causados por cuerpos extraños [2]	40
Figura II-1-19: Improntas por partículas duras [1]	41
Figura II-1-20: Marcas debidas a partículas extrañas blandas	42
Figura II-1-21: Surco producido por impurezas [3]	43
Figura II-1-22: Puntos y surcos producidos por impurezas	43
Figura II-1-23: Ampliación de averías por desgaste adhesivo, formación de “leguas” a causa de soldaduras locales [8].	44
Figura II-1-24: Rotura por desgaste abrasivo intenso [3].	45
Figura II-2-1: Corrosión y fatiga de los caminos de rodadura, debido a la acción del 6% de agua y jugo de caña de azúcar en la grasa de lubricación, luego de un largo período de inactividad [9].	46

Figura II-2-2: Aro de rodamiento axial corroído por la presencia de agua [2]	47
Figura II-2-3: Daño por corrosión en pista interna de rodamiento cónico [2]	48
Figura II-2-4: Marcas de corrosión entre los elementos de rodadura y la pista, debidos a una grasa inadecuada	49
Figura II-2-5: Corrosión laterales de un rodillo debido a un lubricante contaminado con humedad [1]	50
Figura II-2-6: Picado superficial debido a corrosión producida por grasa contaminada con ácidos y humedad [1]	50
Figura II-2-7: Marcas por corrosión [3].	51
Figura II-2-8: Corrosión, posiblemente combinado con un largo período de inactividad [3].	51
Figura II-2-9: Corrosión en la superficie exterior del aro de un rodamiento de bolas a rótula [3].	52
Figura II-2-10: Daño muy avanzado por corrosión [3].	52
Figura II-2-11: Marcas por corrosión por vibración en la pista de rodadura externa de un rodamiento de bolas a rótula [2].	54
Figura II-2-12: Corrosión por vibración axial en la pista interna de un rodamiento de bolas [2].	55
Figura II-2-13: Huellas de corrosión por vibración del mismo cojinete radial de rodillos. Véase las huellas en la pista interior y exterior [2].	55
Figura II-2-14: Avería de falso <i>brinelling</i> en la pista interior de un rodamiento radial de rodillos [1]	56
Figura II-2-15: Falso <i>brinelling</i> en la pista interior de un rodamiento radial de rodillos [3].	57
Figura II-2-16: Falso <i>brinelling</i> en la pista interior de un rodamiento de bolas [3].	58
Figura II-2-17: Falso <i>brinelling</i> en ambas pistas de un rodamiento rígido de bolas [3].	58
Figura II-2-18: Corrosión en la superficie externa de un aro externo de rodamiento causado por la falta de uniformidad en la fijación del mismo al soporte [1].	60
Figura II-2-19: Corrosión de contacto [3].	61
Figura II-2-20: Corrosión de contacto muy avanzada con pérdida de material [3].	62
Figura II-2-21: Corrosión de contacto [3].	63
Figura II-3-1 Huellas dejadas por los elementos rodantes en toda la extensión de los caminos de rodadura [2].	64
Figura II-3-2: Marcas del daño producido en el aro interior de un rodamiento de bolas debido a un sobrecalentamiento.	65
Figura II-3-3: Exfoliación en la totalidad de la pista de un anillo fijo respecto de la dirección de la carga debido exceso de ajuste de montaje [3].	66
Figura II-3-4: Rotura de pista interior debido a excesiva interferencia de montaje sobre el eje [1]	67
Figura II-3-5: Rotura por exceso de interferencia de montaje [3].	68
Figura II-3-6: Avería por precarga interna debido a una deformación oval del aro externo de un rodamiento por defecto de mecanizado del apoyo [2].	69

Figura II-3-7: Exfoliación localizada debido a la forma oval del apoyo [3].	69
Figura II-3-8: Exfoliación localizada debido a mecanizado cónico del apoyo [3].	70
Figura II-3-9: Huellas dejadas por los elementos rodantes en un caso de sobrecarga por desalineación cuando el anillo interior es el rotante [2].	71
Figura II-3-10: Huellas dejadas por los elementos rodantes en un caso de sobrecarga por desalineación cuando el anillo exterior es el rotante [2]	71
Figura II-3-11: Huella por sobrecarga debida a desalineación en un aro interno de un rodamiento de bolas en al cual el aro externo es el rotante [2].	72
Figura II-3-12: Muestra la avería por sobrecarga debida a desalineación en un aro interno de un rodamiento cónico [2]	72
Figura II-3-13: Exfoliación debido a concentración de carga sobre determinados sectores de las pistas por desalineación [3].	73
Figura II-3-14: Ejemplo de huella dejada por los elementos rodantes debido a una sobrecarga por desalineación axial en un rodamiento de bolas a rótula [2].	74
Figura II-3-15: Rotura del borde de contención de los rodillos debido a un montaje a golpes [2].	75
Figura II-3-16: Rotura del borde de la pista por percusión durante el montaje [3].	76
Figura II-3-17: Rotura del borde de una pista por percusión durante el montaje [3].	76
Figura II-3-18: Deterioro de la jaula debido a golpes durante el montaje [3].	77
Figura II-3-19: Marcas de los elementos rodantes causados por una carga excesiva durante el desmontaje [2].	77
Figura II-3-20: Marcas de los rodillos en la pista externa.	77
Figura II-3-21: Fisura y rotura por golpes durante el montaje [3].	78
Figura II-3-22: Marcas por arranque de material en la generatriz del rodillo de un rodamiento radial de rodillos debido a la introducción forzada en la pista de la figura II-3-23.	79
Figura II-3-23: Marcas por arranque de material en la pista de rodadura del aro exterior de un rodamiento radial de rodillos debido a la introducción forzada de la pieza de la figura II-3-22	79
Figura II-3-24: Avería producida por la presión de un tornillo de fijación radial en el aro exterior de un rodamiento, vista exterior y vista interior.[2]	80
Figura II-4-1: Estrías en los rodillos de un cojinete de rodillos a rótula derivadas del pasaje de una corriente eléctrica [2].	82
Figura II-4-2: Estrías formadas en la pista exterior de un cojinete de rodillos a rótula debidas al pasaje de una corriente eléctrica [2].	83
Figura II-4-3: Picado superficial sobre un rodillo esférico causado por el pasaje de una corriente eléctrica relativamente grande [1].	84
Figura II-4-4: Detalle ampliado de la zona afectada por el paso de una corriente eléctrica en el rodillo de la figura II-4-3 [1].	84
Figura II-4-5: Cráteres, según SNR [3].	85
Figura II-4-6: Cráteres según SNR [3]	85
Figura II-4-7: Estrías por pasaje de corriente [3].	86
Figura II-4-8: Estrías en elemento rodante [3].	86

Figura II-4-9: Estrías sobre la pista interior de un rodamiento radial de rodillos, causadas por el pasaje prolongado de una pequeña corriente eléctrica en presencia de vibración [1]	87
Figura II-4-10: Vista ampliada de la zona de estrías de la figura II-4-9 [1].	88
Figura II-4-11: Coloración superficial debido a la exposición a alta temperatura [3].	89
Figura II-4-12: Coloración debido a la exposición a altas temperaturas [3].	90
Figura II-4-13: Deformación plástica de las bolillas de un rodamiento sometido a altas temperaturas [1].	90

BIBLIOGRAFÍA Y DOCUMENTACIÓN CONSULTADA

Ordenada por año de edición.

[1] Wilcock, Donald F. y Booser, E. Richard. *BEARING DESIGN AND APPLICATION*. 1º Edición. S.l. Ed.McGraw-Hill Book Company, Inc.1957. Sin ISBN.

[2] Eschmann. Hasbargen. Weigand. *BALL AND ROLLER BEARINGS – Their Theory, Design, and Application*. München. Ed. R.Oldenbourg Graphische Betriebe GmbH. 1958. Sin ISBN.

[3] SNR. “Documento Técnico SNR 010 – Causas de Destrucción Prematura de los Rodamientos”. Sin Fecha.

[4] Schlicht, Hans. “El Fenómeno de la Fatiga en los Elementos de Rodadura”. *La Técnica de los Rodamientos*. SA 1970-1.Ed. FAG Kugelfisher Georg Schäfer & Co. Schweinfurt. Páginas 2 a 14.

[5] Brändlein, Johannes. “La Duración hasta la Fatiga de los Rodamientos de Rodillos Cilíndricos Solicitados a Carga Axial”. *La Técnica de los Rodamientos*. SC 1972-1. Ed. FAG Kugelfisher Georg Schäfer & Co. Schweinfurt. Páginas 7 a 11.

[6] Lorösch, de Hans-Karl. “Nuevos conocimientos obtenidos en ensayos de fatiga con rodamientos”. *La Técnica de los Rodamientos*. SC 1976-1. Ed. FAG Kugelfisher Georg Schäfer & Co. Schweinfurt. Páginas 7 a 11.

[7] Lorösch, Hans-Karl. “La Duración de los Rodamientos bajo Solicitaciones a Carga y Condiciones del Medio Ambiente Diferentes”. *La Técnica de los Rodamientos*. SC 1981-1. Ed. FAG Kugelfisher Georg Schäfer & Co. Schweinfurt. Páginas 17 a 23.

[8] Schlicht, Hans. “Las Propiedades de los Materiales Adaptadas a las Solicitaciones Reales en los Rodamientos”. *La Técnica de los Rodamientos*. SC 1981-1. Ed. FAG Kugelfisher Georg Schäfer & Co. Schweinfurt. SC 1981-1. Páginas 24 a 29.

[9] Bergling, G. “Molinos de caña de azúcar cubanos y australianos con rodamientos de rodillos a rótula”. *La Revista de Rodamientos. Boletín técnico sobre rodamientos de bolas y de rodillos N° 222*. Ed. Compañía SKF Argentina SA, Buenos Aires. Año 1985. Páginas 1 a 12.

[10] Åkesson, J. y Lund, T. “Acero para rodamientos fabricado según el proceso MR de SKF”. *Revista de rodamientos 231 (1). Boletín técnico sobre rodamientos de bolas y de rodillos*. Ed. SKF, Göteborg. Posiblemente año 1987. Páginas 12 a19.

[11] Hollox, G.; Voskamp, A. y Joannides, E. “Cálculo absoluto de duración de componentes de rodamientos”. *Revista de rodamientos 231 (1). Boletín técnico sobre*

rodamientos de bolas y de rodillos. Ed. SKF, Göteborg. Posiblemente año 1987. Páginas 20 a 27.

[12] Andersson, T. “Acero SKF MR para rodamientos, una alternativa válida al acero ESR. *Revista de rodamientos 231 (1)*. *Boletín técnico sobre rodamientos de bolas y de rodillos*. Ed. SKF, Göteborg. Posiblemente año 1987. Páginas 28 a 35.

[13] Rouget, Dominique. “Rispettare le Regole di Montaggio”. *Organi di Trasmissione*. Luglio 1996. Ed. Techniche Nuove Spa. Milano Italy. Páginas 72 a 77.

[14] Seufert, Rudolf W. “Un Metodo Ampliato per la Durata a Fatica dei Cuscinetti Volventi”. *Organi di Trasmissione*. Luglio 1996. Ed. Techniche Nuove Spa. Milano Italy. Páginas 72 a 78.

[15] Cavacece, Massimo e Introini, Alberto. “Il Danneggiamento di Cuscinetti Volventi di Trasmissioni Aeronautiche”. *Organi di Trasmissione*. Luglio 1996. Ed. Techniche Nuove Spa. Milano Italy. Páginas 86 a 95.