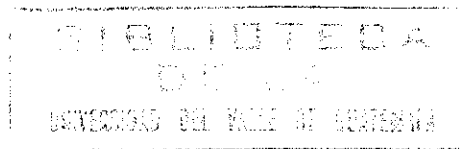


Determinación de la naturaleza de los modos de falla más comunes
en engranes rectos

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades

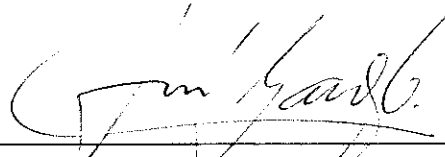
Determinación de la naturaleza de los modos de falla más comunes
en engranes rectos



Trabajo de graduación presentado por Luis Arturo Orellana López
para optar al grado de Licenciado en Ingeniería Mecánica

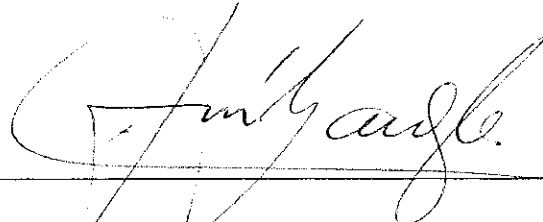
Guatemala
2002

Vo.Bo.



Ing. José Joaquín Garóz Cabrera
Asesor

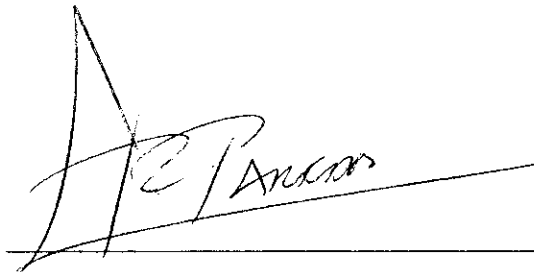
Vo.Bo. Tribunal Examinador



Ing. José Joaquín Garóz Cabrera



Ing. Sigurd Mocklebust Chúa



Ing. Carlos Roberto Paredes de la Vega

Guatemala, 20 de febrero del 2002

RESUMEN

Los engranes son elementos fundamentales para el funcionamiento de las máquinas. Aunque su función fundamental es la transmisión de potencia, el uso de los engranes es muy común en la variación de velocidad de distintos mecanismos.

La mayor parte de los engranes son fabricados conforme a los sistemas de engranes estándar y generalmente cumplen con normas de distintas entidades como AGMA (American Gear Manufacturers Association), ASME (American Society of Mechanical Engineers) u otras en distintos países. Esta estandarización facilita el reemplazo de unidades dañadas e inclusive permite contar con un inventario de piezas de movimiento continuo.

Aunque para la transmisión de potencia es posible utilizar cadenas, fajas y poleas, el uso de engranes es el factor común en aplicaciones industriales y de alta potencia. La falla de engranes ocurre continuamente en la industria y genera pérdidas considerables por tiempo de producción y daño a otras piezas de la maquinaria. Cuando ocurre una falla de engrane, a no ser que la naturaleza del modo de falla sea identificado y se corrijan las causas, la falla seguirá presentándose continuamente.

La industria a nivel mundial está cambiando con respecto al mantenimiento de maquinaria. Anteriormente se practicaba mantenimiento puramente correctivo, ahora, se aplican prácticas preventivas e incluso predictivas para maximizar el rendimiento de las plantas y optimizar la producción. Como parte de estas nuevas corrientes de mantenimiento, ahora se hace una distinción entre el departamento de mantenimiento y el departamento de ingeniería. Es en este último, donde los ingenieros analizan las distintas fallas de los equipos y buscan hallar soluciones permanentes con la aplicación del conocimiento teórico y de la experiencia adquirida.

Las teorías de falla son muy útiles en el diseño de engranes y en la determinación de las cargas admisibles de determinado engrane. Cuando falla un engrane de una máquina en la industria, debe determinarse no solamente si se ha excedido la carga admisible del diente del engrane sino también deben considerarse otras causas comunes que conducen a la falla. Algunos modos de falla producen una dramática reducción en la vida útil del engrane aun cuando éste trabaja con cargas mucho menores a la admisible.

Una vez identificada la causa del problema, es posible determinar el curso de acción que debe seguirse, ya sea para eliminar el problema y reemplazar la pieza o llevar a cabo un análisis de otros elementos (exceso de calor, lubricante inadecuado, humedad, etc.) que afectan de manera indirecta la vida útil del engrane.

La prevención de futuras fallas en elementos de maquinaria es fundamental para la productividad de una planta. Debido a que los engranes son elementos muy comunes en la maquinaria industrial, el Ingeniero de Planta o el Gerente de Producción necesitan contar con una guía práctica para la determinación de la naturaleza de los modos de falla de los engranes, para corregir los problemas que se presenten en su maquinaria.

En la mayoría de los casos es posible identificar el modo de falla por medio de una inspección visual del elemento que ha fallado y de su entorno. Una vez identificado el modo de falla, es posible plantear hipótesis que guíen a la solución del problema.

CONTENIDO

	Página
RESUMEN	iv
LISTA DE ILUSTRACIONES	vii
 Capítulos	
I. INTRODUCCIÓN	1
II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	2
A. GENERALIDADES DE LOS ENGRANES	2
B. ENGRANES RECTOS	3
C. CAUSAS MÁS COMUNES DE LA FALLA DE ENGRANES	6
III. DETERMINACIÓN DE LA NATURALEZA DEL MODO DE FALLA	13
IV. CONCLUSIONES	21
V. GLOSARIO	22
VI. BIBLIOGRAFÍA	23
VII. ANEXO: GUÍA PARA FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS	25

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración	Página
1. Engranés rectos	2
2. Engranés helicoidales	2
3. Engrane de gusano y engrane recto en acción conjunta	3
4. Engranés cónicos	3
5. Engrane recto en el que se aprecia deformación elástica	6
6. Detalle de un diente de engrane que ejemplifica la fatiga a flexión	7
7. Detalle de un engrane en que se observa la propagación de una grieta producida por fatiga a flexión	7
8. Detalle de un diente de engrane con macropicadura	8
9. Detalle de un engrane con muestras de desgaste abrasivo	10
10. Detalle de un engrane en el que se observa desgaste corrosivo	11
11. Detalle de un engrane con muestras de rascadura	11

I. INTRODUCCIÓN

El aumento de la productividad llegó a convertirse en el siglo pasado en uno de los retos más grandes para el hombre. A pesar de lograr grandes avances en técnica y procesos, aún se continúa en la búsqueda de mejoras e innovaciones que propicien el aumento de la productividad. Uno de los logros más importantes ha sido el cambio de pensamiento con respecto al mantenimiento del equipo productivo. Al inicio de la explosión industrial, no existía mantenimiento preventivo. Las máquinas debían trabajar continuamente hasta que ocurriera alguna falla que obligara a detener el proceso para hacer reparaciones. Este tipo de mantenimiento actualmente se conoce como “apagafuegos”, pues es una solución que sólo busca que la máquina vuelva nuevamente a producir. Luego, se introdujo el mantenimiento regular de los equipos. Este tipo de mantenimiento busca evitar fallas en las máquinas y por tal razón se le denominó “Preventivo”. Actualmente, la búsqueda del aumento de la productividad ha impulsado una nueva visión del mantenimiento y la importancia que ahora se le da a éste ha promovido investigación y mejoras en los procedimientos de mantenimiento, a tal grado que se ha hecho una distinción entre el departamento de mantenimiento y el departamento de ingeniería. Este último se dedica principalmente al Mantenimiento Predictivo, el diseño y a la capacitación del personal que lleva a cabo el trabajo.

El mantenimiento predictivo requiere de un nivel técnico adecuado combinado con el conocimiento teórico, para determinar las causas o naturaleza de las fallas de las máquinas y plantear soluciones definitivas o a largo plazo.

Debido a que los engranes son elementos muy comunes en las máquinas, el método que se presenta a continuación puede ser una herramienta útil en la prevención de fallas de maquinaria y en la determinación de los hechos que condujeron a la falla.

Se ha hecho la distinción de “Engranes Rectos” por ser éstos los más comunes y por ser la nomenclatura que ha servido como referencia. Sin embargo, la mayor parte de los modos de falla se presentan en la misma forma en los demás tipos de engranes y por esta razón, la evidencia física que deja la falla es la misma en los demás tipos de engrane.

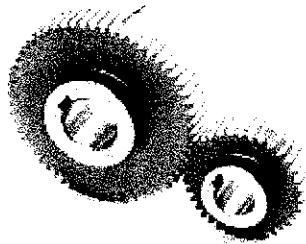
El método que se presenta es fácil de seguir, brinda resultados prácticos y se adecua a las condiciones de trabajo de la industria nacional. En este método se omiten análisis complejos y de alto costo, que no solamente consumen demasiado tiempo, sino que no se ajustan a la realidad de la industria nacional.

II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

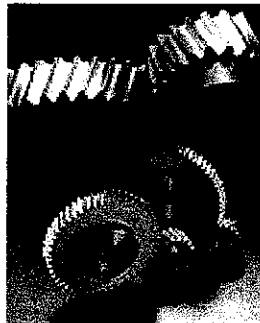
A. Generalidades de los engranes

Los engranes son elementos de maquinaria que se utilizan para transmitir potencia y movimiento angular. Los tipos más comunes de engranes son los rectos, sin embargo, el uso de engranes helicoidales, de gusano y cónicos es también generalizado.

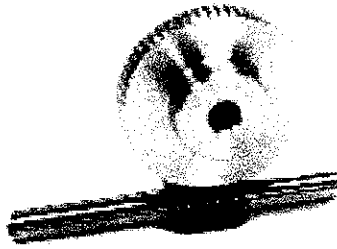
1. Engranés rectos: Los engranes rectos sirven para transmitir potencia entre ejes paralelos. La orientación de los dientes de estos engranes es paralela a la flecha en que van montados.



2. Engranés helicoidales: Estos engranes son utilizados generalmente para transmitir potencia entre ejes paralelos, aunque también se les utiliza en ejes cruzados. Los dientes de estos engranes forman un ángulo con la flecha que los soporta. Este ángulo es característico del engrane y se conoce como "Ángulo de Hélice".



3. Engranés de gusano: Estos engranes tienen forma similar a un tornillo y se utilizan para transmitir potencia entre flechas perpendiculares. Tienen la particularidad de permitir grandes reducciones de velocidad.



4. Engranés cónicos: A diferencia de los engranes rectos, helicoidales y de gusano, que se obtienen a partir de piezas cilíndricas, los engranes cónicos se obtienen a partir de piezas en forma de cono y se utilizan para transmitir potencia entre flechas no paralelas.



Además de éstos, existen otros tipos de engranes especializados y de características más sofisticadas, pero su uso no es generalizado aún.

Los engranes van montados sobre flechas e interactúan con otros engranes para formar mecanismos conocidos como Engranés o Trenes de Engranés.

B. Engranés rectos

Como se mencionó anteriormente, los engranes rectos se utilizan para transmitir potencia entre flechas paralelas. Este tipo de engrane es el más común y el más sencillo de analizar, por lo que el estudio de su falla brinda una base amplia para el análisis en el campo de trabajo. Inclusive permite el análisis de falla de otros tipos de engranes y de otras piezas de maquinaria que tengan ciertos parámetros de comparación que faciliten conclusiones.

1. Terminología de engranes rectos: El tren de engranes más simple que existe consiste en dos engranes apareados, donde el más pequeño recibe el de piñón y el más grande se conoce simplemente como engrane. Por lo general, el piñón es el elemento motor y el engrane es el elemento impulsado.

Algunas definiciones y propiedades geométricas son fundamentales para entender el funcionamiento del engrane.

- Paso Circular: El paso circular se define como la distancia, sobre el círculo de paso, desde un punto en el diente hasta el punto correspondiente del diente adyacente.
- Paso Diametral: Se define como el número de dientes del engrane dividido entre el diámetro del círculo de paso en pulg. **Esta propiedad geométrica es fundamental puesto que para que dos engranes trabajen juntos, deben tener el mismo paso diametral.**
- Angulo de Presión: Es el ángulo formado por la línea de presión (línea donde actúa la fuerza normal que un diente ejerce al otro) y una línea perpendicular a la línea de centros, ubicada sobre el punto de paso.

$$P \text{ (Paso Diametral)} = \frac{N_t}{d}$$

$$p \text{ (Paso Circular)} = \frac{\pi d}{N_t}$$

$$Pp \text{ (Paso Diametral X Paso Circular)} = \pi$$

La mayor parte de los engranes son fabricados conforme a estándares dados por asociaciones como la AGMA (American Gear Manufacturers Association), ASA (American Standards Association) y ASME (American Society of Mechanical Engineers). Estos engranes no solamente son intercambiables, sino que su fabricación resulta más económica pues existen estándares de fabricación.

La ley fundamental del engranamiento establece que para que dos engranes engranen y mantengan una relación de velocidad constante, *la forma de los dientes debe ser tal que la normal común en el punto de contacto entre dos dientes debe pasar siempre a través de un*

punto fijo sobre la línea de centros. Cuando dos engranes satisfacen esta condición, se dice que éstos producen una acción conjugada. Para lograr esta condición, la mayoría de dientes se cortan conforme a una curva envolvente entre los círculos de base y adendo, mientras que la parte del diente entre el círculo base y el dedendo es simplemente radial.

2. **Materiales de los engranes:** Los engranes se fabrican en una gran variedad de materiales, tanto metálicos como no metálicos.

Aunque los engranes no metálicos se han utilizado durante muchos años, no son de uso típico en la industria y por tal razón no son objeto de este análisis. Cabe mencionar, que en aplicaciones de operación sin ruido, lubricación interna, amortiguamiento de choques y vibraciones y economía de fabricación, los engranes no metálicos son los más apropiados. Sin embargo, debido a su baja capacidad de soportar carga no son usuales en la industria.

Los engranes metálicos, tradicionalmente, se dividen en ferrosos y no ferrosos, esto es, aquéllos en que el metal base es el hierro y aquellos en que sus metales básicos no incorporan hierro. Esta distinción se hace debido a dos razones básicas:

a. Las aleaciones con base hierro se han utilizado en cantidades que exceden todas las demás aleaciones combinadas.

b. La extracción del hierro es un proceso complejo y diferente a los procesos utilizados para extraer otros metales como aluminio, cobre y níquel.

Para un equipo específico, deberá escogerse el engrane que más se aproxime a los requerimientos del fabricante. Sin embargo, una guía práctica para la selección del material del engrane es la siguiente: Si la consideración principal del diseño es la alta resistencia, deberá considerarse el hierro vaciado. Si la resistencia al desgaste es fundamental, una aleación no ferrosa será la indicada. Debe considerarse un acero si lo que se requiere es muy alta resistencia, pero es necesario tomar en cuenta que se requiere un tratamiento térmico para que la dureza sea adecuada. Cuando se requiere resistencia a la corrosión, las aleaciones de cobre conocidas como bronces son recomendables. Para aplicaciones especiales se pueden emplear distintas aleaciones y tratamientos de endurecimiento de superficie.

C. Causas más comunes de la falla de engranes

La herramienta principal con la que puede contar el ingeniero de mantenimiento al analizar la causa de la falla es el conocimiento de la naturaleza o el origen del modo de la falla. Puesto que en la mayoría de casos, la manifestación de la falla es identificable (picadura, fractura dúctil, fractura frágil, etc.), conocer el origen de esta manifestación permitirá, en la mayoría de casos, prevenir que la falla se repita.

1. Falla por sobrecarga

a. Fractura dúctil: Es uno de los modos de falla más comunes y se debe básicamente a que el material es expuesto a una carga mayor de la que puede soportar. Esta fractura ocurre cuando el esfuerzo soportado por el material excede el límite elástico y por consiguiente se fractura.



b. Fractura frágil: Esta es similar a la fractura dúctil. Este modo de falla es debido a la sobrecarga, pero a diferencia de la fractura dúctil, no hay evidencia de deformación a escala macroscópica.

c. Deformación plástica: Este caso corresponde a un estado anterior a la fractura dúctil, es decir, el elemento se ha deformado permanentemente y aunque no hay fractura, ya no cumple su función.

2. Fatiga a flexión: Esta fatiga se da por un mecanismo de crecimiento lento de una grieta que da lugar a la fractura de la pieza en forma de cubierta. Este modo de falla

deja un rastro conocido como “marcas de playa”, las que consisten en una serie de curvas concéntricas que corresponden a las posiciones donde la grieta se detuvo.



Este tipo de fatiga ocurre en tres etapas:

a. Iniciación de la grieta: Se produce una deformación plástica en las zonas de concentración de esfuerzos o discontinuidades. Se generan grietas macroscópicas.

b. Propagación de la grieta: Una grieta lisa crece en forma perpendicular al máximo esfuerzo de tensión. La mayor parte de las fallas por este tipo de fatiga ocurren en la base del diente.



c. Fractura: Cuando la grieta es lo suficientemente grande, el diente se fractura de manera repentina.

3. Fatiga de superficie o contacto

a. Macropicadura: En este modo de falla, los esfuerzos repetidos producen grietas y separación de fragmentos, en la superficie en contacto del diente. El metal es removido y forma cavidades que generalmente son visibles al ojo. La picadura suele ocurrir en el perfil

del diente y en los casos más severos se da en el dedendo. Este tipo de fatiga es causado por condiciones de sobrecarga, donde el material trabaja más allá de sus límites de resistencia. Las únicas soluciones para este problema son: el endurecimiento de la superficie del material (generalmente reduce la capacidad de carga) o la reducción de la carga.



b. **Micropicadura:** En este caso, las cavidades son visibles únicamente con magnificación. Por lo general, el material se redistribuye al pulir la superficie y se mejora el patrón de contacto. Este problema generalmente no es progresivo.

c. **Rompimiento de coraza:** Este tipo de falla es similar a la picadura. En éste, los rastros del material que es arrancado de la superficie aparecen como grietas en el perfil del diente. El problema se presenta cuando la superficie del diente es significativamente más dura que el alma o base del engrane y los límites de resistencia han sido sobrepasados. Puesto que el engrane deberá ser reemplazado, se sugiere aumentar la profundidad del endurecimiento superficial y de acuerdo a la gravedad de la falla (el tiempo que estuvo en servicio el engrane) debe considerarse la necesidad de cambiar la dureza del material base.

4. Desgaste

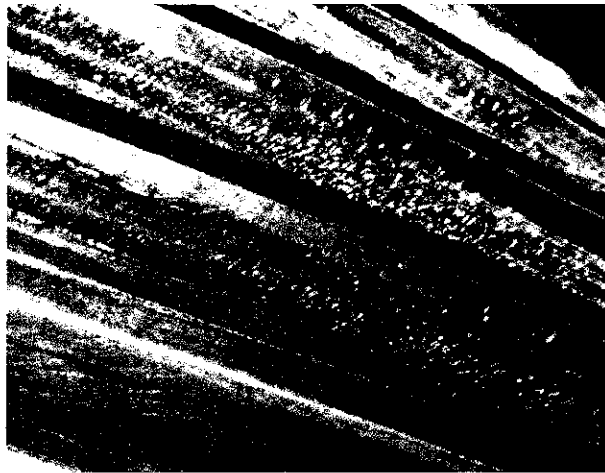
a. **Pulido:** Este es un proceso lento de desgaste que causa el desarrollo de una superficie muy lisa, en el perfil del diente del engrane. Generalmente la causa de este desgaste es que el lubricante está trabajando muy cerca de su límite de lubricación, es decir, la película es muy delgada. El pulido también se atribuye a lubricantes químicamente activos contaminados con abrasivos muy finos. Para corregir este desgaste, es necesario

utilizar un lubricante de mayor viscosidad o reducir la temperatura del lubricante que se está utilizando. Si las velocidades de operación son bajas y no pueden ser elevadas, es mejor reemplazar el lubricante.

b. **Desgaste moderado:** Este tipo de desgaste muestra remoción de metal en el adendo y el dedendo. Por lo general, algunas marcas dejadas por el maquinado de la pieza son removidas parcial o totalmente. La principal causa de este desgaste es la contaminación del lubricante y es muy común en sistemas de lubricación por salpicadura. El uso de lubricantes más viscosos, el aumento de velocidad o la reducción de la carga son las soluciones de primer orden en estos casos. Si se utiliza un sistema de lubricación por salpicadura, debe considerarse la instalación de un sistema de lubricación a presión con filtros.

c. **Desgaste excesivo:** Este desgaste se caracteriza por la remoción excesiva de metal en el adendo y el dedendo. Las causas principales, al igual que en el desgaste moderado son la contaminación del lubricante y una película muy delgada de lubricante para las cargas en el diente. Las vibraciones extremas son también causantes de este tipo de desgaste. Para solucionar este problema deben considerarse varios aspectos: En primer lugar se deben reemplazar o instalar sellos en los ejes y filtros de aire. Luego, debe revisarse la temperatura del lubricante y reducirla si es necesario o utilizar lubricante de mayor viscosidad. Finalmente, si hay excesiva vibración, ésta debe ser reducida.

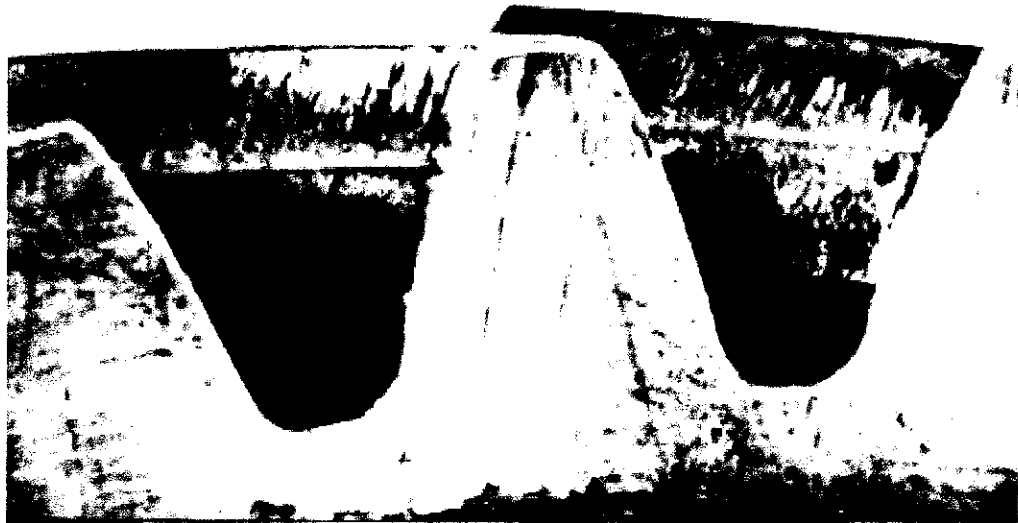
d. **Desgaste abrasivo:** En este modo de falla, las superficies en contacto muestran "rasguños" de forma radial y surcos visibles. Las partículas desprendidas, la aspereza entre las superficies deslizantes y cualquier materia extraña de dureza considerable, que se encuentre en movimiento entre las superficies deslizantes, son la causa de este tipo de desgaste. Éste se atribuye generalmente a la presencia de contaminantes en el lubricante, por lo general, partículas metálicas de otros engranes, cojinetes, arena u otras partículas altamente abrasivas. Para solucionar este tipo de desgaste, es necesario reemplazar regularmente el lubricante, de preferencia debe utilizarse un sistema de lubricación circulante para promover un aumento del espesor de la película de lubricante.



e. **Desgaste corrosivo:** En este caso, se presentan signos de deterioro del material y picadura en la superficie del engrane. La corrosión de una superficie metálica produce efectos muy dañinos en las propiedades de resistencia de los materiales. El modo de falla generalmente se presenta como fractura de una sección transversal reducida. Por lo general, este tipo de desgaste se distingue de los demás porque se presenta no solamente en las superficies en contacto (perfil de los dientes), sino en zonas de no contacto como el alma de los engranes o en los lados del mismo. La corrosión puede actuar en conjunto con el esfuerzo y producir corrosión por esfuerzo o en el caso de esfuerzo variable, fatiga por corrosión. La forma más simple de controlar la corrosión es escoger el material adecuado para el ambiente asociado. Pueden aplicarse también tratamientos superficiales electroquímicos, pero debe considerarse que estos causan una reducción en la resistencia a la fatiga. Este desgaste ocurre cuando la película de lubricante se rompe y elementos corrosivos atacan la superficie del engrane. Para corregir este problema, es necesario reemplazar regularmente el lubricante y de preferencia utilizar lubricantes con aditivos antidesgastes fuertes. Muy probablemente se tenga actividad química y por tanto los engranes que sufren este desgaste deben ser observados cuidadosamente. Puede ser necesario sellar las unidades y evitar la exposición al ambiente



f. **Rascadura:** Este modo de falla presenta ondulaciones en el perfil de los engranes. Se le conoce también como raspadura o rayado. El desgaste es causado por la adhesión entre dos superficies ásperas en contacto, que están soldadas y después son cortadas por el movimiento relativo que se tiene entre las partes deslizantes. Una soldadura fuerte transferirá material de una superficie a la otra, mientras que una soldadura débil tendrá pérdida de partículas. Cuando este modo de desgaste se toma severo, causa el endurecimiento superficial de las superficies en contacto y propicia la adhesión de las partes en movimiento. La prevención de rascadura dependerá de una cuidadosa selección de los materiales y de una lubricación adecuada. Cuando en la superficie se observan marcas de rasgado o hay metal soldado visible en la superficie del diente, la rascadura es severa y generalmente progresiva, hasta llevar al material a su punto de cedencia y producir la falla del engrane. Las causas más comunes de este modo de desgaste son falla en el lubricante, mala alineación, cargas y temperaturas inapropiadas. Es muy posible que el engrane necesite ser rediseñado, pues no satisface los requerimientos del sistema. Sin embargo, reducir la temperatura del lubricante, utilizar aditivos para presiones extremadamente altas o fluidos sintéticos con aditivos antirrascadura y reducir la carga, pueden solucionar el problema si no es demasiado crítico.



5. **Otras causas de falla:** Además de los modos de falla expuestos anteriormente, existen otros tipos complejos como las fracturas de modo compuesto, cavitación, fallas por tratamientos térmicos inadecuados, fallas por debilitamiento del material por altas temperaturas y en general, la combinación de distintos modos de falla, cuya solución

dependerá en mayor grado del conocimiento y la experiencia del ingeniero a cargo del análisis.

III. DETERMINACIÓN DE LA NATURALEZA DEL MODO DE FALLA

Gracias a los grandes avances en la ciencia, se han desarrollado distintas técnicas para el análisis de la falla de un material de ingeniería. En la actualidad, inclusive existen metodologías estandarizadas y se realizan procedimientos sistemáticos para el análisis y la determinación de la naturaleza de la falla de la mayor parte de materiales utilizados en ingeniería.

Los principales componentes de la metodología del análisis de falla son:

- Recopilación de datos de fondo y muestras
- Examen preliminar de la pieza
- Pruebas no destructivas
- Pruebas mecánicas
- Selección, preservación y limpieza de las superficies fracturadas
- Examen macroscópico (1X hasta 100X)
- Examen microscópico
- Aplicación de mecánica de fractura
- Prueba de simulación
- Análisis de evidencia, formulación de conclusiones y desarrollo de informe.

Es importante considerar que las técnicas dominantes en este campo consisten en examinar las piezas por medio de equipo sofisticado como SEMs (Scanning Electron Microscopes), ultrasonido y otros. Además se llevan a cabo tests para determinar la dureza de la superficie y la rugosidad. Se hacen inspecciones magnéticas, determinación de la composición química del material, determinación del tamaño del grano, etc.

Por lo general, este tipo de metodología y análisis es llevado a cabo por firmas de ingenieros, dedicadas exclusivamente a estos procedimientos. Este tipo de análisis proporciona resultados de alta confiabilidad. Sin embargo, por ser exhaustivo representa un costo demasiado elevado para una industria pequeña o inclusive mediana. Aunque este análisis es deseable, está alejado de la realidad de la industria nacional. Por eso se considera únicamente como referencia, pues el análisis que se desarrolla a continuación

está enfocado hacia el ingeniero de mantenimiento o el departamento de ingeniería de la industria nacional, principalmente.

A. Guía práctica para la determinación de la naturaleza del modo de falla en engranes

El método desarrollado para la determinación de la naturaleza de la falla y consiguiente prevención o corrección del problema que la genera considera dos aspectos principales.

1. **Observación y toma de datos:** Este aspecto es el fundamento de este método. Una observación cuidadosa permitirá plantear hipótesis adecuadas que conduzcan a la corrección del problema que genera la falla del engrane. Antes de llevar a cabo la observación es importante conocer las generalidades de los engranes y en general el funcionamiento del elemento que se va a analizar. La observación puede llevarse a cabo con el ojo desnudo o puede ayudarse con una lente de aumento de baja magnificación (10X), además es recomendable el uso de un instrumento de medición como un "vernier". Es muy importante que el objeto de análisis se encuentre limpio de cualquier impureza que pudiera afectar la observación. Se recomienda limpiar el engrane de preferencia con algún solvente fuerte (thinner u otro). Además, se deben anotar los detalles de lo observado y enfocarse en los siguientes aspectos:

- signos de deterioro en el engrane,
- falta de material o presencia de material ajeno soldado,
- marcas en el engrane,
 - ralladuras,
 - finas,
 - gruesas,
 - onduladas,
 - curvas concéntricas;
- desgaste en las zonas de contacto,
- agujeros,
 - considerablemente grandes (+1mm.),

- pequeños (<1mm.),
- profundidad,
- material removido,
- evidencia de pandeo,
- cambio de secciones,
 - elongamientos,
 - acortamientos,
- estado del lubricante,
 - apariencia espumosa. (Cuando el lubricante da la impresión de haberse “cortado” o se ve lechoso indica la presencia de agua),
 - sensación al tacto,
 - contaminación con arena u otras partículas pequeñas dan una sensación de aspereza,
 - contenido de residuos metálicos visibles o elementos extraños,

En caso de haber fractura debe analizarse además:

- existencia de los restos del elemento fracturado (generalmente un diente del engrane),
 - completo,
 - incompleto (resquebrajado),
- marcas características en la sección de fractura,
- apariencia de la fractura,
 - brillante,
 - taza y cono,
 - superficie pareja o dispareja.

Con esta observación efectuada cuidadosamente, se puede proceder a formular hipótesis que conduzcan a la solución del problema.

2. Formulación de la hipótesis: La formulación adecuada de hipótesis guiará a la solución del problema en forma más sencilla y rápida. En el anexo 1 se presenta una guía para la formulación de hipótesis. La presentación y uso de esta guía es muy simple:

a. La guía para formulación de hipótesis está desarrollada en forma de columnas y filas de tal manera que puede seguirse una secuencia lógica, de izquierda a derecha y escoger, en primer lugar, entre dos grandes divisiones:

1) Fractura: Indica que el engrane cedió al esfuerzo y hubo una separación de cierta parte del mismo por lo general un diente.

2) No fractura / modo compuesto: En este caso, puede o no haber fractura, pero además existe evidencia de daño superficial en el perfil del diente o en el engrane en general.

b. A partir de estas divisiones, debe avanzarse hacia la derecha en las celdas que están en contacto entre sí únicamente en base a la observación realizada.

c. Finalmente, hacia la derecha se encontrarán los modos de falla, la naturaleza del modo de falla y las causas más comunes del problema. Se han añadido además, las soluciones prácticas más comunes utilizadas para los problemas detectados. Éstas se basan principalmente en la experiencia y no son necesariamente producto de estudios de naturaleza científica.

3. Consideraciones importantes al analizar fallas y plantear hipótesis: Existen varios aspectos que deben ser considerados antes de hacer conclusiones o tomar cursos de acción drásticos, como el rediseño de un engrane.

Se presentan fundamentalmente tres aspectos importantes:

1) Fatiga: La falla por fatiga es quizá el caso más común en los elementos de máquinas. El mecanismo de falla de un elemento de máquina puede ser muy complicado y las teorías de falla son solamente un intento de modelar dicho mecanismo para una clase específica de materiales. La única cura contra la fatiga se encuentra en el diseño. El diseñador debe considerar y proteger su diseño y tomar en cuenta los factores de seguridad adecuados y, cuando sea posible, sus diseños deben ser normados, de acuerdo a los patrones de alguna norma conocida. Las fallas de engranes por sobrecarga (fracturas, picadura, etc.) se asocian en muchos casos con la fatiga, pues aunque el diseño es adecuado estáticamente, los esfuerzos repetidos reducen considerablemente los esfuerzos admisibles de los materiales. Por esta razón, no puede concluirse inmediatamente que un elemento haya fallado por causa del modo de falla que se presenta.

2) Variación típica de las propiedades de los materiales: Por lo general, los diseñadores o fabricantes trabajan con los valores medios de los datos de propiedades de materiales. Sin embargo, los coeficientes de variación se encuentran generalmente en el orden de 0.05 a 0.2, esto es, del 5% al 20%. Valores como ciclos para falla a fatiga y tasa de crecimiento de grietas a fatiga tienen coeficientes de variación de hasta 0.5. La mejor

forma de protegerse ante estas variaciones es adquirir engranes y todo tipo de elementos de máquinas que satisfagan normas de calidad conocidas. Por lo general, los manuales de las máquinas mencionan la norma bajo la cual son fabricados sus equipos y detallan cada pieza con su norma para un reemplazo positivo. En casos de normas no comunes, es posible encontrar equivalencias o puede seleccionarse el elemento con una norma ligeramente superior al consultar manuales especializados.

3) Error humano en mantenimiento preventivo: Los factores considerados anteriormente no dependen directamente del ingeniero de mantenimiento, la única forma de corregirlos o protegerse de ellos esta en el diseño y los estándares industriales. El error humano en el mantenimiento preventivo depende directamente del ingeniero de mantenimiento, por ésta razón, el mantenimiento preventivo debe ser el punto de mayor enfoque en la prevención de fallas. Los estándares de la AGMA listan los modos de falla de engranes en 4 categorías: fractura, deformación plástica, fatiga y desgaste. En condiciones adecuadas de trabajo, sin sobrecarga, solamente una de estas categorías esta controlada por el factor humano: el desgaste. En general, la superficie de los dientes maquinados no es perfecta, sino que tiene cierta rugosidad. En la mayoría de circunstancias, después de un tiempo de funcionamiento, el engrane presenta desgaste hasta que las superficies están pulidas. Aunque el pulido es un modo de falla, por lo general no es un problema progresivo, es el mantenimiento preventivo el que determina la durabilidad del engrane en cuanto a desgaste. Es muy importante considerar que el funcionamiento de los engranes es dependiente de una lubricación adecuada tanto en calidad como en volumen. Los engranes metálicos que operan en condiciones de no lubricación o lubricación inadecuada son propensos a desgastarse rápidamente y a reducir su vida útil considerablemente. Los manuales de lubricación de las máquinas son herramientas de trabajo fundamentales para el ingeniero de mantenimiento. La supervisión de los procedimientos de lubricación y mantenimiento preventivo son fundamentales para reducir el riesgo de falla de engranes.

El método desarrollado para la determinación de la naturaleza de fallas en engranes rectos y las sugerencias para la solución de los problemas están fundamentados en ciertas suposiciones que también deben considerarse:

- Los materiales utilizados para la fabricación del engrane satisfacen las normas de calidad establecidas y sus propiedades mecánicas llenan los requisitos establecidos por el

fabricante o diseñador de la máquina. En el caso de falla por sobrecarga o desgaste excesivo o abrasivo, puede solicitarse el análisis químico del material a fin de determinar si cumple o no con las regulaciones establecidas por el fabricante.

- La máquina no ha sufrido modificaciones que alteren significativamente la carga o condición de trabajo del engrane. De ser así, debe revisarse el diseño del engrane.
- El estado de los elementos asociados al mecanismo en que está montado el engrane son adecuados y se encuentran en condiciones de uso.

La razón fundamental de estas suposiciones es que el método se basa exclusivamente en la evidencia visual de los elementos que han fallado y en ningún momento involucra exámenes de laboratorio o pruebas químicas. Estos últimos, son parte de análisis profundos y no son objeto de este método, pues en su mayoría demandan equipo especializado que por lo general no es parte de los activos de las plantas industriales de nuestro país.

4. Formulación de conclusiones y selección de cursos de acción: El objetivo primordial de analizar la naturaleza de la falla en engranes es plantear soluciones prácticas o cursos de acción para corregir los problemas que se han detectado. Existen fundamentalmente tres problemas que causan la mayor parte de fallas en engranes y en otros elementos de maquinaria. Dos de éstos problemas son de fácil análisis, el tercero debe ser corregido desde el diseño.

El primero de los problemas es el mal montaje del elemento. Las fallas que se dan por sobrecarga, generalmente están asociadas a una mala alineación o a un montaje inadecuado del engrane. La solución a este problema radica en una eficiente supervisión del montaje de los engranes y un mantenimiento preventivo adecuado que garantice la buena condición de los elementos asociados al trabajo del engrane. Para verificar el adecuado funcionamiento de los engranes son muy útiles los estroboscopios. En la actualidad los hay muy modernos que permiten inclusive recopilar datos de velocidad, vibración y otros factores básicos de manera automática. Es importante notar que la forma más adecuada de monitorear el montaje y correcta alineación de los engranes es bajo carga dinámica. Es decir, en funcionamiento y bajo carga.

El segundo problema, inclusive más común que el mal montaje, es la lubricación inadecuada. Gran parte de los problemas de desgaste están asociados a una lubricación

inadecuada del engrane. Por lo general, estos problemas de desgaste son progresivos y tienden a alterar las propiedades mecánicas del elemento y, en casos más graves, conducen a la reducción del área transversal del diente, esto a su vez conduce a una reducción en la capacidad de carga y finalmente a la fractura del diente o dientes del engrane. Por lo general, los manuales de operación de las máquinas detallan la viscosidad y temperatura adecuada del lubricante. Es muy importante considerar que la viscosidad del lubricante no es constante sino que se ve seriamente afectada por la temperatura a la que trabaja. Por esta razón, es conveniente tener control de la temperatura a la que trabaja el lubricante, esto es especialmente importante cuando el engrane lo hace en conjunto con un engrane de gusano, pues la reducción de velocidad y el funcionamiento propio de este mecanismo libera una cantidad considerable de calor. Si la temperatura se eleva demasiado, la capa límite de aceite se vuelve muy delgada y puede inclusive romperse, lo que provoca daño severo al engrane. Es conveniente además, revisar el estado superficial de los engranes en contacto con la pieza en la cual se ha detectado desgaste, pues la excesiva aspereza o daño en otros elementos puede conducir a la falla de un engrane de características apropiadas para el sistema. Cuando las cargas en el diente son altas, la mejor forma de evitar el desgaste es utilizar un lubricante de alta viscosidad, “de mucho cuerpo”. No debe olvidarse que el uso de un lubricante más viscoso que el recomendado reducirá la eficiencia del sistema. Sin embargo, esta reducción no es considerable en la mayoría de casos. Algunas pruebas han comprobado que el uso de un lubricante 600SSU comparado con un 400SSU aumenta la resistencia al rompimiento de coraza en un 100% mientras reduce la eficiencia en solamente 0.4%.

Bajo condiciones de carga que requieran el uso de fuertes aditivos antidesgaste, debe considerarse que las propiedades de éstos aditivos pudiesen influir en las propiedades de los metales y en una falla metalúrgica. Está demostrado que la selección inadecuada de los aditivos y las cantidades que de éstos se agreguen al lubricante pueden reducir la vida útil del engrane y causar una falla prematura por desgaste. Por esta razón, es muy importante utilizar los lubricantes recomendados por el fabricante o equivalentes adecuados. Nunca debe utilizarse un lubricante sin conocer sus características y propiedades. En caso de ser necesario su reemplazo, deberá consultarse un manual de lubricación adecuado y elegir el lubricante apropiado según el tipo de material, la carga y las condiciones de trabajo. Es recomendable consultar al fabricante.

Finalmente, el problema más difícil de corregir es el de la falla por fatiga. Este problema, como se mencionó anteriormente, sólo puede ser solucionado desde el diseño. Se recomienda consultar literatura especializada para la solución de problemas relacionados con el diseño de máquinas y elementos de maquinaria.

IV. CONCLUSIONES

- La mayor parte de las fallas de engranes en máquinas cuyos diseños satisfacen las normas básicas de seguridad y diseño se deben a dos razones principales:
 - Mal montaje (Desalineación principalmente)
 - Lubricación Inadecuada

- La mayor parte de modos de falla por desgaste son identificables por observación visual y se presentan alrededor de la línea de contacto (Circulo de paso), zonas del adendo y en los casos más graves en el dedendo.

V. BIBLIOGRAFÍA

G. T. Murray y Dekker, Marcel. 1997. *Handbook of Material Selection for Engineering Applications*.

Dudley, Darle. 1962. *Gear Handbook*. Quinta edición. McGraw-Hill

O'Connor, James. 1968. *Standard Handbook of Lubrication Engineering*. McGraw-Hill.

Downing, Norman. 1998. *Mechanical Behavior of Materials*. Segunda edición. Prentice Hall.

Shackelford, James. 1996. *Introduction to Materials Science for Engineers*. Cuarta edición. Prentice Hall.

Deutschman, Aaron et al. 1985. *Diseño de Máquinas*. 1985. CECSA.

ASM Handbook. 1986. *Failure Analysis and Prevention*. Vol 11. ASM International.

Davidson, Thomas. *An Introduction to Failure Analysis for Metallurgical Engineers*.

<http://www.agma.org>

<http://www.penton.com>

<http://www.powertransmission.com>

<http://www.noria.com>

<http://www.horsburgh-scott.com>

<http://www.tms.org/Students/Winners/Davidson/Davidson.html>

<http://www.artec-machine.com/artec-pages/document-listing.htm>

<http://www.tribology.co.uk/services/investigate/index.htm>

VI. GLOSARIO

- **Engrane:** Elemento de maquinaria utilizado para transmitir potencia y movimiento angular.
- **Eje:** Miembro fijo usado como soporte de elementos que giran a su alrededor.
- **Flecha:** Miembro en rotación utilizado para transmitir potencia.
- **Curva Envolvente:** Perfil estándar con que son cortados los dientes de los engranes. (Esta curva puede obtenerse gráficamente enrollando una cuerda alrededor de un cilindro para después trazar la trayectoria que sigue un punto sobre la cuerda cuando ésta es desenrollada.)
- **Maquinado:** Proceso industrial por medio del cual se producen piezas metálicas, (torno, fresa, cepillo, rectificador, etc.).
- **Pandeo:** Deformación lateral de un elemento, puede ser de naturaleza elástica o inelástica.
- **Estroboscopio:** Instrumento óptico para observar objetos en movimiento. Da la impresión de que el objeto en está estático o que se mueve a baja velocidad.
- **SAE:** Siglas en inglés para "Society of Automotive Engineers"
- **Segundos Saybolt Universal, (SUS):** El tiempo en segundos requeridos por 60 centímetros cúbicos de fluido para fluir a través de un orificio de un viscosímetro t Saybolt Universal Standard a una temperatura dada bajo condiciones específicas.

Guía para la Formulación de Hipótesis

Observación	Características Generales	Características Específicas	Otras Características	Modo de Falla	Naturaleza del Modo de Falla	Causas Comunas	Soluciones Preventivo/Correctivas	Otras Consideraciones
Observación cuidadosa del engranaje.		Deformación plástica, reducción de áreas transversales o alargamientos visibles. Área de la fractura como leza y como Superficie plana. Con magnificación se observan holteos.		Fractura Ductil	Sobrecarga	Sobrecarga, mal montaje del engranaje, propiedades del material no satisfacen los requerimientos del sistema.	El nuevo engranaje deberá satisfacer los requerimientos del fabricante en cuanto a carga admisible. Debe revisarse la selección del material y de preferencia debe ser fabricado bajo alguna norma estándar. El montaje del engranaje debe ser revisado. Debe revisarse además el estado de la flecha o eje que soporta al engranaje y los cojinetes donde está montado la flecha o eje.	Si el equipo o máquina donde se encuentra instalado el engranaje ha sufrido alguna modificación considerable, debe revisarse si ha habido un aumento en la potencia que transmite el engranaje. Otra solución es reducir la carga. Si se considera al rediseño del engranaje (cambio de material, dureza u otro) deben considerarse también los elementos que son parte del mecanismo (cojinetes, chumaceras, flechas, ejes, etc.)
	Fractura	No hay deformación plástica visible. La superficie de la zona de la fractura tiene unos superficies brillante		Fatiga a Flexión	Sobrecarga	Sobrecarga, mal montaje del engranaje, propiedades del material no satisfacen los requerimientos del sistema. Carga fluctuante o con choques. Excesiva vibración.	El nuevo engranaje deberá satisfacer los requerimientos del fabricante en cuanto a carga admisible. Debe revisarse la selección del material y de preferencia debe ser fabricado bajo alguna norma estándar. El montaje del engranaje debe ser revisado. Debe revisarse además al estado de la flecha o eje que soporta al engranaje y los cojinetes donde está montada la flecha o eje. Deben reducirse los choques y la vibración si es que existen.	
		Fractura que además presenta signos de daño o contacto excesivo en las superficies en contacto del diente (o los dientes)		Fractura Frágil	Sobrecarga			Véase en la sección "Características Generales" el renglón "No Fractura o Modo Compuesto" para determinar la naturaleza del daño superficial.
		Deformación plástica en el engranaje. Elongaciones o reducciones en áreas transversales.	Aunque la pieza no ha sufrido fracture, existe deformación de uno o más dientes. (Por lo general esta deformación se presenta como inclinación en sentido contrario a la dirección del movimiento.)	Deformación Plástica	Sobrecarga	Sobrecarga, mal montaje del engranaje, propiedades del material no satisfacen los requerimientos del sistema.	Véase en la sección "Características Generales" el modo de falla "Fractura Ductil".	
			Se observan cavidades irregulares visibles sin aumento. (Diámetros de agujero de 1mm o mayores) El diente cubre una porción considerable del perfil del diente.	Macro picadura	Fatiga de Superficie (Fatiga Hertziana)	Este tipo de fatiga son causada por condiciones de sobrecarga donde el material trabaja a ciertos intervalos más allá de sus límites de resistencia.	Puede llevarse a cabo un endurecimiento de superficie del material. Debe revisarse la capacidad de carga del engranaje pues generalmente el endurecimiento superficial reduce la resistencia a la fatiga del material.	De llevarse a cabo un endurecimiento de superficie del material, deberá revisarse la capacidad de carga del engranaje pues generalmente el endurecimiento superficial reduce la resistencia a la fatiga del material.
		Se observan cavidades irregulares en secciones pequeñas del perfil del diente. (Diámetros de agujero menores a 1mm)	Se observan cavidades irregulares en secciones pequeñas del perfil del diente. (Diámetros de agujero menores a 1mm)	Micro picadura	Fatiga de Superficie (Fatiga Hertziana)	Condiciones de esfuerzo alto y repetido en la superficie	Por lo general, el material se redistribuye o elimina los defectos superficiales que producen la micro picadura, haciendo de éste un problema que por lo general no es tal.	El mantenimiento preventivo y la observación cuidadosa de este engranaje es fundamental.

Guía para la Formulación de Hipótesis

	<p>Aparecen rastros de material arrancado (cavidades irregulares) y agrietamiento del perfil del diente. Los ongles tienen un profundidad significativa al tacto. El engranaje ha sido sometido a un proceso de endurecimiento superficial.</p>	<p>Rompimiento de Coraza</p>	<p>Faliga de Superficie (Fiegs Herziana)</p>	<p>Este modo de fallo se presenta en engranajes con endurecimiento superficial, generalmente por una de dos razones: 1. La profundidad del endurecimiento no es suficiente, 2. Sobrecargas.</p>	<p>Puede aumentarse la profundidad del endurecimiento superficial y de acuerdo a la gravedad de la faliga (Tiempo excesivamente largo en servicio) debe considerarse la selección de otros materiales para el engranaje.</p>
<p>No Fractura o Modo Compuesto (Fractura + Daño Superficial)</p>	<p>Se observa una superficie muy lisa en el perfil del diente. La apariencia es brillante, similar a un espejo.</p>	<p>Pulido</p>	<p>Desgaste</p>	<p>La película de lubricante es muy delgada. Lubricante únicamente activo contaminado con abrasivos muy finos.</p>	<p>Debe utilizarse un lubricante con mayor viscosidad o bien, pueda reducirse la temperatura del lubricante utilizado.</p>
	<p>Exista remoción del metal en el adedo y duedo. Les merdas sujetas por atragante de la pieza han sido removidas en estas zonas parciales o totales.</p>	<p>Desgaste Moderado</p>	<p>Desgaste</p>	<p>Le causa más común de este problema es la contaminación del lubricante. Este fenómeno es muy común en máquinas que utilizan lubricación por salpicadura.</p>	<p>Puede aumentarse la viscosidad del lubricante o bien, puede reducirse la temperatura del lubricante utilizado.</p>
	<p>La superficie en contacto (Zonas de adedo y duedo o alrededor de la línea de paso) muestran signos de desgaste, contacto material con metal, defectos o daño en general.</p>	<p>Desgaste Excepcivo</p>	<p>Desgaste</p>	<p>Contaminación del lubricante, película de lubricante muy delgada. Vibraciones excesivas.</p>	<p>Debe considerarse el reemplazo del sistema de lubricación por salpicadura (si es que se utiliza) por uno de lubricación a presión con filtros.</p>
	<p>Las superficies del diente en contacto muestran surcos visibles y "resguños".</p>	<p>Desgaste Abrasivo</p>	<p>Desgaste</p>	<p>Partículas desprendidas, aspereza entre superficies deslizantes con película de lubricante muy delgada. Materiales duros de dureza considerable mezclados con el lubricante. Arena u otros particulales altamente abrasivos.</p>	<p>Puede considerarse el reemplazo de lubricante por uno de mayor viscosidad. Considere además que puede existir desgaste abrasivo.</p>
	<p>Signos de deterioro del material no solamente en las superficies en contacto sino también en zonas de no contacto del engranaje y presencia de paquetes agujeros irregulares en el perfil de los dientes.</p>	<p>Desgaste Corrosivo</p>	<p>Desgaste</p>	<p>Exposición del engranaje a ambientes corrosivos a presencia de elementos corrosivos en el lubricante.</p>	<p>Debe asegurarse un material adecuado en función del ambiente de trabajo del engranaje. El lubricante debe reemplazarse regularmente y de preferencia utilizar lubricantes con aditivos anticorrosivos.</p>
	<p>Se presentan ondulaciones en el perfil de los engranajes. Existe transferencia de material (dientes o ganancia) en el perfil de los dientes.</p>	<p>Rescadura</p>	<p>Desgaste</p>	<p>Adhesión entre dos superficies ásperas en contacto. (Estas están soldadas y después son cortadas por el movimiento relativo de los dientes del engranaje). Las causas más comunes de este fenómeno son falta de lubricante, mala alineación del engranaje, cargas y temperaturas inadecuadas.</p>	<p>Por la gravedad de este problema, se sugiere seleccionar metales con diferentes durezas y tener una lubricación adecuada.</p>

