

# **Fallas Superficiales en las transmisiones por engranajes metálicos**

**Autor:** Ing. Osmany Palli Pérez

Dr.C. Ing. Ángel S. Machado Rodríguez

Dr.C. Ing. Jorge L. Moya Rodríguez.

## **Introducción**

Las fallas en los engranajes pueden ocurrir por diversos factores que varían según el tipo de mecanismo: si es abierto, cerrado, las características de funcionamiento del mismo, o factores externos que pueden o no aparecer en determinados momentos en el trabajo normal, como por ejemplo sobrecargas sostenidas o momentáneas, mala lubricación, aumento de la temperatura de trabajo, propiedades y calidad del metal, aumento de la potencia a transmitir y otros, sin dejar de mencionar el fallo inevitable debido al desgaste normal en el flanco del diente, donde va perdiendo propiedades mecánicas progresivamente hasta que ocurre el fallo.

## **Clasificación de las fallas superficiales en los engranajes metálicos.**

La falla más común en las transmisiones por engranajes metálicos cerradas, que están bien lubricadas y protegidas contra la contaminación es la picadura, mientras que en las transmisiones abiertas, mal lubricadas es la falla por desgaste. (1-10)

En las Transmisiones por engranajes metálicos se pueden presentar diversos modos de fallas superficiales las cuales se agrupan en cuatro grandes grupos:

1. Fallas Superficiales en los dientes del engranaje
2. Falla del diente debido a la fatiga por contacto
3. Falla superficial por gripado
4. Fallas superficiales por deformaciones plásticas

### **1. Fallas Superficiales en los dientes del engranaje.**

Las fallas que van menguando la capacidad y el rendimiento del diente en la superficie del engranaje, (3) son fallas que pueden aparecer a largo plazo, el operario en muchos casos no se daría cuenta de que está ocurriendo, por lo que es importante conocer estas fallas para poder identificar la posible causa de su aparición y desarrollo para corregirla a tiempo antes de que ocurran pérdidas materiales. Dentro de este grupo se encuentran, las fallas por fatiga superficial, fallas por desgaste, fallas por gripado y otras.

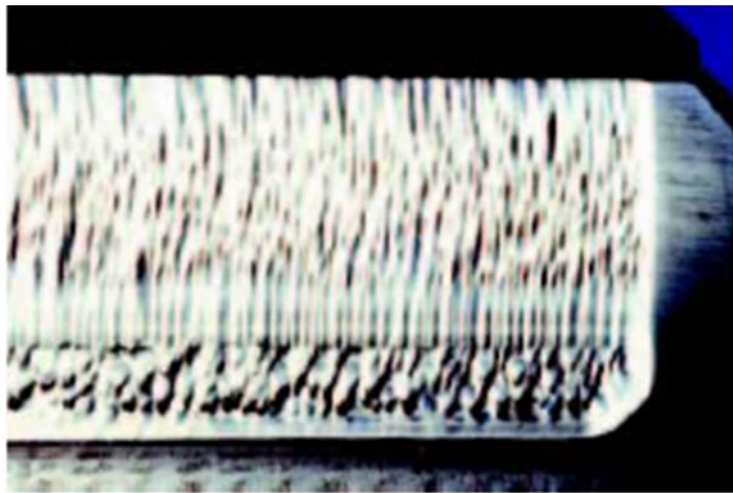
#### **1.1 Falla por desgaste.**

En el caso de la falla por desgaste puede aparecer en varias formas, cada una responde a una o varias causas específicas, según su comportamiento. El desgaste de las superficies de los dientes será tanto mayor, tanto más deslizamiento específico haya entre los dientes y cuanto mayor sea la tensión por contacto a la compresión en estas superficies. Por cuanto el máximo deslizamiento específico tiene lugar en los puntos iniciales y finales de contacto de los dientes, entonces el máximo desgaste se produce en los pies y en las cabezas de los dientes. En el polo del engrane no hay deslizamiento de los perfiles, por eso el desgaste en la zona circumpolar será mínimo.(11-13)

## 1.2 Desgaste abrasivo.

El desgaste abrasivo es una de las principales causas de la inutilización de los engranajes abiertos y cerrados, en las máquinas que trabajan en ambientes agresivos. El desgaste no es uniforme a lo largo del perfil del diente, debido a la velocidad no uniforme de deslizamiento y a las tensiones irregulares de contacto por presión. Sin embargo, debido al cambio de los radios de curvatura durante el desgaste, éste se hace uniforme. Los dientes desgastados adquieren una forma específica aguzada, como muestra la figura 2.(1)

Una microscopía electrónica de barrido aplicada al flanco del diente muestra surcos finos y limpios. Las principales causas de esta falla son la contaminación por partículas duras o afiladas y las asperezas duras en ambos dientes en contacto. Para evitar esta falla se recomienda remover los abrasivos que puedan existir y el uso de las superficies de los dientes lisas y templadas.



*Figura 2. Surcos en los dientes producto al desgaste abrasivo.*

## 1.3 Desgaste adhesivo.

El desgaste adhesivo, ocurre en superficies de deslizamiento cuando la presión entre las asperezas en contacto provoca deformaciones plásticas locales y la adhesión. Donde ocurren deformaciones plásticas, la energía se absorbe en forma de calor. El desgaste adhesivo puede presentarse por instantes y es un proceso que se repite y que inevitablemente lleva a la destrucción.(2)

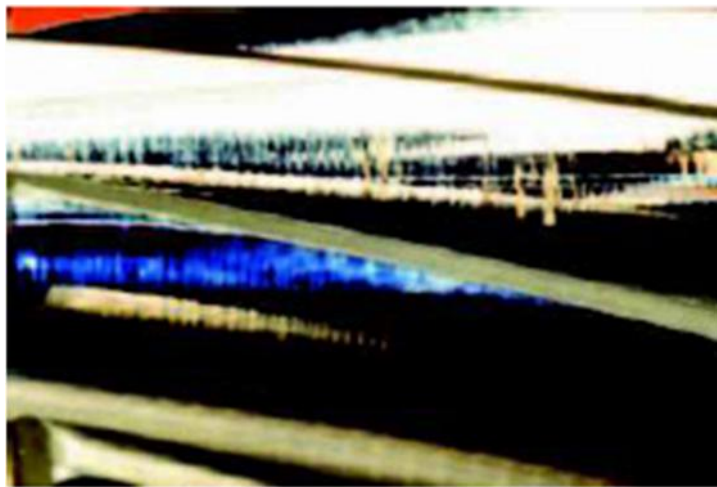
En esta falla se transfiere material entre las superficies de los dientes complementarios debido a microsoldaduras y lagrimeo, como se muestra en la figura 3. La causa que la provoca es el desgaste normal de las asperezas del flanco durante el rodaje. Para evitar este tipo de fallo se recomienda utilizar superficies lisas y en el primer mantenimiento en nuevos engranajes, vaciar, enjuagar, y sustituir el aceite después del rodaje.



*Figura 3. Superficie del flanco del diente durante el desgaste adhesivo.*

#### **1.4 Desgaste por pulido.**

El desgaste por pulido es un proceso muy lento de desgaste, en el cual las asperezas de las superficies de contacto son progresivamente pulidas hasta desarrollar bellas superficies lisas y brillantes, como se muestra en la figura 4. Si los aditivos de extrema presión en el lubricante son demasiado reactivos químicamente, pueden causar pulido de las superficies de los dientes del engranaje, hasta que alcancen una terminación tipo pulido espejo. Aunque los engranajes pulidos pueden parecer buenos, el desgaste por pulido no es deseable dado que generalmente reduce la precisión del engranaje mediante desgaste de los perfiles de los dientes más allá de las formas ideales.(14)



*Figura 4. Superficie pulida del flanco del diente.*

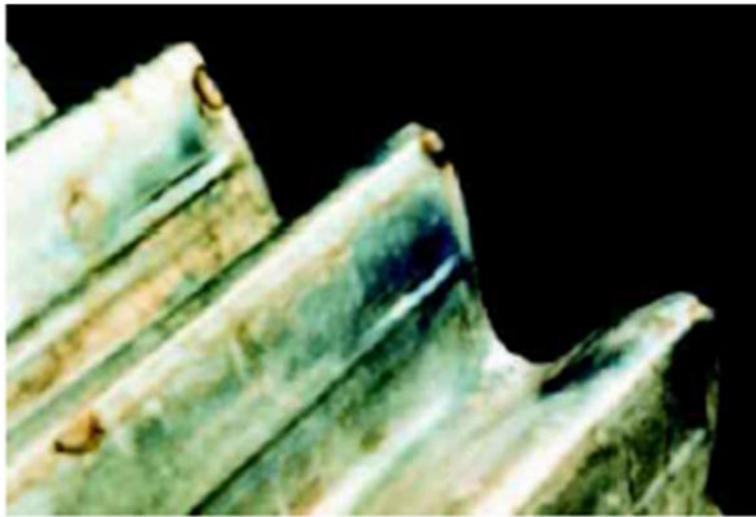
#### **1.5 Rayado.**

El rayado abrasivo (Scratching), ocurre cuando el desgaste del diente se produce de manera rápida, es decir, con excesiva pérdida del material en los flancos del diente debido a una inadecuada asociación de materiales, a insuficiente alisado de los flancos o a escasez de lubricación, apareciendo unas rayas verticales en los flancos del mismo. Estas rayas son siempre relativamente

finas y distribuidas a lo largo de la longitud del diente del engranaje, formando grupos. Especialmente se observa este fenómeno en ruedas dentadas con módulo relativamente grande y escasa velocidad tangencial, y en el caso de existir impurezas minerales en el lubricante con flancos de dientes ásperos.(15)

### **1.6 Falla por desgaste por erosión.**

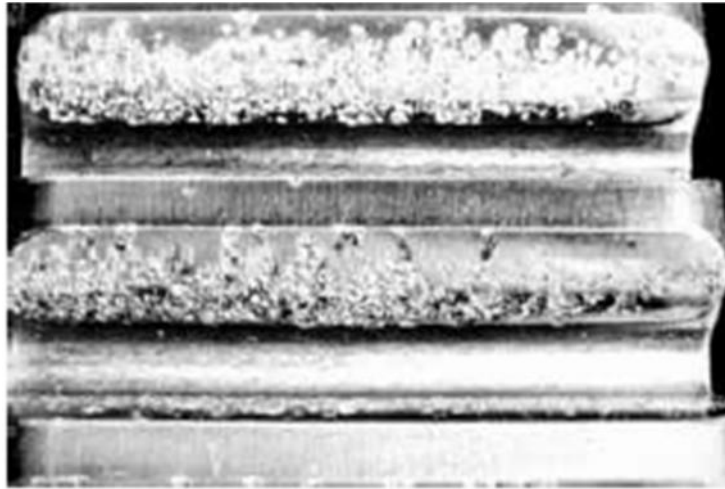
El desgaste por erosión ocurre cuando se elimina material de la superficie del diente debido al impacto de pequeñas partículas sólidas, cráteres finos y longitudinales cerca de los extremos de los dientes, como se muestra en la figura 5. La causa principal de esta falla es el movimiento relativo entre las superficies de los dientes y la existencia de partículas duras en el flujo de la película de lubricante. Para evitar esta falla se recomienda la eliminación de los abrasivos del lubricante.



*Figura 5. Cráteres longitudinales en los extremos de los dientes.*

### **1.7 Falla por desgaste debido a descargas eléctricas.**

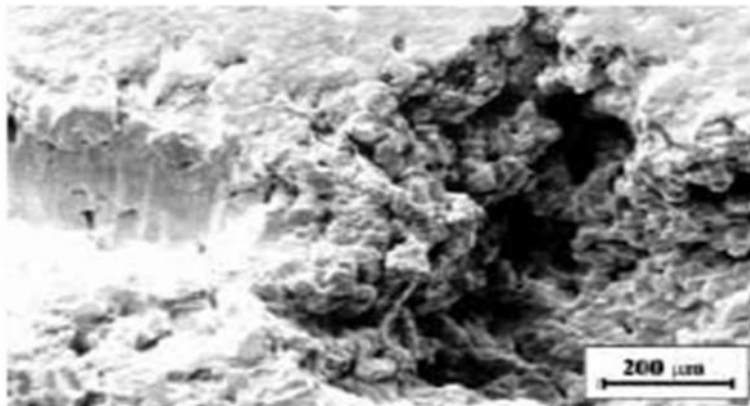
Esta falla es el daño que reciben los flancos de los dientes activos por descargas eléctricas a través de la película de lubricante, donde este daño se manifiesta como una superficie picada, en la microscopía electrónica de barrido se observan pequeños cráteres hemisféricos y esferas de metal fundido, como se muestra en la figura 6. La causa de esta falla está dada porque la corriente eléctrica alcanza el mecanismo de engranajes, y se puede evitar utilizando aislamiento eléctrico o de conexión a tierra, además, no se debe soldar por arco eléctrico cerca de los engranajes.



*Figura 6. Superficie picada debido a las descargas eléctricas.*

### **1.8 Falla por desgaste debido a la cavitación.**

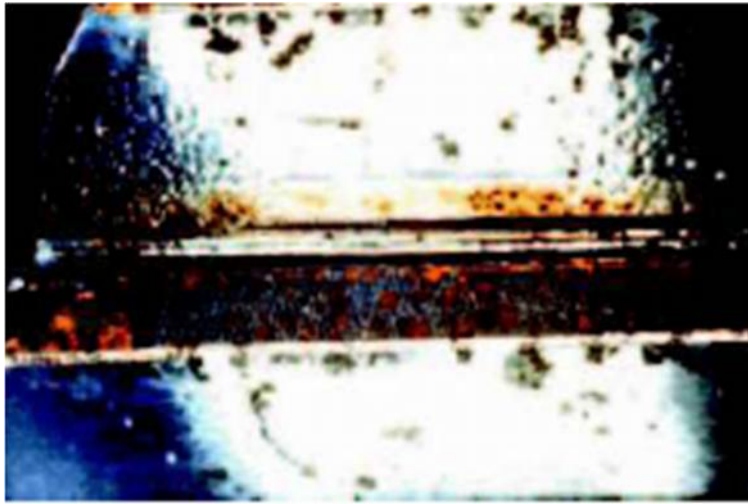
Esta falla es producto de la deformación y el desprendimiento de fragmentos de la superficie, debido al colapso e implosión de burbujas de vapor o lubricante. En esta falla se observan picaduras, como si las hubiesen hecho con arena a presión, si se observa en la microscopía electrónica de barrido, se ven como profundos cráteres, ásperos y limpios en forma de panal, como se muestra en la figura 7. Esta falla se puede evitar disminuyendo la velocidad y evitando las vibraciones.(4)



*Figura 7. Cráteres profundos en forma de panal debido a la cavitación.*

### **1.9 Falla por desgaste debido a la corrosión.**

La falla por desgaste debido a la corrosión se pone de manifiesto cuando existe la reacción química o electroquímica entre un equipo y su entorno; se observan superficies manchadas u óxido con depósitos color marrón rojizos, como se muestra en la figura 8. Se puede observar en la microscopía electrónica de barrido. La causa de esta falla es la contaminación del lubricante por agua o ácido. Aditivos anti desgaste excesivamente reactivos. Esta falla se puede evitar eliminando los contaminantes además de vaciar, enjuagar y sustituir el lubricante.



*Figura 8. Óxido con depósitos color marrón rojizos en la superficie del engranaje.*

### **1.9.1 Falla por desgaste debido a la corrosión por contacto.**

Este tipo de falla se debe al deterioro de la superficie del diente activo, causada por el movimiento vibratorio. Esta falla se puede observar como surcos a lo largo de las líneas de contacto, como se muestra en la figura 9; a simple vista, se observan partículas por el desgaste de color marrón rojizo. Si se observa en una difracción por rayos X, se aprecia  $\alpha - \text{Fe}^2\text{O}^3$ . La causa fundamental de esta falla es la vibración sin rotación.



*Figura 9. Surcos y partículas marrón rojizas a lo largo de la línea de contacto.*

### **1.10 Falla por desgaste debido a la adhesión y transferencia de metal.**

La falla consiste en la adhesión severa y transferencia de metal entre los dientes, debido al desgarramiento por soldadura. La superficie de los dientes se vuelve áspera, con rayas color mate a lo largo de la dirección del deslizamiento en la cabeza, el pie del diente o en ambas, como se muestra en la figura 10. Esta falla se origina cuando la temperatura de contacto del diente supera la temperatura al desgaste abrasivo del lubricante. Se puede evitar reduciendo la temperatura de contacto, utilizando lubricantes de alta viscosidad antidesgaste y mejorando el enfriamiento.



*Figura 10. Asperezas y rayas mate en la cabeza, el pie del diente o en ambas.*

## **2 Falla del diente debido a la fatiga por contacto.**

Producto de la carga aplicada en la superficie del diente se generan grietas que se extienden por debajo de ésta hasta provocar el desprendimiento de pequeñas partículas de material. La principal propiedad mecánica que ofrece resistencia a este tipo de falla es la dureza superficial del material.

### **2.1 Falla debido a la fatiga por contacto, picadura.**

La falla por picadura es la fatiga en la superficie de los dientes del engranaje, y consiste en la aparición sobre la superficie de pequeños hoyos semejantes a cavidades alveolares que crecen, convirtiéndose luego en oquedades. La picadura puede ser inicial (limitada) o progresiva.

#### **2.1.1 Falla por fatiga superficial, picadura inicial.**

La picadura inicial es debida a la concentración de la carga en la longitud de los dientes. En las ruedas de materiales de buena adaptación funcional la picadura puede cesar, y prácticamente no influye sobre el trabajo de la transmisión por engranajes, ya que las cavidades formadas desaparecen poco a poco por laminado, tornándose la carga más uniforme.

La picadura aparece cerca de la línea polar, sobre los pies de los dientes, donde, debido a las pequeñas velocidades de desplazamiento, se originan grandes esfuerzos de fricción. Presenta cavidades localizadas de menos de un milímetro de diámetro como muestra la figura 11. Luego se extiende a toda la superficie de los pies, debido a la alta concentración de la carga en las asperezas. Para evitar la picadura los dientes se calculan a la fatiga superficial, mejorar la precisión y reducir las rugosidades en la superficie.



*Figura 11. Cavidades que se extienden a toda la superficie del pie de los dientes.*

### **2.1.2 Falla por fatiga superficial, picadura progresiva.**

La picadura progresiva es peligrosa, ya que se extiende a toda o una parte de la longitud de los dientes. La picadura lleva al aumento de la presión sobre las partes aún no desmenuzadas de la superficie, a la expulsión del lubricante a las cavidades y, finalmente, al aplastamiento plástico o bien al agrietamiento y desprendimiento de las asperezas superficiales. Se pueden apreciar las cavidades más grandes que 1 mm que cubre un área significativa de la superficie del diente activo, como se muestra en la figura 12. Las causas de esta falla pueden ser la alta tensión de contacto, la baja resistencia a la fatiga y el espesor de la película de lubricante inadecuada.



*Figura 12. Cavidades más grandes que un milímetro.*

### **2.1.3 Falla por fatiga superficial, picadura por desconchado.**

Este tipo de picadura progresiva causa la separación del flanco del diente de finas capas de material en forma de abanicos o escamas. A simple vista se puede apreciar cerca de la línea de contacto grandes hoyos poco profundos que se extienden en toda la zona de contacto, como se muestra en la

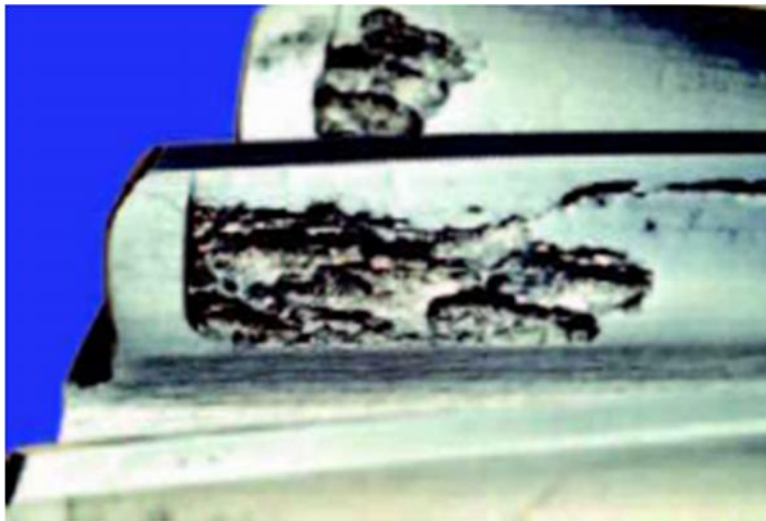
figura 13. Las causas de esta falla son las mismas que la de la picadura progresiva normal, y se puede evitar reduciendo la tensión de contacto, aumentando la resistencia a la fatiga y aumentando el espesor específico de la película del lubricante.



*Figura 13. Desconchado del flanco del diente producto a la picadura progresiva.*

#### **2.1.4 Falla por fatiga superficial, picadura por descostrado.**

Esta falla se inicia como la picadura progresiva lo que las cavidades se funden formando cráteres irregulares que cubren un área significativa de la superficie del diente activo, como se muestra en la figura 14. Las principales causas de la aparición de esta falla son las altas tensiones de contacto, la baja resistencia a la fatiga y el inadecuado espesor de la película de lubricante.



*Figura 14. Cavidades fundidas formando cráteres irregulares en el flanco del diente.*

## 2.2 Falla por fatiga superficial, micropicadura.

La micropicadura es un tipo de fatiga de contacto que aparece como un esmerilado o mancha gris bajo condiciones de una capa fina, como se muestra en la figura 15. La superficie adquiere un acabado como de grabado al aguafuerte, con un patrón que se asemeja a arrugas o crestas ligeramente más altas salidas de las huellas del corte u otras superficies irregulares. Esto generalmente se muestra primero sobre la sección de dedendum del engranaje motriz, aunque también puede comenzar sobre la sección de addendum.



*Figura 15. Patrón que refleja la micropicadura a simple vista.*

Cuando es visto bajo aumento, como en la figura 16, la superficie es vista como un área de muy finos micro agujeros de alrededor de 0,0001 pulgadas de profundidad. Las causas pueden estar dadas por cargas superficiales altas y generación de calor, cuyas finas películas de lubricación conducen a una lubricación marginal. Mejorar el acabado superficial resulta un recurso efectivo para prevenir la micropicadura, mediante el empleo de técnicas de fabricación tales como el honing y el rectificado, así como cumplir los ciclos de asentamiento de manera cuidadosa. Estos procedimientos contribuyen a disminuir la generación de calor al mejorar la concordancia en el contacto de los dientes y uniformar la distribución de las cargas a lo largo de la línea de contacto. Esta falla se puede evitar aumentando el espesor de la película específica del lubricante y utilizando lubricantes de alta resistencia a la micropicadura.



*Figura 16. Finos microagujeros en el flanco del diente en una vista ampliada.*

### **3 Falla superficial por gripado.**

Se define como un daño localizado, causado por la soldadura de la fase sólida entre superficies que se deslizan. Es acompañado por la transferencia de metal de una superficie a otra debido a la soldadura, esto puede ocurrir en cualquier contacto por deslizamiento o rodadura donde la película del lubricante no tiene el espesor suficiente para separar las superficies. Los síntomas son asperezas microscópicas, superficies con un acabado tipo mate. Los análisis de la superficie muestran transferencia de metal de un cuerpo a otro.

El gripado puede ocurrir en los dientes de engranajes que operan en un régimen de lubricación límite. Si el espesor de la película no es lo suficientemente grueso, como para evitar el contacto entre las superficies de los dientes de los engranajes, ésta puede romperse y la superficie descubierta, soldarse.

En contraste con la picadura o la fatiga por flexión, las cuales ocurren después de un período de operación determinado, el gripado puede aparecer inmediatamente después de ponerse en marcha el equipo. De hecho, los engranajes son más vulnerables al gripado cuando son nuevos y las superficies no se han asentado.

Los mecanismos básicos del gripado, no están claramente definidos, por lo general se considera que es causado por una generación intensa de calor friccionar, generado por la combinación de altas velocidades de deslizamiento y una intensa presión de contacto. La teoría de la Temperatura crítica de Block es considerada como el mejor criterio para predecir el gripado. Esta falla se presenta principalmente, cuando existe deslizamiento bajo condiciones de lubricación límite (3; 16; 17)

#### **3.1 Escoriación de 1<sup>er</sup> Grado.**

La escoriación de 1er grado, aparece cuando el esfuerzo es excesivo o la lubricación deficiente. Se produce incluso en engranajes diseñados correctamente, cuando no se puede conseguir mantener una película de lubricante entre flancos conjugados. Se producen pequeñas zonas ásperas, rugosas, con formación de surcos y zonas de corrosión en todos los dientes del engranaje, situadas siempre en la misma posición relativa. Se presentan por la continuada repetición de roturas de la película de lubricante, en lo cual también juegan un papel importante las aristas de cabeza de los dientes al principio del movimiento del engrane.(15)

#### **3.2 Escoriación de 2do Grado.**

La escoriación de 2<sup>do</sup> grado, causada por la violencia del llamado "contacto metálico" entre flancos, que origina una zona estriada en la región de rodadura, producida por el desgarro o arranque de pequeñas partículas metálicas del flanco, y la soldadura o agarrotamiento de las mismas sobre el mismo flanco. Generalmente se produce cuando la rueda y el piñón están fabricados con material de dureza similar, y es demasiado blando para las características del trabajo.(15)

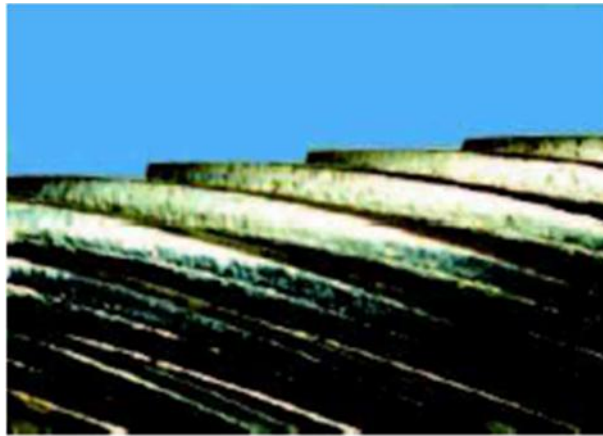
### **4. Fallas superficiales por deformaciones plásticas.**

Las deformaciones plásticas tienen lugar en los dientes cargados fuertemente de las ruedas dentadas de acero, bajo la acción de las fuerzas de rozamiento. En estas fallas la superficie de los flancos puede entrar en fluencia, arrastrando material por la acción del deslizamiento, apareciendo

estrías o rebabas en la cabeza. Las partículas de metal de la capa superficial de los dientes de la rueda conductora, se alejan del polo y los dientes de la rueda conducida que se acercan al polo; como resultado de esto, sobre los dientes impulsores se forman surcos a lo largo de la línea polar, y en los dientes impulsados, crestas. Estas deformaciones plásticas aparecen con más intensidad en los dientes de acero con dureza poco elevada, particularmente con insuficiencia de lubricación y en las transmisiones de pequeña velocidad.(2; 11; 18; 19)

#### **4.1 Aplastamiento.**

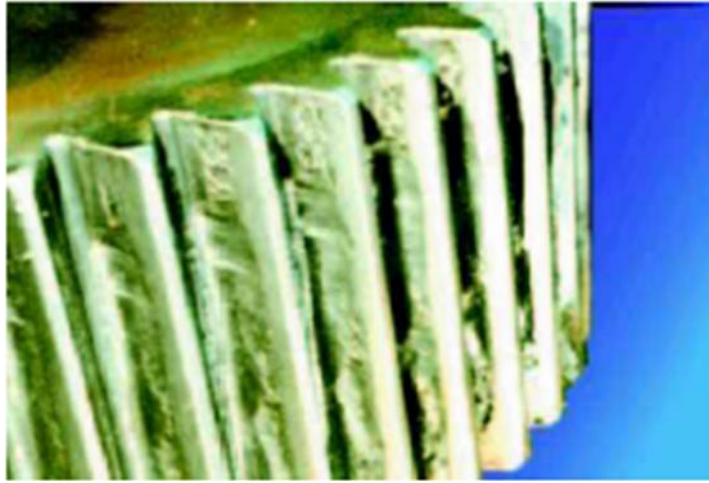
El aplastamiento, consiste en la formación de rebabas en la cabeza del diente, u otras deformaciones plásticas que indican la insuficiente dureza del material en relación con la carga. Es el mismo efecto que se conseguiría por la acción de un aplastamiento del flanco, por medio de una prensa o martillo. Puede ir acompañado de escoriación. En esta falla se crean surcos en las líneas de paso y rebabas en las puntas o raíces de los piñones, o se forman crestas en las líneas de paso, como se muestra en la figura 17. Esta falla se puede evitar reduciendo la tensión de contacto, aumentando la resistencia a la fluencia o mejorando la lubricación.



*Figura 17. Surcos en las líneas de paso debido a la deformación plástica.*

#### **4.2 Flujo en frío.**

La deformación plástica ocurre a temperatura más baja que la temperatura de recristalización. En esta falla, se observan permanentemente deformados los dientes de los engranajes, como se muestra en la figura 18. Para evitar esta falla se recomienda reducir la carga, aumentar la resistencia a la fluencia y mejorar la lubricación.



*Figura 18. Dientes del engranaje deformados.*

### **4.3 Flujo en caliente.**

En esta falla los dientes del engranaje permanecen permanentemente deformados pero cubiertos con óxido negro ferroso como se muestra en la figura 19, ocurre a temperatura superior que la temperatura de recristalización. Esta falla ocurre producto al sobrecalentamiento y la falta de lubricación.



*Figura 19. Dientes del engranaje deformados cubiertos con óxido negro ferroso.*

## **Conclusiones**

1. La picadura es la falla más común en las transmisiones por engranajes cerradas, que están bien lubricadas y protegidas contra la contaminación.
2. El desgaste es en las transmisiones abiertas, mal lubricadas la falla más común.
3. El desgaste de las ruedas dentadas es una función de la potencia específica de las fuerzas de fricción.
4. Es esencial el conocimiento de las fallas en los engranajes y sus causas para realizar un correcto diseño del par de ruedas dentadas.

5. Según las diferentes normas de cálculo de engranajes existen diferentes procedimientos normalizados para el diseño de engranajes contra los diferentes tipos de fallas.

## Referencias bibliográficas

1. RECHETOV, D. *Elementos de máquina*. Edtion ed. Moscú, 1981.
2. RODRÍGUEZ, M. I. Á. S. M. Consideraciones acerca del Diseño de los Engranajes Cilíndricos de Dientes Rectos aplicables a su recuperación. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, 2001.
3. HENRIOT, G. *Traité Théorique et Pratique des Engrenages*. Edtion ed. París, 1991. ISBN 2-04-015607-0.
4. R. W. SNIDLE, H. P. E., M. P. ALANOU, M. J. A. HOLMES Understanding Scuffing and Micropitting of Gears 2003.
5. GABRIEL F. DAMBAUGH, P. E. Fatigue Considerations of High Strength Rolling Bearing Steels. 2006.
6. WEI, Z. STRESSES AND DEFORMATIONS IN INVOLUTE SPUR GEARS BY FINITE ELEMENT METHOD. University of Saskatchewan, 2004.
7. FARSHID SADEGHI, B. J., TREVOR S. SLACK, NIHAR RAJE, NAGARAJ K. ARAKERE A Review of Rolling Contact Fatigue. Journal of Tribology, 2009.
8. NICODEMUS LORENZO TARAPASADE, D. R. A. G. E., M.SC. JUAN GABRIEL NOA ÁGUILA. ANÁLISIS DE LA AVERÍA DEL PIÑÓN DE LA TRANSMISIÓN FINAL DEL MOLINO DE CRUDO No. 2 DE LA EMPRESA “CEMENTOS CIEINFUEGOS S.A.”. 2006.
9. MICHAL HAJZMAN, P. P. SENSITIVITY ANALYSIS OF GEARBOX TORSIONAL VIBRATIONS. 2012.
10. SHINLEY, J. E. *Mechanical Engineering*. Edtion ed. México, 2008. ISBN 0-390-76487-6.
11. GUILLERMO ABREU RUANO, J. L. M. R. Máquinas y Equipos para el ensayo de transmisiones por engranajes. 2010.
12. FLODIN, A. Wear of spur and helical gears 2000, 9-24.
13. JORGE L. MOYA RODRÍGUEZ, R. G. E., EDWIN ABREGÚ LEANDRO, ÁNGELS. MACHADO RODRÍGUEZ INFLUENCIA DE LA CORRECCIÓN DE ALTURA EN LA DISMINUCIÓN DEL DESGASTE EN LOS ENGRANAJES CILÍNDRICOS DE DIENTES RECTOS EXTERIORES 2008.
14. CORONADO, C. E. PROGRAMA DE LUBRICACIÓN PARA LÍNEA DE PRODUCCIÓN EN PASTAS LA MODERNA, S.A. 2009.
15. FUENTES, A. A. Modelo de Cálculo a Flexión de Engranajes Cilíndricos de Perfil de Evolvente. U.N.E.D., 1996.
16. ANSI/AGMA.1010-E95. Appearance or Gear Teeth-Terminology of Wear and Failure. In. Alexandria, VA, 1995.
17. C.GARCÍA-MASIÁ. Optimización del Diseño de Engranajes por Análisis Paramétrico. 1994.
18. ISO.6336-2:1996, I. S. Calculation of load capacity of spur and helical gears In *Part 2: Calculation of surface durability (pitting)*. Switzerland, 1999.
19. MR. BHARAT GUPTA, M. A. C., MR. GAUTAM V. VARDE CONTACT STRESS ANALYSIS OF SPUR GEAR 2012, 1(4).