

Las fallas en los engranajes

En este artículo se presenta un resumen de la forma en que trabajan los engranajes de evolvente haciendo énfasis en las características de la rodadura y el deslizamiento que se suceden a través del engrane y su influencia en las fallas de los dientes. Se analizan las principales formas de falla, sus causas y la forma en que pueden ser evitadas.

Este artículo es extractado del trabajo: Funcionamiento y análisis de fallas de los engranajes que fue presentado en las "Terceras Jornadas Nacionales sobre Mantenimiento" organizadas por ACIEM — Cundinamarca y obtuvo el segundo premio MVA a la Ingeniería de Mantenimiento.

LUIS EDUARDO BENITEZ HERNANDEZ
Ingeniero Mecánico
Profesor Asociado
Universidad Nacional de Colombia

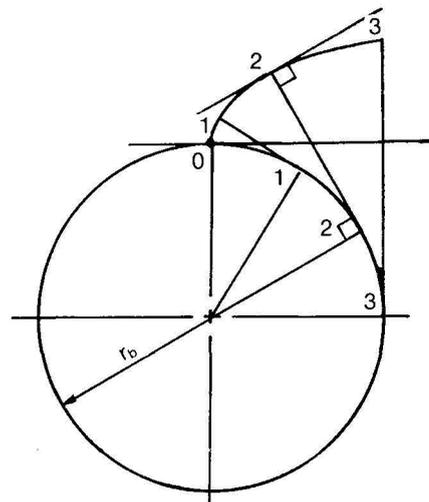


FIGURA 1. Evolvente

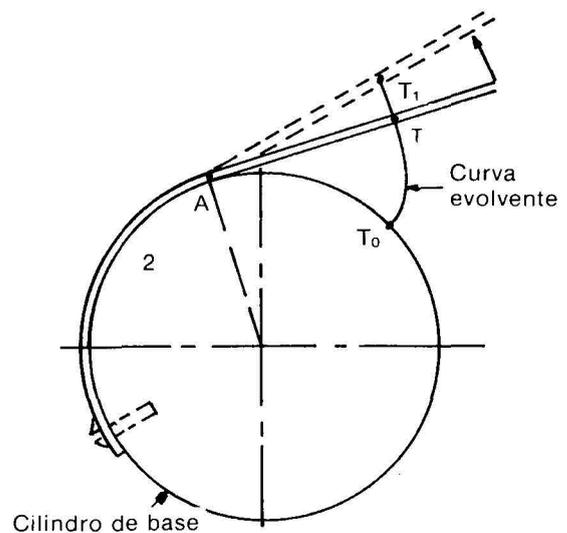


FIGURA 2. Evolvente

El objetivo fundamental de una transmisión por medio de ruedas dentadas es transmitir un movimiento con una relación constante de velocidades. Para lograrlo se le puede dar a los perfiles de los dientes una forma tal que se garantice el cumplimiento de esta condición. Se pueden utilizar los perfiles cicloidales, de evolvente y de Nóvikov. El más utilizado universalmente es el perfil de evolvente de círculo, que es la curva descrita por un punto

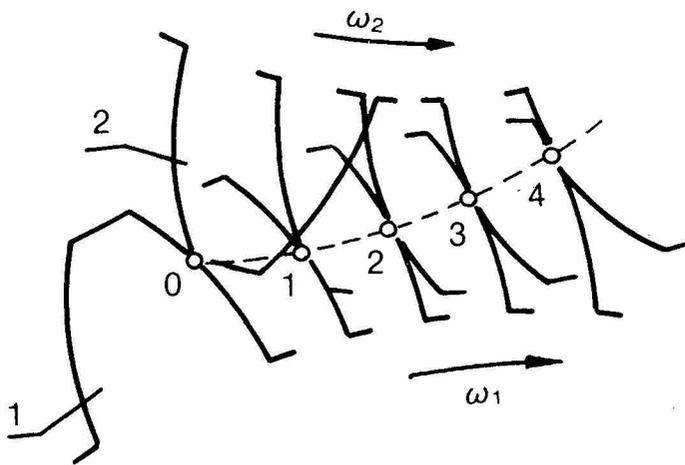


FIGURA 3. Construcción de la línea de engrane por puntos.

de una recta generatriz que rueda sin deslizar sobre un círculo llamado círculo base (Figura 1). También se puede decir que la evolvente es la curva descrita por el extremo de una cuerda que se desenrolla del círculo base (Figura 2).

LÍNEA DE ENGRANE

Supongamos que en un instante determinado los dientes de dos ruedas están en contacto en el punto 0 (Figura 3). Al girar la rueda 1, también gira la rueda 2. Los dientes de ambas ruedas se mueven y su contacto se produce en nuevos puntos 1, 2, 3, etc. Al unir estos puntos por una curva suave se obtiene la llamada "línea de engrane". Podemos definir la línea de engrane como el lugar geométrico de los puntos de contacto de los dientes de dos ruedas en un plano fijo. Esta línea por lo general pasa por el punto primitivo.

Cuando se trata de engranajes de evolvente (Figura 4) la línea de engrane es una línea recta y coincide con la normal **NN** a los perfiles de los dientes. Esta línea pasa por el punto primitivo **P** y forma con la perpendicular a la línea de centros el ángulo α llamado ángulo de presión. La trayectoria del contacto es la recta **AB** y dado que **AB** es la línea generadora de la evolvente de cada rueda, será normal a los perfiles en todos los puntos de contacto y además ocupará siempre la misma posición en virtud de que es tangente a los dos círculos base.

FUNCIONAMIENTO DE LOS ENGRANAJES DE EVOLVENTE

En la Figura 5 se puede observar el funcionamiento de dos engranajes encastrados. La línea **AB** es la trayectoria del contacto que, como ya se dijo, en los engranajes de evolvente es una línea recta. El inicio del contacto (punto a) ocurre donde el círculo de adendo del engranaje conducido corta la línea **AB** que también se conoce como línea de acción y el fin del contacto (punto b) está en la intersección del círculo de adendo de la rueda conductora con la misma línea de acción. La línea **ab** se conoce como longitud de acción. En el tramo **aP** se efectúa la acción de aproximación y en el tramo **Pb** se efectúa la acción de receso o de alejamiento. La experiencia

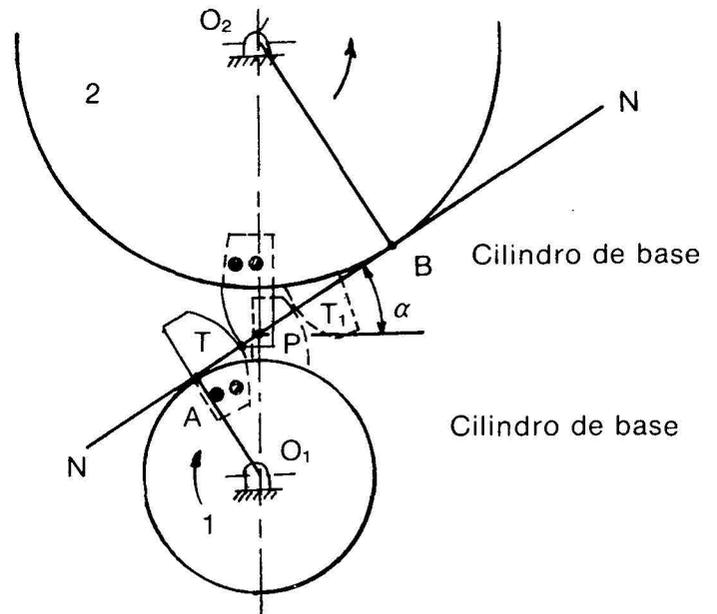


FIGURA 4. Línea de engrane

indica que la fricción entre los dientes es menor durante el receso que en la aproximación.

El perfil conductor corta su círculo primitivo al inicio y al final del contacto en los puntos **d** y **e** respectivamente; al arco **de** se le llama arco de acción. Para la rueda conducida el arco de acción es **fg**. Estos dos arcos deben ser siempre iguales para que exista rodadura pura en los círculos primitivos. Los arcos **dP** y **fP** son los arcos de aproximación y los arcos **Pe** y **Pg** son de alejamiento.

Las longitudes de los dos arcos de entrada son iguales lo mismo que los de salida, pero las longitudes de los arcos de entrada y de salida para cada rueda no son necesariamente iguales.

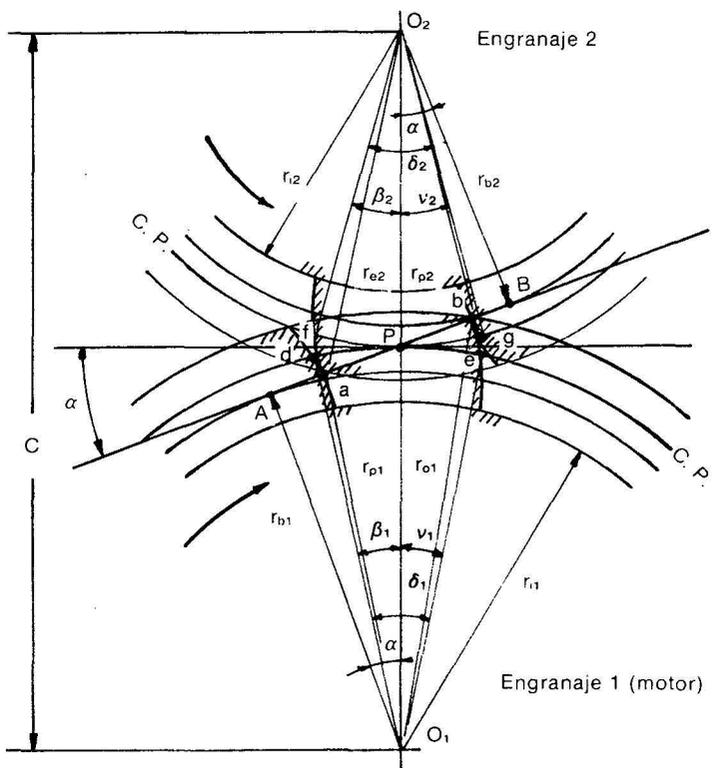


FIGURA 5. Funcionamiento de los engranajes de evolvente.

Una característica importante del arco de acción es que nunca debe ser menor que el paso circular, ya que una pareja de dientes cesaría el contacto antes de que la siguiente lo iniciase y no existiría la continuidad que se necesita en este tipo de transmisión. Los ángulos δ son los ángulos de acción, los ángulos β son de aproximación y los γ son de alejamiento.

Durante el engrane se presentan momentos en que hay dos parejas de dientes en contacto y otros en los cuales una sola pareja hace contacto. Es importante

conocer bien estos últimos puntos ya que esto permite estimar la capacidad de carga de los dientes.

En la Figura 6 se observan cinco etapas del contacto de los dientes de una pareja de ruedas dentadas. En el primer cuadro se muestra el primer contacto (0-0) entre dos dientes cualesquiera; se ve que la pareja anterior de dientes todavía está en contacto. En el segundo cuadro el contacto ha avanzado a la posición 3-3, que es aproximadamente el comienzo

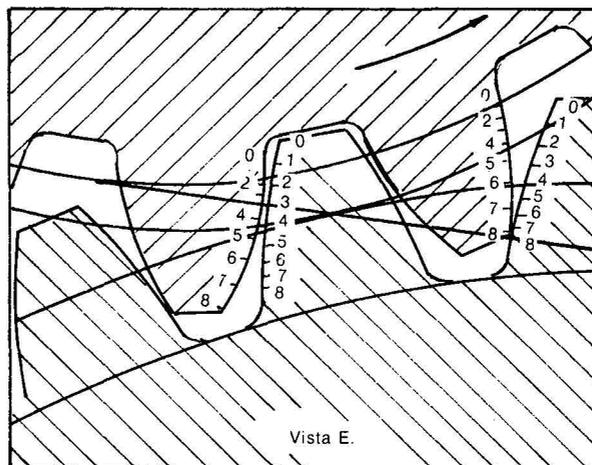
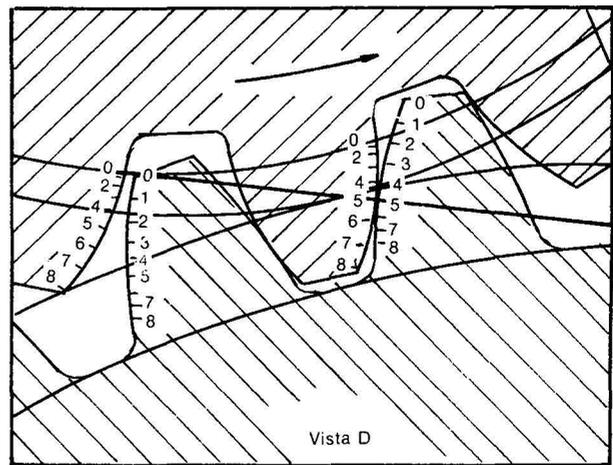
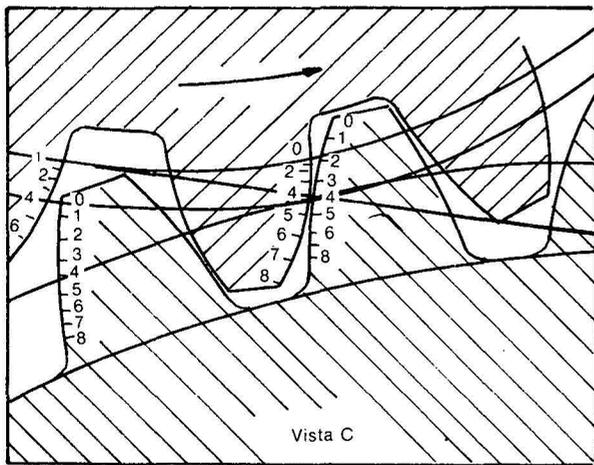
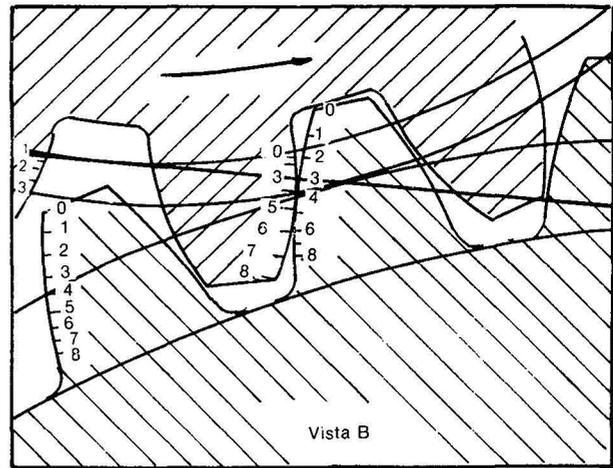
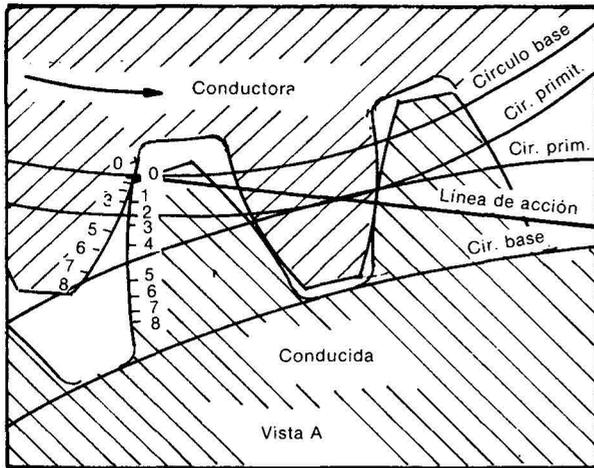


FIGURA 6. Contacto de los dientes de evolvente.

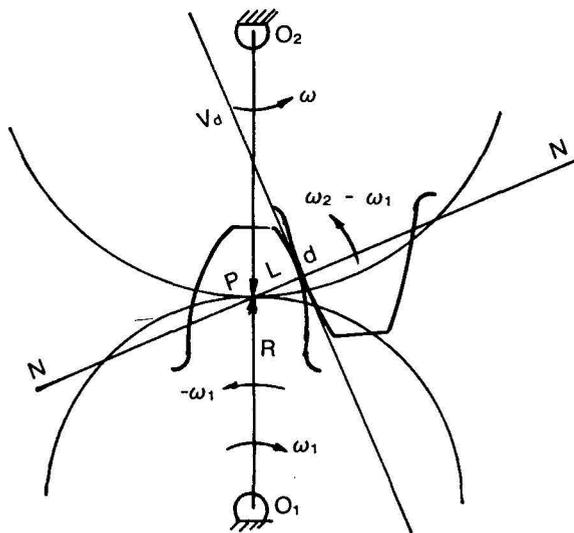


FIGURA 7. Velocidad de deslizamiento para engranajes rectos, cónicos y helicoidales.

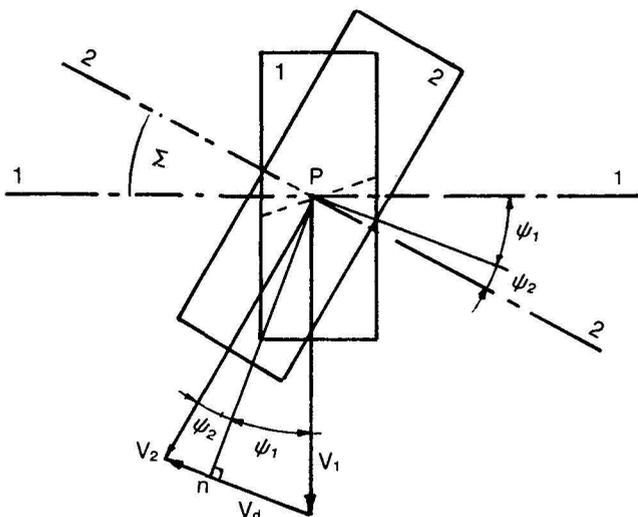


FIGURA 8. Diagrama de velocidades en los engranajes cruzados.

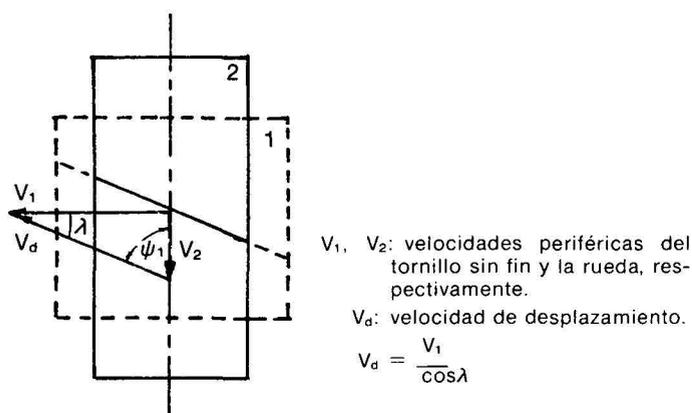


FIGURA 9. Diagrama de velocidades en el engrane tornillo sin fin corona.

del contacto de una sola pareja de dientes ya que la pareja anterior está terminando su contacto.

El tercer cuadro muestra el contacto en la posición 4-4 que corresponde al punto primitivo. El cuarto cuadro muestra el avance del contacto a la posición 5-5 que corresponde al final del contacto de una sola pareja de dientes ya que la siguiente lo está iniciando en este momento. Desde este momento hasta cuando la pareja que ha venido observando

termina su contacto (último cuadro) hay dos parejas de dientes soportando la carga; luego viene la región de contacto de un par y este ciclo se repite continuamente para todas las parejas de dientes.

DESLIZAMIENTO

Los perfiles de las curvas de evolvente ruedan acompañados de un deslizamiento. La velocidad de deslizamiento V_d en un punto cualquiera del engrane está dada por:

$$V_d = (W_1 \pm W_2)PM$$

Siendo W_1 y W_2 las velocidades angulares de la rueda y el piñón, respectivamente, P el punto primitivo y PM la distancia de este punto al de contacto medido sobre la línea de engrane. Se usa el signo (+) en engranajes exteriores y el signo (-) en engranajes interiores.

Las Figuras 7, 8 y 9 muestran cómo se presenta el deslizamiento en los diferentes tipos de engranajes. Como caso especial se debe tener en cuenta que el deslizamiento en los engranajes sinfin-corona está a lo largo del diente, lo cual dificulta la formación de una buena película lubricante. En los engranajes hipoidales se presenta este mismo fenómeno pero en menor escala.

La Figura 10 muestra un resumen de la forma en que se presentan el deslizamiento (S) y la rodadura (R) a lo largo de toda la trayectoria de engrane de las dos ruedas.

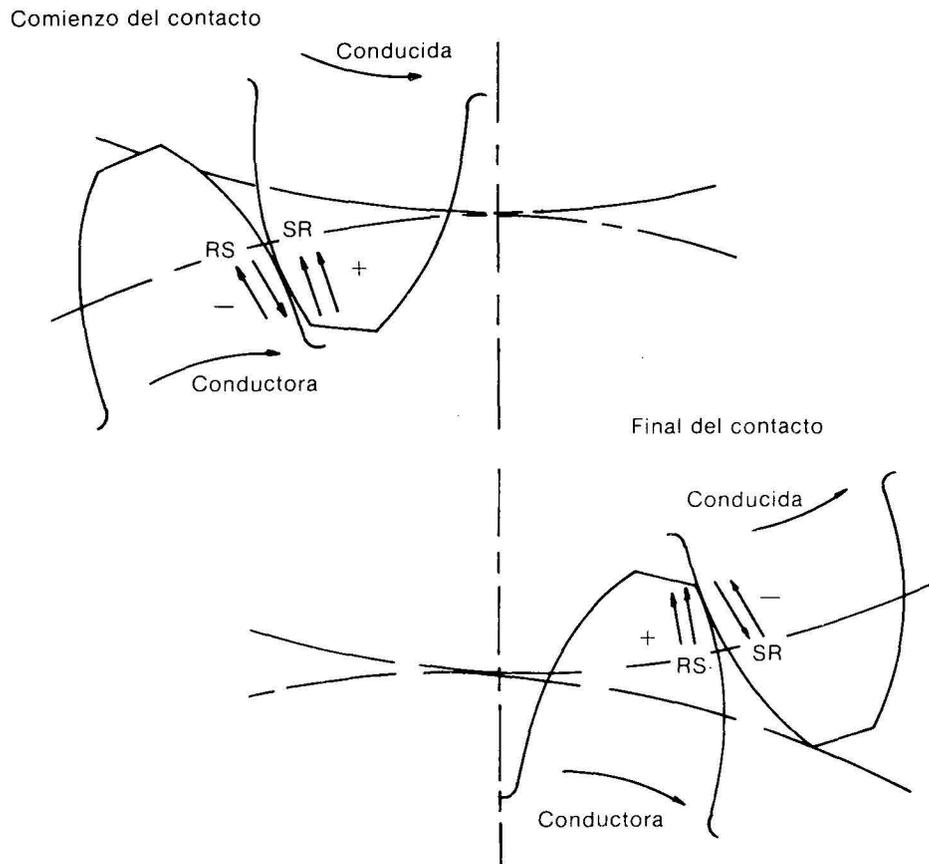
La Figura 11 muestra cómo varían las velocidades en las dos ruedas y cómo se obtiene la velocidad de deslizamiento para toda la trayectoria del engrane. En la parte superior se muestra cómo varían las cargas sobre los dientes. Se observa un aumento repentino en el punto más bajo de contacto de una sola pareja de dientes y una disminución en el punto más alto de una sola pareja de dientes, ya que allí nuevamente hay dos parejas que están repartiéndose la carga.

En la figura 12 se comparan las velocidades de deslizamiento en los engranajes helicoidales e hipoidales. En éstos últimos siempre hay deslizamiento presente y se debe al descentramiento de los ejes. Esta situación es aún más crítica en los engranajes sinfin-corona ya que presentan el máximo descentramiento admisible.

FALLAS

Las formas en que puede fallar un engranaje son muy diversas, pero pueden determinarse con un detenido análisis ya que cada tipo de falla deja una pista característica en los dientes. Se pueden distinguir cinco tipos de fallas a saber:

- Desgaste
- Fatiga superficial
- Flujo plástico
- Rotura de los dientes
- Fallas combinadas



	Dirección de la rodadura*	Dirección del deslizamiento*		Con respecto a la L. P.
		Sobre la raíz* (Debajo de la L.P.)	Sobre la cabeza** (Encima de la L.P.)	
Conductora	Arriba	Abajo	Arriba	Alejándose
Conducida	Abajo	Arriba	Abajo	Acercándose

* Arriba, acercándose a la cresta. Abajo, acercándose a la raíz.
 * Deslizamiento negativo — la rodadura y el deslizamiento son en sentidos opuestos.
 ** Deslizamiento positivo — la rodadura y el deslizamiento son en el mismo sentido.

FIGURA 10. Movimientos en el engrane.

FALLAS POR DESGASTE

El desgaste se puede definir como el deterioro que sufren los dientes y por el cual son removidos de sus superficies capas de metal de manera más o menos uniforme. Esta clase de desgaste reduce el espesor del diente y causa muchas veces grandes cambios en el perfil del mismo. Las causas más comunes del desgaste en los dientes de los engranajes son, el contacto de metal contra metal por fallas de la película lubricante entre los dientes, la presencia de partículas abrasivas en el aceite, desplazamiento de la película de aceite en el área de contacto ocasionando un desgaste rápido o la formación de estriado y el desgaste de origen químico provocado por la composición del aceite y de sus aditivos.

Existen diferentes tipos de desgaste entre los cuales se pueden nombrar:

Desgaste pulimentado

Aquí las rugosidades características del proceso de trabajo a máquina son sometidas a un proceso de asentamiento de los engranajes (período de ajuste),

en donde las superficies se ajustan y se pulen entre sí. Este pulimentado se causa por un contacto metal-metal durante la operación; ocurre en aplicaciones de baja velocidad y de lubricación cercana a la límite. Cuando una película de aceite entre dos superficies es más delgada que la altura combinada de las irregularidades sobre las superficies opuestas ocurre contacto metálico. Esta condición se conoce como lubricación límite o a película delgada. Este desgaste no es necesario evitarlo y cuando se ha logrado, se debe utilizar un lubricante de mayor viscosidad, reducir la temperatura de operación y lograr una reducción sustancial de la carga.

Desgaste moderado y excesivo

En el desgaste moderado se observa que hay remoción de metal en el adendo y dedendo de ambas superficies, mas no en la línea de paso que permanece intacta. La presencia de este tipo de desgaste se debe a que los engranajes trabajan con lubricación límite o existe contaminación en el lubricante. Este desgaste puede avanzar a excesivo

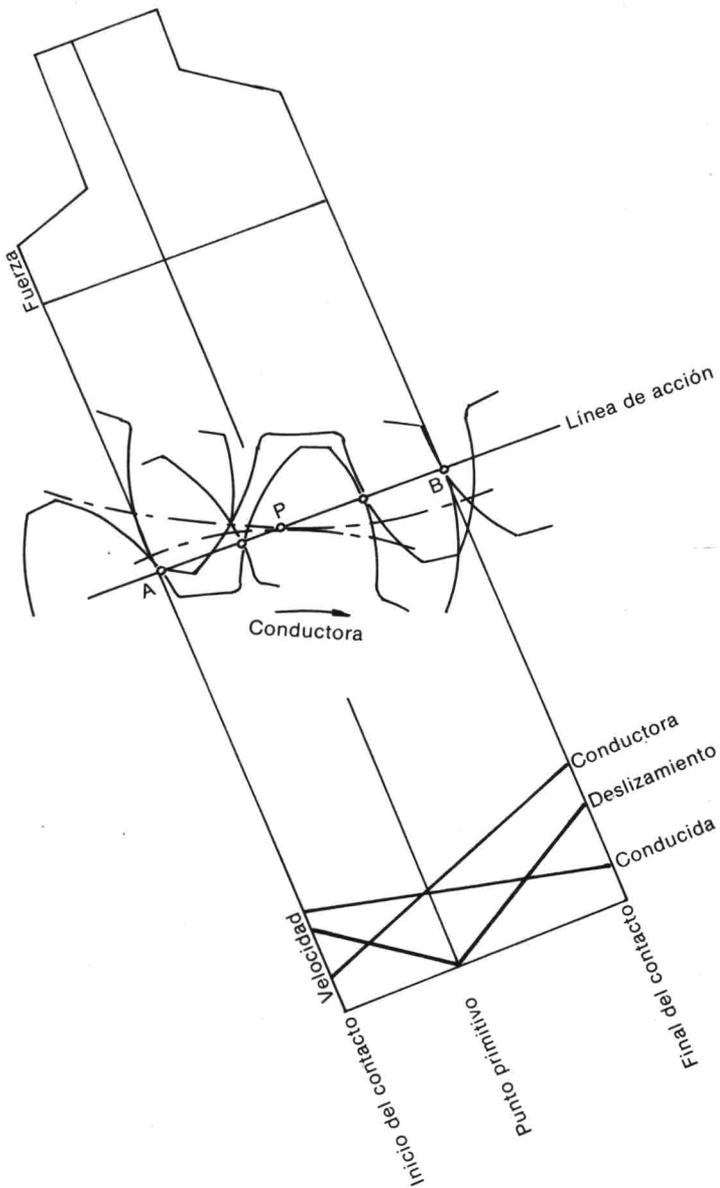


FIGURA 11. Condiciones del contacto para engranajes rectos.

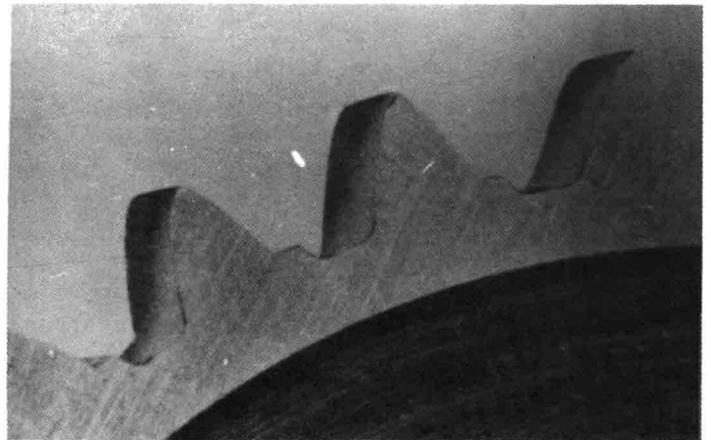


FIGURA 13. Desgaste excesivo.

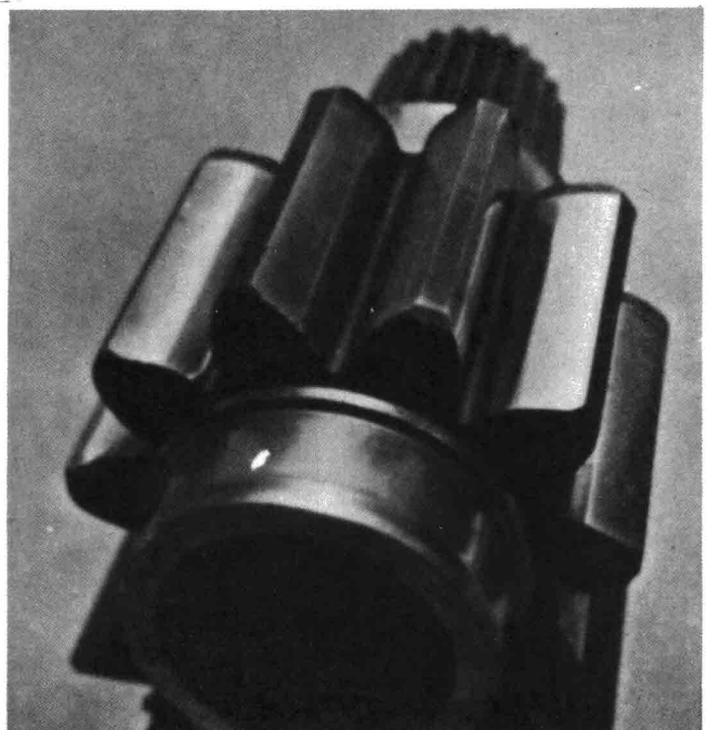


FIGURA 14. Desgaste abrasivo.

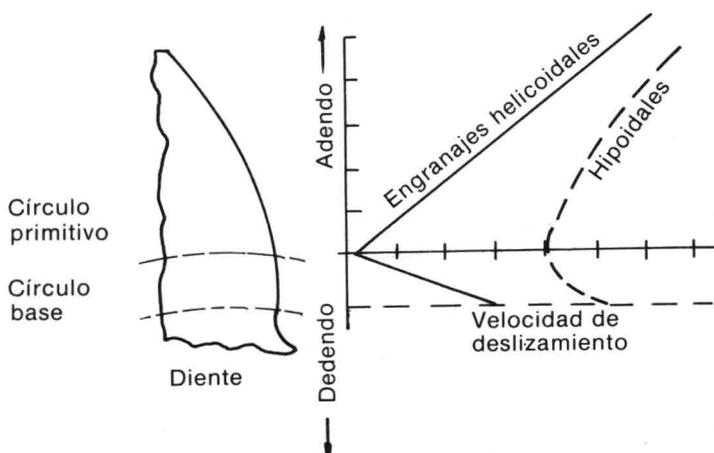


FIGURA 12. Deslizamiento sobre los dientes de los engranajes.



FIGURA 15. Desgaste abrasivo.

con una rata de progreso tal que no se cumplirá la vida de diseño del engranaje. Los dientes presentan una considerable cantidad de material removido en la superficie (Figura 13). En este tipo de desgaste la línea de paso queda pronunciada y se presenta el peligro de picaduras. También se destruye el perfil original del diente creándose elevadas cargas dinámicas sobre los dientes. Este desgaste puede ser causado por una película de lubricante muy delgada para la carga aplicada, por la presencia de finas partículas abrasivas en el lubricante o cargas de vibración severas.

Desgaste abrasivo

Se puede distinguir por dejar zonas planas y gastadas que interrumpen el perfil del diente. Comienza en la parte inferior de contacto de un solo diente, termina en la línea de paso y comienza de nuevo allí para terminar en el punto de contacto más alto de un solo diente. Se presenta así por las elevadas cargas que se suceden en esos sectores y por el grado de deslizamiento que se produce. Los lomos prominentes en la línea de paso y cerca del punto inferior de contacto identifican el desgaste abrasivo. También se puede identificar por rayas o marcas radiales en la dirección del deslizamiento de los dientes (Figuras 14 y 15).

Este desgaste se produce por la presencia de elementos extraños en el lubricante; por tanto, cuando se observan las huellas características de este desgaste, se deben revisar los filtros, comprobar si hay sedimentos en el compartimiento del lubricante y en fin, hacer los cambios de aceite tratando de desalojar todo elemento extraño que pueda convertirse en elemento abrasivo.

Desgaste corrosivo

Es un deterioro de la superficie por acción química. Se caracteriza por una gran cantidad de picaduras muy pequeñas distribuidas uniformemente sobre la superficie de trabajo del engranaje. Estas picaduras se deben a la afinidad por el vapor de agua de algunos aditivos de los aceites de extrema presión (E.P.) y a la acción de otras sustancias demasiado corrosivas.

Desgaste adhesivo

También se le conoce como escoriado. Es un desgaste muy rápido de los dientes que se causa por grandes fuerzas adhesivas desarrolladas por el contacto de los dientes. Cuando la película de aceite no previene el contacto de las superficies en engrane, ocurre del desgaste adhesivo. Debido a la rugosidad superficial de los dientes hay puntos de una superficie que tocan puntos de la otra. Este contacto metal-metal origina altas temperaturas localizadas en los puntos de contacto resultando en el soldamiento de las dos superficies. Como el movimiento deslizante continua, las superficies soldadas se rompen y apartan; sin embargo, el rompimiento no tiene lugar en la interfase original. Las partículas de desgaste se adhieren a la superficie a la cual son transferidas y eventualmente se rompen. Después de repetidos ciclos del proceso de soldadura y fractura, la superficie se deteriora y el

desgaste se acelera. El escoriado generalmente ocurre cerca a la cabeza del diente del piñón donde la carga del diente y la velocidad de deslizamiento son mayores. El lubricante puede tener un marcado efecto en el escoriado. Para prevenirlo el aceite debe tener suficiente viscosidad para mantener una película lubricante. Es más deseable una película de alta resistencia. Los aditivos de extrema presión pueden prevenir el escoriado.

No obstante que el escoriado se inicia por fallas de lubricación, existen muchos otros factores independientes del aceite capaces de influir en la resistencia final de las superficies engranantes, entre las que figuran la presión entre las superficies de engrane de los dientes, las propiedades de los materiales, los acabados y tratamientos aplicados a las superficies y las velocidades de fricción entre dichas superficies. Las fallas por escoriado son de difícil análisis y se pueden presentar en varias formas:

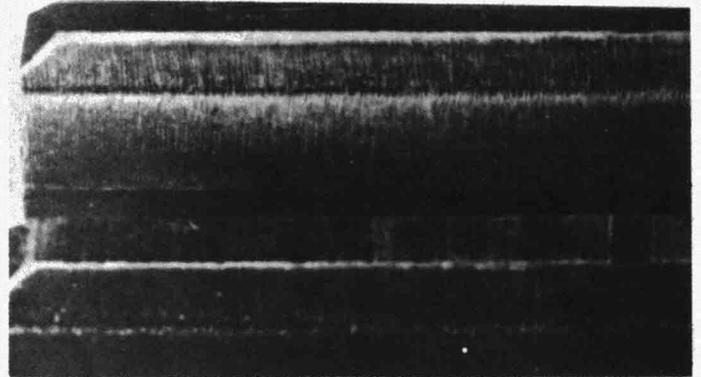


FIGURA 16. Rayado severo.

Rayado y escoriado

Son deterioros por frotamiento. Se reconoce por la presencia de un número de rayas ligeras o pequeñas zonas de atascamiento en la superficie del diente (Figura 16). Estas rayas por lo general se deben a puntos altos en la superficie correspondiente entre los dientes de los engranajes. La fricción entre estos puntos crea elevadas temperaturas locales que evitan la formación de la película de aceite. En el contacto resultante de metal a metal, los puntos en relieve se desgastan y la carga se distribuye más uniformemente en la superficie de los dientes.

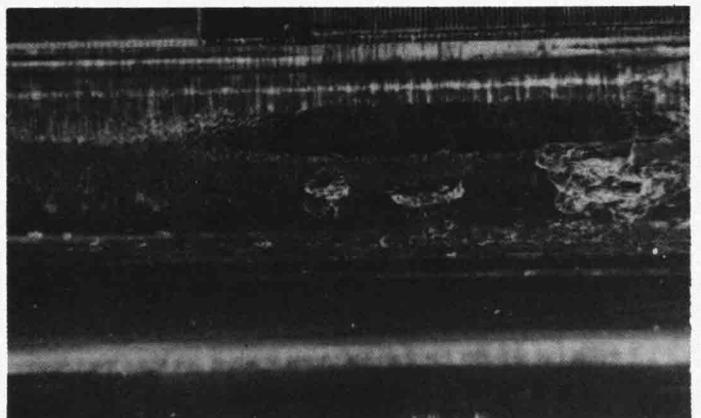


FIGURA 17. Escoriado destructivo.

El rayado y el desgaste asociados a menudo conducen a picaduras serias, indicando que el lubricante no es apropiado para las cargas y velocidades a que se está sometiendo. Las picaduras se deben controlar ya que pueden conducir a averías serias en el diente.

Escoriado moderado

Se observa en los dientes en forma de parches sobre el adendo, el dedendo o ambos.

Escoriado destructivo

Muestra rayas radiales muy definidas y marcas de desgarramiento en la dirección del deslizamiento (Figura 17). Algunas veces el material ha sido removido radialmente sobre la punta de los engranajes; además hay indicios de que ha habido remoción de material arriba y abajo de la línea de paso, la cual se nota pronunciada. El perfil se destruye por completo y el engranaje queda inservible. Se debe utilizar lubricantes que soporten más carga, velocidad y condiciones de alta temperatura del engrane. Se pueden agregar aditivos de extrema presión.

Escoriado localizado

Similar al escoriado moderado.

FATIGA SUPERFICIAL

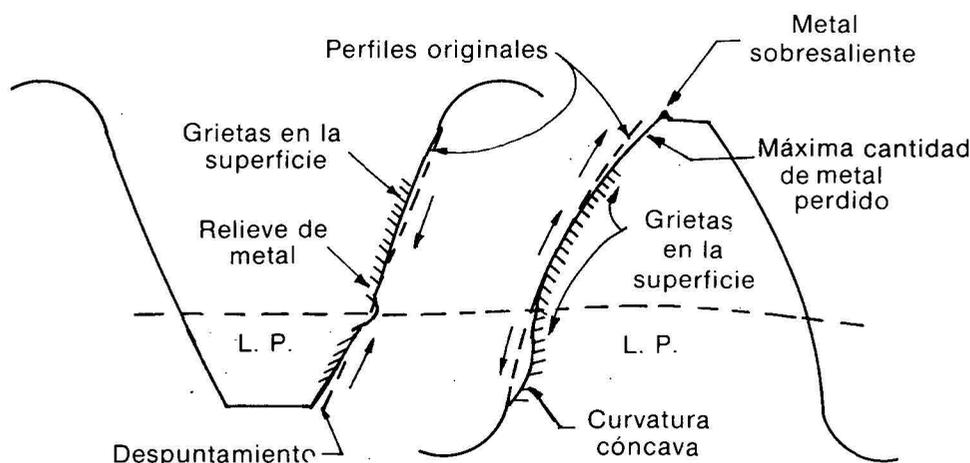
Esta falla ocurre incluso con lubricación adecuada y una película ininterrumpida de aceite; es el resultado de esfuerzos repetidos en la superficie del engranaje hasta que se forma una grieta en la superficie o cerca de ella. La grieta aumenta progresivamente hasta que se rompe un pequeño pedazo del engranaje y deja una picadura en la superficie. Como esto ocurre después de muchos millones de ciclos de esfuerzo, las fallas por fatiga por lo general resultan evidentes solo después de prolongados servicios. Esto contrasta con el desgaste y la escoriación que pueden comenzar en forma rápida.

Los engranajes que funcionan con carga desarrollan esfuerzos superficiales constantes y si las cargas tienen la suficiente intensidad y el ciclo de esfuerzos se repite con bastante frecuencia, sobreviene la fatiga en algunos fragmentos de metal en la superficie, dando origen a las picaduras. La falla por fatiga muestra la superficie marcada por pequeñas picaduras que se pueden descubrir al frotar la superficie con un objeto afilado. En los casos avanzados, las picaduras se extienden y se conectan produciendo fallas por escoriación.

Hay diversos lugares propicios para el picado. Los piñones helicoidales de dureza media y de 20 o más dientes se pican a lo largo de la línea primitiva. La rueda también se puede picar, pero si tiene una dureza cercana a la del piñón y tiene el mismo tratamiento térmico, será este último el que presente mayor picado; hay dos razones para esto: el piñón es ordinariamente el conductor y los sentidos del deslizamiento se alejan de la línea primitiva, no así en el conducido donde estos se acercan hacia la línea primitiva.

La Figura 18 muestra cómo el movimiento deslizante en el conductor tiende a empujar el metal hacia afuera de la línea primitiva. Esta deja la línea primitiva más alta y también tiende a estrechar el metal en ella. En la rueda, el deslizamiento tiende a comprimir el metal en la línea primitiva. Las grietas que se forman cuando una superficie es severamente cargada tienden a intersectarse en la línea primitiva del conductor, mientras en el conducido no sucede esto. Además, el piñón, siendo más pequeño, tiene más ciclos de operación que la rueda. La pendiente de la curva de fatiga hace la parte con mayor número de ciclos la más apta para fallar. Cuando la rueda conduce al piñón y tiene su misma dureza, ésta tiende a picarse primero.

En las puntas y raíces de los dientes hay dos pares de éstos compartiendo la carga. En muchos casos el máximo esfuerzo de Hertz calculado (esfuerzo compresivo) ocurrirá en la posición más baja del



Note como coinciden el daño y los sentidos de deslizamiento.
Daño típico de perfiles del diente.

FIGURA 18. Efectos de los sentidos de deslizamiento sobre la superficie del diente.

piñón donde una pareja de dientes soporta toda la carga. Si este esfuerzo es mucho mayor que el de la línea primitiva, puede ocurrir picado en esta región. Debido a los efectos del deslizamiento, las condiciones en este punto no son muy difíciles y el picado no partirá de aquí a menos que la diferencia entre los esfuerzos de este punto y la línea primitiva sea significativa.

El esfuerzo de Hertz máximo en la rueda ocurrirá en su adendo, ya que es el que entra en contacto con el dedendo del piñón. El piñón suele tener mayor tendencia a picarse en el dedendo y la rueda en el adendo.

Los ensayos hechos muestran que las superficies de los engranajes son más aptas a fallas cuando el deslizamiento tiene una dirección negativa que cuando es positiva (véase Figura 10). El deslizamiento negativo ocurre en el dedendo del piñón y la rueda, mientras que en las regiones del adendo el deslizamiento es positivo.

Para piñones pequeños el radio de curvatura del perfil de evolvente en el círculo base es cero. Significa que los esfuerzos en la superficie tienden a infinito (aun cuando hay dos pares de dientes soportando la carga). El resultado de transmitir una carga elevada cerca del círculo base es un rápido martilleo y el picado del metal hasta que esta región crítica no soporte una carga apreciable.

La presencia de picaduras generalmente significa que el diseño del engranaje no corresponde a la capacidad de carga que se transmite; en casos como éste se puede aumentar la dureza superficial o cambiar el material por uno nitrurizado de alta capacidad de resistencia o por otro carburado superficialmente. En la mayoría de los casos se hace necesario un rediseño del engranaje. La fatiga superficial puede encontrarse en las siguientes formas:

Picado inicial

Se presenta en pequeñas áreas sobreesforzadas y cuando se redistribuye la carga, el picado cesa. Se

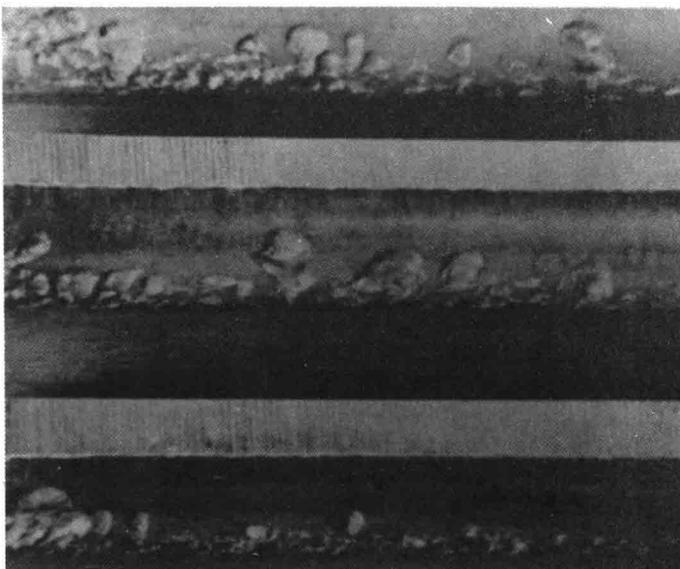


FIGURA 19. Picado destructivo.

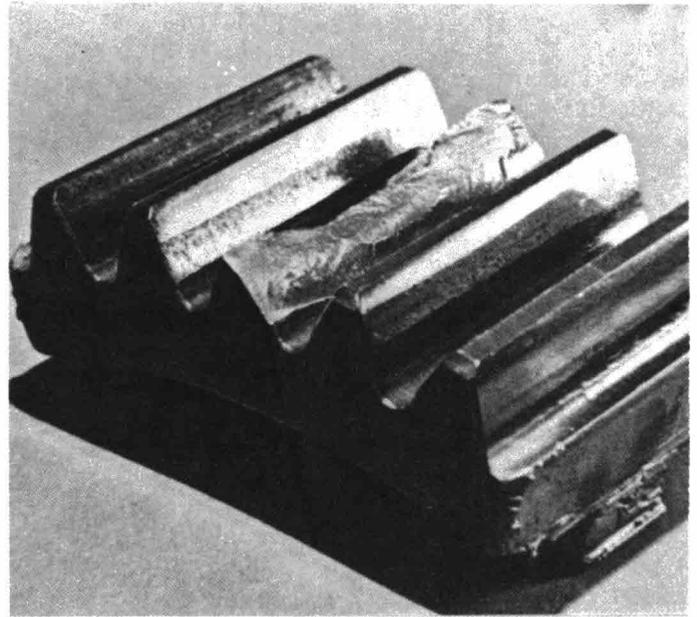


FIGURA 20. Fractura por picaduras.

puede presentar por errores en el perfil del diente, irregularidades superficiales o pequeños desalineamientos del diente. Estas causas se pueden corregir fácilmente.

Picado destructivo

Cuando se deja progresar el picado inicial, considerables porciones del diente desarrollan cráteres de picado de variadas formas y tamaños; esto resulta de sobrecargas superficiales que no se alivian con el picado inicial. Este picado destruye el perfil del diente (Figura 19) originando grietas de fatiga por flexión que conducen a la fractura del diente (Figura 20). Esta falla se evita manteniendo la carga superficial abajo del límite de endurencia del material o aumentando la dureza.

Desprendimiento o desconchado

Es una falla por fatiga metalúrgica que se manifiesta con el desprendimiento de pedazos de metal relativamente grandes de las superficies de los dientes. La superficie metálica de un diente de engrane tiende a deformarse elásticamente bajo la carga transmitida y a formar ondulaciones que se desplazan adelante y atrás de la línea de contacto. Estas ondulaciones se pueden observar cuando se ven funcionar rodillos de hule cargados; con las superficies metálicas ocurre una acción semejante. El material está sujeto a esfuerzos de corte, de compresión y de tensión y el primero alcanza su valor máximo a cierta distancia por debajo de la superficie. Generalmente estos esfuerzos se encuentran dentro de los límites estimados por el diseño. Sin embargo, bajo ciertas condiciones, como desalineamiento o sobrecargas, los esfuerzos de la subsuperficie pueden exceder el límite de resistencia del material. Como resultado, se desarrollan en la superficie cuarteaduras por fatiga que originan el desprendimiento de pedazos de metal, dejando picaduras de tamaño considerable. Los desprendimientos ocurren con mayor frecuencia en un área relativamente pequeña abajo de la línea de

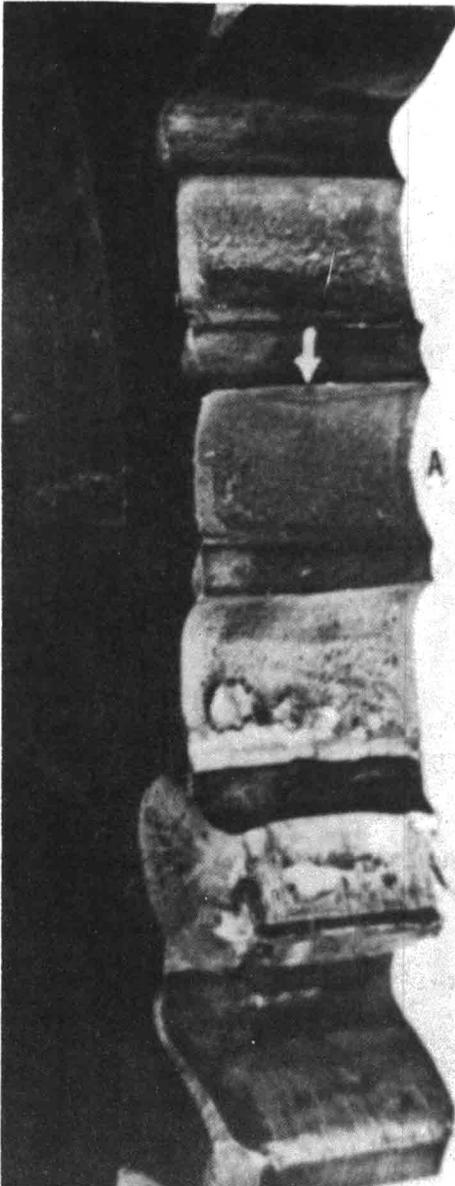


FIGURA 21. Fatiga y sobrecarga.

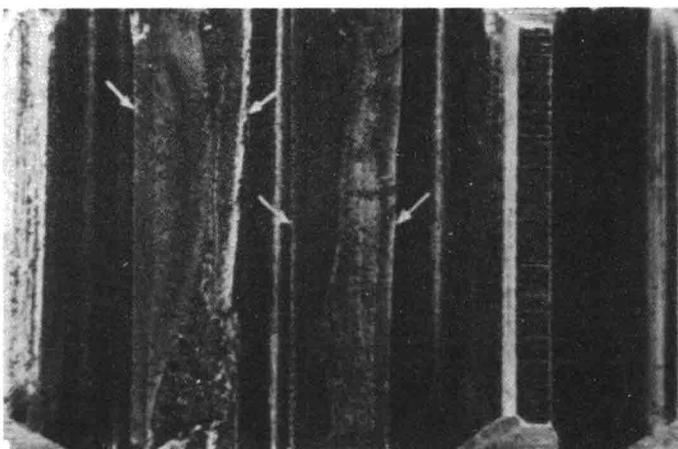


FIGURA 22. Fatiga.

paso. En esta área del piñón los esfuerzos superficiales son mayores ya que un número menor de dientes se encuentra engranado; además, esta misma área se ve sujeta después a considerables esfuerzos de tensión ocasionados por una carga lineal.

En los engranajes cementados al carbono y templa-

dos, las picaduras y el desconchado revisten gravedad. La probabilidad de desconchado es mayor que la de picado cuando se les somete a fatigas severas. Si se desarrollan picaduras o desconchado en un engranaje de temple superficial, estas progresan más rápido que en engranajes de dureza rectificable porque el daño se produce a lo largo del límite entre la superficie templada y el núcleo.

Rotura de la superficie templada

Se puede identificar en una etapa inicial por grietas longitudinales en la superficie de trabajo del diente, aproximadamente paralelas a la línea de paso. La rotura de la superficie se debe a fallas del material del núcleo. La progresión de esta falla es muy rápida ya que en gran parte el material del núcleo se ha fatigado antes de que aparezcan las grietas en la superficie. Los engranajes con indicio de esta falla se deben cambiar.

Para solucionar esta falla se aconseja aumentar la profundidad efectiva de la capa endurecida, aumentar la dureza en el núcleo del material, cambiar el material básico en el tratamiento térmico o variar el diseño si existen altos esfuerzos residuales.

FLUJO PLASTICO

Aunque el flujo plástico puede tomar varias formas, siempre es el resultado de cargar el engranaje por encima de la carga de deformación permanente del metal en la zona de contacto. Si las cargas de compresión son elevadas o la vibración causa cargas intermitentes altas que hacen las veces de golpe de martillo, la superficie de los dientes puede laminarse o descamarse. Esta falla se presenta como un flujo severo de material superficial que resulta en la formación de rebordes de altura irregular en los extremos y/o en las puntas de los dientes. Esta falla está asociada con la plasticidad del material del engranaje, aunque frecuentemente ocurre en engranajes con capa endurecida fuertemente cargados y engranajes endurecidos completamente.

ROTURA DE DIENTES

Esta falla resulta de sobrecargas o por ciclos de esfuerzo de los dientes más allá del límite de durancia del material. Cuando un diente se rompe por fatiga debe haber evidencia de un punto focal donde comienza la fractura. A veces una raya o una entalla en la raíz pueden coincidir con ese punto focal; una inclusión o una grieta debida al tratamiento térmico también se pueden encontrar allí. Si se halla algún defecto en ese punto, se debe suponer que, al menos en parte, es la causa de la falla.

Cuando un diente se rompe por un choque repentino o una sobrecarga, la fractura suele tener una apariencia fibrosa. Aún cuando el diente sea totalmente endurecido, la fractura se verá como las fibras de un material plástico que ha sido torcido. Cuando se rompen dientes consecutivos, suele

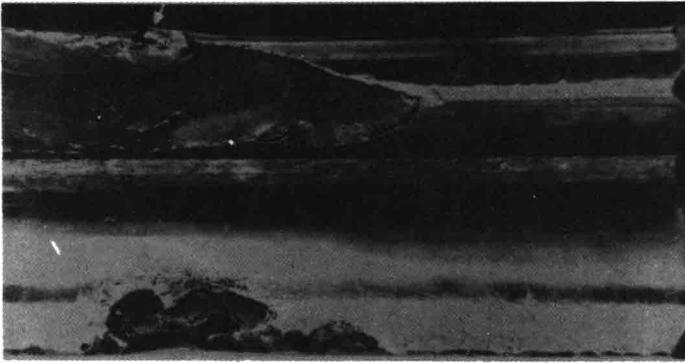


FIGURA 23. Foco de fatiga.

sucedier que uno o dos se rompen por fatiga; como el engranaje continúa girando bajo torque, el golpe de la rueda que engrana al saltar en el boquete dejado por el diente fatigado, romperá otros dientes adicionales. Mirando varios dientes fracturados se puede definir cuál falló por fatiga (presentará una apariencia lisa) y cuáles fallaron luego por sobrecarga (apariencia fibrosa).

La Figura 21 muestra varios dientes fracturados en una rueda. Como se ve por la textura fina del diente **A** falló primero, la fatiga comenzó en la raíz del filete. Luego fallaron los dientes adyacentes. La Figura 22 muestra dos dientes de una rueda loca fracturados debido a que la fatiga comenzó en ambos lados del diente. El diente de la derecha falló primero porque el área de ruptura final es muy pequeña. La Figura 23 muestra el foco de inicio de la fatiga indicado por la flecha.

Las fracturas de los dientes ordinariamente parten de la raíz. Una viga en voladizo es más débil en su base. El picado en la línea de paso puede ser tan severo que cause una fractura que comience en esta línea.

Veamos algunas formas en que se puede presentar la rotura de los dientes:

Fractura por fatiga

Se puede reconocer por la presencia de curvas semi-elípticas con marcas perpendiculares en la superficie de la fractura que irradian desde el foco o núcleo de la fractura (Figura 23). Son el resultado de cargas periódicas suficientemente elevadas para agrandar una grieta, pero no tanto como para que una sola de ellas sea capaz de provocar individualmente la fractura del diente.

Fractura por fatiga de flexión

La Figura 24 muestra que los dientes trabajan como una viga en cantilever, por lo cual los esfuerzos máximos se presentan en la raíz del diente, del lado que trabaja a tensión. Las fracturas generalmente resultan de una fisura originada en la raíz del diente, debido a entalladuras, inclusiones, pequeñas fisuras de tratamiento térmico y esfuerzos residuales.

Los elementos del diente deben diseñarse de modo que la carga transmitida resulte dentro del límite de endurencia del material, o escoger un material con mayor resistencia, o aumentar el área de raíz del

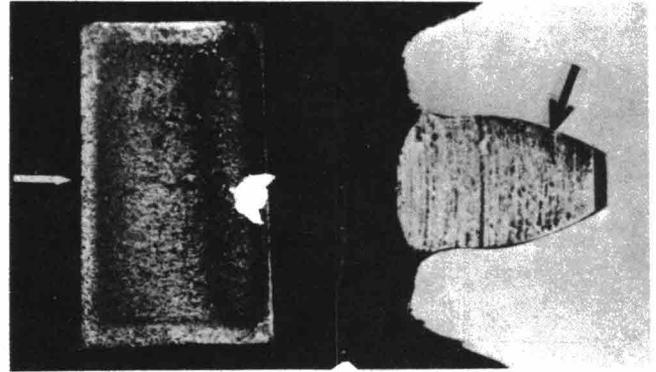


FIGURA 24. Fatiga por flexión;

diente (mayor radio de acordonado) y mejorar su acabado. Con esto se puede evitar la fatiga.

Rotura por sobrecarga

Se presenta como una rotura tenaz y fibrosa, mostrando evidencia de que el material ha sido rápidamente arrancado o rasgado. La rotura del diente es causada por una sobrecarga que excede la resistencia a la tensión del material; esto viene a parar en una rotura por fatiga de corto ciclo, que generalmente comienza sobre el lado de tensión de la raíz del filete.

Hay casos en que la sobrecarga se produce por desalineación de los engranajes. En estos casos la fractura se origina en un extremo del diente y ocurre en línea diagonal. La desalineación es una causa común de dientes rotos en engranajes rectos, helicoidales y cónicos. A veces la desalineación se debe a cojinetes flojos o averiados. Los cojinetes flojos causarán la deflexión del eje y finalmente una fractura del diente debido a cargas en sus extremos.

En todos los casos de fracturas se debe hacer un detenido análisis para encontrar las causas que la originaron y aplicar los correctivos del caso.

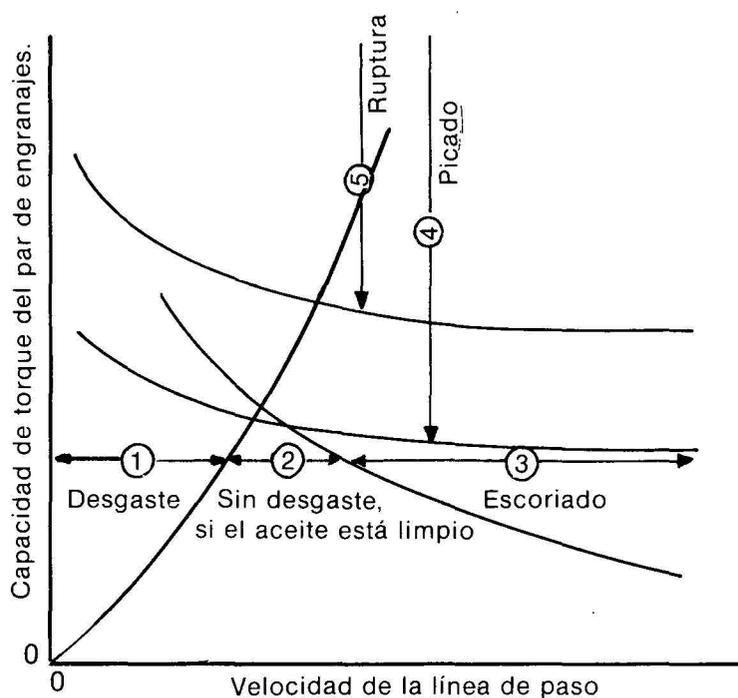
FALLAS COMBINADAS

En general las fallas no ocurren separadamente en la forma descrita hasta ahora, sino que existen otros factores que hacen que se presenten dos o más fallas al mismo tiempo o que haya una cadena de fallas que conduzcan a la rotura o inutilización del engranaje. En la Figura 17 podemos ver un ejemplo de este tipo de fallas. Se presenta el desgaste por escoriado, el desconchado, el picado en la línea primitiva y el flujo plástico en forma de escamas de pescado.

CONCLUSIONES

Como conclusión de este artículo podemos analizar la Figura 25 donde se muestra la influencia de la velocidad y la carga de operación sobre los cuatro tipos de tallas que gobiernan la capacidad de operación de un tren de engranajes: desgaste, escoriado, picado y rotura de los dientes.

Las curvas del diagrama muestran como la ocurrencia de las fallas se ve afectada por la velocidad y la carga de operación. La posición de las curvas es



- Descripción: Región 1.— Carencia de película de aceite debido a baja velocidad
 2.— Buena película de aceite
 3.— Demasiado calor generado
 4.— Aquí, ocurrirá picado con el tiempo.
 5.— Ocurrirá ruptura del diente con el tiempo.

FIGURA 25. Regiones de falla del engranaje.

aproximada y en general es determinada para un tren por las variables de diseño del engrane, por las características del lubricante y la temperatura de operación.

El desgaste ocurre cuando se rompe la película hidrodinámica de aceite, no se forma por la viscosidad, la velocidad es muy baja o la carga muy alta. En la región 1 a medida que aumenta la velocidad, la carga admisible también lo hace. Se puede obtener mayor capacidad de carga aumentando la viscosidad del lubricante o bajando la temperatura de operación. El efecto de estos cambios es modificar la pendiente de la línea de desgaste. Con aditivos antidesgaste la pendiente se eleva. El desgaste tiene más probabilidades de presentarse en trenes de elevada relación de transmisión operando a velocidades relativamente bajas.

Los engranajes sinfin-corona casi siempre trabajan en la región de desgaste (véase Figura 12), pero la selección adecuada de los materiales puede hacer que la línea de desgaste se incline lo suficiente para permitir una operación satisfactoria. La máxima elevación de temperatura admisible frecuentemente restringe los límites de operación más que el desgaste. Debido a que la carga permisible sin desgaste aumenta con la velocidad, el calor de fricción generado aumenta con el cuadrado de la velocidad. Esto produce recalentamiento de los engranajes y del aceite, una viscosidad rebajada y por consiguiente disminución de la carga admisible.

Para minimizar este efecto, a los lubricantes para sin fin-corona se les puede agregar aditivos para reducir la fricción.

La región 2 es el lugar ideal para el funcionamiento de una transmisión: la velocidad es lo suficientemente alta para desarrollar una buena película. Si el aceite no tiene abrasivos extraños, no es corrosivo y se adhiere apropiadamente a la superficie, un engranaje puede funcionar casi indefinidamente en esta región sin que se presente desgaste.

El escoriado (región 3) ocurre cuando el calor generado por el deslizamiento de las superficies de los dientes en la película de aceite es tan alto que la rompe. Sin la película de aceite las superficies de los dientes frotan directamente en cada una de las otras y el calor de fricción es tan grande que causa el soldamiento de las dos superficies. Dado que el calor es la causa, una alta velocidad disminuye la carga requerida para producir la falla.

A medida que el paso es más grueso en los engranajes, el deslizamiento aumenta en las puntas del diente; por consiguiente, estos engranajes son más susceptibles al picado que los de paso fino, y dado que los pasos finos tienden a disminuir el torque de rotura, el escoriado llega a ser casi imposible con dientes muy finos. Al aumentar el tamaño de los engranajes debería ser más baja la carga, para una potencia dada; pero los factores de velocidad que afectan el escoriado no cambian mucho; por eso los engranajes grandes pueden

transmitir más potencia sin escoriado para la misma velocidad de rotación.

Algunos resultados experimentales muestran que la resistencia al escoriado se eleva aumentando el ángulo de presión, utilizando dientes más altos (mayor traslape de los dientes) o aumentando el ángulo de hélice y rebajando los extremos de los dientes. Cuando se usan adendos desiguales como en las relaciones de engrane elevadas, donde las modificaciones del adendo se utilizan para igualar la resistencia de los dientes, se presenta una disminución de la resistencia al escoriado. Una combinación de materiales que tengan resistencia al desgaste, al rayado, mejores acabados superficiales y superficies recubiertas, ayudan a elevar la resistencia al escoriado.

Si se aumenta la temperatura de operación en un tren, se baja la línea de escoriación; un aumento de la viscosidad del aceite la puede elevar.

El picado y rompimiento de los dientes (regiones 4 y 5) son fallas por fatiga del material, de modo que la pendiente de sus líneas decrece suavemente a medida que las velocidades aumentan. La posición relativa de las dos líneas es función del diseño de las ruedas. Para pasos gruesos los dientes son fuertes y de alto límite de rotura. Si se aumenta el paso (dientes más finos), se debilitan los dientes, así que para la misma carga de los engranajes gruesos, los de paso fino tienden a romper el diente antes de que

se pique. El tamaño de los engranajes debe ser considerado junto con el paso; con engranajes grandes se puede transmitir el mismo torque con menos carga tangencial en el diente, admitiendo que se usen pasos más finos.

La resistencia del material afecta al picado y la rotura. La resistencia a la rotura del diente aumenta en proporción a la dureza; sin embargo, los aceros endurecidos superficialmente son una excepción a esto. El máximo esfuerzo de flexión en un diente ocurre en la raíz.

Un engranaje totalmente endurecido es más débil que uno endurecido superficialmente cuando las durezas en la raíz son las mismas debido a que la resistencia al impacto del diente endurecido totalmente es menor que el de endurecido superficial con un núcleo blando y tenaz. La relación entre núcleo endurecido y altura de capa es importante dado que también una capa poco profunda o núcleo dúctil pueden conducir a fallas por fatiga subsuperficial muy similares al picado; son fallas por aplastamiento de la capa endurecida.

El lubricante no afecta la línea de rotura y solo levemente la de picado. Un aumento de la viscosidad puede elevar la línea límite de picado o un cambio radical en la composición del aceite puede alterar los efectos superficiales lo suficiente para aumentar la vida al picado.

BIBLIOGRAFIA

1. Niemann, G. *Tratado teórico práctico de elementos de máquinas*. Labor, Barcelona 1973.
2. Deutschman, Aaron D. *Machine Design theory and practice*. McMillan Publishing Co. New York, 1975.
3. AGMA. *Nomenclature of Gear tooth failure modes*, 1980.
4. Cowie, Alexander. *Kinematics and design of mechanisms*. International text-book Company, Pennsylvania 1961.
5. Dudley, Darle W. *Manual de engranajes*. Cia. Edit. Continental S.A., México, 1980.
6. Dudley, Darle W. *Practical Gear Design*. McGraw Hill, New York, 1954.
7. Wulpy, Donald J. *How Components fail*. ASME, E.U.A., 1966.
8. Benitez, Acosta, Márquez, Tobacia. *Transmisión de potencia por engranajes*. Proyecto de Grado. Universidad Nacional, 1982.
9. Caterpillar. *Diagnóstico de fallas en engranajes*. E.U.A, 1979.
10. Mobil. *Gear tooth Failures*. Technical bulletin
11. Mabie, Hamilton H. *Mecanismos y dinámica de maquinaria*, Limusa, México 1978.
12. A.S.M., *Metals Handbook. Fractography and Atlas of Fractographs*, 1974.
13. A.S.M., *Metals Handbook. Failure Analysis and Prevention*, 1975.
14. Benitez, Luis E. *Características y funcionamiento de los engranajes de evolvente*. Universidad Nacional de Colombia, 1984