
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA



LABORATORIO DE TECNOLOGÍA DE MATERIALES

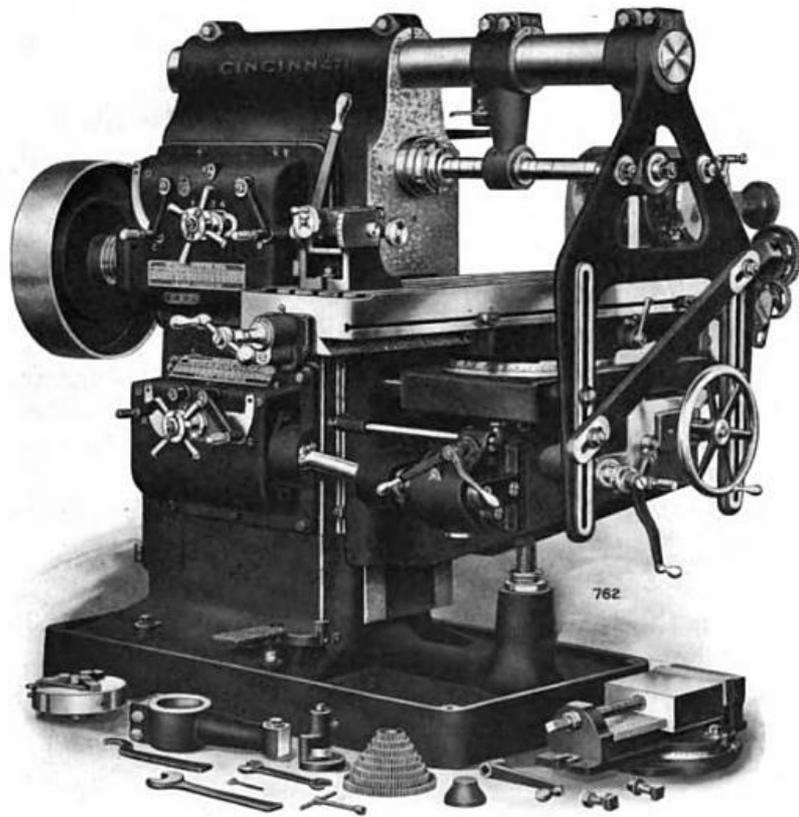
LECTURAS DE INGENIERÍA 22

ENGRANES: HISTORIA, FABRICACIÓN Y FALLAS



M. en I. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez.

CUAUTITLÁN IZCALLI 2013



Fresadora horizontal Cincinnati, a principios del siglo XX

ÍNDICE

Pág.

INTRODUCCIÓN	1
---------------------------	---

CAPITULO 1 HISTORIA DE LOS ENGRANES

1.1. DEFINICIÓN	2
1.2. HISTORIA	3

CAPITULO 2 EVOLUCIÓN DE LOS MATERIALES PARA LOS ENGRANES

2.1. BOSQUEJO HISTÓRICO	28
2.2 MATERIALES	29
2.3. ACEROS PARA LA FABRICACIÓN DE ENGRANES	29
2.3.1. Aceros endurecidos en forma superficial	30
2.3.2 Carburización y nitruración	30
2.4. HIERRO FUNDIDO Y BRONCE COMO MATERIALES PARA FABRICAR ENGRANAJES	31
2.5. MATERIALES PLÁSTICOS PARA ENGRANAJES	31

CAPITULO 3 FABRICACIÓN DE ENGRANES

3.1. PRODUCCIÓN DE ENGRANAJES	33
3.2. FABRICACIÓN DE ENGRANES SIN ARRANQUE DE VIRUTA	35
3.2.1. Conformado por fundición	35
3.2.2. Conformado por troquelado	36
3.2.3. Conformado por pulvimetalurgia	36
3.2.4. Extrusión	37
3.2.5. Prototipado rápido	38
3.3. PRODUCCIÓN DE ENGRANAJES POR TALLADO	40
3.4. PROCEDIMIENTOS DE TALLA POR REPRODUCCIÓN O COPIA	40
3.4.1. Cepillado	40
3.4.2. Fresado	41
3.5. PROCEDIMIENTOS DE TALLA POR GENERACIÓN	42
3.5.1. Herramientas para engranes	43
3.5.2. Generación con fresa madre (HOB)	43
3.5.3. Brochado	46
3.5.4. Generación con piñón generador	50
3.5.5. Desbarbado (Rasurado)	52
3.5.6. Rolado	55
3.5.7. Generación con cremallera	57

3.6. PROCESOS DE ACABADO SUPERFICIAL	58
3.6.1. Rectificado	58
3.6.2. Lapeado	60
3.6.3. Pulido	60
3.6.4. Bruñido	60

CAPITULO 4 DESGASTE DE LOS ENGRANES

4.1. DESGASTE	62
4.1.1. Desgaste pulimentado	62
4.1.2. Desgaste moderado y excesivo	63
4.1.3. Desgaste abrasivo	64
4.2. FATIGA SUPERFICIAL	67
4.3. FLUJO PLÁSTICO	74
4.4. ROTURA DE DIENTES	74
4.5. FALLAS COMBINADAS	79

CAPÍTULO 5 LUBRICACIÓN DE ENGRANAJES

5.1. ENGRANAJES ABIERTOS	83
5.2. ENGRANAJES CERRADOS	84
5.3. PRINCIPIOS BÁSICOS DE LUBRICACIÓN	85
5.4. LUBRICACIÓN DE ENGRANAJES	86
5.4.1. Sistemas de lubricación centralizados	86
5.4.2. Lubricación por baño o salpique	87
5.4.3. Engranajes lubricados por aspersión	88
5.4.4. Sistemas alimentados por gravedad o goteo	89
5.4.5. Lubricación por neblina de aceite	89
5.5. PELÍCULAS LUBRICANTES	90
5.5.1. Película fluida	90
5.5.2. Película delgada	92
5.5.3. Película sólida	92
5.6. TIPOS DE LUBRICANTES PARA ENGRANAJES	93
5.7. CLASIFICACIÓN SAE DE ACEITES PARA TRANSMISIÓN (SAE J306)	95
5.8. CLASIFICACIÓN ISO DE VISCOSIDAD DE ACEITES INDUSTRIALES	96
5.9. LINEAMIENTOS AGMA PARA LUBRICACIÓN DE ENGRANAJES	97
5.10. COMPARACIÓN ENTRE CLASIFICACIONES	98
5.11. INGENIERÍA DE LUBRICACIÓN	99
5.12. 10 MITOS SOBRE LUBRICACIÓN DE ENGRANAJES	101

BIBLIOGRAFÍA	106
---------------------------	------------

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la Ciencia y Tecnología actuales implican la generación y aplicación del conocimiento en muchas áreas y consecuentemente el estudiante de Ingeniería debe estar al tanto de los mismos, sin embargo, debido a la actualización no tan frecuente de los programas y planes de estudio y por las limitaciones propias de semestres de apenas cuatro meses de actividades académicas, es difícil la actualización del estudiante en dichos conocimientos, además, dejar trabajos de investigación no funciona ya de la manera deseada, ya que en muchas ocasiones se descargan de Internet y se imprimen sin leerlos siquiera, de ese modo, surge la idea de crear una serie de apuntes de temas básicos para el ingeniero actual como son: el endurecimiento superficial del acero, las fundiciones de hierro, la tribología y el desgaste, la superplasticidad, los avances en la industria siderúrgica, superaleaciones, nanomateriales, etc.

En esta lectura (ya la número 22) se presenta un breve resumen histórico acerca del desarrollo de los engranes, sus principales métodos de manufactura, así como un resumen de las principales formas de falla y métodos de lubricación.

Como siempre, agradeceré sus correcciones y comentarios.

ATTE.

Mtro. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez

CAPITULO 1

HISTORIA DE LOS ENGRANES

1.1. DEFINICIÓN

Se denomina **engranaje** o **ruedas dentadas** al mecanismo utilizado para transmitir potencia de un componente a otro dentro de una máquina. Los engranajes están formados por dos ruedas dentadas, de las cuales la mayor se denomina “engrane” y la menor “piñón”. Un engranaje sirve para transmitir movimiento circular mediante contacto de ruedas dentadas. Una de las aplicaciones más importantes de los engranajes es la transmisión del movimiento desde el eje de una fuente de energía, como puede ser un motor de combustión interna o un motor eléctrico, hasta otro eje situado a cierta distancia y que ha de realizar un trabajo. De manera que una de las ruedas está conectada por la fuente de energía y es conocido como engrane motor o piñón y la otra está conectada al eje que debe recibir el movimiento del eje motor y que se denomina engrane conducido. Si el sistema está compuesto de más de un par de ruedas dentadas, se denomina 'tren'.

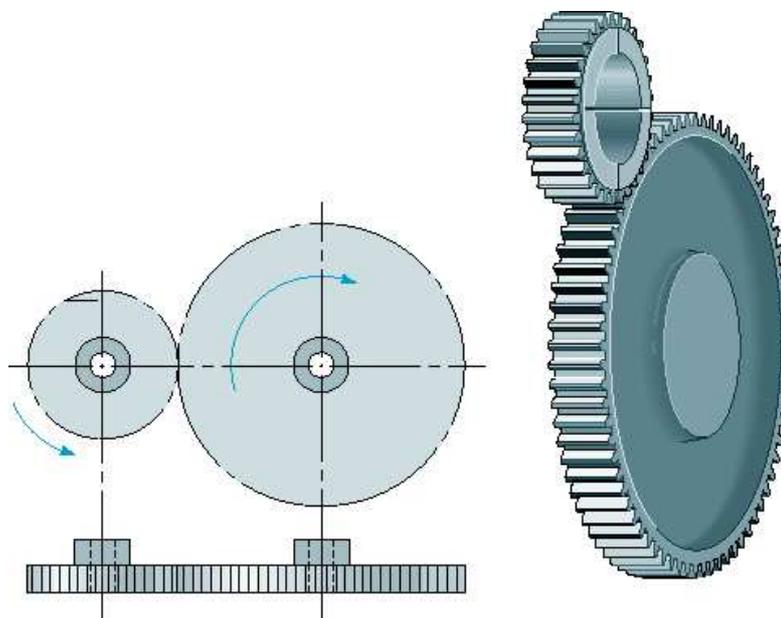


Figura 1.1. Piñón y engrane

La principal ventaja que tienen las transmisiones por engranaje respecto de la transmisión por poleas es que no patinan como las poleas, con lo que se obtiene exactitud en la relación de transmisión.

1.2. HISTORIA

Desde épocas muy remotas se han utilizado cuerdas y elementos fabricados en madera para solucionar los problemas de transporte, impulsión, elevación y movimiento. Nadie sabe a ciencia cierta dónde ni cuándo se inventaron los engranajes. La literatura de la antigua China, Grecia, Turquía y Damasco mencionan engranajes pero no aportan muchos detalles de los mismos.



Figura 1.2. Molde chino para fabricar engranajes de bronce (siglos II a. C. a III d. C.).

Aristóteles en el siglo IV a.C mencionó en sus escritos que en muchas aplicaciones se usaban ruedas dentadas. El origen clásico de los tornillos sinfin se atribuyen a Arquímedes (287-212 a.C). Vitruvius, un ingeniero militar describe en sus escritos que datan del año 28 a.C un sinnúmero de aplicaciones de los engranes, algunas de las cuales se muestran en las figuras 1.3 y 1.4.

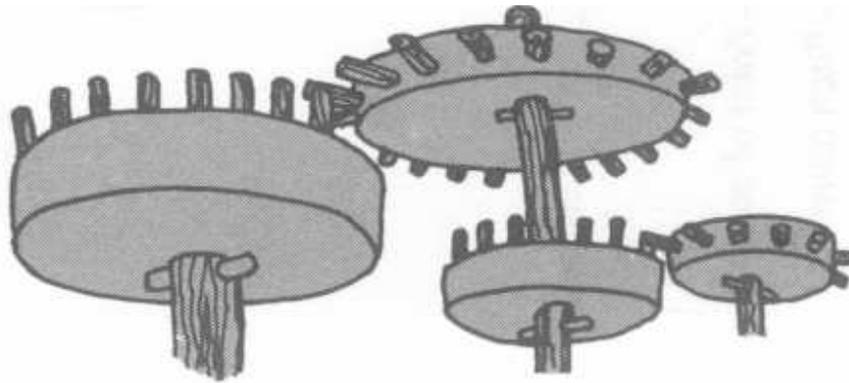


Figura 1.3. Engranés primitivos hechos de madera.

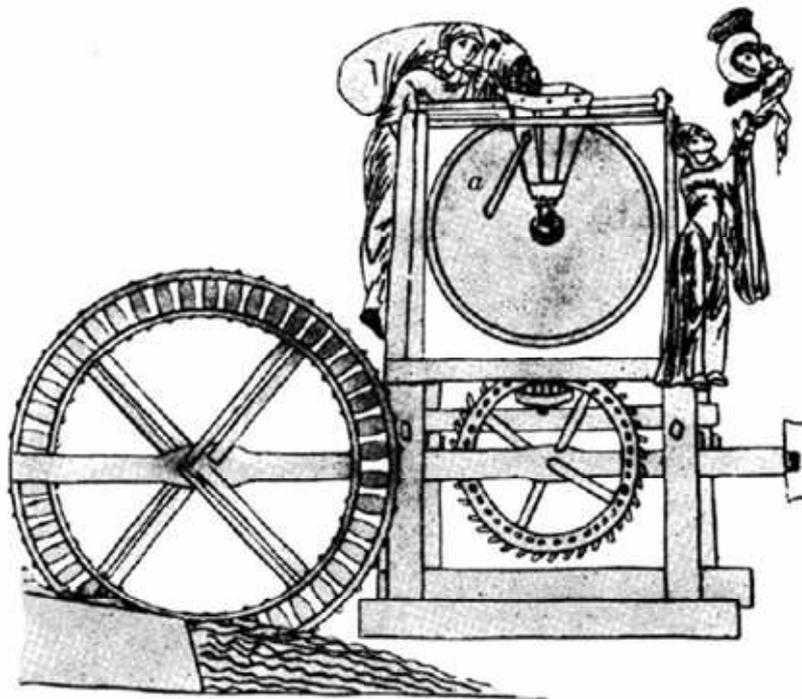


Figura 1.4. Rueda de agua y molino de granos descrito por Vitruvius en el año 40 a.C

El mecanismo de engranajes más antiguo de cuyos restos se disponen es el mecanismo de Anticitera. Se trata de una calculadora astronómica datada entre el 150 y el 100 a.C. y compuesta por al menos 30 engranajes de bronce con dientes triangulares. Presenta características tecnológicas avanzadas como por ejemplo trenes de engranajes

epicicloidales que, hasta el descubrimiento de este mecanismo, se creían inventados en el siglo XIX. Por citas de Cicerón se sabe que el de Anticitera no fue un ejemplo aislado sino que existieron al menos otros dos mecanismos similares en esa época, construidos por Arquímedes y por Posidonio. Por otro lado, a Arquímedes se le suele considerar uno de los inventores de los engranajes porque diseñó un tornillo sin fin, figura 1.6.



Figura 1.5. Mecanismo de Anticitera.

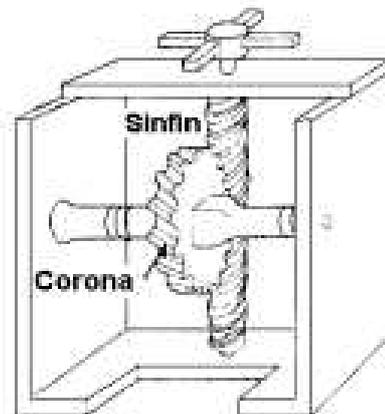


Figura 1.6. Diseño de engrane corona y tornillo sinfín atribuido a Arquímedes

En China también se han conservado ejemplos muy antiguos de máquinas con engranajes. Un ejemplo es el llamado "carro que apunta hacia el Sur" (120-250 d.C.), figura 1.7. inventado por el ingeniero mecánico chino Ma Jun (200–265). Este aparato consistía en un vehículo con

ruedas que hacía uso de un complejo sistema de engranajes diferenciales, utilizados en los automóviles actuales para aplicar cantidades iguales de torsión a las ruedas mientras éstas giran a velocidades distintas cuando el vehículo gira. Los engranajes diferenciales se incorporaron con el fin de mantener una figura de accionamiento mecánico apuntando hacia una posición fija en el Sur. Así, el dispositivo utilizaba mecánica avanzada en lugar del magnetismo de una brújula, con vistas a navegar y orientarse. Algo anteriores, de en torno a 50 d. C., son los engranajes helicoidales tallados en madera y hallados en una tumba real en la ciudad china de Shensi.



Figura 1.7. Carro que apunta hacia el sur.

No está claro cómo se transmitió la tecnología de los engranajes en los siglos siguientes. Es posible que el conocimiento de la época del mecanismo de Anticitera sobreviviese y contribuyese al florecimiento de la ciencia y la tecnología en el mundo islámico de los siglos IX al XIII. Por ejemplo, un manuscrito andalusí del siglo XI menciona por vez primera el uso en relojes mecánicos tanto de engranajes epicíclicos como de engranajes segmentados. Los trabajos islámicos sobre astronomía y mecánica pueden haber sido la base que permitió que volvieran a fabricarse calculadoras astronómicas en la Edad Moderna. En los inicios del Renacimiento esta tecnología se utilizó en Europa para el desarrollo de sofisticados relojes,

en la mayoría de los casos destinados a edificios públicos como catedrales como los que se muestran en las figuras 1.8 y 1.9

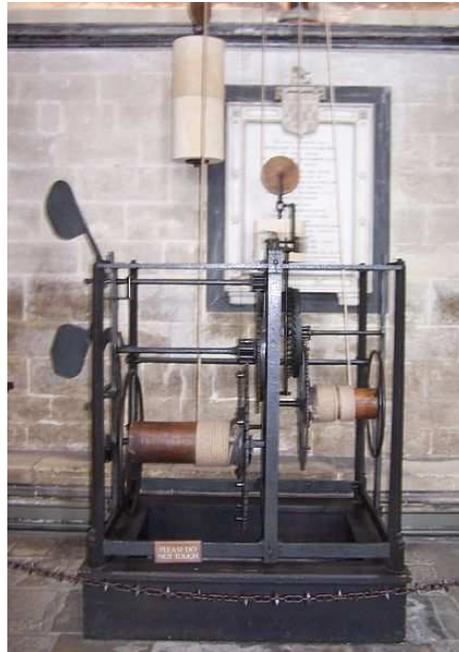


Figura 1.8. Reloj restaurado de la catedral de Salisbury, (1386)

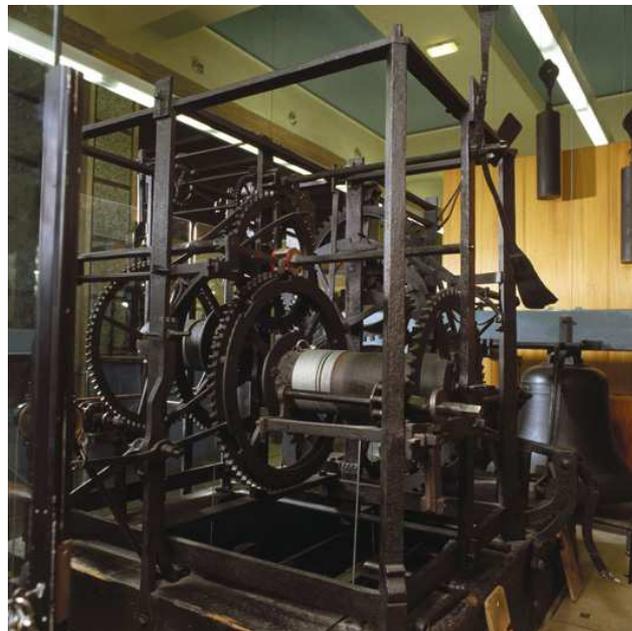


Figura 1.9. Reloj de la Catedral de Wells (1392) preservado en el Museo de Ciencias de Londres

En uno de los grabados del artista alemán Albrecht Dürer se puede ver un vehículo diseñado para el emperador Maximiliano I durante el siglo XV y que se muestra en la figura 1.10. El vehículo es conducido por tornillos sinfín en las cuatro ruedas, mostrando claramente que conocía el concepto de engranaje y que lo ayudó a reproducir su diseño de manera confiable.

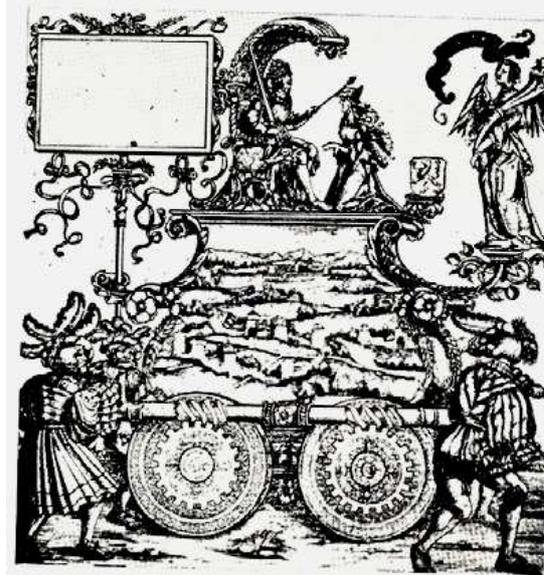


Figura 1.10. Carro utilizando tornillo sinfín

Leonardo da Vinci, muerto en Francia en 1519, dejó numerosos dibujos y esquemas de algunos de los mecanismos utilizados hoy diariamente, figura 1.11, incluidos varios tipos de engranajes de tipo sinfín-corona.

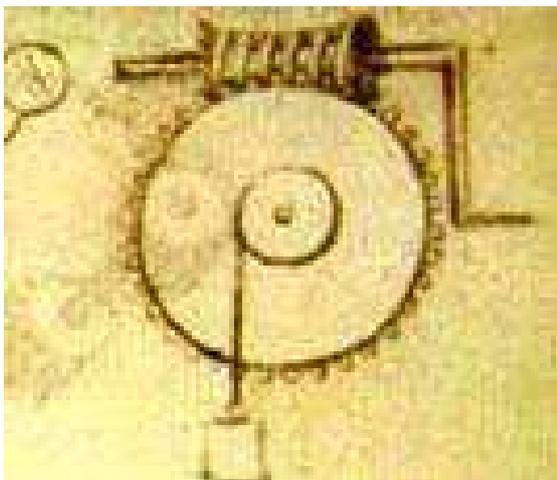


Figura 1.11. Engranaje sinfín-corona de Leonardo da Vinci

Los primeros datos que existen sobre la transmisión de rotación con velocidad angular uniforme por medio de engranajes, corresponden al año 1674, cuando el famoso astrónomo danés Olaf Roemer (1644-1710) propuso la forma o perfil del diente en epicicloide, figura 1.12.

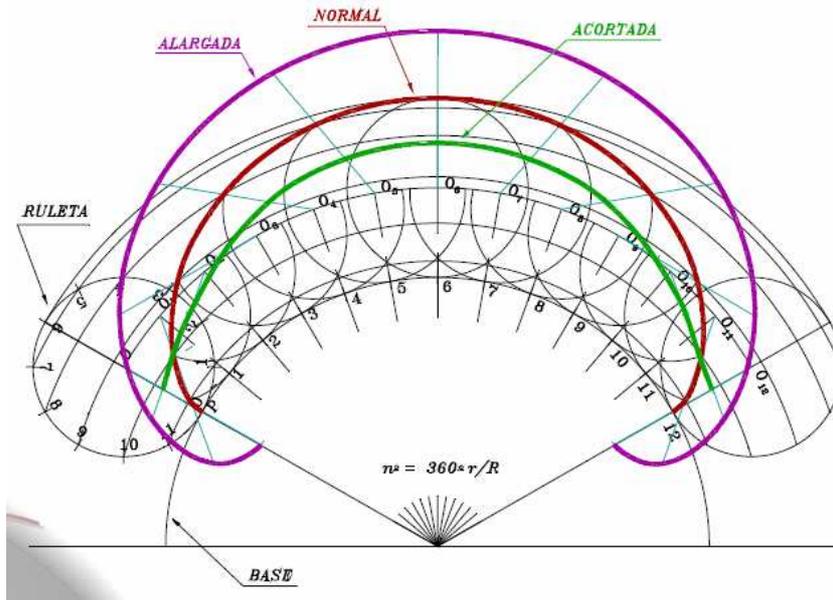


Figura 1.12. La epicicloide es la curva que describe un punto “P” de una circunferencia ruleta que rueda sin resbalar sobre otra circunferencia que hace de base y exteriormente a ella.

Es muy posible que fuera el francés Philippe de Lahire el primero en concebir el diente de perfil en evolvente en 1695, figura 1.14, muy poco tiempo después de que Roemer concibiera el epicicloidal.

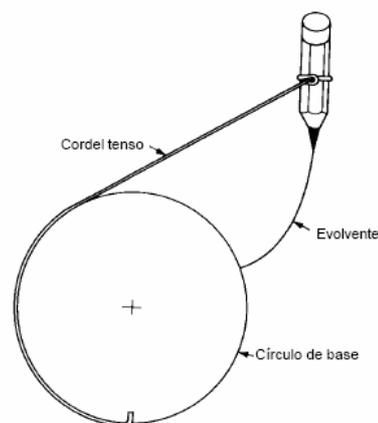


Figura 1.13. Generación del perfil del evolvente

La primera aplicación práctica del diente en evolvente, figura, 1.15, fue debida al suizo Leonhard Euler (1707), figura 1.16.

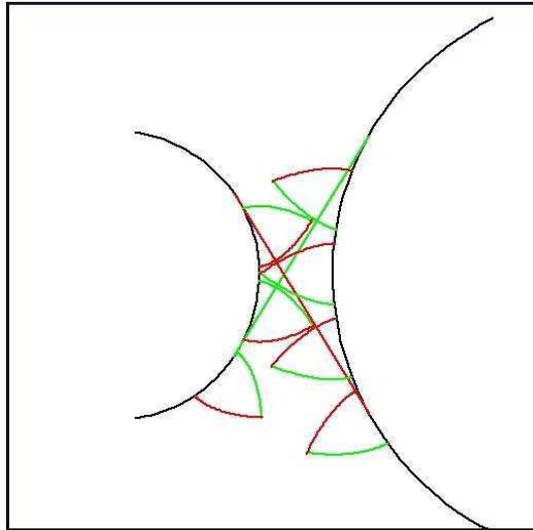


Figura 1.15. Engrane de Euler, 1767

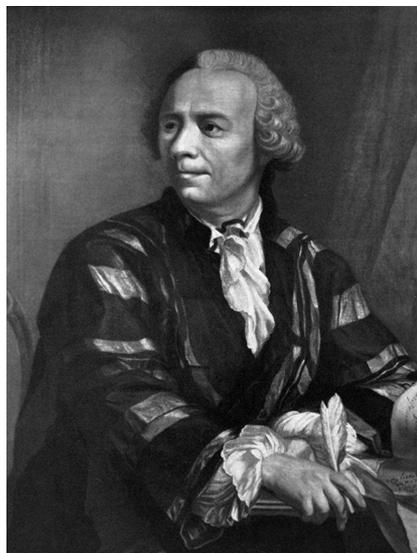


Figura 1.16. El físico e inventor suizo Leonhard Euler

Richard Roberts construyó una amplia gama de máquinas-herramientas, algunas de su propio diseño, fue el primero en fabricar una máquina cortadora de engranajes, figura 1.17. Para controlar con precisión las dimensiones de los engranajes adaptó el sector, que desarrolló para su venta a otros ingenieros. Roberts adoptó cortadores giratorios, que había visto usar a Maudslay (inventor del torno). Este es uno de los primeros registros de una fresa utilizada en ingeniería. En 1817 hizo un torno capaz maquinar piezas con una longitud de 6 pies (1.8 m).

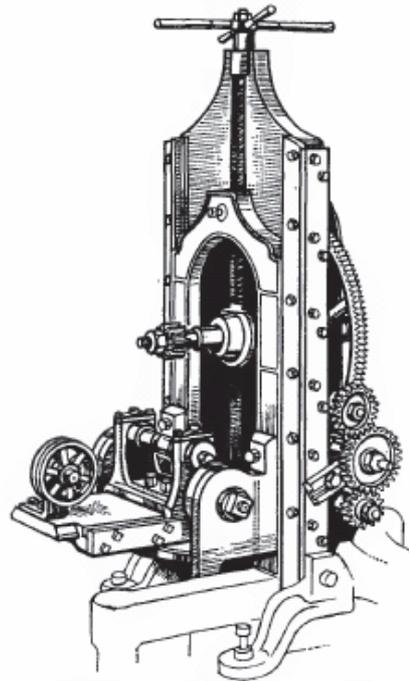


Figura 1.17. Máquina cortadora de engranes desarrollada por Richard Roberts en 1821.

En 1820, Joseph Woolams inventó los engranes helicoidales, así como los engranes herringbone (helicoidales dobles), figura 1.18 concediéndole la patente inglesa No. 4477; de Junio 20 de 1820, figura 1.19

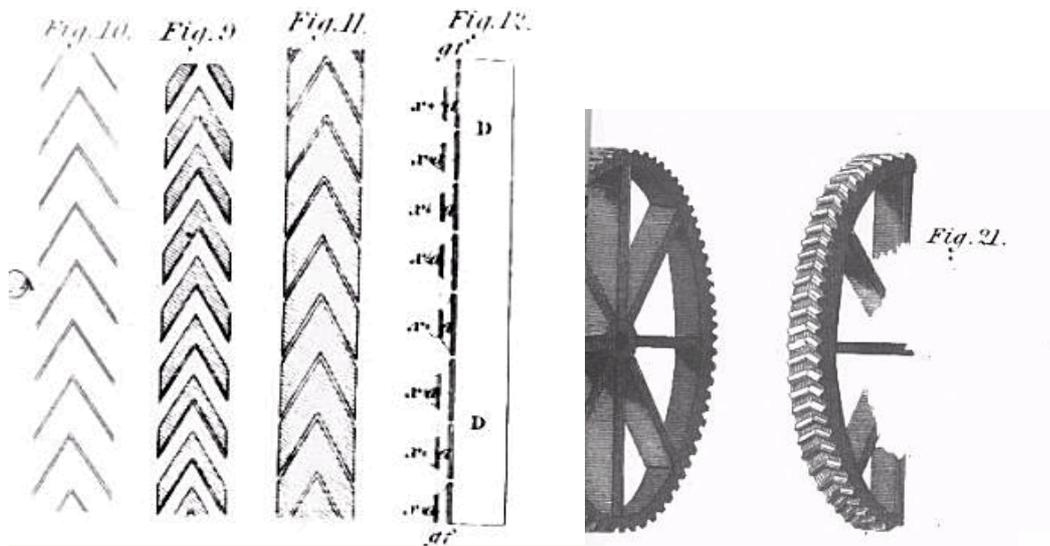


Figura 1.18. Dibujos originales de la patente sobre engranes helicoidales concedida a Joseph Woolams

Specification of the Patent granted to JOSEPH WOOLLAMS, of the City of Wells, in the County of Somerset, Land Agent ; for certain Improvements in the Teeth or Cogs formed on, or applied to, Wheels, Pinions, and other Mechanical Agents for communicating or estraining Motion. Dated June 20, 1820.

Figura 1.19. Patente concedida a Joseph Woollams

En 1842, Joseph Saxton desarrolló la primera máquina generadora de engranes para maquinar dientes cicloïdales, figura 1.20

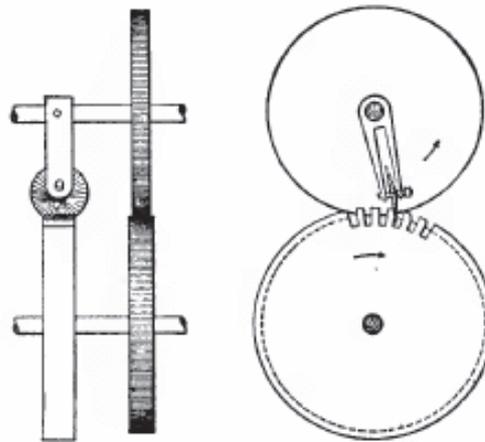


Figura 1.20 Máquina para cortar engranes desarrollada por Joseph Saxton en 1842

Robert Willis (1800-1875), considerado uno de los primeros ingenieros mecánicos, fue el que obtuvo la primera aplicación práctica de la epicloide al emplearla en la construcción de una serie de engranajes intercambiables. De la misma manera, fue de los primeros matemáticos la idea del empleo de la evolvente de círculo en el perfil del diente, pero también se deben a Willis las realizaciones prácticas, así como la creación del odontógrafo, aparato que sirve para el trazado simplificado del perfil del diente de evolvente, figura 1.21.

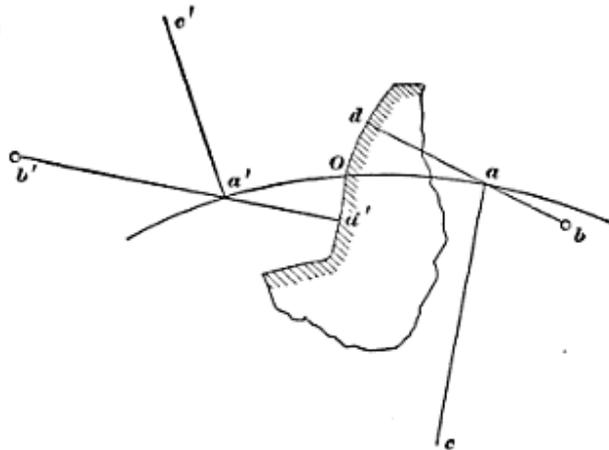


Figura 1.21. Odontógrafo de Willis, el cual es el mas antiguo y mejor conocido de todos los odontografos, pero es inferior a otros propuestos tanto en facilidad de uso como en exactitud de resultados.

En 1844, Joseph Whitworth perfeccionó una máquina muy grande para maquinar engranes de envolvente mediante una fresa de formado, figura 1.22

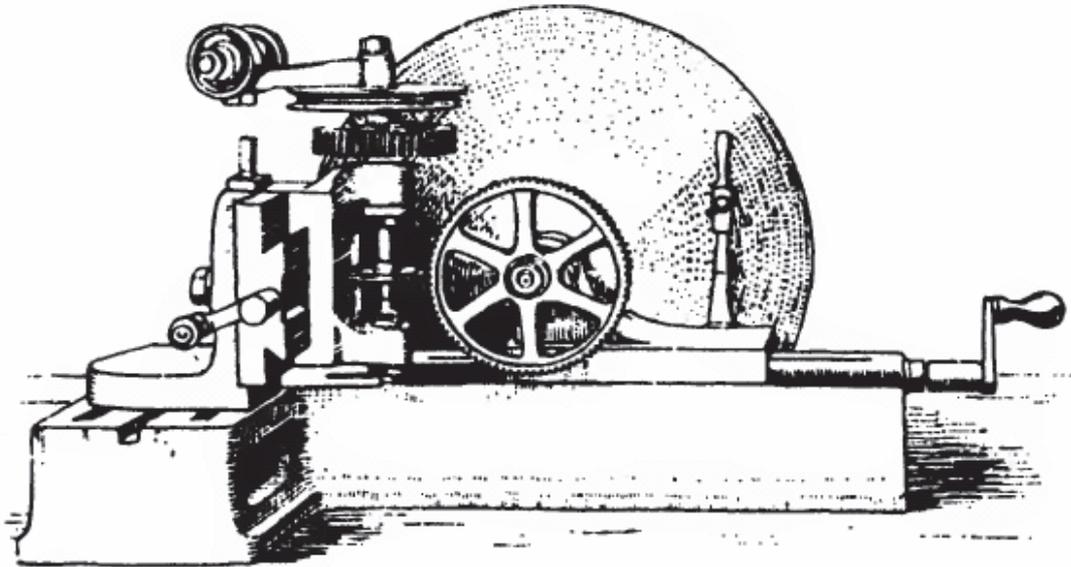


Figura 1.22. Máquina desarrollada por Joseph Whitworth con un cortador de forma para diente de envolvente, 1844-1851.

En 1856, Christian Schiele descubrió el sistema de fresado de engranajes rectos por medio de fresa madre, pero el procedimiento no se llevaría a la práctica hasta 1887, cuando le fue concedida la patente

En 1874, el norteamericano William Gleason inventó la primera fresadora de engranajes cónicos, figura 1.23 y gracias al apoyo de sus hijos, especialmente su hija Kate Gleason (1865-1933), convirtió a su empresa Gleason Works, radicada en Rochester (Nueva York, EUA) en una de los fabricantes de máquinas herramientas más importantes del mundo, figura 1.24



Figura 1.23. Fresadora de engranes desarrollada por William Gleason

A NEW
GLEASON
ready for delivery
37" BEVEL GEAR PLANER
FULLY AUTOMATIC **VERY RIGID**

*Constant speed quick
return reversing
mechanism*

*Positive index
Wide range of feeds
Gear box providing
quick change from
roughing to finishing
speed*

WEIGHT 13000 LBS.
FLOOR SPACE—INCHES
WIDTH 84
DEPTH 108
HEIGHT 57

GLEASON WORKS
Manufacturers of Gears and Gear Cutting Machinery
ROCHESTER, NEW YORK.

Figura 1.24. Cartel publicitario de Gleason Works describiendo una máquina para fabricar engranes cónicos

Al principio, las máquinas para generar engranes cónicos eran máquinas planeadoras. Una las primeras fue diseñada por George Coliss para fabricar engranes para sus máquinas de vapor sin embargo dichas máquinas eran lentas y complicadas, figura 1.25.



Figura 1.25. Grabado en madera de la generadora de engranes cónicos desarrollada por George Coliss y presentada en la exposición de Filadelfia de 1876

En 1897, el inventor alemán Robert Hermann Pfauter (1885-1914), inventó y patentó una máquina universal para fabricar tanto engranes rectos como helicoidales mediante fresa madre, figura 1.26. En 1897, H. Pfauter fabricó la primer máquina universal, la cual podía utilizarse para fabricar engrane sinfín y engranes de tornillo. La máquina mostrada en la figura 1.27 se utilizaba para manufacturar engranes de dientes rectos y sinfín con diversas formas. Con el paso del tiempo, se ha convertido en una multinacional fabricante de todo tipo de máquinas-herramientas.



Figura 1.26. Máquina desarrollada por Robert Hermann Pfauter para la fabricación de engranes mediante fresa madre.

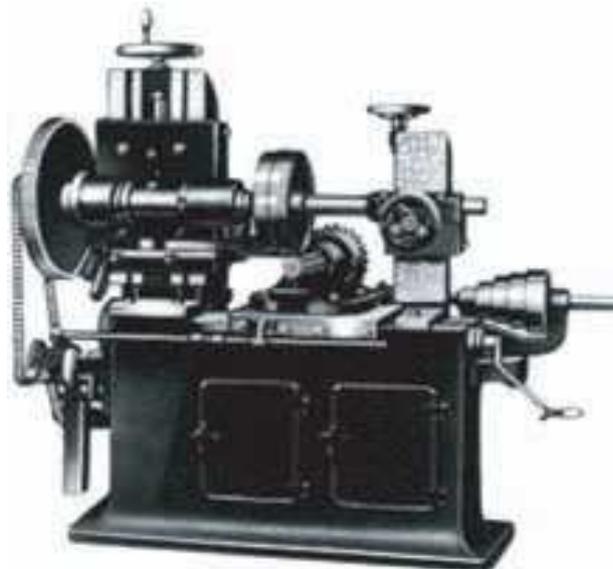
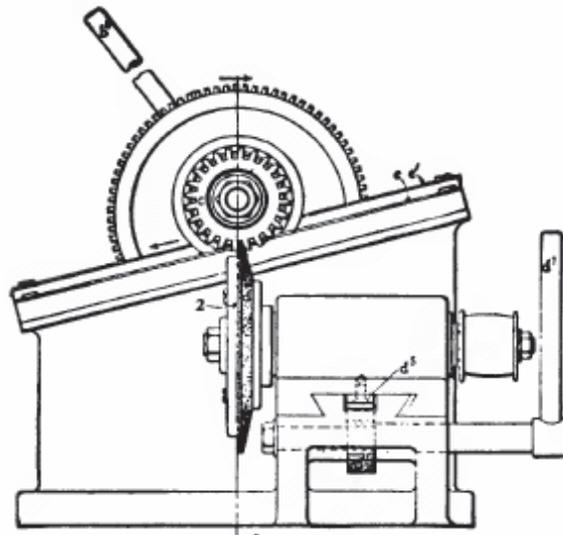


Figura 1.27. Prototipo de la máquina desarrollada por Robert Hermann

A finales del siglo XIX, coincidiendo con la época dorada del desarrollo de los engranajes, el inventor y fundador de la empresa Fellows Gear Shaper Company, Edwin R. Fellows (1846-1945), inventó un método revolucionario (figuras 1.28 y 1.29) para mecanizar tornillos sinfín glóbicos, figura 1.30, tales como los que se montaban en las cajas de dirección de los vehículos antes de que fuesen hidráulicas.



*Figura 1.28. Máquina generadora y rectificadora de engranes cónicos Fellows de 1897
(American Machinist)*

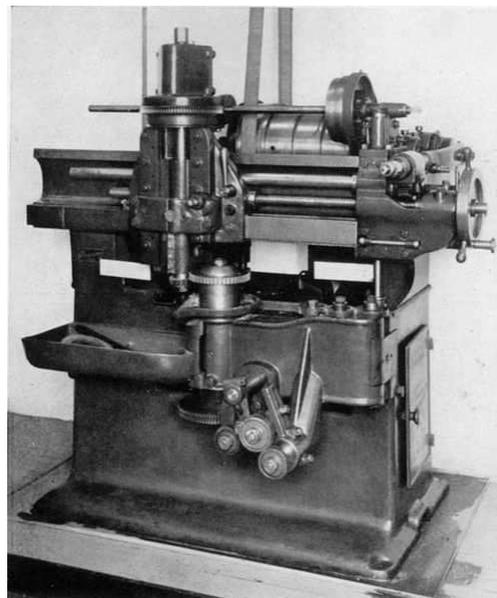


Figura 1.29. Primer modelo de producción de la generadora de engranes Fellows, Tipo 6



Figura 1.30. Tornillo sinfín y corona glóbica

En 1905, M. Chambon, de Lyon (Francia), fue el creador de la máquina para el maquinado de engranajes cónicos por procedimiento de fresa madre. Aproximadamente por esas fechas, en 1912 André Citroën realizó un viaje a Polonia descubriendo el procedimiento de talla de los engranajes en forma de chevrón (en francés, esqueleto de pescado), figura 1.31. En seguida se da cuenta de que puede ser un negocio muy rentable y decide comprar la licencia del proceso de fabricación para crear su primera empresa, la Sociedad de Engranajes Citroën, figura 1.32.



Figura 1.31. Engrane chevron de madera

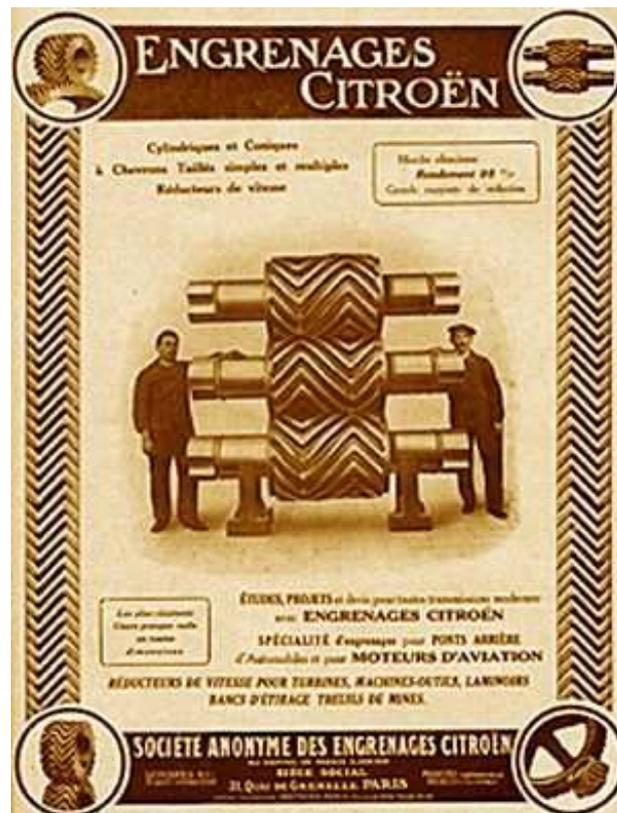


Figura 1.32. Cartel publicitario de la fabrica de engranes de Citroën

Dichos engranajes se convierten en la fuente de inspiración del doble chevrón que la compañía adopta como logotipo cuando crea la fábrica de automóviles Citroën en 1919, siendo el primer auto producido el Tipo A con 10 hp, como el que se muestra en la figura 1.33. Dicho auto utilizaba un diferencial con engranes chevron, figura 1.34. Tan importante fueron los engranes para Citroën que el emblema de la marca es representado con dos chevrones dentro de una elipse horizontal de color azul y amarillo, figura 1.35.

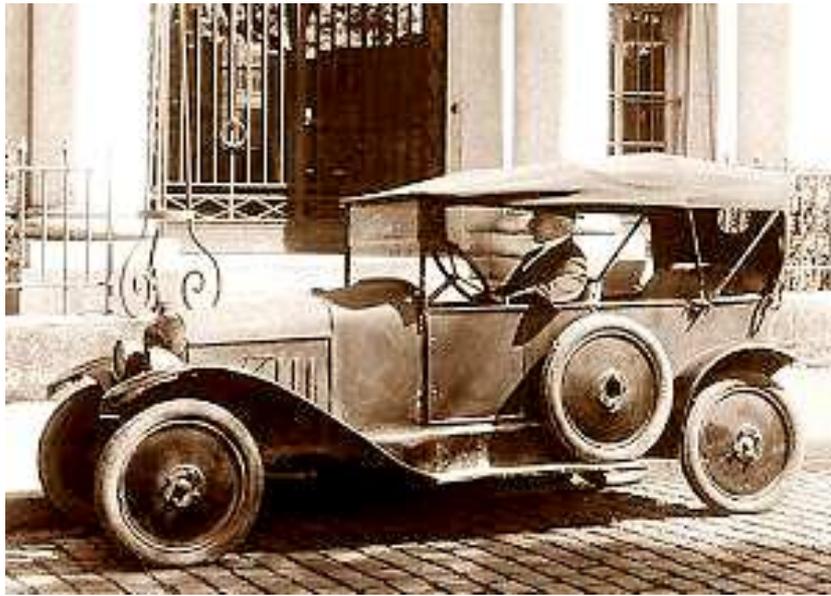


Figura 1.33. En 1919 se lanzó al mercado el Citroën Tipo A con 10 hp, el primero producido en Europa de manera masiva y que fue todo un suceso.



Figura 1.24. Mecanismo piñón –corona con engranes chevrón o doble helicoidales.



Figura 1.35. Emblema de la marca automovilista Citroën

El ingeniero y empresario alemán Friedrich Wilhelm Lorenz (1842-1924) se especializó en crear maquinaria y equipos de mecanizado de engranajes y en 1906 fabricó una talladora de engranajes capaz de mecanizar los dientes de una rueda de 6 m de diámetro, módulo 100 y una longitud del dentado de 1.5 m.

Al finalizar la Primera Guerra Mundial, el control de las máquinas herramientas continuó de diversas maneras que sentaron las bases para la tecnología CNC.

Por la década de los años 30's, existieron fresadoras increíblemente grandes y avanzadas, como la Cincinnati Hydro-Tel, figura 1.36 que presagiaban las máquinas CNC que se utilizan hoy en todos los aspectos excepto el propio control CNC.

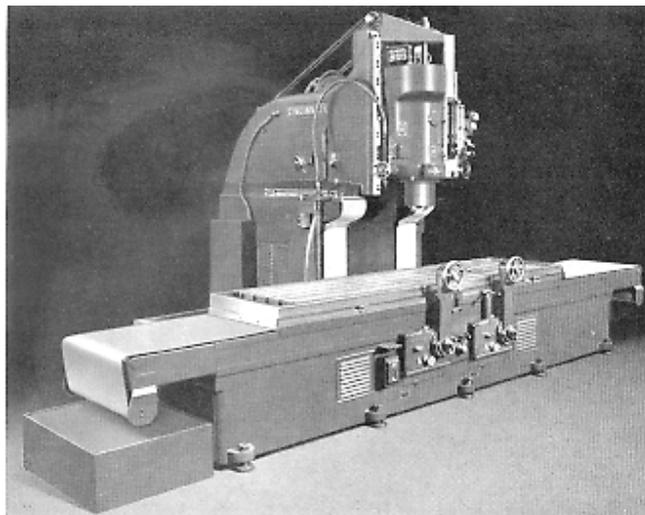


Figura 1.36. Fresadora Cincinnati Hydro-Tel de los años 30's del siglo XX

En principio, contrariamente a lo que se pudiera pensar, el Control Numérico de Máquinas Herramientas no fue concebido para mejorar los procesos de fabricación, sino para dar solución a problemas técnicos surgidos a consecuencia de] diseño de piezas cada vez más difíciles de mecanizar.

En 1942, la "Bendix Corporation" tuvo problemas con la fabricación de una leva tridimensional para el regulador de una bomba de inyección para motores de avión. El perfil tan especial de dicha leva es prácticamente imposible de realizar con máquinas comandadas

manualmente. La dificultad provenía de combinar los movimientos de la herramienta simultáneamente según varios ejes de coordenadas, hallando el perfil deseado. Se acordó entonces confiar los cálculos a una máquina automática que definiera un gran número de puntos de la trayectoria, siendo la herramienta conducida sucesivamente de uno a otro.

En 1947, John Parsons, figura 1.37, constructor de hélices de helicópteros, concibe un mando automático. La idea de utilizar cintas perforadas (comportando las coordenadas de los ejes de los agujeros) en un lector que permitiera traducir las señales de mando a los dos ejes, permite a Parsons desarrollar su sistema Digitón.

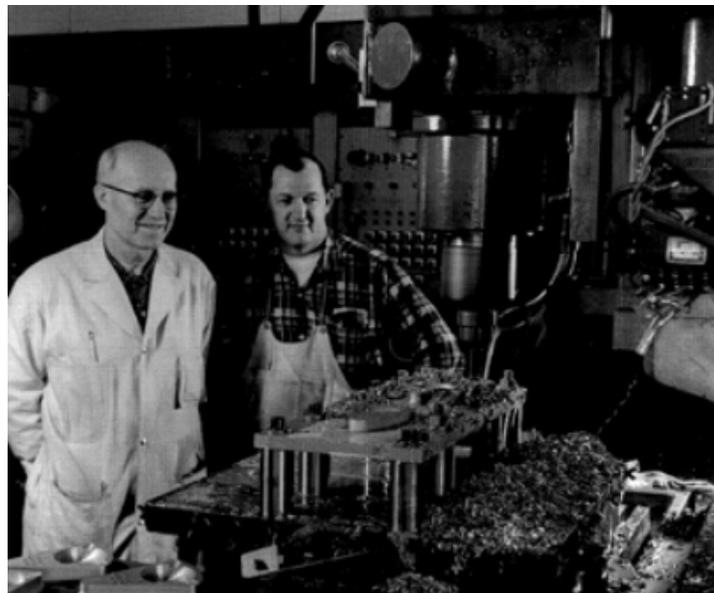


Figura 1.37. John Parsons y su socio Frank Stulen con la primera fresadora de control numérico

En esta época, la U.S. Air Force estaba preocupada con la fabricación de estructuras difíciles de trabajar por copiado susceptibles de ser modificadas rápidamente. Gracias a su sistema, Parsons, obtiene un contrato y el apoyo del Massachusetts Institute of Technology (MIT)

El Gobierno norteamericano apoya la iniciativa para el desarrollo de una fresadora de tres ejes en contorno mandado por control digital.

Es importante destacar que la máquina no se limitó a hacer una serie de cortes en puntos específicos, como había sido propuesto por Parsons, sino que fue capaz de maquinarse una superficie con la forma deseada. El proyecto de demostración se llevó a cabo utilizando una

máquina fresadora Cincinnati Hydro-Tel modificada con engranajes y servo motores -para reemplazar a los volantines. También incorporó un controlador masivo y complejo, que tenía 250 tubos de vacío (bulbos) y 175 relevadores, figura 1.38

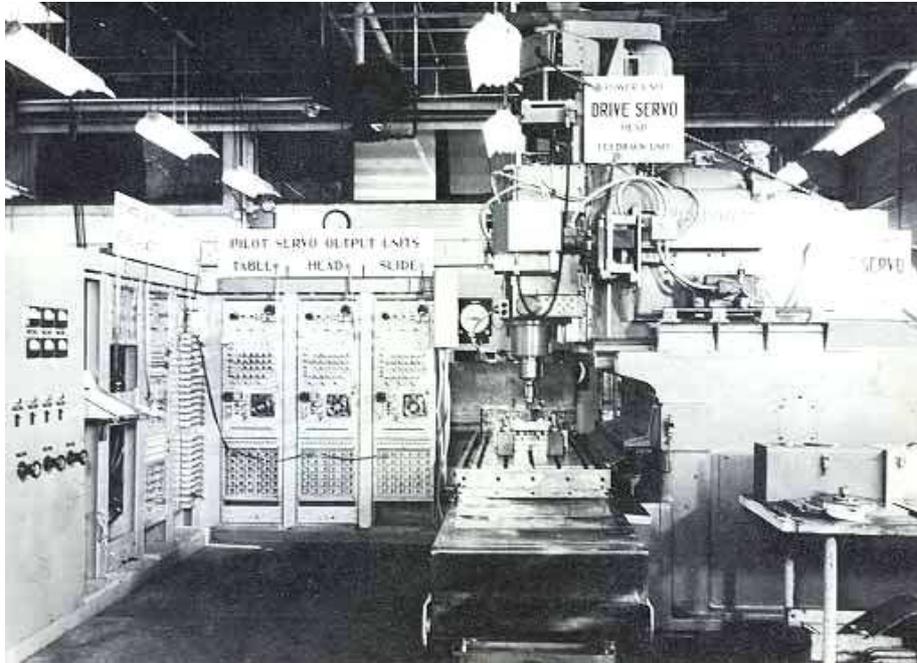


Figura 1.38. Fresadora Cincinnati Hydrotel y el sistema de control utilizado en el MIT

En 1953, después de cinco años de la puesta a punto, el M.I.T. utiliza por primera vez el término "Numerical Control"

En 1956, la U.S.A.F. hace un pedido de 170 máquinas de Control Numérico a tres grandes constructores norteamericanos:

- Cincinnati Milling Machine Company,
- Giddin & Levis,
- Kearney & Trecker.

Paralelamente a esta evolución, ciertos fabricantes se interesan por el desarrollo de máquinas más simples para trabajos, tales como taladrado, mandrinado y punteado, que no requieren ningún movimiento continuo, pero sí un posicionamiento preciso y en 1959 se introdujo al mercado la fresadora Milwaukee-Matic-II y que fue la primera máquina con un intercambiador de herramientas, figura 1.39.

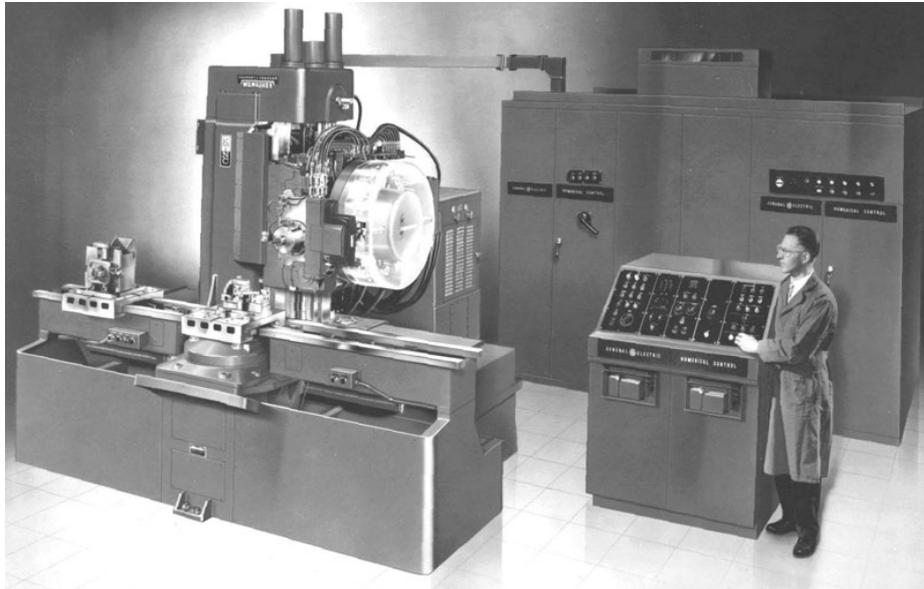


Figura 1.39. En 1959 se introdujo al mercado la Milwaukke-Matic-II que fue la primer máquina con un intercambiador de herramientas

Para 1964, más de 35,000 máquinas de control numérico estaban en uso en todo Estados Unidos Americanos.

Con el desarrollo de la microelectrónica, en 1973, Yoram Koren desarrolla a nivel mundial el primer controlador adaptativo computarizado en tiempo real para una fresadora, figura 1.40, de ese modo, desde los años `70, el NC pasa a ser CNC, Control Numérico Computarizado, al integrarse una computadora en el sistema. Sin embargo, fue durante los años `80 cuando se generaliza la aplicación de CNC debido al desarrollo de la electrónica y la informática, provocando una revolución en la cual estamos inmersos.



Figura 1.40. Primera fresadora CNC utilizando para su control una computadora HP-2100, la cual era de 16 bits y 4K en RAM (McMaster University, Hamilton, Canada, Mayo 1973)

Esta nueva tecnología reemplazó a los sistemas NC como el estándar industrial. Los sistemas CNC también fueron la base para los procesos posteriores, como el diseño asistido por computadora (CAD) y la fabricación asistida por computadora (CAM). Aunque conceptualmente similar al sistema de tarjetas perforadas mecanizado creada en 1952, los sistemas CAD / CAM ofrecen a los fabricantes de hoy en día con una mayor flexibilidad en sus operaciones.

El siguiente gran paso se dio en 1975 cuando la empresa Pfauter en Alemania introdujo la primera máquina NC para generador de engranes con fresa madre, Pfauter PE150, figura 1.41 y en 1982 se lanzó al mercado una máquina de 6 ejes totales.



Figura 1.41. Fresadora CNC para la fabricación de engranes con fresa madre.

CAPITULO 2

EVOLUCIÓN DE LOS MATERIALES PARA LOS ENGRANES

2.1. BOSQUEJO HISTÓRICO

Juzgar mediante la historia escrita en los libros es una cosa, encontrar evidencia palpable de los engranajes es otra. El mayor problema en encontrar evidencia arqueológica de engranajes radica en que los primeros engranes fueron hechos de madera tallada (figura 2.1), con lo cual es más que evidente que al paso del tiempo se degradan completamente y difícilmente dejan rastros debido al tipo de material empleado. Por otro lado en los registros bíblicos antiquísimos se encuentra que los metales se trabajaban desde el 4000 a.C. y menciona a un Tubal-Caín como el artífice del hierro y del bronce. Así que bajo esta evidencia teórica bien pudo haber sido factible que se fabricaran engranajes de bronce o hierro, aunque es necesario recordar que el uso de dichos materiales se encontraba restringido por las limitadas cantidades que se podían obtener y que sólo eran destinadas como obsequio a reyes y faraones.



Figura 2.1. Engranes primitivos de madera

Tal es el caso de una cuña de metal forjado que data del 3000 a.C., encontrada en la gran pirámide de Keops, rey de Egipto de la IV dinastía. Actualmente esta pieza arqueológica se encuentra en el museo Británico y es una prueba palpable de que el hierro ya se trabajaba en esas épocas. Sin embargo dicho hallazgo también fortalece la hipótesis de que verdaderamente

sólo se utilizaban para artículos religiosos u obsequios para reyes y difícilmente se utilizarían para fabricar engranes, si es que ya existían en esa época.

Ya para el año 2000 a.C. cuando la civilización asiria empezaba a formarse, aún bajo la opresión de Caldea y Egipto, la metalurgia del hierro comenzaba a desarrollarse con mayor fuerza.

Los asirios fueron quienes primero consiguieron producir a gran escala hierro y bronce, perfeccionando los métodos y logrando, con ayuda de esta ventaja técnica, su libertad como pueblo para el 1300 a.C. bajo el reinado de Teglafalasar. Ya como pueblo en libertad hacia el 800 a.C. bajo el reinado de Salmanasar habían formado un verdadero imperio y hacia el año 730 a.C. al mando de Salmanasar V habían invadido Caldea, que para ese entonces ya se conocía como Babilonia, además del territorio Egipcio, extendiendo así su imperio desde el Mediterráneo hasta el mar Caspio, y del sur del mar Negro al Golfo Pérsico. Su grandeza: su rey Salmanasar V, su fama: el dominio del hierro y el bronce, su orgullo: el imperio formado

2.2 MATERIALES

Las ruedas dentadas pueden fabricarse de una variedad de materiales muy extensa para obtener las propiedades adecuadas según el uso que se les va a dar. Desde el punto de vista de diseño mecánico, la resistencia y la durabilidad, es decir la resistencia al desgaste, son las propiedades más importantes. Sin embargo, en general, el diseñador deberá considerar la capacidad para fabricar el engranaje, tomando en cuenta todos los procesos de fabricación que intervienen desde la preparación del disco para el engrane, pasando por la formación de los dientes del engranaje hasta el ensamble final de este en una máquina. Otras consideraciones que deben tenerse en cuenta son: peso, resistencia a la corrosión, ruido y costo.

2.3. ACEROS PARA LA FABRICACIÓN DE ENGRANES

Los aceros para elementos de herramientas mecánicas y muchos tipos de reductores de velocidad y transmisiones de movimiento para trabajo entre medio y pesado, por lo regular, se fabrican de acero al medio carbono. Entre la amplia gama de aceros al carbono y aceros con aleación que se utilizan se pueden mencionar:

AISI 1020	AISI 1040	AISI 1050	AISI 3140	AISI 4140	AISI 4150
AISI 4340	AISI 6150	AISI 8650			

2.3.1. Aceros endurecidos en forma superficial

El endurecimiento mediante flama, endurecimiento por inducción, la carburización, la nitruración son procesos que se emplean para obtener una alta dureza en la capa superficial en los dientes de un engranaje. Estos procesos proporcionan valores de dureza superficial de 50 a 64 HRC (Rockwell C) y en consecuencia altos valores de tensión permisible (σ_{max}), y de tensión debida al contacto permisible (σ_{es}). En los dientes de engranaje endurecidos mediante flama y por inducción, implican el calentamiento a nivel local de la superficie del engrane a altas temperaturas sea por medio de flamas o por bobinas de inducción eléctrica. Al controlar el tiempo y la entrada de energía, es posible controlar la profundidad del calentamiento y la profundidad de la dureza que se obtiene como resultado. Es fundamental que el calentamiento tenga lugar alrededor de todo el diente para que se obtenga la superficie dura en la cara del diente y en las áreas del chaflán y de la raíz. Las especificaciones para dientes de engranajes de acero endurecidos por flama o por inducción, exigen una dureza resultante de HRC 50 a 54. Debido a que estos procesos recurren a la capacidad inherente de los aceros para ser endurecidos, debe especificar un material que puede endurecerse a estos niveles. Por lo regular, se especifican aceros con aleaciones al medio carbón, aproximadamente de 0.4 % a 0.6% de carbón.

2.3.2 Carburización y nitruración

La carburización produce una dureza superficial de 55 a 64 HRC y da por resultado una de las durezas más considerables de uso común para engranajes. Mediante la nitruración se obtiene una superficie muy dura pero muy delgada (aprox. 0.6mm). Se especifica para aplicaciones en las que las cargas son ligeras y se conocen bien. La nitruración se debe evitar cuando es probable que se presenten cargas o choques excesivos porque la superficie no es lo suficientemente resistente o no está bien apoyada para resistir tales cargas.

2.4. HIERRO FUNDIDO Y BRONCE COMO MATERIALES PARA FABRICAR ENGRANAJES

Tres tipos de hierro que se emplean para fabricar engranajes son: hierro gris fundido, hierro nodular conocido también como hierro dúctil y el hierro maleable. Se debe tener en cuenta que el hierro gris es quebradizo, por tanto, hay que tener cuidado cuando sea probable que se presente carga por choque. El hierro dúctil austemperado se está utilizando en algunas aplicaciones importantes en la industria automotriz, sin embargo, los valores de esfuerzo permisible estandarizados aún no se han especificado. En lo que a los bronce se refiere, hay cuatro tipos que se utilizan para fabricar engranajes: bronce con fósforo o estaño, bronce con manganeso, bronce con aluminio y bronce con sílice. Casi todos los bronce son fundidos, sin embargo, se puede disponer de algunos forjados. La resistencia a la corrosión buenas propiedades en cuanto a desgaste y coeficientes de fricción bajos son algunas razones para optar por los bronce para fabricar engranajes.

2.5. MATERIALES PLÁSTICOS PARA ENGRANAJES

Los plásticos se desempeñan bien en aplicaciones donde se desea peso ligero, operación silenciosa, baja fricción, resistencia a la corrosión aceptable y buenas propiedades en cuanto a desgaste. Debido a que las resistencias son significativamente mas bajas que las de casi todos los materiales metálicos para fabricar engranajes, los plásticos se emplean en dispositivos que se someten a cargas ligeras. A menudo, los materiales plásticos pueden moldearse para darles su forma final sin el maquinado subsecuente lo cual representa ventajas en lo relativo al costo. Algunos de los materiales plásticos que se utilizan para fabricar engranajes son:

- Fenólico (baquelita)
- Poliamida
- Poliéster
- Policarbonato
- Acetal,etc.

Estos y otros plásticos pueden fabricarse mediante muchas fórmulas y pueden rellenarse con gran variedad de productos para mejorar resistencia al desgaste, resistencia al impacto, límite

de temperatura, moldeabilidad y otras propiedades. Por tanto, las resistencias estándar tolerables no se han publicado.



Figura 2.2. Algunos engranes de plástico

CAPITULO 3

FABRICACIÓN DE ENGRANES

3.1. PRODUCCIÓN DE ENGRANAJES

La elaboración de engranes de servicio ligero, como los mecanismos de relojería data de varios centenares de años, figura 3.1, pero la historia de las que pueden producir engranes capaces de transmitir potencias de magnitud apreciable apenas data de alrededor del año 1800. Desde entonces se han obtenido miles de patentes de dispositivos para corte de engranes y de herramientas para el mismo fin.



Figura 3.1. Mecanismo mediante engranes en un reloj de pulso moderno.

La capacidad para fabricar engranes en forma económica no apareció sino hasta alrededor de 1850 y fue la base del desarrollo de las impresoras de alta velocidad, de la máquina de coser y de muchos otros productos útiles que se comenzaron a producir a gran escala después de la Guerra Civil de los Estados Unidos. Estas primeras para cortar engranes utilizaron de manera característica un cortador de forma, fabricado para fresar el espacio comprendido entre dientes para dejar en resalto los dientes de la forma correcta. En las grandes máquinas de este periodo a menudo se usaron plantillas para guiar una herramienta en una corredera para ir verificando la forma de los dientes.

A medida que aumento la demanda de producción más rápida de engranes en la década de los sesentas en el siglo XVIII, comenzó el desarrollo de la maquinaria altamente especializada para la producción de engranes. Se observó que un tornillo sin fin preparado como cortador, y

con sus lados rectos de la misma forma de diente que una cremallera, podía generar un engrane de involuta si les hacía girar juntos de manera que el engrane se moviera un espacio mientras el tornillo sin fin giraba una revolución. Esta es la base para una especializada de fresadoras que se conocen como cortadoras o fresadoras de engranes.

Hacia 1900, este era un método bien desarrollado y altamente productivo para la fabricación de engranes de precisión. Estas vienen tanto de husillo horizontal como en tipos verticales. Las más grandes tienen por lo general husillo vertical para sostener la pieza por maquinarse. Algunas de estas se usan para fabricar engranes de 16 pies de diámetro y mayores.

Alrededor de 1900 apareció otra importante máquina para la fabricación de engranes. En esta se utilizó con cortador conformado como un engrane compañero que se le daba el movimiento recíprocante transversalmente al engrane por cortar y se le hacía girar junto con la pieza por cortar a medida que progresaba el corte. A esta máquina se le llama perfiladora de engrane. Se puede usar para generar engranes de dientes rectos o helicoidales externos o internos, y tiene la ventaja de poder maquinarse la forma del diente en seguida a un hombro, como se requiere a menudo en los grupos de engranajes de las transmisiones.

Este tipo de también se pueden usar para generar formas poco comunes de engranes.

Al popularizarse el automóvil, cobró importancia la capacidad de producir engranajes silenciosos y precisos para los extremos traseros de los autos. Se desarrollaron generadoras de engranes hipoidales para cubrir dicha necesidad.

Al necesitarse medios más rápidos para producir engranes de forma precisa para aplicaciones de alta producción, se desarrollaron métodos como el brochado. Este método es adecuado en especial para producir engranes individuales o no agrupados de dientes rectos o con ángulos de hélice de menos de 21 grados.

Para uso comercial, por lo general se dan acabado a los dientes de los engranes después de cortarlos. El tipo de método de acabado depende en gran parte de la condición de servicio del engrane, de sus requisitos de exactitud, de su limitación de ruido, y de sus requisitos de dureza.

Las técnicas de fabricación de engranes ha ido evolucionando en los últimos años, por eso es importante conocer los distintos métodos existentes de fabricación.

Los procedimientos de producción de engranes se pueden dividir en dos grandes familias como se muestra en la figura 3.2.



Figura 3.2. Clasificación de los métodos para fabricar engranes

3.2. FABRICACIÓN DE ENGRANES SIN ARRANQUE DE VIRUTA

3.2.1. Conformado por fundición

La fabricación de los dientes del engranaje por fundición se realiza por varios procedimientos, entre los cuales se encuentran: colado en arena, moldeo en cáscara, fundición por revestimiento, colada en molde permanente, colada en matriz.



Figura 3.3. Engrane obtenido mediante fundición.

El problema principal es que se suele emplear para grandes series de producción debido al coste de los moldes. Otro problema es que posteriormente los engranajes se tienen que rectificar o pulir, ya que las superficies obtenidas de la fundición dejan mucho que desear para aplicaciones en las que se requiera cierta precisión.

3.2.2. Conformado por troquelado

Este tipo de procedimiento para obtención de ruedas dentadas tiene aplicación bastante limitada en el entorno industrial. Normalmente se fabrican así, grandes series de ruedas dentadas de características mecánicas bajas y de limitada precisión; especialmente demandadas por los sectores jugueteros, fotográficos, artículos para oficina...

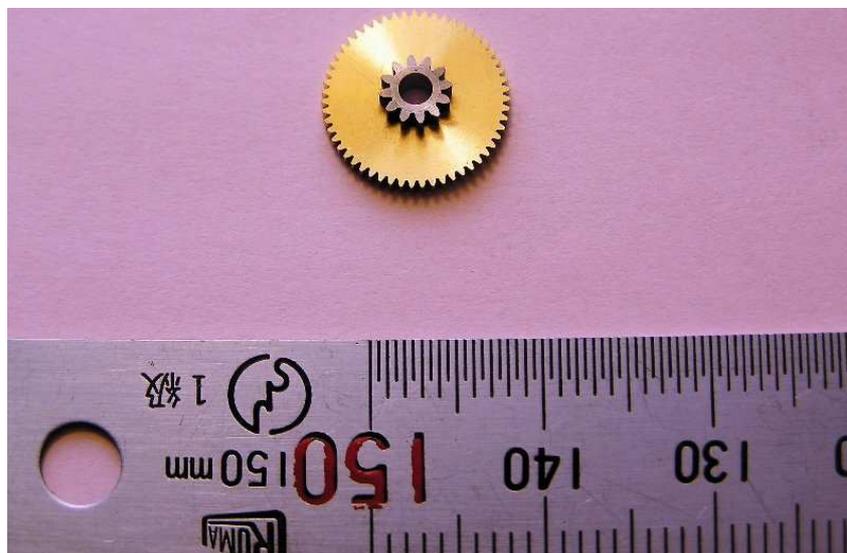


Figura 3.4. Fabricación de engranes mediante troquelado

3.2.3. Conformado por pulvimetalurgia

El atractivo mayor de la pulvimetalurgia es la habilidad de fabricar piezas de formas complejas con excelentes tolerancias y de alta calidad de forma relativamente barata. En resumen, la pulvimetalurgia toma polvos metálicos con ciertas características como tamaño, forma y empaquetamiento para luego crear una figura de alta dureza y precisión. Los pasos claves que incluye son: la compactación del material polvo y la subsiguiente unión termal de las partículas por medio de la sinterización.



Figura 3.5. Engranés helicoidales obtenidos mediante pulvimetalurgia con un ángulo de hélice de 22°.

3.2.4. Extrusión

En este procedimiento se requieren las herramientas de menor costo para la producción en masa de engranes y ofrece una versatilidad extraordinaria, ya que por este método puede producirse casi cualquier forma deseada. Como lo indica el nombre mismo este procedimiento, el material tiene que pasar a través de varias matrices en donde la última de estas tiene la forma exacta del acabado final del engrane correspondiente y una vez que el material va pasando por esta serie de dados, puede decirse que se le va exprimiendo, para darle la forma de la herramienta, figura 3.6. Como el material es desplazado por presión, sus superficies exteriores quedan duras y tersas

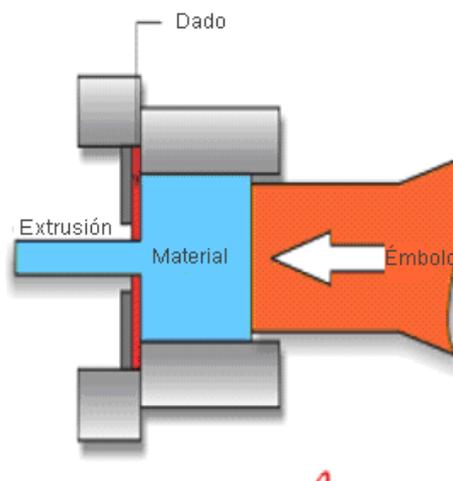


Figura 3.6. Proceso de extrusión.

Cualquier material con buenas características de maleabilidad puede ser empleado para la fabricación de piñones a base de barras estiradas, por ejemplo, aceros al alto carbono, latón, bronce, metal monel, aluminio y aceros inoxidables, mostrándose algunos ejemplos en la figura 3.7.



Figura 3.7. Piezas mecánicas obtenidas mediante extrusión.

Los piñones de bajo costo que se deben producir en grandes volúmenes, destinados a servicios ligeros o medianos, pueden diseñarse para su manufactura partiendo de barras estiradas en frío, con la forma del piñón. Al diseñarse piñones que se han de fabricar a base de barras estiradas, la holgura y el socavado deben proveerse en el diseño de los dientes, ya que una vez terminadas las diferentes herramientas de estiramiento, no es posible modificar el perfil de los dientes, como sucede en el método de corte

3.2.5. Prototipado rápido

El prototipado rápido es cada vez más empleado en la producción de objetos en plástico, cerámica y metal, parte de principios básicos de tecnología aditiva que consisten en la impresión o adición del material capa por capa de abajo hacia arriba sin moldes o matrices en base a un prototipo modelado digitalmente con anterioridad mediante software.

El método consiste básicamente en el sinterizado por capas del material en polvo o desmenuzado, mediante un rayo láser de infrarrojos, con el cual se pueden crear diferentes estructuras o configuraciones en zonas determinadas de la pieza, figura 3.8.

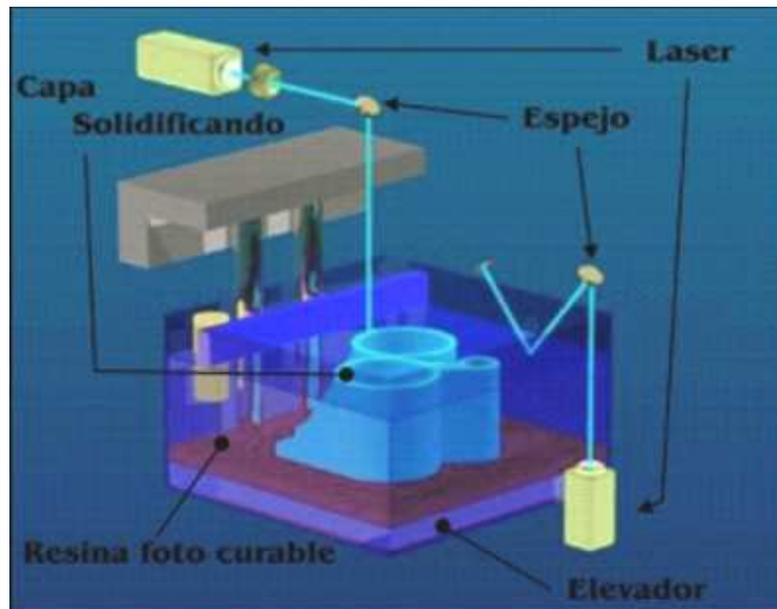


Figura 3.8. Proceso de prototipado

Antes de proceder al mecanizado de los dientes en los engranajes, la pieza en bruto debe pasar por otras máquinas-herramientas como tornos o fresadoras, donde se mecanizan sus dimensiones exteriores y agujeros si los tuviera, dejando eso si, los excedentes necesarios en caso de que el engranaje necesitara recibir tratamiento térmico y posterior mecanizado.



Figura 3.9. Engranajes obtenidos mediante prototipado.

3.3. PRODUCCIÓN DE ENGRANAJES POR TALLADO

Los procedimientos de tallado de ruedas dentadas consisten en la utilización de una herramienta de corte para efectuar el tallado de los dientes de los engranajes a partir de un cilindro base. Los dientes de los engranajes se mecanizan por fresado, cepillado o formado con sinfín y pueden ser acabados por cepillado, bruñido, esmerilado o pulido con rueda

Los procedimientos de producción de engranajes por talla se dividen, a su vez, en dos grandes grupos:

- Procedimientos de talla por reproducción o copia.
- Procedimientos de talla por generación.

En los procedimientos de tallado de ruedas dentadas por reproducción, el borde cortante de la herramienta es una copia exacta de cierta parte de ella (por ejemplo, del hueco entre dientes contiguos). Como consecuencia de ello, los métodos de talla por reproducción precisan de un número elevado de herramientas ya que, incluso para fabricar ruedas dentadas con el mismo

hace falta una herramienta para cada número de dientes, puesto que el hueco interdental varía. A estas herramientas de corte se les denomina “cortadores conformadores” y, generalmente, el cortador tiene la forma exacta del hueco interdental. Cabe distinguir dos procedimientos, según la máquina herramienta utilizada.

3.4. PROCEDIMIENTOS DE TALLA POR REPRODUCCIÓN O COPIA.

3.4.1. Cepillado

La herramienta, en la sección perpendicular a la dirección de su movimiento tiene perfiles cortantes, que se corresponden perfectamente con el contorno del hueco interdental del engranaje a tallar, figura 3.10. Actualmente se suele emplear para dientes no normalizados encontrándose cada vez más en desuso.

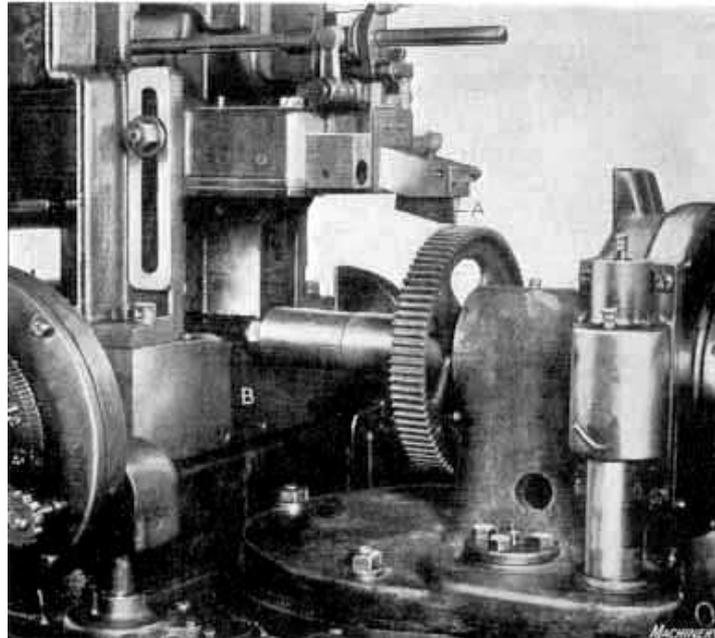


Figura 3.10. Tallado de un engranaje por cepillado

3.4.2. Fresado

Es un método muy difundido, similar a la talla por cepillado, pero en lugar de una cuchilla con una forma determinada se utiliza como herramienta una fresa especial estandarizada –la "fresa de módulo" cuyos dientes tienen perfiles idénticos a la forma del hueco interdental que se persigue, figura 3.11. Al final de cada operación de fresado la fresa vuelve a su posición inicial y la pieza bruta gira un ángulo igual a $1/2$ de vuelta para poder fresar el siguiente hueco.



Figura 3.11. Tallado de un engranaje con fresa de módulo

La principal desventaja de este procedimiento es que se necesitan una fresa distinta para cada combinación de z y número de dientes. Como es imposible tener un juego de fresas para cada caso, además del elevado precio de una "fresa de módulo" y la rapidez con la que se desgastan, obliga a recurrir a una cierta inexactitud en el tallado, pues se emplea una misma fresa para ruedas con un número de dientes cercano a aquel para el que está diseñada la fresa.

Lo habitual es utilizar juegos de 8 fresas por: por ejemplo, para tallar las ruedas de 35 a 54 dientes se suele utilizar la misma fresa, debido a la escasa variación de los perfiles. Así, cada fresa se corresponde con el número menor de dientes de su serie, ya que al aumentar " z " disminuye el hueco interdental, evitando de esta manera el peligro de "acuñamiento". En ocasiones se emplean juegos de 15 a 26 fresas, para dar una mayor exactitud.

Este procedimiento conlleva una inexactitud en los perfiles conjugados que no importa para velocidades pequeñas pero que es inadmisibles cuando estas son elevadas

3.5. PROCEDIMIENTOS DE TALLA POR GENERACIÓN

El procedimiento de talla de ruedas dentadas por generación o rodamiento permite, aprovechando las propiedades de la evolvente, la "generación del perfil del diente" de un engranaje. Los dientes de perfil de evolvente se pueden tallar de forma sencilla y muy exacta empleando herramientas de perfil rectilíneo. La herramienta de corte va avanzando a medida que la rueda gira sobre su centro. Esta es la principal ventaja de este tipo de perfiles, cuya talla

puede realizarse con una precisión elevadísima, cualquiera que sea el número de dientes, asegurando así un funcionamiento perfecto y silencioso, aun a grandes velocidades.

Existen diversas formas de lograr el perfil del diente: con un piñón generador, por tallado con fresa madre, por tallado con cremallera etc.

3.5.1. Herramientas para engranes

Se fabrican diferentes tipos de herramientas para la fabricación de engranes externos e internos. Estas herramientas son fabricadas en base a engranes estándar en cuanto a paso diametral o módulo y ángulo de presión pero en la mayoría de los casos, se hace bajo diseño con base a las especificaciones del cliente. Cuatro de ellos son herramientas de corte y una de ellas es por rolado en frío.

3.5.2. Generación con fresa madre (hob)

Según la descripción de Joseph Whitworth en su patente de 1835, figura 3.12, el generado es una operación continua en la cual el hob(herramienta) y la pieza de trabajo giran en sincronía uno con otro mientras la herramienta se mueve a lo largo de la pieza de trabajo.

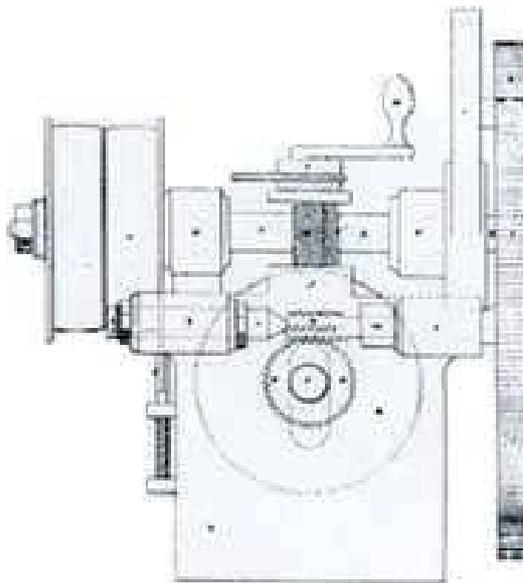


Figura 3.12. Máquina generadora de engranes patentada por Joseph Whitworth en 1835

Se utiliza una herramienta de corte también conocida como fresa -madre ó hob (en inglés). Esta herramienta se utiliza en máquinas denominadas **generadoras de engranes**. El hob es una herramienta cilíndrica que tiene dientes con filos cortantes que siguen una o varias espirales, todos y cada uno de los dientes son idénticos.

Este proceso puede ser visualizado como un tornillo sinfín acoplado a un engrane. El hob es representado como el tornillo sinfín y la pieza de trabajo como el engrane. La figura 3.13 muestra este proceso.

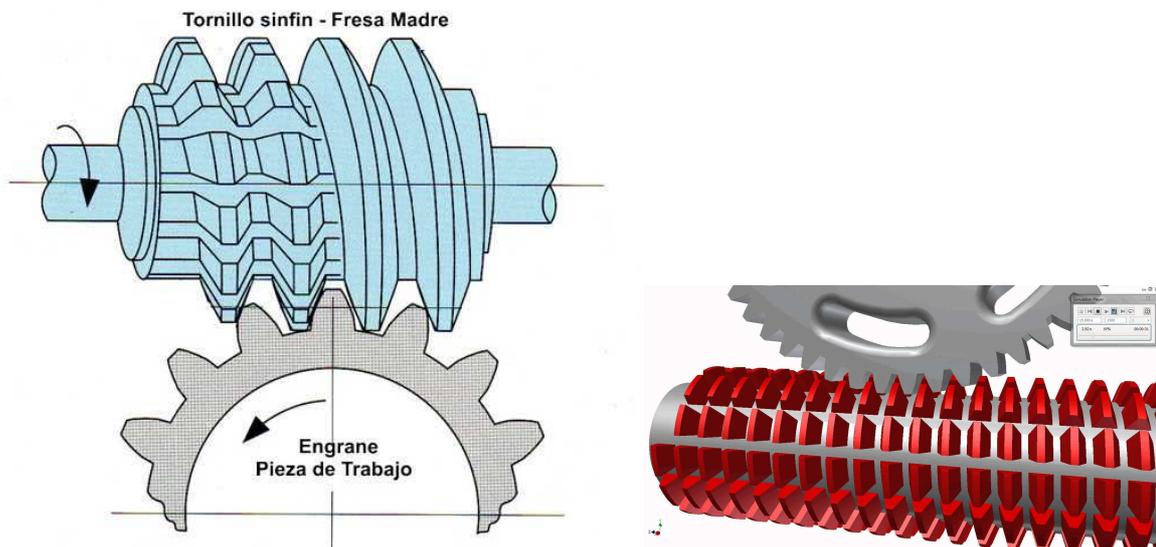


Figura 3.13. Proceso de generado de engranes.

Para entender cual es el principio del método de generado, nos basaremos en la forma en la que se genera una curva de evolvente (Figura 3.13), dicha curva define la forma que tienen los flancos de los dientes de los engranes. Obsérvese que el punto P sobre la línea L genera la evolvente a medida que dicha línea se desenvuelve desde el círculo base, La línea T-P es tangente a la curva de evolvente y perpendicular a L. Este es un fenómeno que se observa cuando se desenrolla un rollo de papel.

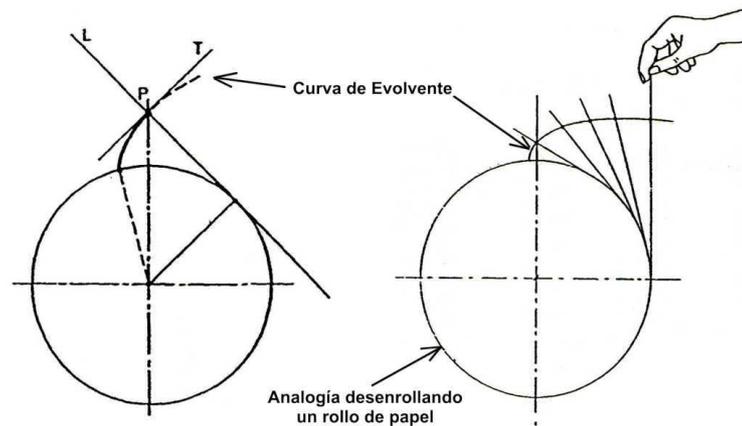


Figura 3.14. Generación de curva de evolvente y analogía con un rollo de papel.

El principio del proceso de generado se basa en producir la curva de evolvente por medio de muchos cortes sucesivos tangentes a la curva, lo cual origina una herramienta con dientes de flancos rectos. El perfil de la herramienta, llamada hob o fresa madre se muestra en la figura 3.15. La forma recta de los dientes de la fresa se conoce como “Perfil Básico de la Fresa Madre” y se muestra como se genera diente de engrane por cortes consecutivos hechos por la fresa madre. Este es un proceso de corte continuo, el engrane gira en sincronía con la fresa la cual tiene filos cortantes, al mismo tiempo, la herramienta avanza axialmente sobre toda la cara del engrane. En la misma figura se puede apreciar como es el aspecto de un hob ya terminado en su fabricación.

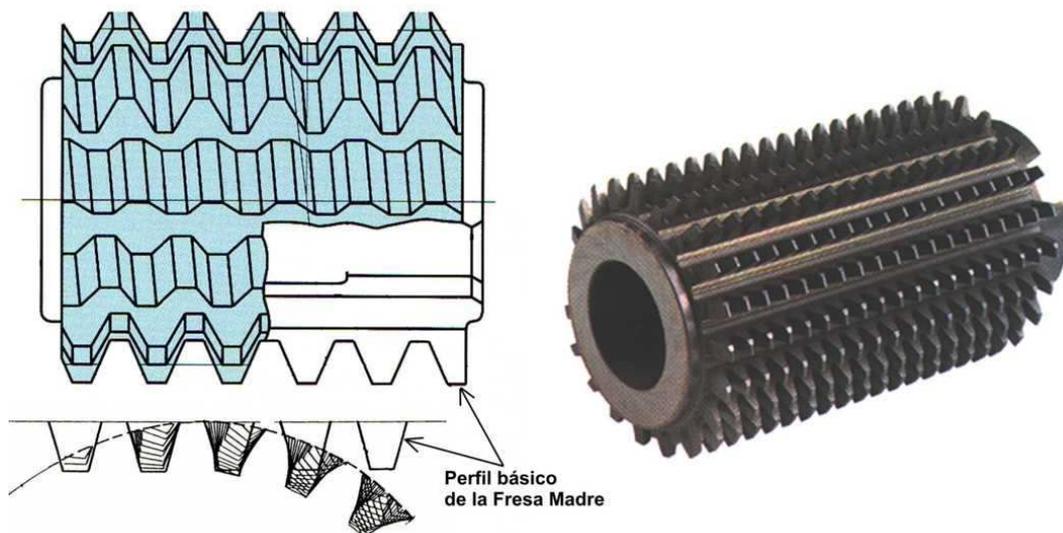


Figura 3.15. Perfil básico de la fresa madre.

El generado es el proceso más comúnmente utilizado en la industria para la fabricación de engranes rectos y helicoidales externos. Actualmente este proceso es el más utilizado debido a que provee alta producción a un bajo costo, se han hecho muchas modificaciones a las herramientas y maquinarias con lo que se puede incrementar la velocidad de operación y calidad en los engranes.

Entre las mejoras que se han hecho a este proceso se pueden mencionar las siguientes: el desarrollo y uso de aceros para herramienta más resistentes al desgaste y temperatura; desarrollo de recubrimientos superficiales que incrementan la resistencia al desgaste y temperatura y, desarrollo de materiales que se pueden utilizar sin refrigerante, lo que ha venido a implementar el término “generado en seco”. Normalmente para aplicaciones generales se utilizan fresas madre fabricadas en acero rápido (M2 ó M35), para operaciones en seco o para alto desempeño se utilizan fresas madre en aceros fundidos especiales (FM34D), aceros sinterizados (FAX38, FAX55) o en carburo de tungsteno. En conjunto con el material base (acero o carburo), se puede recubrir la fresa madre para obtener mejores desempeños ya que permiten trabajar a velocidades y avances mas altas reduciendo el desgaste de la herramienta.

Los desarrollos para este tipo de herramientas no se detienen y cada vez se obtienen aleaciones y recubrimientos más resistentes lo que lo mantiene como el proceso más utilizado para fabricación en masa de engranes.

3.5.3. Brochado

La brocha es una herramienta de corte y se caracteriza por tener dientes con filos cortantes los cuales van incrementando su altura en forma consecutiva hasta alcanzar la forma o profundidad requerida como se muestra en la figura 3.16. El brochado es una operación en la cual la brocha, es forzada a pasar por el interior o exterior de la pieza de trabajo para obtener una forma específica.

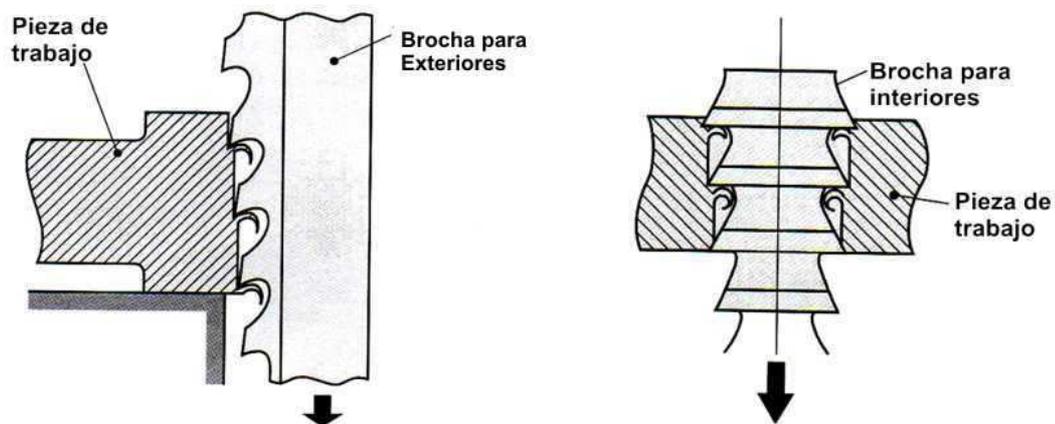


Figura 3.16. Brochado interior y exterior

Dentro de las ventajas que esta herramienta proporciona se pueden mencionar:

- Existen brochas tanto para interiores como para exteriores.
- Es un proceso muy rápido.
- Son herramientas de forma, lo cual significa que la geometría que tiene la herramienta será transmitida a la pieza.
- Son herramientas que se pueden re-afilar –dependiendo del tipo de herramienta y proceso- hasta 15 veces.

En la figura 3.17 se muestra una brocha típica para un engrane interno, los extremos de esta herramienta se denominan zancos, estos son conectores para la máquina brochadora. El zanco frontal es enganchado a un cabezal el cual jala la brocha a través de la pieza. En algunas máquinas, el proceso es empujando la herramienta en lugar de jalar. En otro diseño de máquina, la broca permanece fija y lo que se desplaza a lo largo de su longitud es la pieza de trabajo, este tipo de máquina también se ejemplifica en la figura.

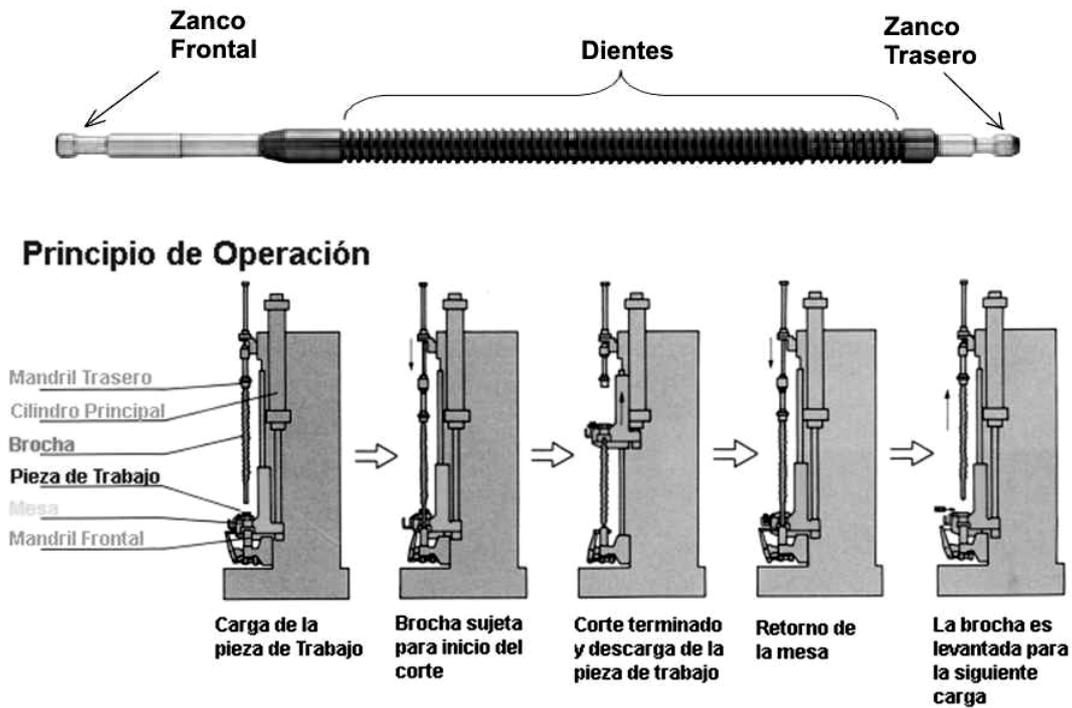


Figura 3.17. Brocha típica para interiores y operación.

Un tipo de brocha muy utilizado es la que tiene dientes combinados alternados, esto es, un diente corta el diámetro menor y el siguiente el diámetro mayor y así sucesivamente, figura 3.18. Este diseño permite obtener piezas con menos variantes en concentricidad entre ambos diámetros.

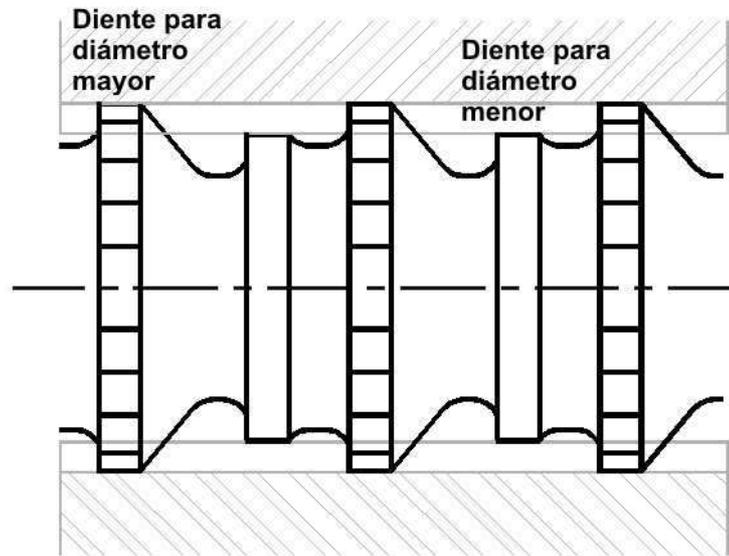


Figura 3.18. Disposición de dientes en brocha combinada de diente alterno.

Este proceso es el que proporciona el costo beneficio más bajo cuando es utilizado para producción en alta escala. Normalmente se utiliza para la producción de piezas metálicas pero, también es utilizado en plástico y materiales no metálicos. Las brochas hoy en día son utilizadas en formas muy complejas para la fabricación de engranes internos y externos, tanto rectos como helicoidales.

Como un ejemplo de aplicación, el collar helicoidal que tienen las transmisiones automáticas es fabricado con esta herramienta. Hasta este momento, no se ha podido desarrollar un proceso que mejore en productividad y costo al brochado. Al igual que las fresas madre, se hacen desarrollos continuos permitiendo la utilización de aceros más resistentes así como tratamientos superficiales y/o recubrimientos para incrementar la productividad.

Existen dos limitantes principales que presenta este proceso, a saber:

- ❖ Entre más material se requiera cortar, la longitud de la brocha debe ser mayor, esto hace que en ocasiones no sea posible el uso de una brocha por no contar con la maquina con longitud suficiente.

- ❖ La cantidad de material a cortar, implica un esfuerzo de corte el cual está directamente relacionado con la potencia de la maquina: A mayor material a cortar, mayor potencia, máquina más grande y rígida.

La brocha solo es capaz de cortar ciertas “formas”, no es flexible.

Se fabrican las brochas principalmente en aceros rápidos o al cobalto (M2, M4, M35) pero dependiendo del proceso y exigencias de producción, también se fabrican en aceros sinterizados (T15, PMM4) o de carburo de tungsteno sólido. En conjunto, las brochas pueden ser sometidas a un tratamiento químico de nitrurado para que la superficie exterior obtenga mayor dureza y se tenga una mejor lubricación. Dependiendo de la aplicación, también se pueden recubrir con TiN que prolonga aún más la vida de la herramienta.

3.5.4. Generación con piñón generador

El tallador (figura 3.19) es una herramienta con forma de engrane (piñón), la cara inferior del tallador es la que tiene filo para el corte.

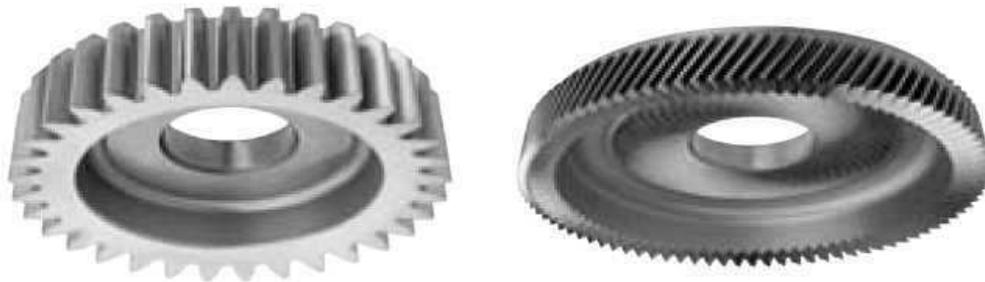


Figura 3.19. Talladores típicos. Para engranes rectos y helicoidales.

La operación de tallado se basa en el principio de dos engranes que son hermanados, con la variante de que uno de ellos recorre el espesor del otro engrane de un extremo al otro y viceversa. El que se mueve de un extremo al otro corresponde al cortador el cual se denomina “tallador”, figura 3.20.

Esta operación es en forma vertical, el corte de los dientes se realiza durante el movimiento o carrera hacia abajo. El tallador es alimentado contra la pieza de trabajo reduciendo la distancia entre centros entre ellos. Una vez que la herramienta ha alcanzado la profundidad total de trabajo, tanto la pieza de trabajo como el tallador comienzan a girar en sincronía y basta una sola vuelta completa para terminar el engrane. Esta operación podría no realizarse en una sola vuelta ya que dependiendo de la profundidad total de trabajo, en ocasiones son necesarias 2 ó 3 pasadas.

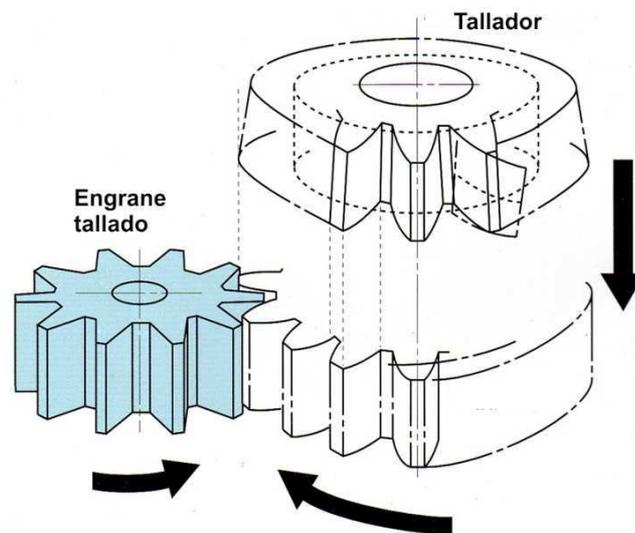


Figura 3.20. Operación de tallado.

Con este método es posible fabricar engranes rectos y helicoidales, tanto externos como internos. Este tipo de operación es utilizado cuando restricciones en la geometría de la pieza de trabajo impiden el uso de otro tipo de herramienta, como puede ser en piezas que presentan hombros muy cercanos al engrane.

Dentro de los procesos de fabricación de engranes, el de tallado se encuentra dentro de los más lentos, realmente únicamente se utiliza cuando existen las limitantes de “hombros” como se muestra en la figura 3.21. En estos casos, no sería posible utilizar un generado o brochado.

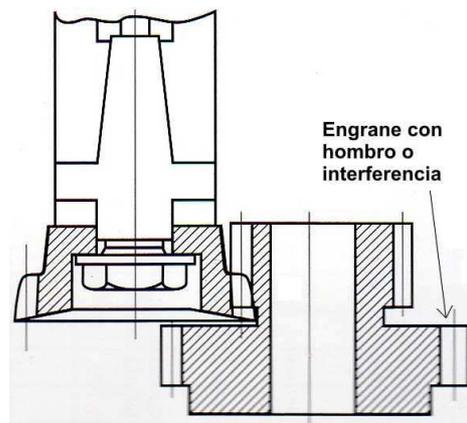


Figura 3.21. Tallado de engranes con interferencia

Los talladores son fabricados en aceros rápidos (M2, M35) y si se pretende obtener un mejor rendimiento, se utiliza en acero sinterizado (FAX31) en combinación con recubrimiento de TiN.

3.5.5. Desbarbado (Rasurado)

Se utiliza una herramienta de corte que se caracteriza por su forma de engrane con dientes rectificadas, esta herramienta hermanará perfectamente con el engrane a ser procesado (figura 3.22). Los dientes del desbarbador tienen serraciones con forma rectangular a lo largo del perfil los cuales al entrar en contacto con el engrane, cortan pequeñas cantidades de material en forma de hilos delgados; de ahí proviene el nombre de “desbarbador”, en otras partes del mundo, se conoce como “afeitador” o “rueda de rasurado”.

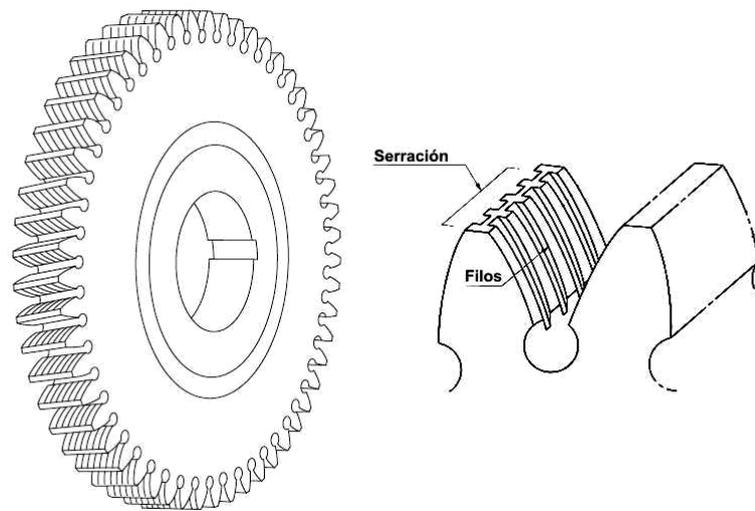


Figura 3.22. Desbarbador y detalle de sus dientes.

Principalmente, el desbarbador se utiliza para obtener un mejor acabado superficial a los dientes de los engranes y además, para proporcionarles las tolerancias y dimensiones finales requeridas. Esta herramienta se utiliza posterior a los procesos de generado o tallado en donde las superficies en los dientes son obtenidas con un acabado burdo y por consecuencia, las tolerancias no están bien definidas.

En la figura 3.23, se aprecia como se realiza el proceso de desbarbado el que en general, es sencillo en su operación. Únicamente se hermanan ambas partes: engrane y herramienta, el desbarbador está acoplado a la transmisión de la máquina y al girar transmite movimiento al engrane, se hace girar en un sentido mientras se desplaza a lo largo de la cara del engrane y al final del recorrido, el giro se invierte regresando al punto de origen. Este proceso se repite por lo normal 4-5 veces dependiendo de la cantidad de material a remover, las capacidades de la máquina y el acabado superficial que se quiera obtener.

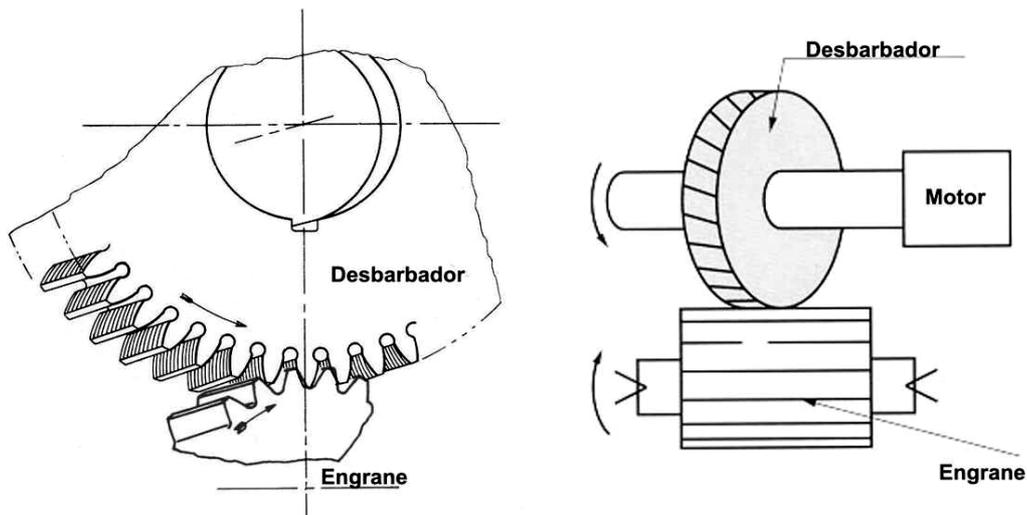


Figura 3.23. Proceso de desbarbado

Este proceso podría entenderse como una transmisión simple entre engranes sin embargo, la diferencia radica en que mientras en una transmisión de engranes hay un claro de hermanamiento o “backlash”, en el desbarbado no existe este espacio, la herramienta y el engrane están en contacto total y en cada recorrido de la herramienta, se incrementa este contacto, este depende de la cantidad de material a remover en cada recorrido, definido por los aspectos mencionados en el párrafo anterior.

Aunque el proceso de rectificado provee mejores acabados superficiales, tolerancias más cerradas y mejor repetitividad; el desbarbado es más económico y la herramienta se puede modificar en su geometría para el proceso de engranes con variantes en ángulos de presión lo que hace a la herramienta más versátil que una rueda de rectificado.

Los desbarbadores se fabrican en aceros rápidos (M2, M4) y también se utiliza el acero sinterizado (PMM4) para obtener mejor desempeño. Entre los desarrollos de la empresa Nachi se encuentra el uso de aceros fundidos con estructura más homogénea (FM23A) el cuál permite obtener mayor vida útil. En este campo de aplicación no se ha demostrado que el uso de aceros sinterizados o con recubrimientos permita una reducción en costos de operación por lo que se han seguido utilizando únicamente los materiales mencionados anteriormente.

3.5.6. Rolado

Además de procesos de corte de engranes, existen algunos que incluyen herramientas que no generan viruta, haciéndolos procesos más limpios, más precisos e incluso más rápidos sin embargo existen limitantes. En este trabajo, se explica el proceso con peines de rolado “Forming Racks” siendo la empresa Nachi fabricante de este tipo de herramienta.

Un peine de rolado como se muestra en la figura 3.24, tiene forma rectangular, cada peine un inicio en donde los dientes comienzan a “aparecer” y conforme se avanza por la longitud del peine estos se van haciendo más grandes hasta que al final ya tienen la forma final que se busca en el engrane.

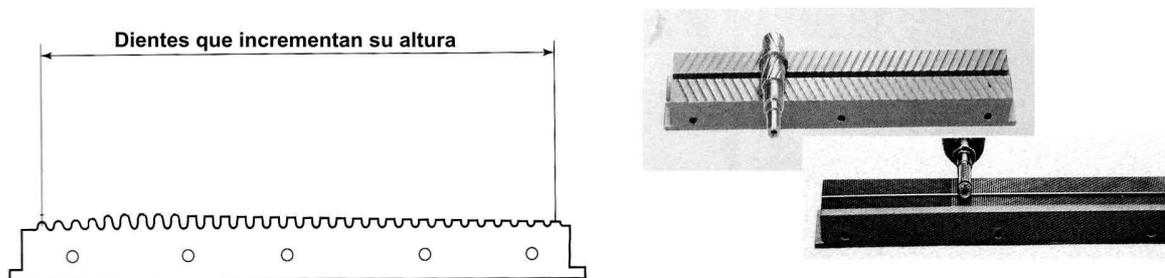


Figura 3.24. Peines de rolado

Cabe hacer mención de que estas herramientas son diseñadas y fabricadas no únicamente para de engranes sino también para cuerdas y ranuras de lubricación.

Los peines se utilizan en pares, cada uno de ellos es idéntico al otro. Se usan en una máquina especial de rolado, esta máquina puede ser horizontal o vertical y siempre se hace referencia al centro del husillo que es donde se coloca la pieza, los peines se colocan arriba y abajo (o izquierda y derecha en máquinas verticales) a la misma altura o distancia uno del otro, desplazados del centro del husillo; los dientes de inicio apuntan hacia el mismo.

Los peines son movidos en sentido contrario uno con respecto al otro y llegan hacia la pieza a la cual hacen girar. Los dientes de los peines van incrementando su altura por lo que

cada vez que avanzan “penetran” más en la pieza deformándola para darle la forma requerida. Este proceso se aprecia en la figura 3.26.

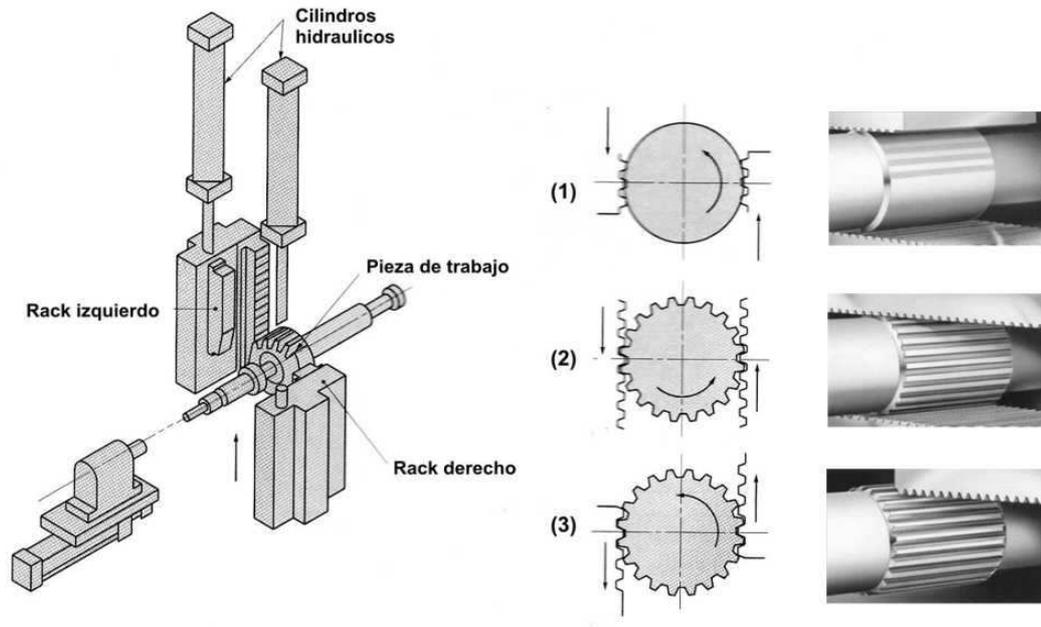


Figura 3.26. Proceso de rolado

El proceso de rolado es el más rápido que se conoce para la fabricación de engranes, estrías, cuerdas y ranuras de lubricación. Asimismo, es un proceso que provee un acabado superficial excelente evitando la necesidad de procesos de rectificado finales.

Sin embargo, también se tienen limitantes: debido a que se trata de un proceso de deformación, se recomienda usarse en piezas en donde los dientes, cuerdas o ranuras no sean muy grandes. A mayor sea la profundidad del diente o ranura, se requiere que el peine sea más largo y que la máquina tenga más potencia. En el caso de engranes y/o estrías, se recomiendan pasos diametrales 16, 20, 24, 32, 48 ó mas finos; asimismo, los ángulos de presión recomendados son 30° , 37.5° y 45° . Ángulos de presión menores implicarán mayor esfuerzo para la deformación.

Otra limitante es que este proceso solo se puede usar en piezas redondas que puedan ser sujetas entre centros.

Una desventaja que este proceso ofrece es que debido a que se trata de un proceso de deformación, el material es empujado para dar su forma sin embargo, este material es empujado hacia alguna parte ya que no se remueve de la pieza. Este material se conoce con el nombre de “sobre-material” y es empujado hacia el diámetro exterior, en la mayoría de las ocasiones se requiere un proceso posterior de rectificado para eliminar este sobre-material.

Estas herramientas se fabrican en aceros rápidos (M2) y hace unos años, la empresa Nachi desarrollo el acero HSD que ofrece una mayor resistencia y durabilidad. En este tipo de herramientas no es conveniente el uso de carburo de tungsteno o recubrimientos ya que por ser muy duros, se vuelven frágiles lo que ocasiona su rápido deterioro debido a las elevadas presiones a las que están expuestos por el proceso de deformación.

3.5.7. Generación con cremallera

El principio de trabajo con cuchilla -cremallera se realiza con las máquinas tipo Maag o Sunderland.

La generación del dentado con estas máquinas no se realiza con movimiento continuo (como una cuchilla circular), dada la pequeña longitud de la cremallera de primitivo rectilíneo. Se desprende que el carro portapieza debe de estar animado periódicamente de un movimiento de regresión durante el cual el engranaje, mientras se opera el tallado, presenta las distintas partes a dentar según un desplazamiento circular, que es función del número de dientes fresar y que se pone igual a un paso o dos pasos circunferenciales.

Este método de fabricación permite el tamaño de engranajes helicoidales mediante inclinación del cabezal portaherramientas, que puede ser arbitraria; los respectivos movimientos de rotación entre la pieza y la herramienta se determinan por una combinación de ruedas dentadas en relación a la hélice a generar.

Añadimos que por exigencias de precisión requeridas en la ejecución del perfil del dentado, las cuchillas de corte (circulares o de cremallera) están completamente rectificadas; el perfil de la arista de corte se determina automáticamente sobre máquinas especiales.

Las máquinas Maag poseen la ventaja de tallar coronas de grandes dimensiones cuyo diámetro primitivo máximo puede llegar a 2.4 metros (figura 3.27)

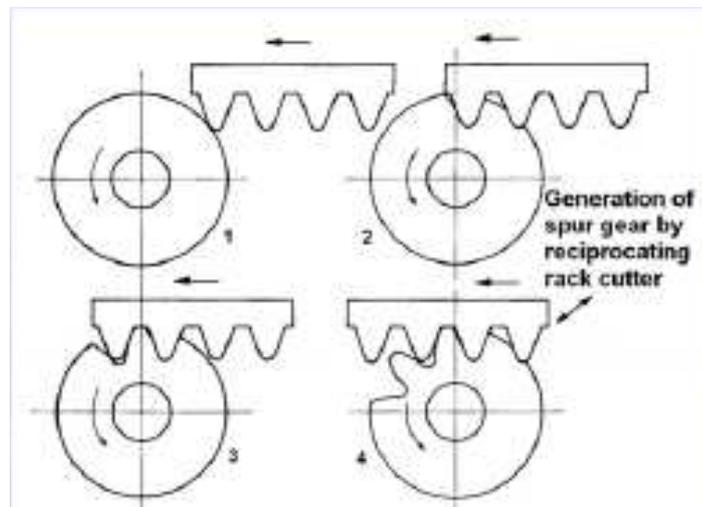


Figura 3.27. Generación con cremallera.

3.6. PROCESOS DE ACABADO SUPERFICIAL

3.6.1. Rectificado

Luego de haber sido endurecida la pieza mediante el tratamiento térmico adecuado y lograr una alta dureza y así poder resistir enormes cargas aplicadas durante años de servicio, los engranajes sufren grandes distorsiones inadmisibles desde el punto de vista de operación en su aplicación final, que no pueden ser eliminadas con máquinas Talladoras de Engranajes Dichas distorsiones, figura 3.28 se eliminan en máquinas especiales rectificadoras de engranajes como la que se muestra en la figura 3.29, de muy alto costo, y se puede realizar por rectificación por generación y rectificación de perfiles o con herramientas CBN repasables o con capa galvanizada, obteniéndose una precisión dimensional muy alta del orden de $5 \mu\text{m}$ (0.005 mm o $0.0002''$) y excelentes acabados superficiales del orden de $0.4 \mu\text{m}$ (0.0004 mm o $0.00002''$)



Figura 3.28. Eliminación de la distorsión generada mediante el tratamiento térmico mediante rectificado



Figura 3.29. Máquina para rectificar engranes de la empresa china Tianshan Heavy, modelo ZP80

3.6.2. Lapeado

Se trata al engranaje con una herramienta para lapear en forma de engranaje, en un medio que tiene abrasivo. A veces se tallan dos engranajes conjugados. Se necesita un movimiento relativo adicional en la dirección del eje para el engranaje cilíndrico de dientes rectos y para los dientes helicoidales. Un lapeado excesivo puede ser perjudicial para la forma de la involuta.



Figura 3.30. Proceso de lapeado de un engrane

3.6.3. Pulido

Se debe utilizar el pulido para dar la forma final a los dientes después del termotratamiento. Se pueden corregir los errores de distorsión debidos al templado. Cuando se tallan, debe dejarse suficiente material sobre la superficie del diente. Algunos engranajes de dentadura fina se hacen a partir de lingotes de acero fundido.

3.6.4. Bruñido

Es un proceso de moldeado plástico que resulta de la presión de rozamiento, la cual aplan y extiende las pequeñas irregularidades superficiales. Se utiliza una herramienta bruñidora templada especialmente, figura 3.31. Este proceso no corrige los errores debidos a un tamaño erróneo.

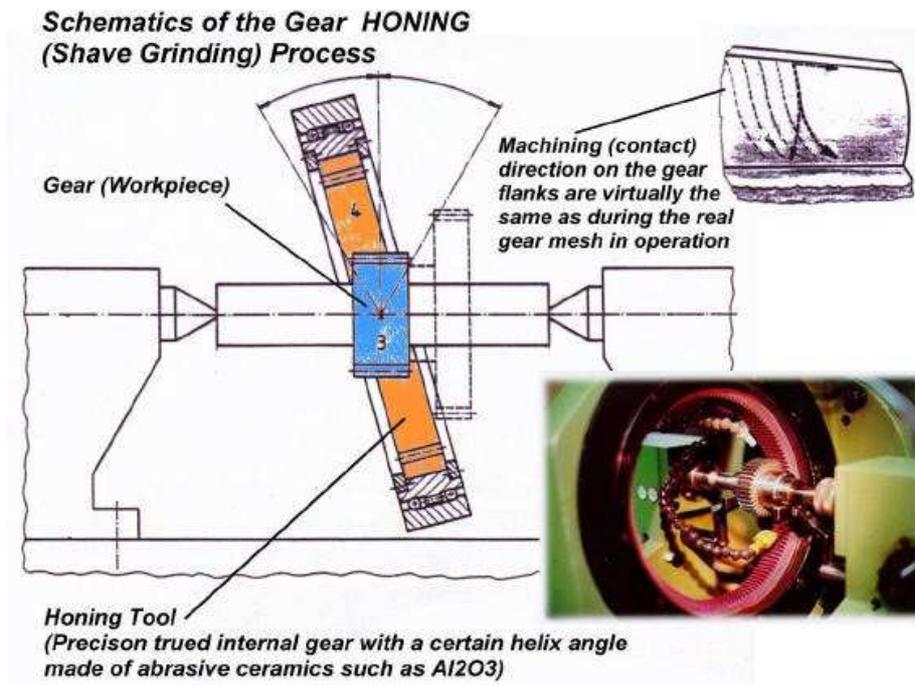


Figura 3.31. Bruñido (honing) de un engrane.

CAPITULO 4

DESGASTE DE LOS ENGRANES

Las formas en que puede fallar un engranaje son muy diversas, pero pueden determinarse con un análisis detenido ya que cada tipo de falla deja una huella característica en los dientes. Se pueden distinguir cinco tipos de fallas a saber [12]:

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

4.1. DESGASTE.

El desgaste se puede definir como el deterioro que sufren los dientes y por el cual se remueven 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:

4.1.1. 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 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.

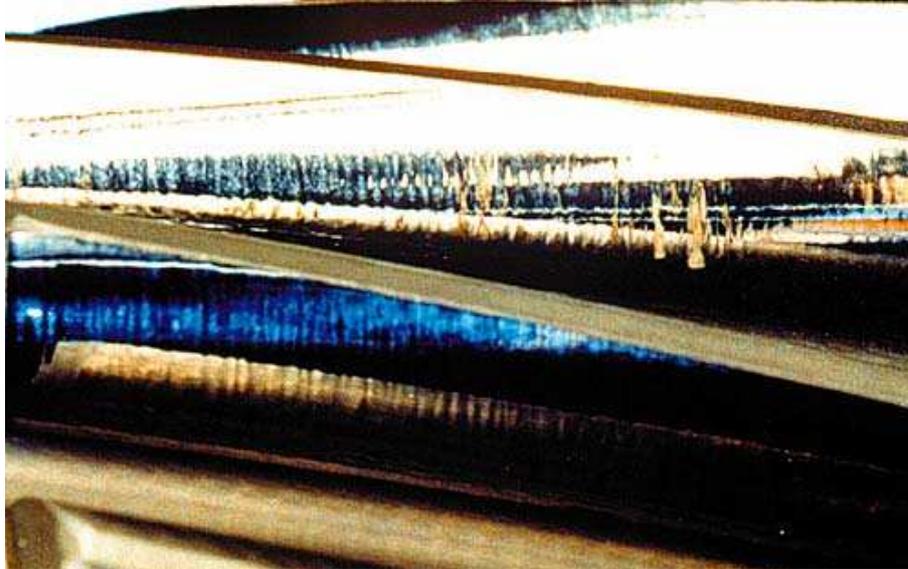


Figura 4.1. Desgaste pulimentado

4.1.2. 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 con una velocidad 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 4.2). 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.

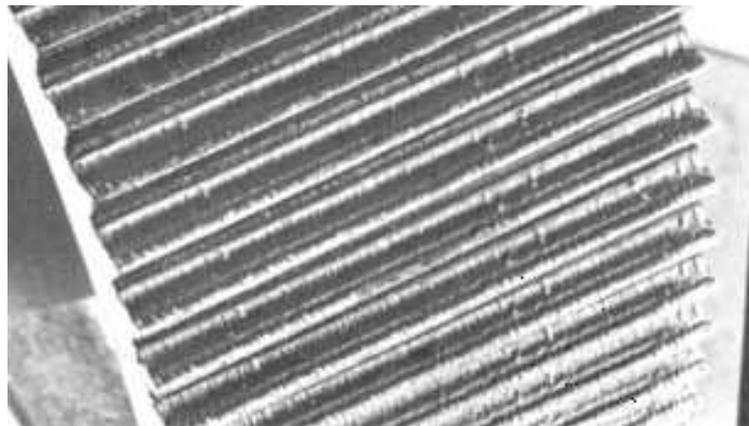


Figura 4.2. Desgaste excesivo

4.1.3. 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 y 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 (Figura 4.3). 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 tratanto de desalojar todo elemento extraño que pueda convertirse en elemento abrasivo.

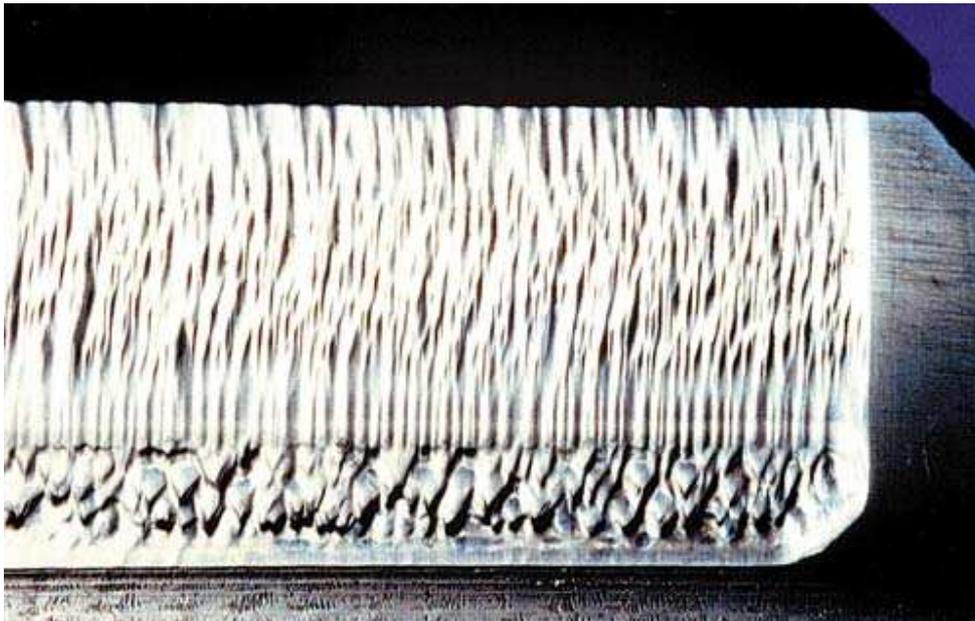


Figura 4.3. Desgaste abrasivo excesivo

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, figura 4.4. 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.



Figura 4.4. Desgaste corrosivo

Desgaste adhesivo

También se le conoce como escoriado. Es un desgaste muy rápido de los dientes que es causado 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 el desgaste adhesivo, figura 4.5. 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 el soldado de las dos superficies. Como el movimiento continúa, 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.

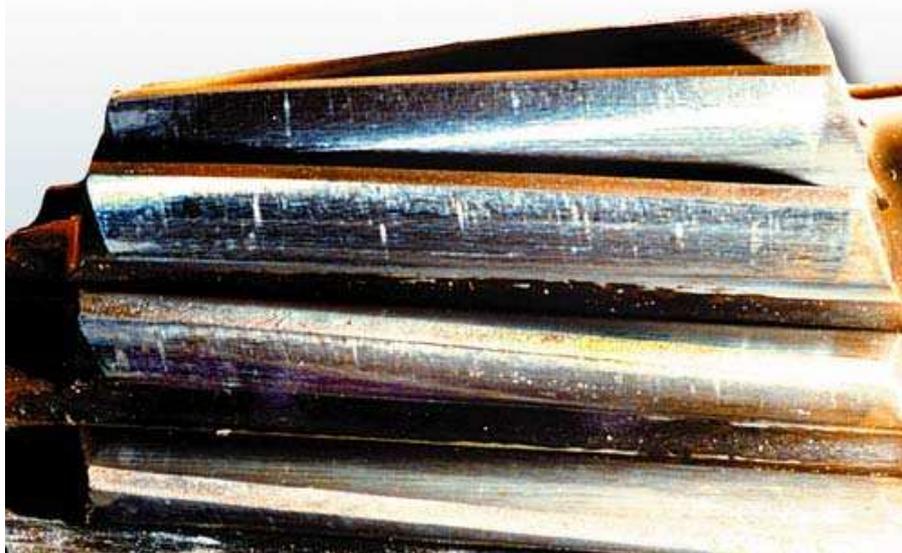


Figura 4.5. Desgaste adhesivo de los dientes de engrane

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:

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 4.6). 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.

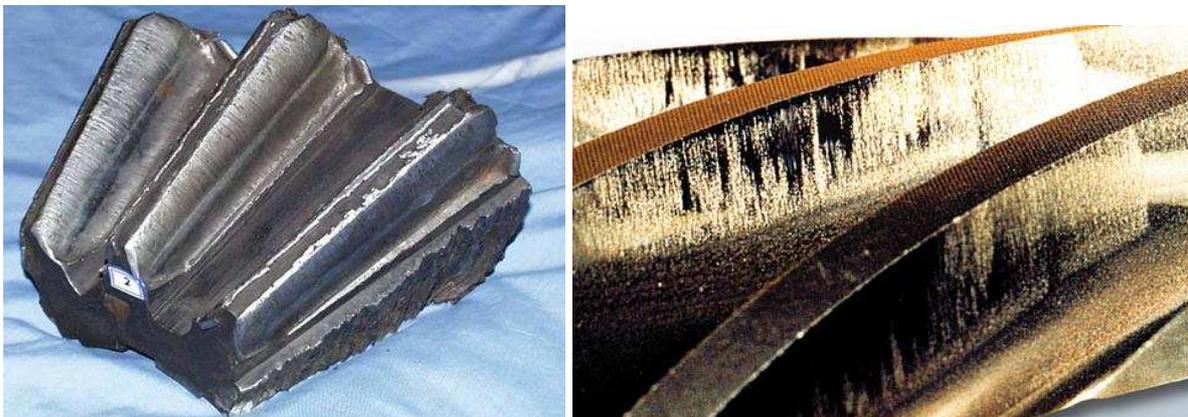


Figura 4.6. Rayado (scuffing) de las superficies de un diente de engrane

4.2. 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

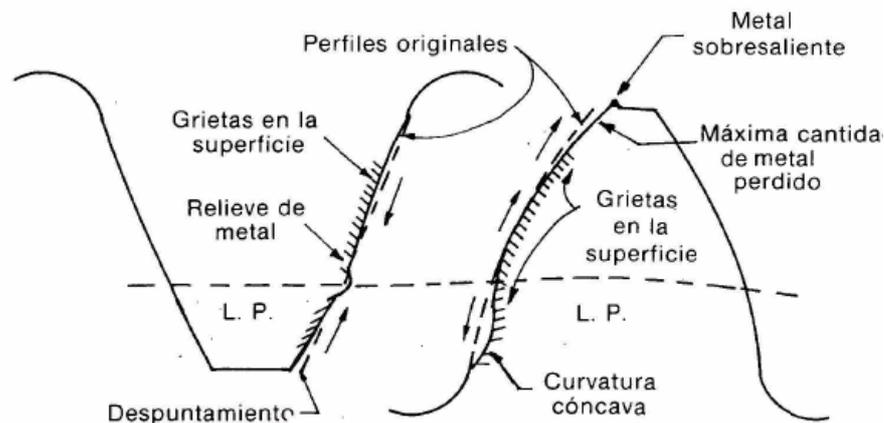
de muchos millones de ciclos de esfuerzo, las fallas por fatiga por lo general resultan evidentes solo después de prolongados servicios, figura 4.7. Esto contrasta con el desgaste y la escoriación que pueden comenzar en forma rápida. Los engranajes que funcionan con carga desarrollan esfuerzos superficiales 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.



Figura 4.7. Falla por picado en la superficie de contacto de un diente de engrane. Las “marcas de playa” son visibles en algunos de los agujeros grandes.

La figura 4.8 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 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.



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

Figura 4.8. Efectos de los sentidos de deslizamiento sobre la superficie del diente.

El esfuerzo de Hertz máximo en la rueda conducida 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 4.9). El deslizamiento negativo ocurre en el dedendo del piñón y la rueda, mientras que en las regiones del adendo el deslizamiento es positivo.

	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 4.9. Movimientos en el engrane

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 puede presentar por errores en el perfil del diente, irregularidades superficiales o pequeños desalineamientos del diente, figura 4.10. Estas causas se pueden corregir fácilmente.

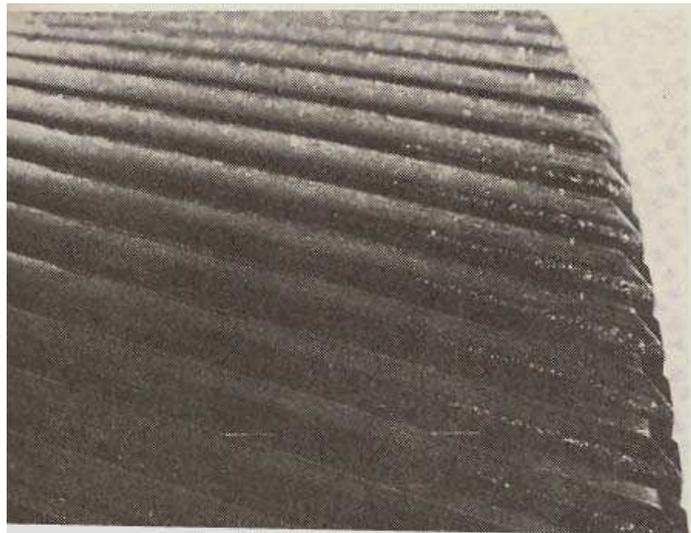


Figura 4.10. Picado inicial

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 4.11) originando grietas de fatiga por flexión que conducen a la fractura del diente (Figura 4.12), Esta falla se evita manteniendo la carga superficial abajo del límite a la fatiga del material o aumentando la dureza.

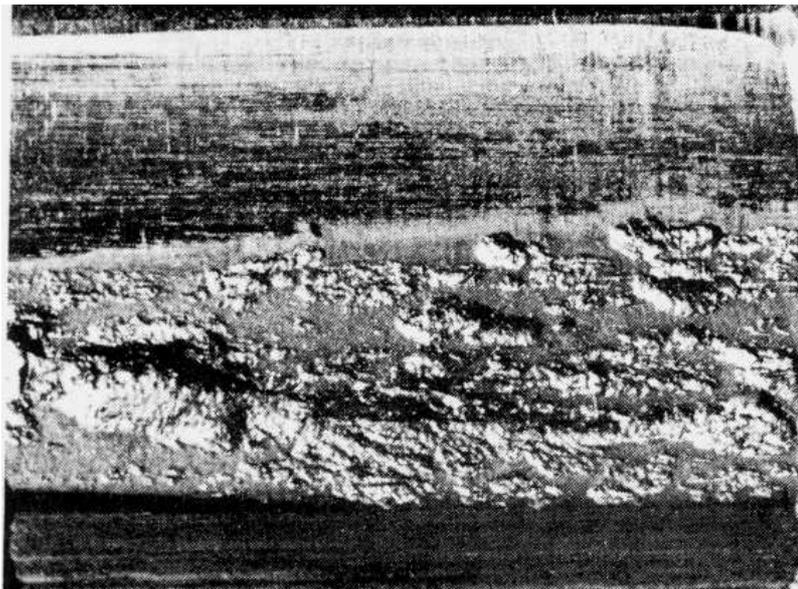


Figura 4.11. Picado extensivo

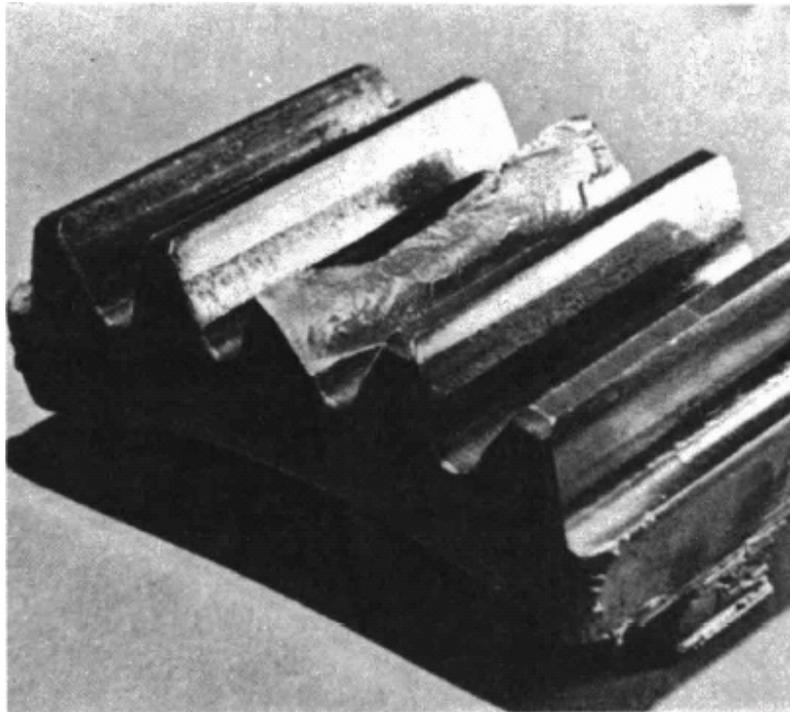


Figura 4.12. Fractura por picaduras

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, figura 4.13.

Los desprendimientos ocurren con mayor frecuencia en un área relativamente pequeña abajo de la línea de 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 templados, las picaduras y el desconchado revisten gravedad. La probabilidad de desconchado es mayor que la de picado cuando se les somete a fatigas severas.



Figura 4.13. Desconchado de un diente de engrane

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.

4.3. FLUJO PLÁSTICO

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, figura 4.14. 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.

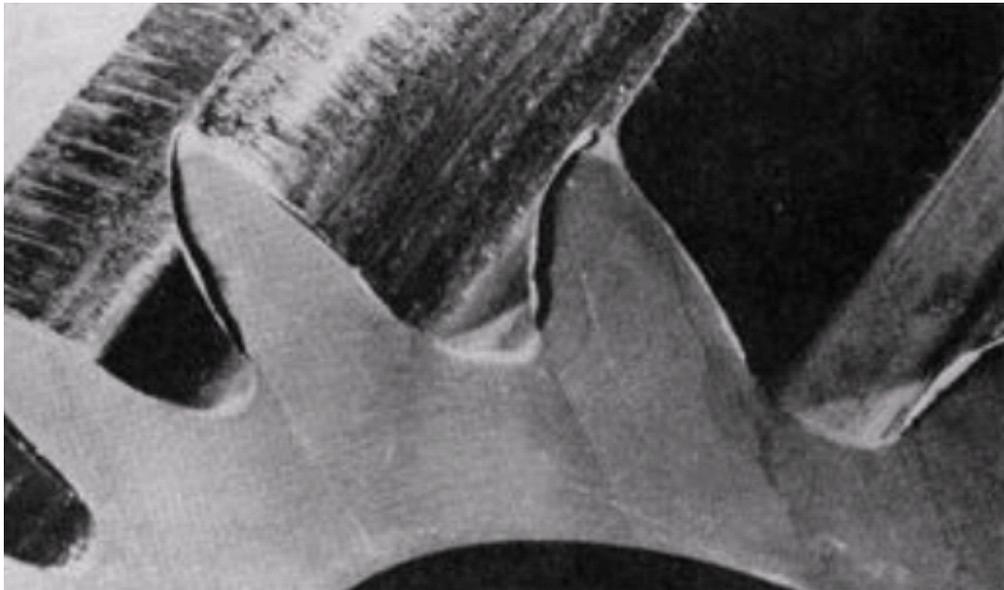


Figura 4.14. Deformación plástica en los dientes de un engrane

4.4. ROTURA DE DIENTES

Esta falla resulta de **sobrecargas** o por **ciclos de esfuerzo** de los dientes más allá del límite de fatiga 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 suceder 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 4.15 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

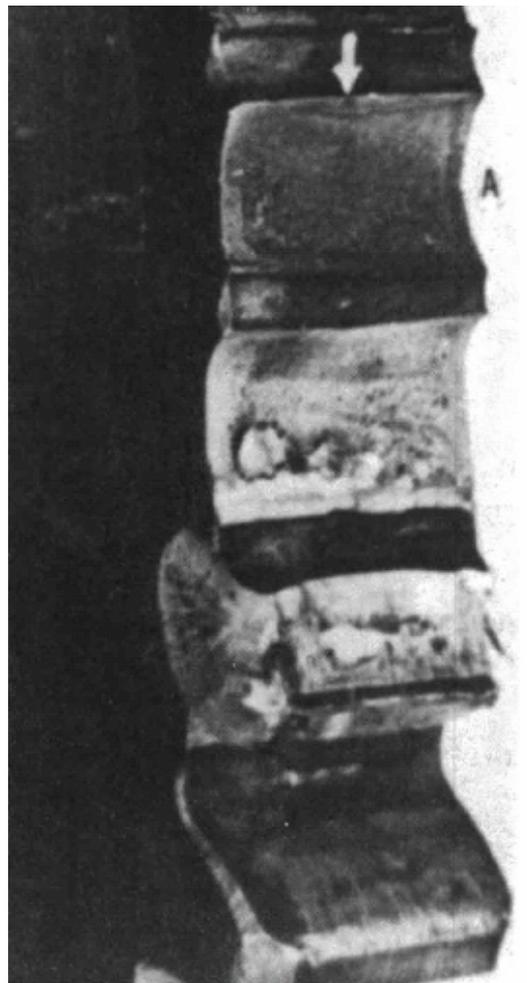


Figura 4.15. Fatiga y sobrecarga

Las fracturas de los dientes ordinariamente parten de la raíz. Una viga en voladizo es más débil en su base, figura 4.16. El picado en la línea de paso puede ser tan severo que cause una fractura que comience en esta línea.



Figura 4.16. Inicio de la falla en la raíz del diente

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

Fractura por fatiga

Se puede reconocer por la presencia de curvas semielípticas con marcas perpendiculares en la superficie de la fractura que irradian desde el foco o núcleo de la fractura (Figura 4.17) 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.

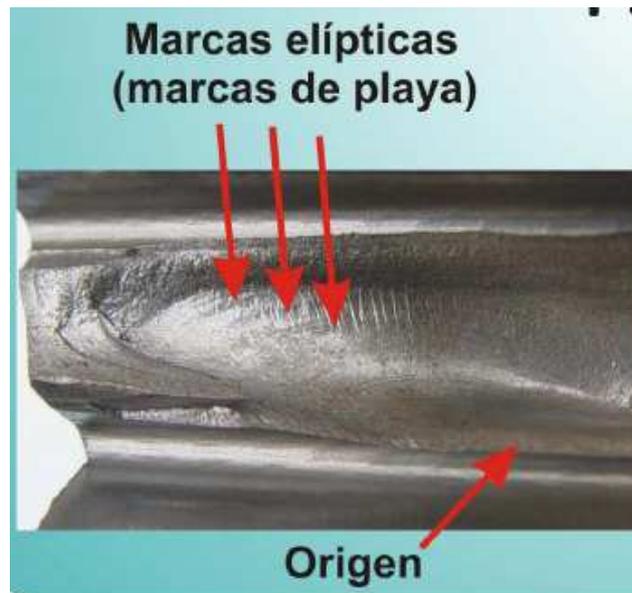


Figura 4.17. Falla por fatiga

Fractura por fatiga de flexión

La Figura 4.18 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.

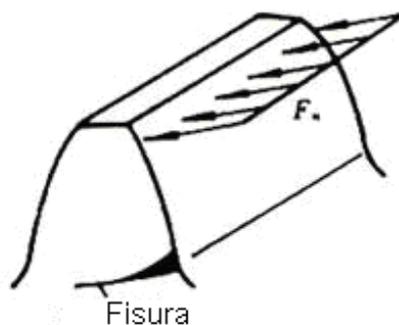


Figura 4.18. El diente de un engrane como una viga en cantilever

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

de raíz del 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, figura 4.19. 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.

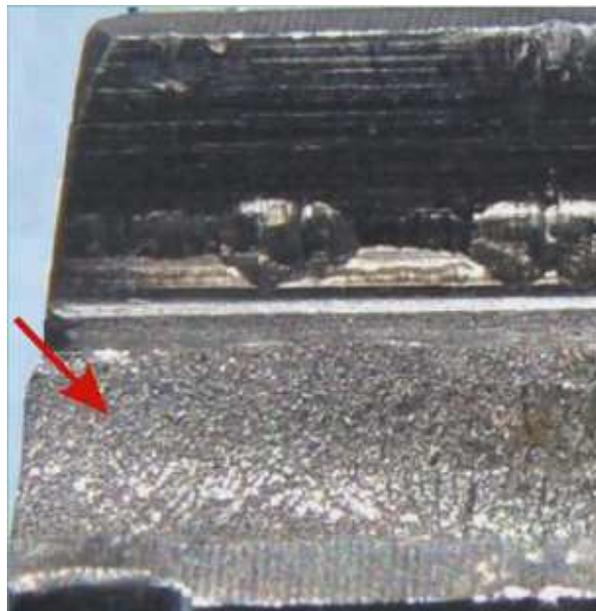


Figura 4.19. Fractura por sobrecarga

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.

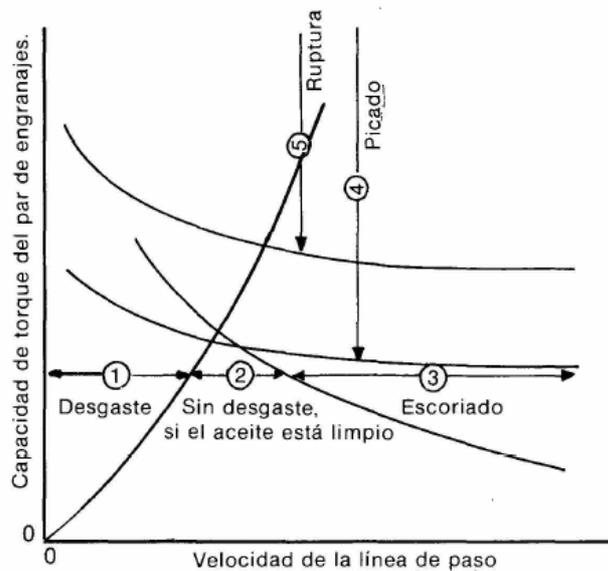
4.5. FALLAS COMBINADAS

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 4.20 se puede 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.



Figura 4.20. Falla combinada en un engrane.

Como conclusión se puede analizar la figura 4.21 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.



- 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 4.21. Regiones de falla del engranaje

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 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 sinfín-corona casi siempre trabajan en la región de desgaste 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 Sinfin-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 soldado 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 adensos desiguales como en las relaciones de engrane elevadas donde las modificaciones del adenso 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 las 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 (reglones 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, permitiendo 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 ésto. 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

CAPÍTULO 5

LUBRICACIÓN DE ENGRANAJES

Los engranajes son dispositivos mecánicos que permiten la transmisión de fuerza (potencia) y movimiento rotativo, generalmente, para convertirlo en trabajo. Existen en una gran diversidad de formas, materiales y tamaños, ya que son muy específicos a cada aplicación. A su vez, las velocidades, las cargas y la temperatura de trabajo también determinarán las características de los engranajes a utilizar en cada máquina o sección de ella. Según lo anterior y dada la enorme variedad de elementos y situaciones con engranajes, la lubricación de estas piezas mecánicas deberá adecuarse individualmente según cada caso, a fin de obtener las mejores condiciones de operación. De manera general se puede decir que existen dos tipos de engranajes de transmisión: abiertos y cerrados.

5.1. ENGRANAJES ABIERTOS

Los engranajes abiertos corresponden con un tipo de transmisión cuya mayor incidencia se encuentra en la industria pesada (Ej. azúcar, cemento, minas etc.), figura 5.1. Se puede citar como algunas de las principales condiciones que encontramos en este tipo de elemento las siguientes:

- Debido a sus dimensiones y a lo complejo del maquinado, es común encontrarnos con áreas de contacto o áreas efectivas de trabajo muy inferiores al área real de los dientes del engranaje. Lo cual se traduce en altas concentraciones de la carga.
- Cuando cuentan con cobertores, normalmente los mismos no garantizan un buen sellado, y por lo tanto el ingreso de contaminantes se presenta con frecuencia. En otros casos el engranaje está totalmente expuesto al ambiente.



Figura 5.1. Un engranaje abierto.

5.2. ENGRANAJES CERRADOS

Los engranajes cerrados son usados ampliamente. En una fábrica casi todo lo que se mueve: Bandas, secadores, ventiladores, bombas, equipos de manipulado de materiales, plantas de procesos y otros muchos, serán impulsados por un motor de combustión o eléctrico moviendo una caja de engranajes, figura 5.2. La caja de engranajes normalmente es una unidad de propósito general construido por un fabricante especializado. Como podrá suponer, existe una gran variedad de tamaños y tipos de cajas de engranajes en la industria.



Figura 5.2. Caja de engranajes (reductor de velocidad)

Las cajas de engranajes que utilizan combinaciones de engranajes helicoidales están muy extendidas, porque pueden transmitir cargas altas, silenciosa y eficientemente. Una versión de este tipo caja de engranajes en donde es posible seleccionar una de varias combinaciones de engranajes, por lo que es muy común para las aplicaciones automotrices, figura 5.3.

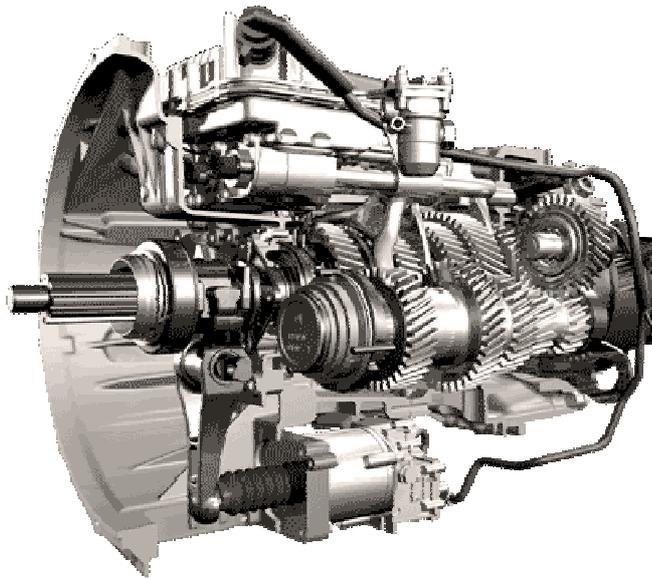


Figura 5.3. Transmisión automotriz

5.3. PRINCIPIOS BÁSICOS DE LUBRICACIÓN

Se define la lubricación como ciencia para reducir la fricción entre dos cuerpos sólidos en movimiento relativo, con la interposición de un lubricante entre las dos superficies en rozamiento.

Desafortunadamente las condiciones de operación de la maquinaria varían con frecuencia y las condiciones del ambiente de operación raramente son las mismas consideradas por las técnicas cuando diseñan.

En ciertos momentos de las maquinas, la fricción es necesaria, pero en la mayor parte de los casos, la fricción es indeseable. Genera calor que perjudica, causa desgaste y consume más energía. Para estas aplicaciones, el reto para las técnicas en lubricación es su creatividad e ingenio para reducir la fricción, o por lo menos llevarla a niveles tolerables. Por lo anterior, la lubricación está lejos de ser considerada como una ciencia exacta.

5.4. LUBRICACIÓN DE ENGRANAJES

La lubricación de los engranajes puede llevarse a cabo mediante varios sistemas: lubricación a presión por circulación centralizada; lubricación por baño o salpique; lubricación por goteo; y lubricación manual. En los dos primeros, el aceite, circula o está confinado en un cárter y su uso es continuo y prolongado. En tanto que la lubricación manual y la lubricación por goteo, sugieren una pérdida total del lubricante, una vez aplicado.

5.4.1. Sistemas de lubricación centralizados

Los sistemas de lubricación centralizados se diseñan para lubricar la más amplia gama de equipo móvil e inmóvil. Mientras que el uso de la lubricación llega a ser más complejo, el diseño del sistema también llega a ser más complejo mientras más características se agregan. La idea principal de un sistema de lubricación centralizada es simple. Una bomba suministra lubricante a través de líneas de dosificación hacia elementos secundarios (válvulas/inyectores), que a su vez dosifican la cantidad correcta de lubricante al mecanismo que lo requiere (engranes, cojinetes, cadenas etc).

Todos los sistemas de lubricación centralizados incorporan los siguientes elementos (Figura. 5.4):

- Unidad de Bombeo
- Válvulas
- Válvulas reversibles
- Estación central
- Controladores
- Sistemas de Spray
- Depósito de grasa
- Un regulador
- Líneas

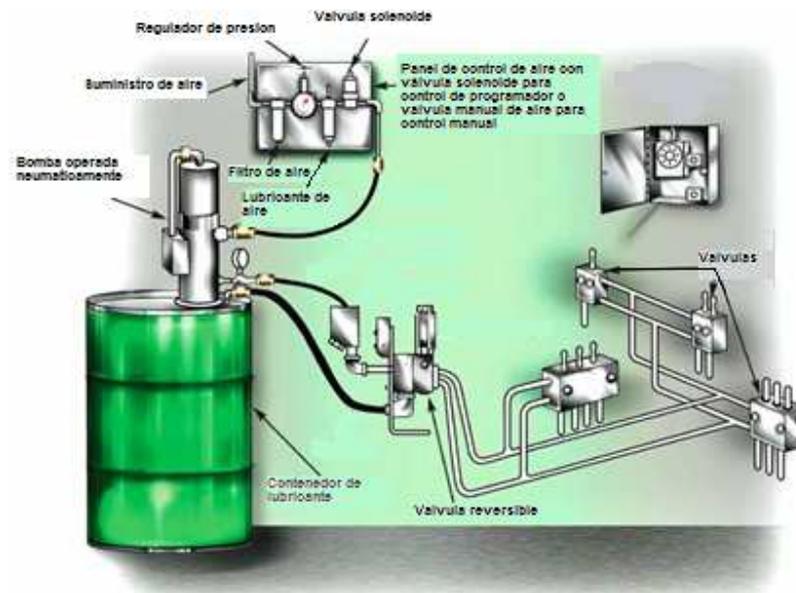


Figura 5.4. Elementos que integran un sistema de lubricación centralizado

Los sistemas centralizados de lubricación son diseñados principalmente para hacer el ambiente del trabajo más seguro para el personal del mantenimiento simplificando la lubricación a puntos de difícil acceso, especialmente en espacios confinados, cuando el equipo está en funcionamiento.

Hay 6 razones importantes para el uso apropiado de la lubricación:

- 1) Reducir fricción
- 2) Reducir desgaste
- 3) Absorber choques o vibraciones
- 4) Reducir incrementos de temperatura
- 5) Minimizar la corrosión
- 6) Formar un sello contra los contaminantes

5.4.2. Lubricación por baño o salpique

Es el método más simple, en el que los dientes del engranaje inferior están sumergidos en un baño de aceite, figura 5.5. El aceite es transferido a las superficies que se encajan y transportado a la caja de engranajes y sobre los rodamientos. El método es satisfactorio cuando las velocidades no son altas, porque el aceite sería agitado excesivamente, o donde ocurren pérdidas de potencia indeseables y aumento de la temperatura. Los engranajes lubricados por

salpique normalmente se calientan bastante y requieren de aceites de mayor viscosidad que los engranajes lubricados de otra forma.

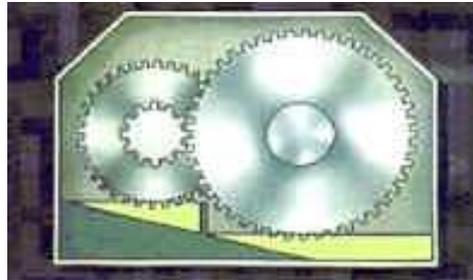


Figura 5.5. Caja de engranes lubricada por salpique

5.4.3. Engranajes lubricados por aspersión.

En sistemas de lubricación por aspersión el aceite es alimentado sobre los dientes del engranaje cerca del punto donde se encajan, figura 5.6. El aceite se drena hacia el fondo de la carcasa, donde es recirculado. Originalmente la práctica era suministrar el lubricante sobre el diente de encaje, pero ahora se considera mejor aplicar el aceite al diente de arranque, al menos que el engranaje esté operando a bajas velocidades. Esto proporciona una refrigeración más eficiente y reduce el riesgo de que exista un exceso de aceite en la raíz de los dientes. Los refrigeradores de aceite y el equipo de filtración pueden ser incorporados al sistema de lubricación por aspersión, los cuales son comúnmente usados en conjuntos de engranajes de potencia operando a altas velocidades.



Figura 5.6. Engranajes lubricados por aspersión.

5.4.4. Sistemas alimentados por gravedad o goteo

Sistemas alimentados por gravedad o goteo se encuentran en molinos, hornos, palas, dragaminas y excavadoras. Estos sistemas consisten en uno o más engrasadores, baños de aceite, líneas de alimentación presurizadas o ruedas aplicadoras, figura 5.7. Estos permiten que el lubricante escurra en el engranaje en un ciclo determinado. Este método de aplicación está limitado solo a engranajes abiertos con una velocidad de la línea de acción de 1500 pies por minuto (7.5 metros por segundo) o menos.

Para este tipo de sistemas, se usa generalmente un lubricante de engranaje abierto de tipo sintético, asfáltico, de alta viscosidad. Si se utilizan líneas de alimentación presurizadas o ruedas aplicadoras en estos sistemas, puede emplearse una grasa semifluida y lubricantes del tipo polímero/gel para engranaje abierto.

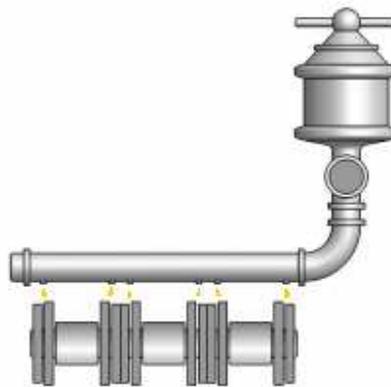


Figura 5.7. Lubricación por goteo

5.4.5. Lubricación por neblina de aceite.

En la lubricación con neblina de aceite el lubricante es atomizado en la caja de engranajes en una corriente de aire comprimido seco, figura 5.8. Las gotas de aceite depositadas sobre los dientes de engranaje proporcionan una lubricación efectiva sin arrastre de aceite. Mientras que el suministro de aire comprimido seco tiene efecto refrigerante. Los aceites usados en este método de lubricación deben ser resistentes a la oxidación ya que la formación de una neblina aumenta enormemente el área de superficie en contacto con el aire. Es importante asegurarse de que la caja de engranajes está adecuadamente ventilada de tal forma que no se crea fricción en la caja de engranajes.

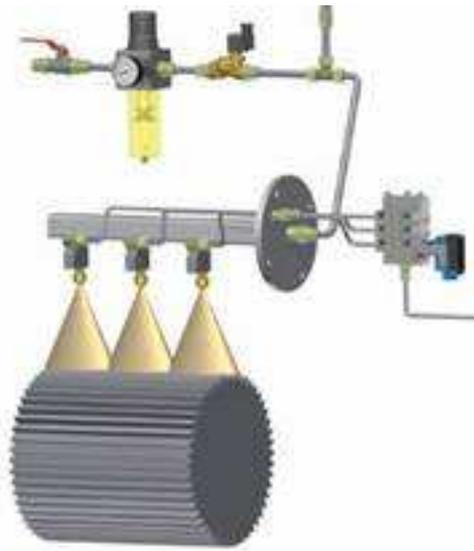


Figura 5.8. Lubricación por neblina de aceite

5.5. PELÍCULAS LUBRICANTES

En todo proceso de lubricación la presencia de un elemento que evite el contacto entre las superficies es necesaria. Este elemento, que bien puede ser un gas, un líquido o un sólido, se coloca entre ambas superficies, permitiendo que resbalen y se reduzca la fricción y el desgaste de ellas. Se denomina “película” a la porción del elemento lubricante que facilitará el movimiento de los componentes; los cuales, generalmente son metálicos.

Las películas lubricantes pueden ser de varios tipos: película fluida; película delgada o película sólida, según se muestra a continuación:

5.5.1. Película fluida

Las superficies en movimiento son separadas, aprovechando el grosor y la viscosidad de la película aportada por el lubricante; y a través de su propio esfuerzo cortante. La fricción y el desgaste generado es mínimo, por lo que es el tipo de lubricación más deseada. La película fluida puede ser formada de varias maneras a saber:

Película Hidrodinámica

Se forma a través del movimiento de las superficies lubricadas convergiendo en un punto, en el cual, se genera una presión tal, que permite mantener estas superficies separadas, figura 5.9.

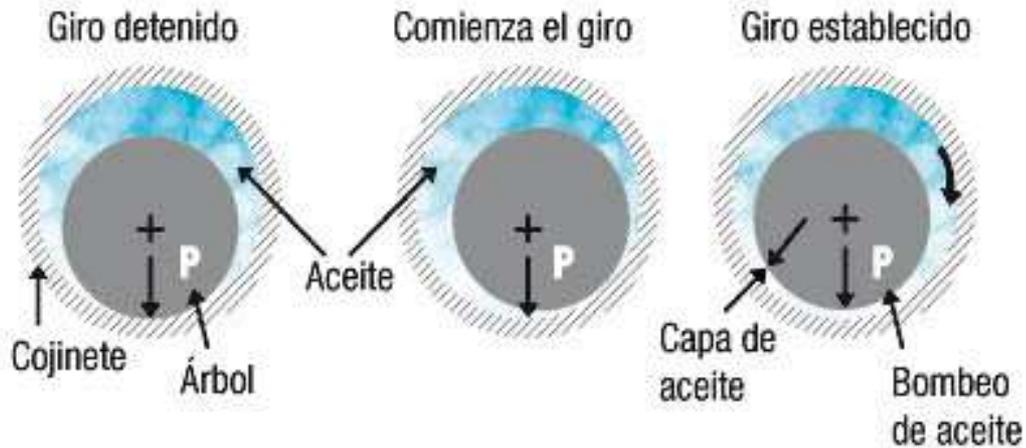


Figura 5.9. Lubricación hidrodinámica

Película Hidrostática

Se genera mediante el bombeo a presión de un fluido entre las superficies, figura 5.10, las cuales pueden o no estar en movimiento.

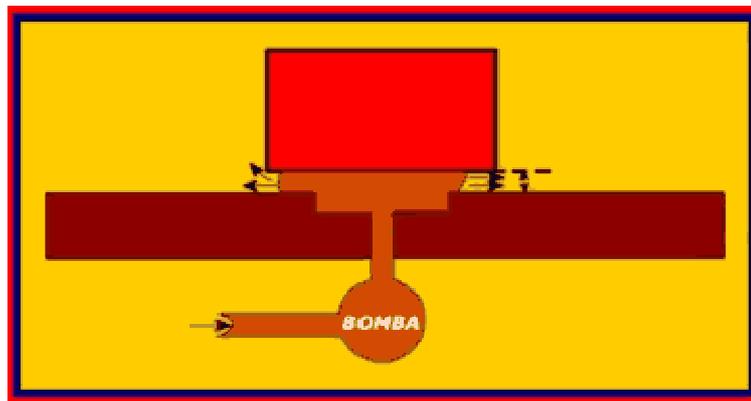


Figura 5.10. Generación de una película hidrostática con ayuda de una bomba

Película Elasto-Hidrodinámica (EHL):

Las películas EHL se forman en sistemas que contienen dos superficies metálicas lubricadas en movimiento y soportando una determinada carga. El elemento metálico se deforma leve y

elásticamente, permitiendo la formación de la película hidrodinámica, la cual separa dichas superficies, figura 5.11.

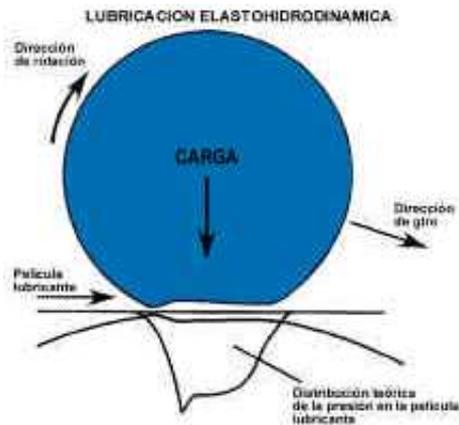


Figura 5.11. Película Elasto-hidrodinámica

5.5.2. Película delgada

Distinta a la consideración anterior, existen sistemas que por diseño o por limitaciones del propio equipo, no permiten la lubricación continua y suficiente. En estos casos, se lubrica bajo dosificación o, eventualmente.

5.5.3. Película sólida

Existen situaciones en las cuales la lubricación con aceites o grasas no es posible. De igual modo, en ciertos sistemas o equipos pueden observarse la presencia de fugas, o existir la posibilidad de contaminación. Bajo este escenario es conveniente pensar en la aplicación de algún agente como vehículo, ligero o poco viscoso, que al volatilizarse deje como residuo una película sólida en los metales en movimiento. Esta película estará compuesta por productos de muy bajo coeficiente de fricción, tales como el bisulfuro de molibdeno, grafito, mica, etc. Las moléculas de estos productos se alojarán en las irregularidades de las superficies metálicas, rellenando y emparejando sus cavidades, todo lo cual, permitirá reducir la fricción y el desgaste.

5.6. TIPOS DE LUBRICANTES PARA ENGRANAJES

Aceites minerales puros

Se aplican en engranajes que trabajan bajo condiciones moderadas de operación.

Aceites inhibidos contra la herrumbre y la corrosión (R & O)

Se utilizan cuando las temperaturas son altas y existe el riesgo de contaminación con agua, que conduce a la formación de herrumbre en los metales ferrosos. Poseen aditivos antiherrumbre, antiespuma, antidesgaste y antioxidantes. Estos aceites no tienen muy buena adhesividad, pero trabajan bien en sistemas de circulación donde se aplica en forma continua.

Aceites minerales de extrema presión (E.P.)

Se utilizan cuando los engranajes tienen que soportar altas cargas o cargas de choque, bajas velocidades y altas cargas. Son aceites inhibidos, a los que se les incorporan aditivos de extrema presión, los cuales son normalmente de azufre y fósforo; es necesario tener mucho cuidado con estos aceites, cuando se aplica en reductores que trabajan en ambientes de alta humedad (ejem.: torres de enfriamiento), ya que el vapor de agua presente puede reaccionar con el azufre y el fósforo formando ácido sulfúrico y ácido fosfórico, que atacan las superficies metálicas.

Aceites compuestos

Tienen como característica principal su elevada adhesividad. Son una mezcla de aceite mineral y sebo animal en proporciones variables. Se utilizan en reductores con engranajes de tornillo sinfín corona en donde la acción de deslizamiento es muy elevada. Estos aceites se pueden filtrar y enfriar sin que se separe el sebo animal del aceite base. La adhesividad también se logra adicionando pequeño porcentaje de un aditivo para tal fin al lubricante, evitando el goteo. Estas son sustancias sintéticas.

Aceites sintéticos

Se utilizan generalmente en engranajes que presentan alto grado de deslizamiento, o que trabajan a altas temperaturas por períodos prolongados. Los lubricantes sintéticos requieren

una adecuada combinación de aditivos y bases sintéticas fluidas para incrementar los beneficios sobre los aceites minerales. Los más usados son Polialfaoleinas.

Grasas

Su aplicación en engranajes no es muy amplia debido a que tienen muy poca capacidad refrigerante y por que las partículas contaminantes tienden a ser atrapadas y son difíciles de eliminar. Se utilizan algunas veces en la lubricación de engranajes que operan a bajas velocidades y bajas cargas, son más comúnmente utilizadas en engranajes abiertos y cajas de engranajes que tienden a dejar escapar aceite; también se utilizan en engranajes que operan intermitentemente, porque las grasas tienen la ventaja de mantener una película de lubricante en los dientes del engranaje, aunque estos no estén girando, lo que permite proveer lubricación inmediatamente son iniciados. Las grasas semifluidas sintéticas son particularmente adecuadas para lubricar unidades de engranajes “de por vida”. Las grasas para engranajes son blandas, para minimizar a fricción fluida y para limitar la tendencia de los engranajes a cortar un canal en la grasa y dejar el diente del engranaje seco.

Lubricantes sólidos

Son usados cuando las temperaturas de operación son muy altas o muy bajas, cuando las fugas no pueden ser toleradas y cuando se debe operar en un vacío. Estos lubricantes son películas secas untuosas, que se aplican a los dientes de los engranajes; los más utilizados son el bisulfuro de molibdeno, bisulfuro de tungsteno, grafito, talco y politetrafluoroetileno; son costosos, tienen vida limitada contra el desgaste, pero son ideales para aplicaciones especiales como la aviación espacial.

Gases

El aire y otros gases pueden ser empleados como lubricantes, pero son generalmente usados para propósitos especiales. Los cojinetes lubricados con aire pueden operar a altas velocidades, pero deben tener bajas cargas. Tales cojinetes se utilizan en las fresas de los dentistas.

Una comparación de los tipos básicos de lubricantes

Algunas características importantes de los tipos básicos de lubricantes se comparan en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Comparación entre los tipos básicos de lubricantes

	Aceites	Grasas	Sólidos	Gases
Lubricación Hidrodinámica	****	*	■	***
Lubricación Límite	**	**	***	■
Refrigeración	****	*	■	**
Facilidad de alimentación	***	*	■	***
Habilidad para permanecer en el cojinete	*	***	*****	*
Habilidad para proteger contra la contaminación	*	***	**	*
Protección contra la corrosión	***	**	**	■
Rango de temperatura de operación	**	**	*****	***
Código: Excelente **** Muy Bueno *** Bueno ** Regular * Inaplicable ■				

5.7. CLASIFICACIÓN SAE DE ACEITES PARA TRANSMISIÓN (SAE J306)

Los aceites de transmisión se clasifican por su viscosidad en grados de “verano” y grados de invierno, tabla 5.2. Los grados de invierno se identifican mediante un número acompañado de la letra W. Los grados de verano mediante un número. En ambos casos a medida que aumenta el número aumenta la viscosidad del aceite.

Tabla 5.2. Sistema de designación SAE para aceites para transmisión

Grado SAE	Máxima temperatura en °C para una viscosidad de 150000 cP (1)	Viscosidad cinemática en Centistokes (cSt) a 100°C (2)	
		min.	máx.
70 W	-40	4.1	
75 W	-40	4.1	
80 W	-26	7.0	
85 W	-12	11.0	
80		7.0	<11.0
85		11.0	<13.5
90		13.5	<24.0
140		24.0	<41.0
250		41.0	

1) Método ASTM D2893 (Viscosímetro Brookfield)

2) Método ASTM D445 (Viscosímetro capilar)

5.8. CLASIFICACIÓN ISO DE VISCOSIDAD DE ACEITES INDUSTRIALES

Los lubricantes industriales se clasifican por su viscosidad en 18 grados de acuerdo a un sistema especificado por la ISO (Organización Internacional de Estandarización), tabla 5.3. Cada grado, cubre un rango de viscosidades cinemáticas medidas en cSt a 40°C. El punto medio de viscosidad de cada grado es aproximadamente 50 % superior al del grado precedente.

Tabla 5.3. Grados ISO para aceites para transmisión.

Grado ISO	Punto medio de la viscosidad cinemática (cSt) a 40°C	Límites de viscosidad cinemática (cSt) a 40°C	
		mínimo	máximo
2	2.2	1.98	2.42
3	3.2	2.88	3.52
5	4.6	4.14	5.06
7	6.8	6.12	7.48
10	10.0	9.00	11.0
15	15.0	13.5	16.5
22	22.0	19.8	24.2
32	32.0	28.8	35.2
46	46.0	41.4	50.6
68	68.0	61.2	74.8
100	100.0	90.0	110.0
150	150.0	135.0	165.0
220	220.0	198.0	242.0
320	320.0	288.0	352.0
460	460.0	414.0	506.0
680	680.0	612.0	748.0
1000	1000.0	900.0	1100.0
1500	1500.0	1350.0	1650.0

5.9. LINEAMIENTOS AGMA PARA LUBRICACIÓN DE ENGRANAJES

La norma 9005-D94 (ANSI/AGMA 9005-D94) de AGMA (American Gear Manufacturers Association) combina las especificaciones para engranajes abiertos y cerrados. Esta especificación supera a las normas AGMA 250.04 (Lubricación de engranajes cerrados industriales) y 251.02 (Lubricación de engranajes abiertos industriales). Esta norma AGMA provee especificaciones para lubricantes inhibidos contra la herrumbre y la oxidación (R&O), compuestos (incluidos en la especificación R&O), de extrema presión (EP) y para lubricantes sintéticos para engranajes industriales. El grado de viscosidad se corresponde con aquellos de ASTM D 2422 (Standard Recommended Industrial Liquid Lubricants – ISO Viscosity Classification) y B. S. 4231 del Instituto Británico de Normalización (British Standards Institution). La especificación AGMA utiliza velocidades de línea de paso como el parámetro primario para determinar la selección del lubricante en todos los engranajes salvo los sinfín-corona doble envolvente. Especificaciones previas fueron basadas en distancias al centro del engranaje.

Tabla 5.4. Rangos de viscosidad para lubricantes AGMA

Aceites para engranajes inhibidos contra herrumbre y oxidación (R&O), N° Lubr. AGMA	Rango de viscosidad (cSt a 40°C) ^a	Grado ISO equivalente ^a	Lubricantes de extrema presión para engranajes (EP) ^b , N° Lubr. AGMA	Aceites sintéticos para engranajes, ^c N° Lubr. AGMA
0	28.8-35.2	32	-	0 S
1	41.4-50.6	46	-	1 S
2	61.2-74.8	68	2 EP	2 S
3	90-110	100	3 EP	3 S
4	135-165	150	4 EP	4 S
5	198-242	220	5 EP	5 S
6	288-352	320	6 EP	6 S
7, 7 Comp. ^d	414-506	460	7 EP	7 S
8, 8 Comp. ^d	612-748	680	8 EP	8 S
8A Comp. ^d	900-1100	1000	8 A EP	-
9	1350-1650	1500	9 EP	9 S
10	2880-3520	3200	10 EP	10 S
11	4140-5060	4600	11 EP	11 S
12	6120-7480	6800	12 EP	12 S
13	190-220 cSt a 100°C (212°F) ^e	-	13 EP	13 S
Compuestos residuales^f N° Lubr. AGMA	Rangos de viscosidad [cSt a 100 °C (212° F)] ^g			
14R	428.5-857			
15R	857-1714			

- ^a Por ISO 3448, Lubricantes líquidos industriales - Clasificación de viscosidad. También ASTM 2422 y British Standards Institution - B. S. 4231.
- ^b Los lubricantes de extrema presión sólo deben ser recomendados por el fabricante del engranaje.
- ^c Hay disponibles aceites sintéticos 9S a 13S, pero no todavía con uso difundido.
- ^d Compuesto con 3 a 10% de aceites grasos o aceites grasos sintéticos.
- ^e Las viscosidades del lubricante AGMA 12 y superiores son especificadas a 100° C (210° F) porque la medición de viscosidades de estos lubricantes pesados a 40° C (100° F) no sería práctica.
- ^f Compuestos residuales - tipos de diluyentes, comúnmente conocidos como cortes solventes, son aceites pesados que contienen diluyentes volátiles y no inflamables para facilitar su aplicación. El diluyente se evapora, dejando una película gruesa de lubricante en el diente del engranaje. Las viscosidades listadas son para el compuesto base sin diluyente.

5.10. COMPARACIÓN ENTRE CLASIFICACIONES

Las clasificaciones ISO y SAE están basadas en la medición de viscosidades a distintas temperaturas de referencia, (40°C y 100°C respectivamente). Entonces para poder establecer una correlación, es necesario presuponer un cierto índice de viscosidad. Así por ejemplo el cuadro comparativo de la figura 5.12 está basado en un IV= 95. La clasificación AGMA corresponde a la desarrollada por la Asociación Americana de Fabricantes de Engranajes

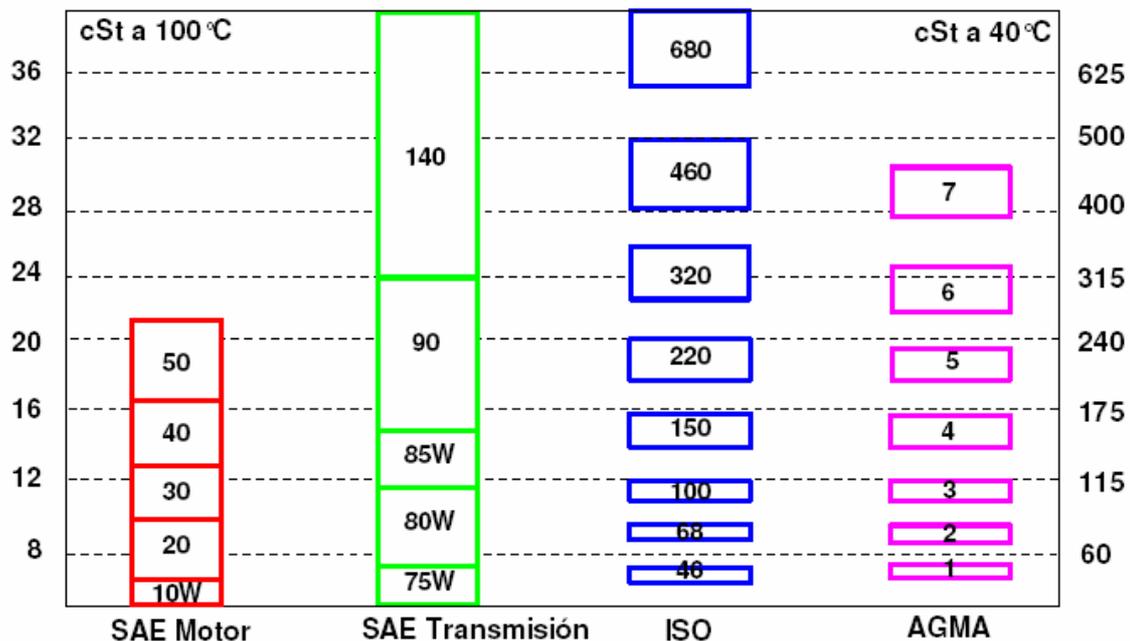


Figura 5.12. Comparación entre clasificaciones

5.11. INGENIERÍA DE LUBRICACIÓN

Los factores más importantes que deben ser considerados en la selección de aceites lubricantes para engranajes son:

- Velocidad
- Carga
- Temperatura de Operación
- Material de los Componentes
- Forma o Tipo del Engranaje
- Ambiente de Trabajo
- Sistema de Aplicación

Cada uno de los factores enunciados propone un producto lubricante específico, de allí que siempre deben ser considerados en su conjunto. Para la selección final del lubricante, se debe optar por aquellos factores que se identifiquen como características críticas de la aplicación.

Los fabricantes de equipos, generalmente, incluyen en los manuales de operación o de mantenimiento, sus indicaciones, sugerencias o referencias, acerca del tipo de lubricante a emplear. En ocasiones, hasta señalan la marca y el nombre comercial del producto.

Muchos equipos se lubrican con varios tipos de aceites, dado que áreas específicas de ellos o secciones, requieren lubricantes con propiedades diferentes, en virtud del material y/o diseño de los engranajes; entre otros.

Debe subrayarse la importancia de seleccionar un producto de calidad con las propiedades adecuadas y ajustadas a la aplicación. Los engranajes requieren de la presencia de una resistente película de lubricante entre sus dientes, cuyo grosor permita una óptima operación, reduciendo la fricción y evitando soldaduras entre los elementos constituyentes. En virtud de lo anterior, la escogencia de la viscosidad correcta es fundamental para una mayor vida de los engranajes. En este punto, se puede indicar una especie de regla: “La viscosidad de un aceite lubricante para engranaje es directamente proporcional a la carga que deba soportar e inversa a la velocidad de trabajo”.

Los **engranajes abiertos** son usualmente lubricados con aceites. Para asegurar que los aceites no se salgan a altas velocidades, se utilizan **lubricantes viscosos** conteniendo aditivos adherentes. Las grasas también pueden ser usadas.

Los **engranajes cerrados** son generalmente lubricados con aceite. Siempre están soportados por cojinetes de tal forma que el lubricante debe ser adecuado tanto para engranajes como para cojinetes. Aceites minerales sin aditivos son satisfactorios para muchas situaciones. A altas velocidades, los aceites con bajas viscosidades conteniendo **antioxidantes** y **agentes antiespuma** pueden ser requeridos.

Lubricantes para engranajes con más carga deben contener aditivos de extrema presión. Los aceites que contienen **aditivos de extrema presión (EP)** son utilizados para engranajes trabajando bajo las cargas más pesadas, particularmente si se espera tener cargas de choque.

La selección entre productos con bases minerales o sintéticas, dependen de los períodos de cambio; la temperatura de operación; del grado de contaminación del ambiente; etc. Pero hay que tomar muy en cuenta que a pesar de ser más costosos, los aceites sintéticos tienen un rendimiento mucho mayor, dada su resistencia a la oxidación y temperatura.

Tomando en cuenta la velocidad periférica de los engranes se puede usar como guía básica lo siguiente:

A velocidades periféricas hasta $v=2$ m/s se recomiendan lubricantes adhesivos, de alta consistencia para grandes engranajes abiertos. Contienen aditivos mejoradores de adhesión, que brindan cierta propiedad elástica. Aplicar por cepillo o rociado.

A velocidades periféricas hasta $v=4$ m/s se recomienda lubricación con grasa fluida por salpicado para garantizar que el lubricante mantiene el flujo entre los dientes.

A velocidades periféricas hasta $v=15$ m/s se recomienda lubricación con aceite por salpicado. Las ruedas o dientes van lubricando el engranaje con su propio movimiento.

A velocidades periféricas sobre $v=15$ m/s se requiere lubricación por rociado en la mayoría de los casos. El aceite se aplica por medio de bombeo, en la mayoría de los casos poco después del encastre de los dientes. El aceite también puede ser enviado a los dientes bajo presión a través de canales previamente dispuestos.

5.12. 10 MITOS SOBRE LUBRICACIÓN DE ENGRANAJES [13]

Mito N° 1: Los aceites son todos iguales.

Usar el aceite incorrecto es una causa común de falla de engranajes. Los engranajes requieren lubricantes especialmente formulados para la aplicación. Por ejemplo, engranajes rectos de baja velocidad, engranajes helicoidales de alta velocidad, engranajes helicoidales y sinfín corona, todos requieren lubricantes diferentes. Los parámetros operativos, tales como velocidad, carga, temperatura y riesgo de contaminación también deben considerarse al seleccionar un aceite. Usar el aceite correcto puede aumentar la eficiencia y la vida útil del engranaje.

Mito N° 2: El aceite nunca se degrada.

La oxidación limita la vida útil de los lubricantes. Llegará cierto punto en que el lubricante se degradará, formará ácidos, perderá habilidades lubricantes y depositará lodos y barnices. A temperaturas por encima de 65°C, el aceite comienza a oxidarse más rápido, y por cada 10°C de aumento la velocidad de oxidación se duplica. Los aditivos también pueden agotarse si el engranaje trabaja en condiciones que requieren reacción de los aditivos.

Monitorear las propiedades del lubricante mediante análisis de aceite usado ayuda a determinar los períodos de cambio de aceite y a detectar contaminación excesiva.

Mito N° 3: Los engranajes no requieren filtración fina.

Es bien conocido que los rodamientos requieren aceite limpio. Es menos conocido que los dientes de los engranajes también requieren aceite limpio. La película de aceite que separa los dientes de engranajes tiene usualmente pocos micrones de espesor. Los contaminantes sólidos indentan y provocan abrasión en los dientes, disminuyendo su vida útil. Los filtros deben ser tan finos como 3 micrones para prevenir abrasión, pulido, micropitting y macropitting. Usualmente se escucha el argumento: "Un filtro tan fino se taponará enseguida". Nuestra respuesta es: "Entonces el filtro es necesario y está haciendo su trabajo". Los filtros modernos brindan filtración fina sin ser muy grandes en tamaño y sin provocar grandes caídas de presión. Comenzando con un filtro más grueso, como 100 micrones, y cambiándolo progresivamente por filtros más finos, un sistema se puede limpiar en poco tiempo. Una vez limpio, debería mantenerse limpio si los venteos, sellos y el mantenimiento son adecuados.

Mito N° 4: Los aditivos suplementarios mejoran la lubricación.

Las compañías petroleras poseen algunas de las mejores instalaciones de investigación y desarrollo, y emplean expertos ingenieros químicos, científicos de materiales y tribologistas. Las principales compañías fabricantes de aditivos son propiedad también de las compañías petroleras, y usualmente son las que proveen productos a las compañías que venden aditivos en forma comercial. Es muy difícil que las compañías independientes de aditivos desarrollen aditivos que las compañías petroleras no hayan descubierto. Las compañías petroleras han desarrollado paquetes de aditivos específicos para engranajes. Jugar con el balance de aditivos de un aceite invita a la falla.

Antes de comprar algún aditivo verifique que esté homologado por el fabricante del engranaje o del lubricante. Dudo que sea así.

Mito N° 5: Los aceites son intercambiables.

Los paquetes de aditivos varían entre los distintos aceites, aún cuando cumplan la misma función, por lo que si desea mezclar aceites primero asegúrese que son compatibles entre sí. Algunos aceites sintéticos son incompatibles con aceites minerales y algunos elastómeros y requieren un flushing previo.

Mito N° 6: La selección del lubricante es responsabilidad del proveedor del engranaje o del usuario.

Muchas fallas de engranajes pueden relacionarse con confusiones sobre la responsabilidad de selección del lubricante. Para seleccionar el aceite correcto, tanto el proveedor del engranaje como el usuario deben colaborar. Los fabricantes de engranajes deben conocer lo máximo posible sobre la aplicación, y los usuarios deben saber perfectamente qué se necesita para lubricar adecuadamente un engranaje. Muchas veces se cometen errores porque la aplicación se malentiende. Existe una larga lista de parámetros que deben considerarse. ¿Cuál es la temperatura ambiente que rodea al engranaje?, ¿Existe un flujo de aire adecuado sobre el engranaje?, ¿Existen problemas de corrosión o contaminación? ¿Qué mantenimiento se planeó?

Existe una tendencia entre los diseñadores hacia consolidar lubricantes y requerir aceites de baja viscosidad para engranajes de baja velocidad o servicio pesado. Estas prácticas incrementarán las fallas.

Mito N° 7: Los ensayos de laboratorio son precisos.

Esto puede no ser cierto. Los análisis de laboratorio pueden medir en forma precisa una propiedad particular, pero esta propiedad puede no ser la que usted le preocupa. Por ejemplo, usted puede querer detectar desgaste inusual en un engranaje, y envía en consecuencia una muestra de aceite usado al laboratorio. A menos que solicite lo contrario, el laboratorio analizará metales por plasma o absorción atómica. Si los valores reportados son bajos entonces usted concluirá que el engranaje está saludable. Desafortunadamente, este tipo de análisis

detecta partículas menores de 10 micrones. Los engranajes pueden estar fallando y generando partículas mayores a ese tamaño, por lo que usted necesita entender las limitaciones de los análisis de laboratorio para poder interpretarlos correctamente. Es igualmente importante tomar muestras que sean representativas de la situación. Asegúrese de estar familiarizado con las técnicas de muestreo adecuadas.

Es mejor visitar el laboratorio y presenciar los análisis antes de comenzar a utilizarlo. Pídale al personal del laboratorio una demostración de cada análisis, pregunte cómo administran su proceso de calidad y si cumplen al pie de la letra las normas ASTM. Muchos laboratorios dicen que realizan análisis según determinada norma ASTM, pero cuando usted solicita la misma en el laboratorio se encuentra que poseen instructivos escritos que reproducen sólo en parte la norma, pues es costoso seguirla al pie de la letra. Esto definitivamente afecta la veracidad de los resultados. Pregunte cómo el laboratorio se audita a sí mismo, muchos laboratorios participan de programas de contraste con otros laboratorios o usan auditores independientes.

Mito N° 8: Si un poco de aceite es bueno, mucho aceite es mejor.

Cada caja de engranajes posee una cierta cantidad de lubricante necesaria para trabajar fría y eficientemente. Demasiado aceite va a batirse, reducirá la eficiencia y hará que el engranaje se recaliente. Demasiado puede provocar espuma y fugas. Además, más aceite es más gasto.

Mito N° 9: Hay aceites especiales que reparan los engranajes.

Algunos proveedores dicen que sus aceites no sólo reducen el desgaste, sino que también ¡reparan los dientes dañados!. Pueden incluso mostrarle fotos del tipo "antes y después" que parecen convincentes.

El problema es que la única forma de reparar dientes dañados es remover material de las superficies de los mismos. Un aceite puede ser abrasivo y capaz de remover acero. Desafortunadamente, los dientes de engranajes se desgastan de una forma no uniforme, y los engranajes "reparados" por aceites especiales pueden verse bonitos, pero su precisión y eficiencia definitivamente disminuyeron.

Mito N° 10: Los aceites sintéticos no se justifican por su alto costo.

Si bien no siempre es necesario utilizar aceites sintéticos, sobre todo cuando las posibilidades de contaminación son altas, o cuando el reductor trabaja poco exigido, en las condiciones de operación más extremas los aceites sintéticos pueden proveer beneficios de desempeño excepcionales que sobrepasan largamente el costo de los mismos. Aún en condiciones normales, los sintéticos pueden ahorrar energía, lo cual en ciertas industrias significa mucho dinero.

BIBLIOGRAFÍA

1. K.Gopinath, M.M.Mayuram, Machine Design II, Indian Institute of Technology Madras
2. The Cincinnati Milling Machine Co. A Treatise on Milling and Milling Machines Cincinnati, Ohio. U. S.A.
3. Wickham, Joseph Roe. English and American Tool Builders. Mcgraw-Hill Book Company, Inc. New York. 1936
4. Coombs, Howard. A. The art of generating gear-teeth. D. Van Nostrand Company Publishers. New York. 1904.
5. Niernann. G Tratado teórico práctico de elementos de máquinas. Labor. Barcelona 1973
6. Deutschman. Aaron D. Machine Design theory and practice. McMillan Publishing Co. New York. 1975
7. AGMA Nomenclature of Gear tooth failure modes. 1980
8. Cowie. Alexander. Kinematics and design of mechanisms. International Text Book Company, 1961.
9. Dudley, Darle W. Manual de engranajes. Cia. Edit. Continental S.A. México. 1980
10. Dudley, Darle W. Practical Gear Design. McGraw Hill. New York. 1954.
11. Wulpy, Donald J. How Components fail. ASME. E.UA. 1966

12. Benítez, Luís Eduardo Hernández. Las fallas en los engranajes. Universidad Nacional de Colombia. Ingeniería e Investigación.

13. Martins, Marcelo E. Exxon lubricants and specialties.

14. <http://www.homemodelenginemachinist.com/f28/bilgram-bevel-gear-generator-9042/>

15. <http://www.monografias.com/trabajos94/lubricacion-engranajes-industriales/lubricacion-engranajes-industriales.shtml#ixzz2VxsqXmQ>