

20
2



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

‘ ‘ A R A G O N ’ ’

**ESTUDIO DE FALLAS EN LA FABRICACION Y
FUNCIONAMIENTO DE ENGRANES RECTOS Y
HELIOCOIDALES EN REDUCTORES DE VELOCIDAD**

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el Título de:
INGENIERO MECANICO - ELECTRICO

Presentan:

FELIX PONCE HERNANDEZ

VICTOR M. ISLAS GUZMAN

Asesor de Tesis Ing.: Cuitláhuac Osornio C.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

San Juan de Aragón, Mex. 1988.



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E

	<u>PAGINA</u>
INTRODUCCION	5
CAPITULO 1. INTRODUCCION A LOS ENGRANES	7
1.1.- Bosquejo histórico de los engranes.	9
1.2.- Características de los dientes de evolventa.	11
1.3.- Geometría y nomenclatura de los dientes.	14
1.4.- Tipos de engranes.	18
1.5.- Cálculo dimensional básico.	23
1.6.- Cálculo de potencia en engranes.	26
CAPITULO 2. FABRICACION DE ENGRANES	35
2.1.- Maquinado.	37
2.2.- Instrucciones para el generado.	40
2.3.- Cuidados en el montaje de la pieza en la máquina.	43
2.4.- Verificación de preparación del cortador para generar.	44
2.5.- Sistemas de fresado, ventajas y desventajas.	46
2.6.- Consecuencia de los errores de afilado.	47
CAPITULO 3. TRATAMIENTOS TERMICOS EN LA FABRICACION DE ENGRANES	51
3.1.- Materiales.	53
3.2.- Temple y revenido.	58
3.3.- Nitruado.	63
3.4.- Cementado.	66
3.5.- Conclusiones	70
CAPITULO 4. TIPOS DE ERRORES DURANTE LA FABRICACION DE ENGRANES	71
4.1.- Excentricidad.	73
4.2.- Espaciamiento inadecuado.	77
4.3.- Error de perfil.	80
4.4.- Error en la hélice.	86
4.5.- Huelgo entre dientes.	94
4.6.- Error compuesto.	94
4.7.- Procedimiento de medición para el control de errores en la fabricación de engranes nitruados en Mecánica Falk.	99
4.8.- Correcciones.	106
CAPITULO 5. FALLAS EN EL FUNCIONAMIENTO DE LOS ENGRANES	116
5.1.- Fallas debidas a desgaste y rayadura.	118
5.2.- Fallas por sobrecarga.	122
5.3.- Fallas debidas a fatiga.	124
5.4.- Otros tipos de fallas.	129

I N D I C E C O N T .

	<u>PAGINA</u>
APENDICE " A "	133
CONCLUSIONES	136
BIBLIOGRAFIA	138

O B J E T I V O

EL OBJETIVO DEL PRESENTE TRABAJO DE TESIS, ES EL DE PROPORCIONAR CRITERIOS A SEGUIR EN LA CORRECCIÓN DE ERRORES EN LA FABRICACIÓN Y LA SOLUCIÓN DE FALLAS EN EL FUNCIONAMIENTO DE ENGRANES RECTOS Y HELIOCOIDALES EN LA APLICACIÓN DE REDUCTORES DE VELOCIDAD.

I N T R O D U C C I O N

En la actualidad, los trenes de engranes representan uno de los pilares sobre los que se sustenta la industria, de ahí que constantemente se introduzcan innovaciones al respecto, el conocimiento y estudio de los mismos nos conducirán a perfeccionar el proceso de fabricación y aplicación de dichos trenes de engranes. Los requerimientos de las industrias tales como cementeras, azucareras, de la construcción, etc., son cada vez más estrictas en cuanto a operación silenciosa, máxima capacidad de transmisión de potencia y eficiencia de operación constante durante toda la vida de servicio de la unidad, es por esto que nos hemos abocado en este trabajo al perfeccionamiento del proceso de fabricación, ya que de éste dependen en gran medida los resultados de funcionalidad adecuada del producto, así como la introducción de procesos tales como tratamientos térmicos (nitruado y cementado), clasificando y cuantificando los errores que estos presentan por condiciones inherentes al proceso y sus posibles correcciones, según sea el caso. Consideramos que el conjunto de lo antes mencionado nos llevará al objetivo arriba planteado. A continuación damos una breve introducción de cada uno de los capítulos.

1.- Introducción a los engranes.

Este capítulo tiene la finalidad de introducirnos a lo que son los engranes, explicando su evolución histórica, características y ventajas de la utilización de los tipos de dientes, hasta llegar a los utilizados actualmente en la industria.

2.- Fabricación de engranes.

En este capítulo se tratarán las precauciones que se deben tener desde el maquinado de la materia prima hasta el generado de los dientes de engranes para la disminución de errores debidos al proceso de fabricación, también consideramos las condiciones de montaje del cortador en la máquina, las consecuencias del mal afilado sobre el perfil del diente de la pieza generada, así como también los tipos de generado.

3.- Tratamientos térmicos en la fabricación de engranes.

En este capítulo se abarcarán las características que deben reunir los materiales, los cuales son utilizados en la fabricación de engranes; estas características están en función del tipo de engrane y de la dureza requerida para cada aplicación específica. Así mismo, se darán formas de preparación de la superficie de la pieza y la determinación del tratamiento térmico adecuado conforme a dureza requerida y a la profundidad de la misma, para poder lograr la capacidad de la transmisión de potencia.

También se darán los pasos que se siguen en la aplicación de los tratamientos térmicos, las tolerancias de los acabados superficiales permitidos para las durezas que se requieren alcanzar, así como los procesos de acabado necesarios para corregir las distorsiones que se generan en los engranes debidas a los tratamientos térmicos.

4.- Tipos de errores durante la fabricación de engranes.

En el presente capítulo, haremos un análisis de los errores que son cometidos durante la fabricación de los engranes, así como sus métodos de control para disminuir el problema, ya que esos errores provocarían primeramente ruido en la unidad y si no son corregidos a tiempo, derivarían en un desgaste acelerado de los engranes y --- habría riesgo de falla después de un corto periodo de operación. - Estos errores tales como la excentricidad, mal espaciamento entre dientes, error de perfil, error en el paso de la hélice, huelgo entre dientes, son vistos y analizados en el presente capítulo, así como sus métodos de supervisión y control-corrección, junto con algunas consideraciones prácticas para el diseño y fabricación de engranes.

5.- Fallas en el funcionamiento de los engranes.

Aquí se hará referencia a las principales causas de fallas en -- los engranes, observándose que éstas son producidas por errores cometidos más frecuentemente en el funcionamiento de las unidades debido a una mala aplicación, que por problemas en el proceso de fabricación y/o diseño. Analizándose primero los problemas por un mal contacto entre los dientes de los engranes, observando el tipo de contactos que se tienen y determinando su solución, si estos son -- provocados por un desalineamiento o por imperfección en el diente. Después tenemos el problema de la lubricación inadecuada en las unidades, el cual nos provocará un desgaste muy acelerado en los dientes de los engranes, y si esto no es corregido, se presentara el -- problema de rayado y picado en el diente y una falla por fatiga en el engrane posteriormente. Este problema de lubricación, también -- provocará que se produzca un calentamiento excesivo en la unidad -- ocasionando que el engrane tenga fluencia plástica en los dientes y que se produzca una fractura en los mismos.

De todo esto se realiza un reconocimiento a los tipos de fractura para determinar la causa de la falla y plantear la solución más adecuada, teniendo en cuenta que esto no es fácil debido a que las fallas se presentan en forma combinada, lo cual dificulta su análisis.

CAPITULO

I

INTRODUCCION A LOS ENGRANES

- 1.1.- Bosquejo histórico de los engranes.
- 1.2.- Características de los dientes de evolvente.
- 1.3.- Geometría y nomenclatura de los dientes.
- 1.4.- Tipos de engranes.
- 1.5.- Cálculo dimensional básico.
- 1.6.- Cálculo de potencia en engranes.

I N T R O D U C C I O N

Los engranes son utilizados para la transmisión de movimiento y potencia de un eje motriz a otro. Uno de los primeros métodos de transmisión de movimiento de una rueda a otra fue por ruedas de --fricción, que transmitían una cantidad limitada de potencia, esto se producía a través de irregularidades microscópicas o superficies ásperas que se encontraban fuertemente comprimidas entre sí.

En las primeras máquinas construidas por el hombre para facilitar su trabajo, los engranes constituyeron una parte esencial. Los ejes en los cuales son montados los engranes pueden tener tres posiciones uno con respecto del otro, pueden estar paralelos, formando un ángulo e intersectarse estando en un mismo plano, o formar ángulos de 90° pero sin llegar a cruzarse por no estar en el mismo plano.

En la transmisión de movimiento de un eje a otro, la velocidad relativa de los ejes esta en función del número de dientes que tengan los engranes. La rueda dentada con menor número de dientes se denomina piñón, y la de mayor número de dientes se denomina rueda compañera. Generalmente encontraremos juegos de engranes cuya función será reducir la velocidad angular y aumentar el torque transmitido, denominándoseles reductores de velocidad. Esporadicamente encontraremos engranes incrementadores de velocidad.

El perfil del diente de los engranes se ha venido perfeccionando, así como sus dimensiones. El perfil de diente más comunmente - usado en la actualidad es del tipo de evolvente, ya que esta forma tiene ciertas ventajas de utilización con respecto de otros tipos de perfiles (dichas ventajas se analizarán posteriormente), además de contar en la actualidad con máquinas herramienta capaces de fabricar dientes de engranes en los metales más duros y resistentes. Los engranes fabricados en la actualidad distan mucho de semejarse a los engranes rudimentarios hechos de espigas de madera, ya que - ahora se les fabrica con una gran precisión de proporciones exactas y superficies tersas, así como en una gran variedad de materiales.

De ahí que en este capítulo trataremos la geometría y nomenclatura que se utilizan para el diseño y la fabricación de engranes, así como la ley que rige a los engranes, los diferentes tipos de engranes, sus características, su utilización y sus ventajas y desventajas entre sí.

1.1.- Bosquejo histórico de los engranes.

En las primeras máquinas construidas por el hombre, los engranes primitivos estaban fabricados con dientes de madera en forma de espigas, los cuales estaban insertados en las caras laterales de las ruedas de madera, por lo que resultaban unos artefactos rústicos - capaces de transmitir tan sólo cargas ligeras a bajas velocidades de rotación, por lo cual resultaban bastante frágiles, pero al romperse un diente, este era sustituido por otro pedazo de madera con facilidad lo que hacía que el engrane siguiera funcionando. Esto se puede observar en la figura 1.1.1.

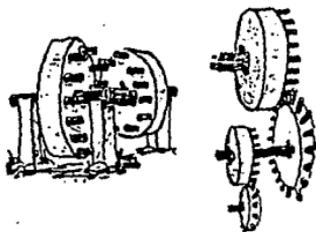


Figura 1.1.1 Forma de los primeros engranes

El primer paso importante de diseño se dio cuando se abandonaron los toscos dientes iniciales y se fueron desarrollando otros, los cuales fueron muy semejantes a los actuales, realizados en metales más duros y resistentes, los dientes van tallados a los perfiles deseados y ensablados en las caras de las ruedas.

Los primeros engranes de metal probablemente fueron de bronce o de hierro fundido. Los engranes modernos cumplen su misión, que es la de transmitir fuerza o movimiento, o ambas entre dos ejes que se encuentran separados. Dadas las múltiples aplicaciones que tienen los engranes, necesariamente debe de existir una gran diversidad de tipos en cuanto a su forma, diseño, tamaño, velocidad, y capacidad de carga a transmitir.

Los primeros intentos serios para investigar la acción de los engranes fueron realizados hasta el año de 1673, por el danés - Olaf Roemer, quien encontró muchas deficiencias en los engranajes, por razones de una rotación no uniforme de estos. El trabajo de Roemer estuvo basado en un tratado realizado por el astrónomo - Dutch y el matemático Cristian Huygens, quienes estuvieron trabajando en la forma de los dientes desde el año de 1660 y este tratado fue publicado en 1673. La forma recomendada por Huygens y la utilizada por Roemer fue la epicicloidal. Huygens también investigó la forma de dientes con perfil de evolvente, pero la descartó por la epicicloidal, por considerar que la forma de evolvente era menos eficiente.

No fue sino hasta el año de 1832, que un profesor de mecánica de la Universidad de Cambridge, el señor Robert Willis, estudió - las características del contorno de evolvente y sus posibilidades de utilización, así como sus ventajas con respecto a los otros - perfiles de diente. Estas características se mencionan en un punto posterior. La adopción de un tipo estándar de diente se realizó más tarde en el año de 1850, ya que la forma de diente variaba de acuerdo a la persona que lo realizaba y al uso para el que era destinado.

Los engranes de diente helicoidal fueron desarrollados por el inglés Joseph Woodlams, quien patentó este tipo en 1820 para una firma inglesa. Los engranes Herringbone fueron realizados por vez primera por la compañía inglesa P. R. Jackson, en el año de 1880. Los engranes helicoidales y herringbone fueron hechos con tejos - de metal y cortados los dientes con un movimiento relativo del - cortador y la rueda, siendo acabados a mano. El engrane helicoidal tenía la ventaja de que podía funcionar a más altas velocidades - que el engrane recto y con mucho menos ruido, y la desventaja de que inducía empuje axial sobre el eje de rotación. El engrane herringbone es un engrane similar al helicoidal, pero con dos hélices en ángulo opuesto, esto con el fin de que funcione a velocidades altas, sin ruido y sin inducir cargas axiales en los ejes. La primera máquina para fabricar engranes helicoidales por medio de un cortador tipo Hob, fue inventada por Cristian Schiele en el - año de 1856.

El método para generación de engranes cónicos rectos y cónicos espirales fue realizado por el señor Hugo Bilgram en Filadelfia, este tipo de engranes se utilizan para conectar y dar movimiento a dos ejes que se intersectan entre sí, lo cual no se podía realizar con los engranes rectos y helicoidales. Los engranes cónicos tienen poca relación de reducción de velocidad.

1.2.- Características de los dientes de evolvente.

Los perfiles de evolvente cumplen con la condición requerida para todos los engranes, de que la normal común a todos los puntos de contacto pase por el punto primitivo. La curva de evolvente es una trayectoria que marca un punto trazador de un hilo cuando se desenrolla de un cilindro, conocido como cilindro base de la evolvente, tal y como se muestra en la figura 1.2.1.

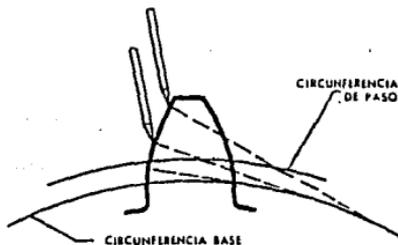


Figura 1.2.1 Construcción de un diente con perfil en forma de evolvente. El perfil de un diente de forma de evolvente es trazado por medio de un lápiz atado a un hilo que se empieza a desenrollar de la base del círculo primitivo de la rueda dentada.

De este tipo de perfil de diente vemos que la transmisión de movimiento es uniforme, esto es, si ponemos dos ruedas en bruto teniendo sus centros fijos en O_2 y O_3 , cuyos radios son O_2A y O_3B enrollemos un hilo sobre el cilindro base de la rueda 2 en el sentido de giro de las manecillas del reloj y manteniéndolo tenso entre los puntos A y B, seguimos enrollándolo sobre el cilindro base de la rueda 3, pero en sentido contrario, si giramos los cilindros en direcciones opuestas para mantener el hilo tenso, un punto de él, tal como T, trazará sobre la rueda 2 la evolvente CD y sobre la rueda 3 la EF. Estas evolventes son perfiles conjugados por haber sido generadas simultáneamente con el punto trazador, y esto nos dará el movimiento uniforme, tal y como se ilustra en la figura 1.2.2.

1.2.1.- Propiedades de la evolvente.

Las curvas evolventes tienen una ventaja principal sobre las cicloidales u otras curvas que son empleadas para generar perfiles de ruedas dentadas. Esta ventaja es que la distancia de centro a centro de las ruedas dentadas puede ser alterada sin destruir la acción conjugada de los dientes, o sea, sin alterar la relación de transformación o relación de velocidades. La comprobación a lo anterior se observa en la figura 1.2.3.

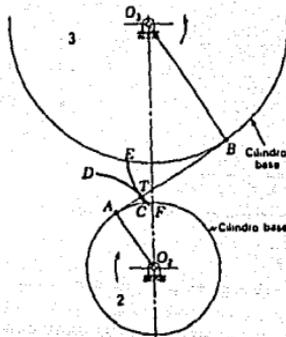


Figura 1.2.2 Generado de la curva evolvente.

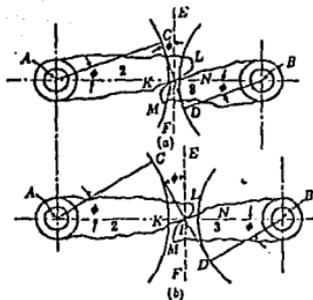


Figura 1.2.3 Ventaja de la curva evolvente sobre los otros tipos de perfil de diente, notándose como al incrementarse la distancia entre centros, la relación de velocidad se mantiene constante.

Cuando los centros de los engranes A y B se apartan una distancia mayor, la tangente común CD a los círculos base se inclinará a un ángulo mayor con EF, por lo tanto se incrementará el ángulo de presión. Igual que antes, la tangente común cruzará la línea de centros en un punto fijo, porque todavía estamos tratando con el contacto de las curvas evolventes. Los radios primitivos AP y BP se agrandan, pero el radio de BP a AP permanece sin ningún cambio, por lo que la relación de velocidades depende únicamente de los diámetros relativos de los círculos base, y no cambia cuando la distancia de centro a centro es alterada.

Otra deducción, es que un perfil de evolvente no tiene en sí mismo, ni círculo primitivo, ni algún ángulo de presión en particular, pero tiene círculo primitivo y ángulo de presión en virtud de su localización con referencia a una segunda evolvente, ubicadas éstas en una posición diferente determinada por la magnitud de la distancia entre centros, tal y como se puede observar en la figura 1.2.3.

1.2.2 Ventajas prácticas de los perfiles de evolvente.

1.- Los engranajes con dientes de perfil de evolvente se pueden emplear con una pequeña falta de precisión en la distancia entre centros, o esta distancia puede variar como resultado del desgaste en los rodamientos, y el contacto de los dientes continúa cumpliendo con la ley fundamental de las ruedas dentadas, la cual se mencionara en el punto siguiente.

2.- Los engranajes evolventes se pueden emplear para aplicaciones tales como la transmisión de laminadoras en las fabricas de acero, en donde la distancia de centro a centro cambia constantemente.

3.- Cuando los dientes son fabricados con el cortador de una fresa madre, el número necesario de cortadores para cubrir una gama desde el piñón más pequeño hasta una cremallera, es menor que el que se utiliza para otros perfiles. Esto se debe al cambio ligero que se da en la curvatura del diente cuando se aumenta el número de dientes.

1.3.- Geometría y nomenclatura de los dientes de evolvente.

Los engranajes deben de cumplir con una ley, esta ley es denominada ley fundamental del engranaje, la cual nos indica que:

"La normal común al perfil del diente en el punto de contacto debe pasar siempre por un punto fijo, llamado punto de tangencia, con el fin de mantener constante la razón de las velocidades angulares de los dos engranajes."

La curva evolvente satisface esta ley y es la que se utiliza con mayor frecuencia en el perfil de los dientes de los engranes. Pero en determinadas condiciones, los perfiles de forma de evolvente cortan o recubren los perfiles de los dientes del otro engrane. Este efecto llamado interferencia, puede evitarse si el radio de cabeza máximo de cada engranaje es igual o menor que la siguiente relación.

$$\sqrt{(\text{radio de circunferencia base})^2 + (\text{dist. entre centros})^2 (\text{sen } \phi)^2}$$

El primer paso al estudiar un par de engranajes es situar los centros y dibujar las circunferencias primitivas. Las dimensiones de los engranes están basadas en las circunferencias primitivas. Si se denominan los radios de las dos ruedas por r_1 y r_2 respectivamente, y las velocidades angulares por W_1 y W_2 , y si suponemos que las dos circunferencias primitivas ruedan una sobre otra sin deslizamientos, la velocidad lineal de la línea primitiva es;

$$V = r_1 W_1 = r_2 W_2 \quad \text{-----} \quad 1.1$$

que nos da la relación entre los dos radios y las velocidades angulares.

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{r_2}{r_1} \quad \text{-----} \quad 1.2$$

Esta relación puede también escribirse en la forma;

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{D_2}{D_1} \quad \text{-----} \quad 1.3$$

Ya que las ruedas dentadas para poder engranar deben tener el mismo paso diametral, donde n representa las revoluciones por minuto y D el diámetro primitivo.

El siguiente paso es dibujar la línea ab por el punto primitivo P perpendicular a la línea de los centros. Tal y como se muestra en la figura 1.3.1.

Señalamos el engranaje 1 como conductor y que está girando en sentido de las manecillas del reloj, trazamos una recta cd, ésta es denominada la línea de presión, representa la acción y dirección en que actúa la fuerza resultante entre los engranes. Se llama ángulo de presión al ángulo ϕ y normalmente tiene valores de 14.5°, 20° y 25°.



Figura 1.3.1 Disposición de los engranes y localización geométrica.

El siguiente paso es trazar las circunferencias base en cada engranaje, tangentes a la línea de presión. Como deben ser tangentes a ésta, el ángulo de presión determina su tamaño. Las circunferencias base se usan para engendrar el perfil de evolvente y por tanto, la acción conjugada es cierta solamente en el espacio entre ellas. Las partes de los dientes que se extienden por debajo de ellas generalmente se hacen radiales.

Se genera ahora una evolvente en cada circunferencia base, ésta se puede generar en cualquiera de las dos direcciones.

Otros parámetros de importancia son, el claro, que es la diferencia entre el adendo y el dedendo, notándose que el dedendo es mayor que el adendo, con el objeto de que el engrane aloje el diente de su compañero sin que este toque la raíz del otro. Matemáticamente el claro es igual a;

$$c = d - a \text{ ----- 1.5}$$

El adendo, el dedendo y el claro son funciones del paso diametral P_d , el cual está definido por el cociente;

$$P_d = \frac{N}{D_p} \text{ (pulg}^{-1}\text{) ----- 1.6}$$

En donde N es el número de dientes. Así, el paso diametral nos indica cuántos dientes tiene un engrane por cada pulgada de diámetro de paso (D_p), mientras mayor sea este cociente, menor es el tamaño del diente.

Si el diente tiene un ángulo de presión de 20° o 25°, y si es normal o escotado, las dimensiones del adendo, dedendo y el claro están normalizadas de acuerdo a los siguientes valores:

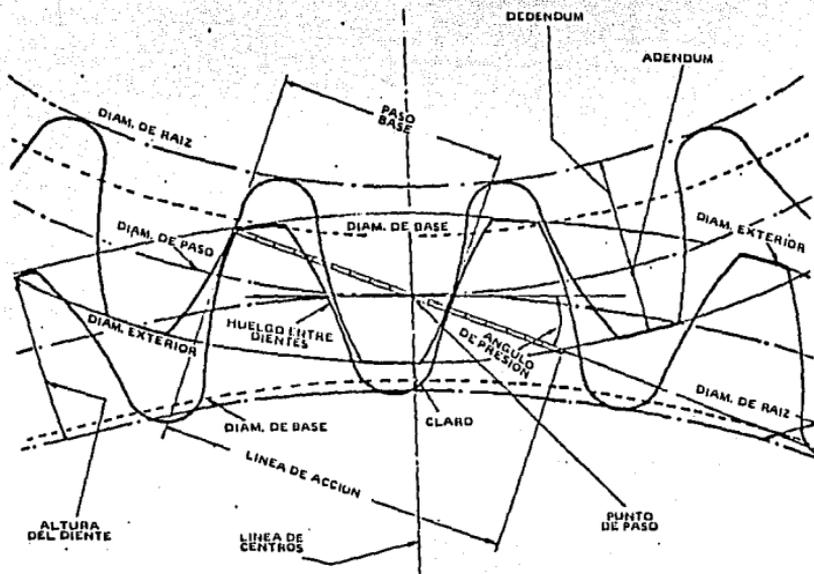
Diente normal	a= 1.00 m	d=1.25 m
Diente escotado	a= 0.75 m	d=1.00 m

Donde m es el módulo y está definido como:

$$m = D_p / N \text{ (mm)}$$

El diente escotado es más robusto que el normal y se utiliza cuando las cargas son muy altas.

FIGURA 1.3.2. Nomenclatura de los elementos de los dientes.



Diámetro de base: Es el diámetro del círculo de base o el círculo del cual la evolvente del perfil del diente comienza.

Diámetro de paso: Es el diámetro del círculo de paso, en teoría es el círculo imaginario que rueda sin deslizar con el círculo de paso del engrane compañero.

Diámetro exterior: Es el diámetro del adendo o círculo exterior.

Diámetro de raíz: Es el diámetro del círculo que es tangente a los fondos de los espacios de los dientes.

Línea de centros: Es la línea que conecta los centros del círculo de paso de dos engranes compañeros.

Punto de paso: Es el punto de tangencia de dos círculos de paso en la línea de centros.

Línea de acción: Es la línea recta que pasa a través del punto de paso y es tangente al círculo base. Podría decirse que es la trayectoria de contacto de evolventes compañeras.

Paso de base: Es la distancia fundamental entre curvas adyacentes a lo largo de una línea perpendicular común tal como la línea de acción.

Adendo: Es la distancia radial entre el círculo de paso y el -- diámetro exterior.

Dedendo: Es la distancia radial entre el círculo de paso y el -- círculo de raíz.

Claro: Es la cantidad radial por la cual el dedendo de un engrane excede el adendo de su compañero.

Angulo de presión: Es el ángulo entre la línea de acción y la -- línea tangente al círculo de paso en el punto de paso. Dado que -- una evolvente no tiene especificado ángulo de presión hasta que -- cause un íntimo contacto con otra evolvente, el ángulo de presión de operación es determinado por la distancia entre centros con la cual un par de engranes opera.

Profundidad de trabajo: Es la profundidad de engranamiento de -- dos ruedas dentadas compañeras, esto es la suma de sus adendos.

Profundidad íntegra: Es la profundidad total de un espacio de dientes, es igual a la suma del adendo más dedendo, o la distancia de trabajo más el claro.

Ancho de cara: Es la longitud del diente en un plano axial.

Huelgo: Es la cantidad por la cual el ancho de un espacio de dientes excede el espesor de engranamiento de dientes en el círculo de paso.

1.4.- Tipos de engranes.

Básicamente tenemos seis tipos de engranes, los cuales son representativos de los que son utilizados en la actualidad. Estos tipos se pueden clasificar de acuerdo a la posición que guardan sus ejes entre sí: Engranes rectos y helicoidales, los cuales tienen sus ejes paralelos; los engranes cónicos que tienen sus ejes que se intersectan; y los engranes hipoides y de tornillo sin fin que tienen sus ejes cruzados, pero que no se intersectan.

1.4.1.- Ejes paralelos (engranes rectos y helicoidales).

Los engranes rectos son usados en ejes paralelos, cuyos dientes son cortados a lo largo de la cara del engrane paralelamente al eje de rotación.

Los engranes helicoidales son similares a los engranes rectos, excepto que los engranes helicoidales son cortados con un ángulo, a lo largo de la cara del tejo. Esto es conocido como ángulo de hélice, y puede tener un rango desde 20 hasta 45 grados. Dentro de los engranes helicoidales tenemos a los engranes herringbone que son de doble helicoidal pero con ángulos de hélice opuestos.

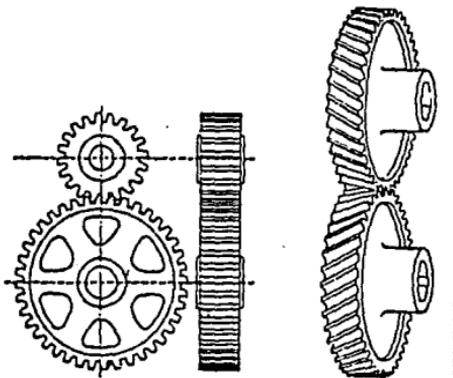


Figura 1.4.1 Engranes rectos y helicoidales.

1.4.2.- Ejes que se intersectan (engranes cónicos y zerol).

Los engranes cónicos tienen la forma del tronco de un cono, y son utilizados para conectar ejes que se intersectan. Los engranes cónicos rectos son utilizados para operar con desplazamiento sin producir concentración de esfuerzos en los extremos de los dientes.

El uso de engranes cónicos rectos es generalmente limitado para aplicaciones, las cuales operan a velocidades relativamente bajas. Los engranes cónicos rectos son la forma más simple de los engranes cónicos. Estos tienen dientes estrechados, los cuales si se extendieran, deberían cruzarse en un punto del eje.

Los engranes cónicos espirales tienen una curvatura, dientes -- oblicuos, en los cuales el contacto se inicia gradualmente y continúa uniforme de extremo a extremo. Debido a la acción de sobreabrazación del diente, el movimiento debería ser transmitido más uniformemente por medio de engranes cónicos espirales que por engranes cónicos rectos o Zerol, esto reduce ruido y vibración, especialmente a altas velocidades.

Los engranes cónicos zerol, tienen dientes curvados, los cuales están en la misma dirección que el diente cónico recto, sin embargo, estos son considerados como engranes cónicos espirales que tienen un ángulo espiral de cero. Los engranes cónicos zerol también tienen la ventaja de tener contactos uniformes en los dientes. Ello produce el mismo tipo de cargas en los cojinetes que los engranes cónicos rectos y pueden ser utilizados en los mismos montajes.

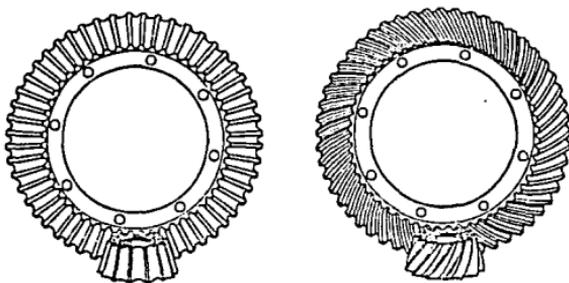


Figura 1.4.2 Engranes cónicos

1.4.3.- Ejes que se cruzan pero no se intersectan (engranes hipoidales y corona de tornillo sinfin);

Los engranes de tornillos sinfin, consisten de engranes helicoidales en ángulo recto. Estos son fabricados de tal forma que el engrane conducido rodea parcialmente el tornillo sinfin. En estos engranes los ejes forman un ángulo recto, pero no se llegan a intersectar ya que no están sobre el mismo plano, estos tipos de trenes de engranes son comercialmente utilizados en aplicaciones donde se requieren cantidades de potencia considerables a ser transmitidas.

Los engranes hipoides son similares a los engranes cónicos espirales, excepto que el eje del piñón está movido hacia arriba o hacia abajo del eje del engrane. Si la desviación es grande, un eje puede estar más cargado que el otro. Mientras el piñón cónico espiral tiene ángulos de presión iguales y curvaturas simétricas del perfil en ambos lados del diente, el piñón hipóide debe tener un ángulo de presión ordenado para obtener arcos iguales de acción para los dos lados del diente. El piñón hipóide tiene un diámetro de mayor tamaño que el correspondiente piñón cónico espiral, y es tan resistente como éste. Esto permite a los engranes hipóides ser diseñados con comparativamente altas relaciones de velocidad y reducción, sin que el piñón sea de un pequeño tamaño, lo cual nos proveerá un eje de un adecuado tamaño. En suma, los engranes hipoides tienen una acción deslizante a lo largo de la dirección del diente, la cantidad de desplazamiento está en función de la diferencia en los ángulos de espiral en el piñón y el engrane. Los engranes hipoides convencionales son fabricados para relaciones de velocidad mayores de 10 a 1, y las relaciones pueden llegar a ser tan grandes como de 300 a 1, las cuales son dadas por engranes hipoides de alta relación (HRH).

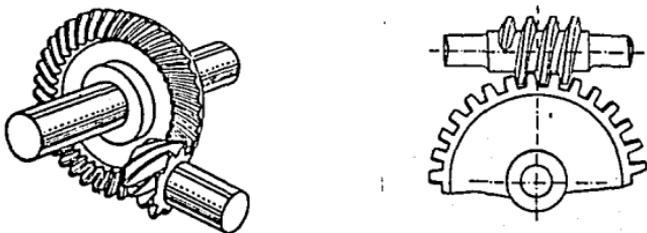


Figura 1.4.3 Engranes hipoides y corona de tornillo sinfin.

TABLA 1.4.1

Ventajas y Desventajas principales de los diferentes tipos de trenes de engranes utilizados.

TIPOS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
RECTOS	<ul style="list-style-type: none"> - Transmisión de potencia entre ejes paralelos. - Económicos. - No inducen empuje axial. - No producen problemas de alineamiento axial. 	<ul style="list-style-type: none"> - Restringido para bajas velocidades - Baja capacidad de carga habilitada. - 10 a 1 el límite de relación de <u>re</u> <u>ducción</u>.
HELICOIDALES Similar que el engrane recto, excepto que uno tiene un ángulo de diente recto y el otro varia de 20 a 45°	<ul style="list-style-type: none"> - Transmite potencia entre ejes paralelos. - Gran capacidad de carga habilitada. - Puede funcionar a altas velocidades debido a sus dientes inclinados. - No hay problemas de alineamiento axial. 	<ul style="list-style-type: none"> - Más costoso que los engranes rectos. - Produce empuje <u>axial</u>. - 10 a 1 el límite de relación de <u>re</u> <u>ducción</u>.
HERRINGBONE O DOBLE HELICOIDAL (Tiene ángulos de hélice opuestos entre si).	<ul style="list-style-type: none"> - Transmite potencia entre ejes paralelos. - Gran capacidad de carga habilitada, más que los engranes rectos y helicoidales. - Puede funcionar a altas velocidades. - No transmite empuje axial. 	<ul style="list-style-type: none"> - Si es de diente pequeño, requiere un maquinado <u>especial</u>. - Si es de diente grande se desperdicia mucho <u>material</u>. - 10 a 1 el límite de relación de <u>re</u> <u>ducción</u>.
CONICO RECTO	<ul style="list-style-type: none"> - Facilidad para fabricar. - Económico. - Bajo empuje axial. 	<ul style="list-style-type: none"> - Baja capacidad de carga habilitada. - Para bajas <u>velocidades</u>. - 6 a 1 el límite de relación de <u>re</u> <u>ducción</u>. - Se requiere un <u>montaje</u> cuidadoso.

CONT. TABLA 1.4.1

TIPOS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
CONICO ESPIRAL	<ul style="list-style-type: none"> - Gran capacidad de carga habilitada, más que el cónico recto. - Eficiente a altas velocidades debido a sus dientes inclinados. - Funcionamiento tranquilo y silencioso. 	<ul style="list-style-type: none"> - Produce empuje axial. - Requiere un montaje cuidadoso. - 6 a 1 el límite de relación de reducción.
HIPOIDES	<ul style="list-style-type: none"> - Gran capacidad de carga habilitada, más que el cónico recto. - Relación de reducción alta (100 a 1). - Los soportes de los ejes se pueden intercambiar unos a otros. 	<ul style="list-style-type: none"> - Baja eficiencia. - Baja disponibilidad. - Menor velocidad de operación que el tipo espiral.
TORNILLO SINFIN	<ul style="list-style-type: none"> - Alta capacidad de absorber choques. - Silenciosos. - Relación de reducción alta (100 a 1). - Los soportes de los ejes se pueden intercambiar unos a otros. 	<ul style="list-style-type: none"> - Baja eficiencia. - Alto empuje axial. - Alto costo.

1.5.- Cálculo dimensional básico

Este punto comprende el cálculo de una pareja de ruedas dentadas, para los que conocemos los siguientes datos:

- a.- Distancia entre centros.
- b.- Paso diametral.
- c.- Relación de reducción deseada.

Estos datos son proporcionados por los requerimientos de servicio a que estarán sujetos, y a su vez, son verificados de acuerdo a una unidad seleccionada.

Para explicar este punto, a continuación se da un ejemplo, explicándolo a medida que se desarrolla.

EJEMPLO.

Los datos que se nos dan son los siguientes.

Distancia entre centros	C= 3.200 pulgadas
Relación de reducción	Mg= 6.214/1
Paso diametral	D _p =16.000 dte/pulg.

1.- Primeramente vamos a estimar el número total de dientes de la pareja teórica, auxiliándonos para ello de la fórmula siguiente.

$NTS = 2 \times \text{Paso diametral del cortador o pieza} \times \text{Distancia entre centros}$

Donde :

NTS= Número total de dientes de la pareja teórica

$NTS = 2 \times 3.200 \times 16$

NTS = 102.4 dientes.

2.- Cálculo del número de dientes del piñón (NPS).

$NPS = NTS / (Mg + 1)$

$NPS = 102.4 / (6.214 + 1)$

$NPS = 14.194$

Aproximamos al inmediato inferior, con lo cual tenemos:

NPS = 14 dientes

Con este dato ya podemos estimar el número de dientes de la rueda dentada compañera (NGS).

$NGS = NTS - NPS$

NGS = 102 - 14 = 88 dientes

3.- El siguiente paso es verificar si nos acercamos a la relación de reducción deseada en los datos, (Mg')

$Mg' = NGS / NPS$

$Mg' = 88 / 14 = 6.2857$ Relación de reducción

Observándose que se obtuvo una relación de reducción mayor que la deseada.

4.- El siguiente paso es disminuir la relación de reducción, podemos disminuir la relación de reducción si disminuimos el número de dientes de la rueda compañera, entonces considerando a NGS como un valor de :

$$\text{NGS} = 87$$

Entonces la nueva relación de reducción sera:

$$\underline{\text{Mg}' = 87/14 = 6.214}$$

El cual es el valor deseado.

Con la variación de NGS realizada, obtendremos un nuevo NTS, el cual cumple con las condiciones deseadas, por lo cual sera el número total de dientes de la pareja real (NTR).

$$\underline{\text{NTR} = 14 + 87 = 101 \text{ dientes}}$$

Lo anterior puede realizarse debido a que prácticamente se ha establecido que podemos disminuir hasta dos dientes y aumentar hasta uno con respecto al NTS, que para este caso lo redondeamos a -- 102, con lo cual se obtiene que estamos uno abajo y por lo tanto, dentro de lo permisible.

Otra cuestión importante que se debe de tomar en cuenta es que el número de dientes del piñón no sea múltiplo del número de dientes de la rueda compañera, se debe buscar que uno sea par y el -- otro impar, en este caso, el diente impar de la rueda dentada compañera se le llama diente cazador, con esto se busca que todos los dientes de la rueda dentada compañera entren en contacto con todos los dientes del piñón y que no entren siempre en contacto los mismos dientes.

5.- El siguiente paso es calcular el diámetro de paso del piñón Pd.

$$\text{Pd} = (\text{NPS} \times 2 \times \text{C}) / \text{NTR}$$

$$\text{Pd} = (14 \times 2 \times 3.200) / 101$$

$$\underline{\text{Pd} = 0.887}$$

6.- Después calculamos el diámetro exterior del piñón Od.

$$\text{Od} = \text{Pd} + 2 \text{ adendos}$$

$$\text{Od} = 0.887 + 2(1/\text{Dp})$$

$$\text{Od} = 0.887 + 2(1/16)$$

$$\underline{\text{Od} = 1.012} \text{ pulgadas}$$

7.- Diámetro de raíz del piñón Rd.

$$\text{Rd} = \text{Pd} - 2 \text{ dedendos}$$

$$\text{dedendo} = 1.25/16 = 0.0781$$

$$\text{Rd} = 0.887 - 2(0.0781)$$

$$\underline{\text{Rd} = 0.731}$$

8.- Diámetro de paso de la rueda dentada PD.

$$\text{PD} = \text{NGS} \times 2 \times \text{C} / \text{NTR}$$

$$\underline{\text{PD} = 87 \times 2 \times 3.200 / 101 = 5.512}$$

9.- Diámetro exterior de la rueda dentada OD.

OD= PD + 2 adendo

OD= 5.512 + 2(0.0625) = 5.637 pulg.

10.- Diámetro de raíz de la rueda dentada RD

RD= PD - 2 dedendo

RD= 5.512 - 2(0.0781) = 5.3558 pulg.

Con este dato, tenemos todos los datos necesarios para poder re
alizar un engranaje con los requerimientos que nos fueron plantea
dos.

1.6.- Cálculo de potencia en engranes

Generalmente se hace el cálculo de potencia en engranes de dos maneras, una de ellas se hace por durabilidad de la superficie, la otra se realiza en base al esfuerzo flexionante admisible.

La primera forma es la más confiable, esto se debe a que se influye directamente sobre la resistencia al desgaste y picado superficial, además de que se ha comprobado que este cálculo de potencia por durabilidad de la superficie, es dos veces menor que el cálculo por esfuerzo admisible flexionante. A continuación damos relaciones para ambos cálculos y mostramos ejemplos al respecto.

Relación de potencia por durabilidad de la superficie
(Para engranes rectos, helicoidales y cónicos)

$$P_{ac} = \frac{n_p d_1^2 C_v}{126000} \times \frac{F}{C_m} \times I \times \frac{S_{ac}^2}{C_p} \times C_L^2 \times C_H^2$$

Relación de potencia por esfuerzo admisible
(Para engranes rectos, helicoidales y cónicos)

$$P_{at} = \frac{n_p d K_v}{126000} \times \frac{F}{K_m} \times S_{at} \times \frac{J}{P_d} \times \frac{K_L}{K_s}$$

Donde:

P_{at} = Razón de potencia por esfuerzo flexionante de entrada admisible de una pieza (piñón o engrane)

P_{ac} = Razón de potencia por durabilidad de la superficie

n_p = Velocidad del piñón en r.p.m.

d = Diámetro de paso del piñón, en pulgadas

d_1 = Diámetro de paso del piñón o diámetro exterior del piñón menos dos adendos normalizados, en pulgadas

C_v = Factor dinámico (durabilidad)

$$C_v \text{ (rectos)} = 50 / (50 + v)$$

$$C_v \text{ (helicoidales)} = 78 / (78 + v)$$

$$C_v \text{ (helicoidales)} = 0.485 \text{ para velocidades arriba de } \text{---} 7000 \text{ pies/min.}$$

v = Velocidad en la línea de paso

$$v = 0.262 \times n_p \times d \text{ en pies/min}$$

K_v = Factor dinámico (esfuerzo)

$$K_v = C_v \text{ (rectos)}$$

$$K_v = C_v \text{ (helicoidales)}$$

$K_v=0.695$ (para velocidades arriba de 7000 pies/min. en engranes helicoidales.

F = Ancho de cara activo.

C_m = Factor de distribución de carga (durabilidad)
ver tabla A para engranes rectos y helicoidales.

K_m = Factor de distribución de carga (esfuerzo)
ver tabla A para engranes rectos y helicoidales.

S_{ac} = Esfuerzo de contacto admisible
ver tabla B para engranes rectos y helicoidales.

C_p = Coeficiente elástico
ver tabla C para engranes rectos y helicoidales.

$\frac{S_{ac}^2}{C_p}$ Ver tabla B para engranes rectos y helicoidales.

S_{at} = Esfuerzo flexionante admisible

I = Factor geométrico (durabilidad)
ver tabla D para engranes rectos.

helicoidales= $0.235 \times \frac{\text{radio}}{\text{radio} + 1}$ en engranaje externo

helicoidales= $0.235 \times \frac{\text{radio}}{\text{radio} - 1}$ en engranaje interno

J = Factor geométrico (esfuerzo)
ver tabla E para engranes rectos y helicoidales

P_d = Paso diametral transversal

$P_d = \frac{\text{No. de dientes del piñón}}{\text{Diámetro de paso del piñón}}$

C_L = Factor de vida (durabilidad)
ver tabla F

K_L = Factor de vida (esfuerzo)
ver tabla F

K_s = Factor de tamaño= 1 para engranes rectos y helicoidales

C_H^2 = Factor de razón de dureza.
ver tabla G para engranes rectos y helicoidales

TABLA A - FACTORES DE DISTRIBUCION DE CARGA PARA ENGRANES RECTOS Y HELICOIDALES

Ancho de Cara (pulgadas)	Km (Rectos)	Km (Helicoidales)	Cm ₁	Cm ₂	Cm ₃
1	1.3	1.2	1.300	1.130	1.070
2	1.3	1.2	1.300	1.130	1.070
6	1.4	1.3	1.418	1.226	1.159
9	1.5	1.4	1.520	1.316	1.250
16 y mayor	1.8	1.7	F	F	F
			.45F + 2.0	.52F + 2.0	.55F + 2.0

Cm₁ Es para engrane recto con
 Cm₂ Es para diseño recto con
 Cm₃ Es para diseño helico con

Use Cm₁ Cm₂ y Cm₃ sobre los factores sobre una máquina de línea, helico y planetarios.
 Use Cm₁ sobre los factores sobre una máquina de línea helico.

TABLA B - ESFUERZO DE TENSION ACEPTABLE Y ESFUERZO DE CONTACTO ACEPTABLE PARA ENGRANES RECTOS Y HELICOIDALES

Temple y Revenido						Nitruado		Endurecido por inducción		Comentario	
Dureza Piñón	210 BHN	285 BHN	310 BHN	340 BHN	375 BHN	49R,*	52R,*	55R,*	58R,*		
Dureza Engrane	180 BHN	245 BHN	270 BHN	300 BHN	335 BHN	49R,*	52R,*	55R,*	58R,*		
S _{2t}	78,300	116,400	125,200	135,300	149,100	165,000	175,000	181,010	187,000		
$\left(\frac{S}{C_p}\right)^2$	1,750	2,560	2,950	3,460	4,200	5,147	5,790	6,200	6,600		
S _{2t} (Piñón) Recto y Helicoidal (Material Especial Tratamiento Térmico e Inspección) Recto y Helicoidal (Diseño General Aceptable)	35,300	46,200	48,300	51,100	53,900	47,400	47,400	55,000	55,000		
Plano de Máximo de Fluctuación Piñones Máquinas de Bata	28,100	35,000	37,000	38,800	40,900	36,000	36,000	55,000	55,000		
Plano de Máximo de Fluctuación Piñones Máquinas de Bata	28,100	35,000	37,000	40,400	43,000	36,000	36,000	55,000	55,000		
S _{2t} (Engrane) Recto y Helicoidal (Material Especial Tratamiento Térmico e Inspección) Recto y Helicoidal (Diseño General Aceptable)	25,100	42,100	44,900	47,400	50,600	47,400	47,400	55,000	55,000		
Plano de Máximo de Fluctuación Engranes Máquinas de Bata	24,100	31,500	33,800	36,000	38,800	36,000	36,000	55,000	55,000		
Plano de Máximo de Fluctuación Engranes Máquinas de Bata	25,500	31,500	33,800	36,000	38,800	36,000	36,000	55,000	55,000		

TABLA B (Cont.) S_{2t} y S_{2c} FACTORES PARA ENGRANES RECTOS Y HELICOIDALES

Fundición de Hierro Gris	S _{2t}	S _{2c}
Grado ACAA 40 (200 Brin. min.)	13,000	85,000
Grado ACAA 30 (175 Brin. min.)	8,500	75,000
Grado ACAA 20	5,000	60,000
Fundición de Hierro Perlitico		
Núcleo 110 (100 Brin. min.)	10,000	60,000
Perlitico 120 (100 Brin. min.)	15,000	105,000
Temple en Aceite y Revenido 425 Brin. min.	20,000	119,000
Branda Forjado ACAA 2C		
110 12 P ₁₀ P ₁₀ 40 1600 psi en Tensión	5,700	30,000
Branda Aluminio		
A3-T4 M 148.52 Estrucción 9C H 11-60 1600 psi en Tensión	23,600	65,000

TABLA C
COEFICIENTE ELASTICO-C_p
PARA ENGRANES RECTOS Y HELICOIDALES

Material y Módulo de Elasticidad - E del Piñón	Material y Módulo de Elasticidad de Engrane				
	Axón	Fundido de Hierro Gris	Bronce al Al	Bronce al Cu	Bronce al Ni
	30 x 10 ⁴	18 x 10 ⁴	17.5 x 10 ⁴	17.5 x 10 ⁴	16 x 10 ⁴
Axón	30 x 10 ⁴	2300	2000	1950	1900
Fund. Hierro Gris	18 x 10 ⁴	2000	1800	1800	1750
Bronce al Al	17.5 x 10 ⁴	1950	1800	1750	1700
Bronce P	16 x 10 ⁴	1900	1750	1700	1650

TABLA D
I-FACTOR PARA ENGRANES RECTOS

EXTERNOS							
RELACION	Número de Dientes en el Piñón						
	16	20	24	28	32	40	60
1 a 1	.074	.077	.079	.079	.080	.080	.080
2 a 1	.089	.095	.098	.100	.102	.104	.105
3 a 1	.096	.104	.108	.111	.113	.115	.118
4 a 1	.100	.109	.114	.117	.120	.122	.126
5 a 1	.103	.112	.118	.122	.124	.127	.131
6 a 1	.105	.115	.121	.125	.127	.131	.134
7 a 1	.107	.117	.123	.127	.130	.133	.137
8 a 1	.108	.118	.125	.129	.131	.135	.139
9 a 1	.109	.119	.126	.131	.133	.137	.141
10 a 1	.109	.120	.127	.131	.134	.137	.142

INTERNOS							
RELACION	Número de Dientes en el Piñón						
	16	20	24	28	32	40	60
2 a 1	.203	.235	.256	.270	.279	.292	.307
3 a 1	.160	.183	.197	.206	.213	.221	.231
4 a 1	.146	.165	.177	.185	.191	.198	.206
5 a 1	.139	.156	.167	.174	.180	.186	.193
6 a 1	.134	.151	.161	.168	.173	.179	.185
7 a 1	.131	.147	.157	.164	.168	.174	.180
8 a 1	.129	.145	.155	.161	.165	.171	.177
9 a 1	.128	.143	.152	.159	.163	.168	.175
10 a 1	.127	.142	.151	.157	.161	.166	.173

TABLA E
J-FACOR PARA PIÑONES Y ENGRANES RECTOS
Y HELICOIDALES CON ADENDUMS IGUALES

(20° Angulo de Presión—Altura Completa)

		Número de Dientes en el Piñón											
		18	20	24	30	40	60						
Dientes	Presión en Piñón	Piñón Eng. recto		Piñón Eng. helic.		Piñón Eng. helic.							
	7°	299	299	333	333	359	359	388	388	422	422	462	462
	15°	398	398	441	441	473	473	508	508	548	548	593	593
	30°	427	427	465	465	496	496	530	530	568	568	611	611
1	Presión en Piñón	Piñón Eng. recto		Piñón Eng. helic.		Piñón Eng. helic.							
	7°	409	409	439	439	460	460	484	484	510	510	538	538
	15°	315	407	351	428	379	444	409	462	444	483	483	508
	30°	430	529	473	555	504	575	537	596	573	619	612	645
3	Presión en Piñón	Piñón Eng. recto		Piñón Eng. helic.		Piñón Eng. helic.							
	7°	455	549	496	574	525	593	558	613	592	636	630	661
	15°	435	494	463	512	483	525	504	538	526	553	551	570
	30°	319	434	361	451	385	464	415	479	449	496	488	518
5	Presión en Piñón	Piñón Eng. recto		Piñón Eng. helic.		Piñón Eng. helic.							
	7°	441	563	482	534	512	600	544	617	580	636	617	657
	15°	465	581	506	602	534	617	565	633	598	652	634	672
	30°	442	515	469	529	488	540	509	551	530	563	554	577

TABLA E
J- FACTOR PARA PIÑONES Y ENGRANES RECTOS
Y HELICOIDALES CON UN MEDIO ADENDUM DE
SOBRETAMARO EN PIÑONES Y UN MEDIO
ADENDUM DE MENOR TAMAÑO EN ENGRANES
(20° Angulo de Presión—Altura Completa)

		Número de Dientes en el Piñón											
		18	20	24	30	40	60						
Dientes	Presión en Piñón	Piñón Eng. recto		Piñón Eng. helic.		Piñón Eng. helic.							
	7°	386	358	417	382	439	401	463	422	488	447	516	479
	15°	497	476	529	507	552	531	577	557	604	586	635	621
	30°	520	496	551	527	573	550	597	575	623	604	651	637
3	Presión en Piñón	Piñón Eng. recto		Piñón Eng. helic.		Piñón Eng. helic.							
	7°	479	456	500	478	514	495	530	512	546	532	565	554
	15°	392	391	422	410	444	426	468	443	493	465	520	492
	30°	504	516	536	542	558	561	582	583	608	607	638	636
5	Presión en Piñón	Piñón Eng. recto		Piñón Eng. helic.		Piñón Eng. helic.							
	7°	527	535	558	560	579	579	602	600	627	624	654	651
	15°	484	482	504	500	518	514	533	528	549	545	568	563
	30°	394	405	425	423	447	437	470	453	495	473	521	498
7	Presión en Piñón	Piñón Eng. recto		Piñón Eng. helic.		Piñón Eng. helic.							
	7°	508	546	529	558	561	576	585	595	610	617	639	642
	15°	531	554	561	576	582	593	604	612	628	633	655	657
	30°	487	494	506	511	520	522	534	536	550	550	567	567

- Para dientes cortos use los mismos valores que este tabla
- Para 25° de angulo de presión, multiplicar el valor por 1.15.
- Para 14.5° de angulo de presión, multiplicar por 0.90.

TABLA F
FACTOR DE VIDA

Número de Ciclos	Punto y Materialidad					Carga		
	K_L					C_L	K_L	C_L
	150 BHN	250 BHN	450 BHN	Carga Total				
10 ⁷	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
10 ⁸	1.1	1.1	1.2	1.1	1.15	1.4	1.15	
10 ⁹	1.2	1.4	1.7	1.5	1.3	2.0	1.30	
10 ⁶	1.4	1.9	2.4	2.0	1.48	3.0	1.48	

En el caso de conexiones a BS-63 se usan 1.0, excepto para servicios intermitentes.

TABLA G
**(C_H)² - FACTOR PARA ENGRANES
RECTOS Y HELICOIDALES**

Gear Ratio	K						
	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	
1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	
2	1.005	1.006	1.008	1.011	1.013	1.015	
4	1.014	1.021	1.027	1.032	1.038	1.042	
6	1.024	1.034	1.045	1.054	1.062	1.072	
8	1.034	1.048	1.063	1.076	1.088	1.100	
10	1.043	1.062	1.080	1.097	1.112	1.129	
12	1.053	1.076	1.098	1.119	1.138	1.158	
16	1.072	1.104	1.136	1.164	1.190	1.215	
20	1.092	1.132	1.192	1.210	1.243	1.278	

K es el Factor de Vida para el punto de contacto de los engranes.
Cuando K = 1.2 usar $K_{H2} = 1.0$
Cuando K = 1.7 el valor de C_{H2} es el mismo a lo que se muestra para K = 1.7.

TABLA H
FACTOR DE SERVICIO

Tipo de Servicio	Duración en Carga	Características de la Carga en la Máquina Conducida		
		Uniforme	Cargas Alto y Bajas	Cargas Fluctuantes
Máquina Eléctrica y Turbina Combinada	8-10 hrs. por día	1.0	1.25	1.75
	24 hrs. por día	1.25	1.5	2.0
Máquina Industrial Eléctrica Combinada Móvil	8-10 hrs. por día	1.25	1.5	2.0
	24 hrs. por día	1.5	1.75	2.25

Las lecturas de este en las fórmulas de tamaño de los ejes representan el tipo de servicio de la máquina conducida. No utilizar valores para otros tipos de servicios de carga.

EJEMPLO: RECTOS

Determine la relación de potencia del siguiente juego de engranes; PIÑON: 5.250" de diámetro de paso, paso diametral de 4, 21 dientes, 20° de ángulo de presión, profundidad completa, adendo estándar, 3.25" de cara, filete completo, acero SAE 4140, 285/--310 BHN. ENGRANE: 26.0" de diámetro de paso, paso diametral de 4, 104 dientes, 20° de ángulo de presión, profundidad completa, adendo estándar, 3" de cara, filete completo, acero SAE 4140, 245/265 --BHN. Velocidad del piñón de 1000 r.p.m. y un servicio de 8-10 hrs. por día. El juego de engranes es de primera reducción.

SOLUCION:

* Potencia por durabilidad

$$P_{ac} = \frac{n_p d_1^2 C_v}{126000} \times \frac{F}{C_m} \times I \times \frac{S_{ac}^2}{C_p} \times C_L^2 \times C_H^2$$

$$v = 0.262 \times 1000 \text{ r.p.m.} \times 5.250" = 1375 \text{ pies/min}$$

$$C_v = \frac{50}{50 + \frac{1375}{1375.5}} = 0.574$$

$$P_{ac} = \frac{1000 \times 5.250^2 \times 0.574}{126000} \times \frac{3}{1.3} \times 0.112 \times 2560 \times 1 \times 1$$

$$\underline{P_{ac} = 81 \text{ HP}}$$

* Potencia en base a la resistencia del piñón

$$P_{at} = \frac{n_p d K_v}{126000} \times \frac{F}{K_m} \times S_{at} \times \frac{J}{P_d} \times \frac{K_f}{K_s}$$

$$K_v = C_v = 0.574$$

$$P_{at} = \frac{1000 \times 5.250 \times 0.574}{126000} \times \frac{3}{1.33} \times 35000 \times \frac{.36}{4} \times \frac{1}{1}$$

$$\underline{P_{at} = 170 \text{ HP}}$$

* Potencia en base a la resistencia del engrane

$$P_{at} = \frac{1000 \times 5.250 \times 0.574}{126000} \times \frac{3}{1.33} \times 31700 \times \frac{.45}{4} \times \frac{1}{1}$$

$$\underline{P_{at} = 192 \text{ HP}}$$

* Relación de servicio:

La potencia en base a la resistencia de el juego de engranes es de 170 HP.

La potencia en base a la durabilidad de la superficie del juego de engranes es de 81 HP.

Como la relación de potencia por durabilidad es el más bajo, ésta nos dicta la potencia del juego de engranes y la relación de servicio de la tabla H nos indicara cual es la potencia real que nos puede soportar este juego de engranes.

Esta tabla H nos da una relación de servicio de 1.25, con lo que tenemos que:

$$\text{Potencia} = 81 / 1.25 = \underline{64 \text{ HP}}$$

Este capítulo lo consideramos básico para el conocimiento de los engranes, así como por su valiosa ayuda en la predicción del comportamiento de los mismos, en el cual al abarcar los elementos constitutivos de los dientes se podrá realizar un análisis profundo, tal como, evaluación por durabilidad de la superficie y por resistencia al esfuerzo de los dientes.

Su comprensión y manejo nos encauzará para dar un uso adecuado a cada uno de los diferentes tipos de engranaje, disminuyéndose considerablemente con esto el riesgo de fallas por sobrecarga, la cual es provocada por una mala selección de los engranes.

C A P I T U L O 2

FABRICACION DE ENGRANES

- 2.1.- Maquinado.
- 2.2.- Instrucciones para el generado
- 2.3.- Cuidados en el montaje de la pieza en la máquina.
- 2.4.- Verificación de preparación del cortador para generar.
- 2.5.- Sistemas de fresado, ventajas y desventajas.
- 2.6.- Consecuencias de los errores de afilado.

I N T R O D U C C I O N

El presente capítulo se refiere a los procesos de fabricación que se dan durante el generado de dientes, esto es, la secuencia que se sigue para el maquinado de los engranes. Dichos maquinados son los siguientes: El corte de las barras, en el caso de que los engranes sean hechos a base de barras de forja. El torneado de los materiales para la elaboración de los engranes. El barrenado del porta-eje del engrane. El cajeadado, en caso de que sean unos engranes muy pesados. El maquinado de generado de dientes y por último el maquinado del cuñero.

Como punto siguiente se dan las instrucciones necesarias para el generado de dientes, las cuales se concentran en las denominadas hojas de corte, en las que se dan especificaciones de corte de los engranes, del cortador, del corte de desbaste, del corte de acabado y de desplazamiento axial del cortador de la máquina, así como datos necesarios para efectuar la inspección de calidad.

También se dan recomendaciones para el montaje de la pieza en la máquina, esto es para disminuir al mínimo las posibilidades de error durante los procesos de corte y una serie de puntos que se deben tomar en cuenta en la preparación del cortador para la generación de dientes de engranes.

Así como también las consecuencias de los errores de montaje en la máquina sobre el perfil de referencia y el perfil del diente en la rueda.

Vemos también los sistemas de fresado, con sus ventajas y desventajas que se tienen durante el proceso de corte y generado de dientes.

También se dan las consecuencias de los errores de un afilado inadecuado sobre el perfil del diente de la rueda, que se dan como resultado de un mal estado del filo del cortador o montaje del mismo.

2.1.- Maquinado

En el proceso de fabricación tendremos la siguiente secuencia de maquinado:

CORTE.- En este caso entran las ruedas dentadas con un diámetro de hasta 10.5 pulgadas, así como los ejes piñón, esto es debido a que generalmente se fabrican con un material en condición de barra, las cuales se adquieren en dimensiones hasta de 3 metros de longitud, por lo que se hace necesario el corte del material adecuado a las condiciones de fabricación de la pieza.

TORNEADO.- En este proceso entran todos los materiales utilizados para la fabricación de ruedas dentadas en sus condiciones de barra en bruto, forja de matriz abierta, forja de matriz cerrada y fundiciones de acero aleado. Este proceso consiste primeramente en un refrentado, que nos servirá de referencia para los efectos que se requieran en la fabricación. En este refrentado se contempla el desbaste de la sobremedida del material, así como el mantener una sobremedida de 1/8 de pulgada sobre las dimensiones del plano para realizarle el tratamiento térmico. Posteriormente se dará el cilindrado de la pieza siguiendo los lineamientos del 1/8 de pulgada de sobremedida en diámetro. Se finaliza con el refrentado de la cara posterior; en este lado se marca con una costilla de maquinado sobre el diámetro exterior, para diferenciarla de la cara de referencia, esta costilla de maquinado consiste en una pasada con el buril, dejando una marca la cual tiene una profundidad de 0.0004 pulgadas, la cual es visible pero no puede sentirse al tocar la pieza.

BARRENADO.- Este proceso comprende el realizar el barreno interior por medio del cual se montará en el eje. También se harán los barrenos en el caso de que el diseño de la rueda dentada los requiera (esto se realiza para disminuir el peso de la pieza).

CAJEADO.- Este maquinado se hace generalmente para disminuir el peso de la pieza, dejando un espesor del 10% del diámetro interior a partir del barreno, y considerando un espesor de la sección en donde se hará el generado de dientes, un mínimo de 1.5 veces la altura del diente.

El siguiente punto es dar el tratamiento térmico a la pieza, el cual se detallará en el capítulo 3.

MAQUINADO DE ACABADO.- Este consiste en un proceso de torneado como el ya mencionado, la única diferencia para este caso es que las dimensiones finales serán las especificadas en el plano.

MAQUINADO DEL CUÑERO.- Esto se puede realizar por medio de una fresadora para las chavetas que se hacen sobre el diámetro exterior del eje en el caso de ejes piñón. La otra forma es por medio de escoplo, para el caso de chavetas sobre el diámetro interior de la rueda dentada.

En estos procesos de maquinado, las tolerancias de forma, posición y dimensión juegan un papel de primera importancia para poder ejercer un control sobre la fabricación, así como la factibilidad de disminuir los errores en la fabricación. En la figura -- 2.1.1 se muestran los procesos de maquinado.

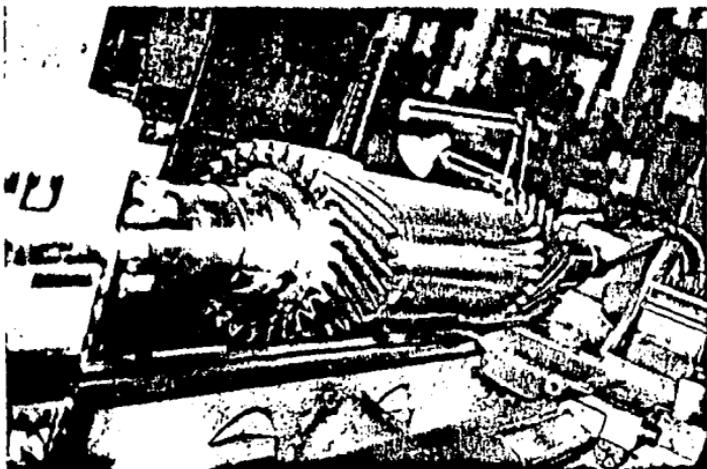


Figura 2.1.1.a Torneado de una pieza.

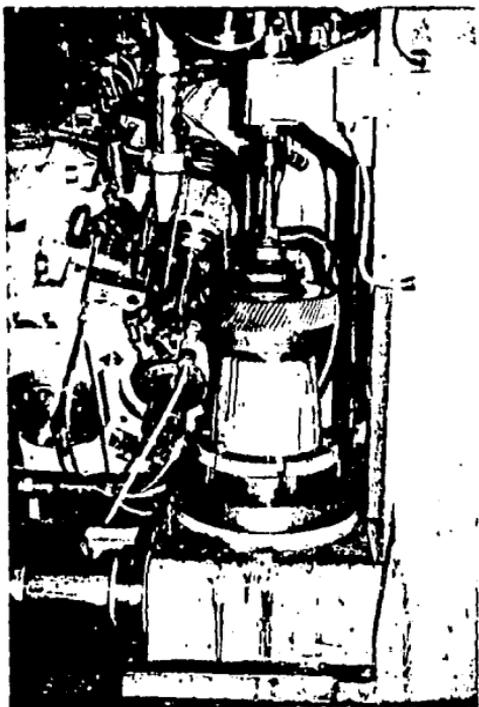


Figura 2.1.1.b. Generado de dientes.

2.2.- Instrucciones para el generador

En este punto se va a explicar en qué consisten las instrucciones para el generador de dientes en los engranes, las cuales por lo general van dadas dentro de las llamadas hojas de corte, debiéndose tomar en cuenta que para este instante la pieza ya va a las dimensiones de acabado y tratada térmicamente. En estas hojas de corte se dan especificaciones del engrane y del cortador, de corte, corte de desbaste, corte de acabado, desplazamiento axial del cortador y datos de inspección, manejándose todas las instrucciones por bloques tal y como se da a continuación.

2.2.1.- Especificaciones de engranes y cortador

Este bloque se refiere a datos técnicos del cortador y pieza. Para la pieza tendremos:

Forma del diente, número de dientes, paso diametral, ángulo de hélice, diámetro exterior, diámetro de raíz, distancia entre centros, en caso de que haya correcciones, distancia entre centros aumentada o disminuida, dureza, ancho de cara.

Para el cortador se tendrán las siguientes especificaciones:

Ángulo de hélice, grueso teórico del diente, dibujo del cortador, paso diametral normal del cortador, paso básico del cortador.

2.2.2.- Especificaciones de corte

Este punto considera las especificaciones necesarias para realizar el montaje del cortador y la pieza, y éstas son: excentricidad del cortador, excentricidad en el diámetro exterior de la pieza, desalineamiento en la cara de referencia de la pieza, utilaje (cuando el generador se realiza con accesorios de la máquina), cortado en flecha (cuando la rueda dentada es generada montada en el eje sobre el cual va a trabajar) y carrera del cortador.

2.2.3.- Corte de desbaste

En este inciso se explican las instrucciones necesarias para llevar a cabo el generador de dientes, éste a su vez se divide en dos etapas; la primera consiste en hacer el corte de desbaste y la segunda se refiere al corte de acabado.

Empezaremos en este punto tratando las instrucciones para corte de desbaste, y éstas son: adendo, grueso del diente, altura del diente, inclinación del cabezal de la máquina que tiene como objeto cumplir con el ángulo de hélice que se requiere en la pieza, revoluciones por minuto del cortador, avance, número de pasadas, engrane divisor (nos sirve para dar el número de dientes a generar), engrane diferencial (para dar el ángulo de hélice), engranes de inversión (para invertir el movimiento de rotación de la pieza).

2.2.4.- Corte de acabado

Este bloque de instrucciones se refiere al corte final o acabado en el generador de dientes, el cual considera las mismas instrucciones que el bloque para el corte de desbaste y la única diferencia entre ellos radica en el avance, el cual en el corte de acabado es la mitad del valor del avance en el corte de desbaste.

2.2.5.- Desplazamiento axial del cortador

Aquí se muestran los datos concernientes al funcionamiento del cortador, siendo estos los siguientes: generado contraavance (en el cual la dirección del avance está en contraposición con la dirección del corte), generado en favor del avance (en el cual la dirección del avance es en la misma dirección del corte), frecuencia de desplazamiento (esto se refiere a la forma y las veces para las cuales el cortador nos va a ser útil), número de desplazamientos (esto se refiere a que cuando estamos generando, solo utilizamos tres dientes del cortador que entran en contacto con la pieza para realizar el corte, pero el cortador generalmente tiene 9 o más dientes, de ahí que se tenga la posibilidad de desplazar el cortador 3 o más veces a lo largo de su eje), posición a empezar (lo cual nos indica el número de dientes del cortador con el cual vamos a iniciar el generado), cantidad de desplazamiento --- (longitud útil del cortador).

2.2.6.- Datos de inspección

Estos datos son obtenidos de la rueda dentada fabricada teniendo como objeto el catalogarla dentro de algún número de calidad AGMA, y para ello se requieren los siguientes datos: paso de la hélice, tolerancia de la pieza, tolerancia de la producción, y la medida del círculo base.

A continuación se muestra una hoja de corte en la cual se encuentran los datos mencionados anteriormente.

TABLA 2.2.6.1 HOJA DE CORTE

ESPECIFICACIONES ENGRANES Y CORTADOR				
TIPO DE ENGRANES	N.º DE DIENTES	D. P. DE ENGRANAMIENTO	MÓDULO ENGRANES	ENGRANES ENGRANES
ENGRANES ENGRANES	ENGRANES ENGRANES	ENGRANES ENGRANES	ENGRANES ENGRANES	ENGRANES ENGRANES
ENGRANES ENGRANES	ENGRANES ENGRANES	ENGRANES ENGRANES	ENGRANES ENGRANES	ENGRANES ENGRANES
ENGRANES ENGRANES	ENGRANES ENGRANES	ENGRANES ENGRANES	ENGRANES ENGRANES	ENGRANES ENGRANES

ESPECIFICACIONES DE CORTE		
ESPECIFICACIONES DE CORTE	ESPECIFICACIONES DE CORTE	ESPECIFICACIONES DE CORTE

CORTE DE DESBASTE										
ORDEN	OPERACION	FECHA	N.º DE OPERACION	FECHA						
1										
2										
3										
4										

CORTE DE ACABADO										
ORDEN	OPERACION	FECHA	N.º DE OPERACION	FECHA						
1										
2										
3										
4										

DESPLAZAMIENTO AXIAL CORTADOR		
FECHA DE DESPLAZAMIENTO	FECHA DE DESPLAZAMIENTO	FECHA DE DESPLAZAMIENTO

DATOS DE INSPECCION					
FECHA DE INSPECCION					

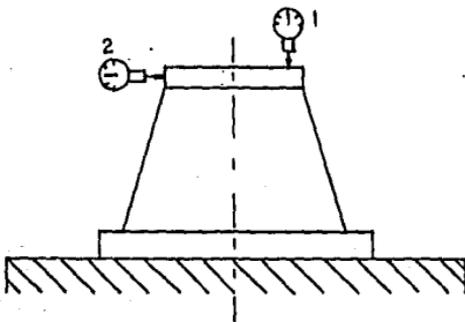
MECANICA FALK
S. A. DE C. V.
MEXICO, D. F.

2.3.- Cuidados en el montaje de la pieza en la máquina

En este punto vamos a enlistar todas las precauciones que se deben de tener en el montaje de la pieza, de acuerdo a su ejecución.

- 1.- Verificar el número de dibujo, diámetro exterior y ancho de cara de la pieza a generar.
- 2.- Limpiar con solventes la mesa de trabajo y dispositivos de sujeción.
- 3.- Verificación del estado del dispositivo de sujeción, su montaje y centrado, ver figuras 2.3.1 y 2.3.2.
- 4.- En el dispositivo de sujeción se asentará la pieza sobre la cara perpendicular al eje del diámetro interior del engrane, generalmente con la cara con chafilán hacia abajo, ver figura 2.3.3.
- 5.- De acuerdo a los parámetros indicados en la hoja de corte, verificar:
 - a) Número de dientes de los engranes de división y engranes del diferencial, así como el huelgo de los engranes.
 - b) Angulo de inclinación del cabezal.
 - c) Sentido de hélice del engrane a generar.
 - d) RPM del cortador y avance axial de desbaste y acabado.
 - e) Recorrido de entrada y carrera del cortador.
- 6.- Los tejos deben centrarse con indicador de carátula, utilizando la sujeción más firme y atendiendo a tolerancias de hoja de corte. También verificar la planitud de giro de la cara.
- 7.- En la pieza se harán las marcas en dos secciones del tejo, encarando el cortador para cerciorarse de que la preparación de la máquina es correcta y no hay corrimiento, así como verificar el número de dientes a generar.
- 8.- Una vez generada la rueda dentada, deberá inspeccionarse la desviación de la hélice por parte del departamento de control de calidad.
- 9.- Nunca desmontar una rueda dentada de la máquina generadora sin haber verificado que el grueso del diente es correcto.
- 10.- Los tejos de los engranes deberán verificarse antes de montarse en la máquina generadora, en cuanto al número de dibujo, diámetro exterior y ancho de cara.
- 11.- En cada preparación se limpiará con solvente la mesa de trabajo, las zonas maquinadas del dispositivo de sujeción, el cortador y la flecha porta-herramienta y casquillos a utilizar.
- 12.- Verificación del estado del dispositivo de sujeción a utilizar, así como el montaje centrado del dispositivo (figura 2.3.1), si se requiere utilizar el contrapunto, verificar el centrado del punto, con indicador de carátula, ver figura 2.3.2.

CENTRADO DE DISPOSITIVO DE SUJECION

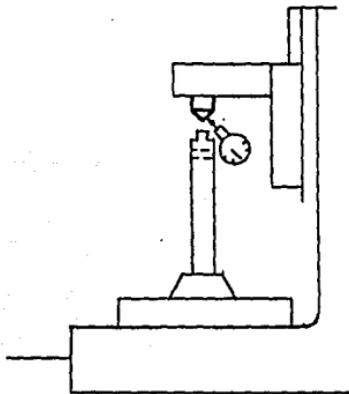


1 ERROR MAXIMO PERMISIBLE 0.0007"

2 ERROR MAXIMO PERMISIBLE 0.001"

FIGURA 2.3.1

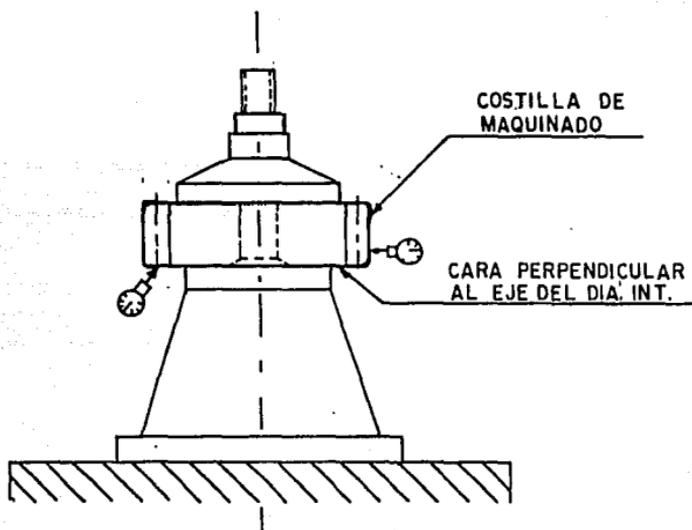
CENTRADO DE EL PUNTO-



ERROR MAXIMO PERMISI-
BLE 0.0005"

FIGURA 2.3.2

MONTAJE DE LA PIEZA EN MAQUINA



NOTA: VERIFICAR CON EL CONTRAPUNTO PUESTO, CUANDO SEA NECESARIO USARLO.

FIGURA 2.3.3.

2.4.- Verificación de preparación del cortador para generar

Este punto tratará acerca de los cuidados en el montaje del -- cortador antes de iniciar el generado, los cuales se listan a continuación:

- 1.- El cortador debe revisarse visualmente respecto a su afilado, y si se considera correcto, se procederá a montarlo, verificando la concentricidad y alabeo del cortador en ambos mamelones y cerciorándose que esté dentro de la tolerancia indicada en la hoja de corte.
- 2.- El cortador debe localizarse en la máquina en el número de vuelta de filete indicada en la hoja de corte como posición a empezar y deberá desplazarse después de cortar el número de piezas indicado en la hoja de corte como frecuencia de desplazamiento. La distancia que debe desplazarse está consignada en la hoja de corte como cantidad de desplazamiento y deberá medirse en el vernier del cabezal o en caso de que la máquina no lo tenga, se medirá directamente.
- 3.- Cuando sea necesario cambiar de cortador sin haber concluido una pieza, se verificará:
 - a) Limpieza con trapo y solvente de eje porta-herramienta, casquillos y cortador.
 - b) Concentricidad y alabeo del cortador en ambos mamelones y cerciorándose que está dentro de la tolerancia indicada en la hoja de corte.

La figura 2.4.1 nos muestra el montaje de cortadores en máquina.

Para obtener la exactitud deseada de un dentado con cortador de calidad prevista, es indispensable una correcta colocación del mismo en la máquina, estando afectada dicha colocación por los siguientes conceptos:

- * Tolerancias de barrenado del cortador y su eje.
- * Errores de alabeo, excentricidad y balanceo del cortador en la máquina.

Las consecuencias del alabeo, excentricidad y balanceo del cortador y los errores obtenidos en el dentado correspondiente se -- pueden observar en la figura 2.4.2.

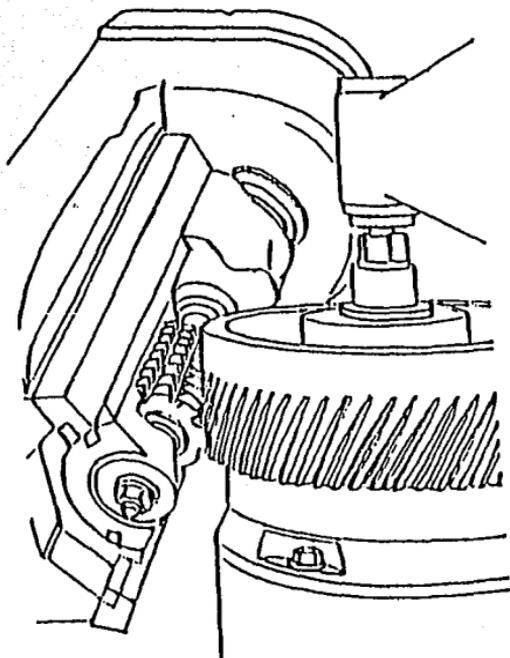


Fig. 2.4.1. Montaje de los cortadores
en la máquina generadora.

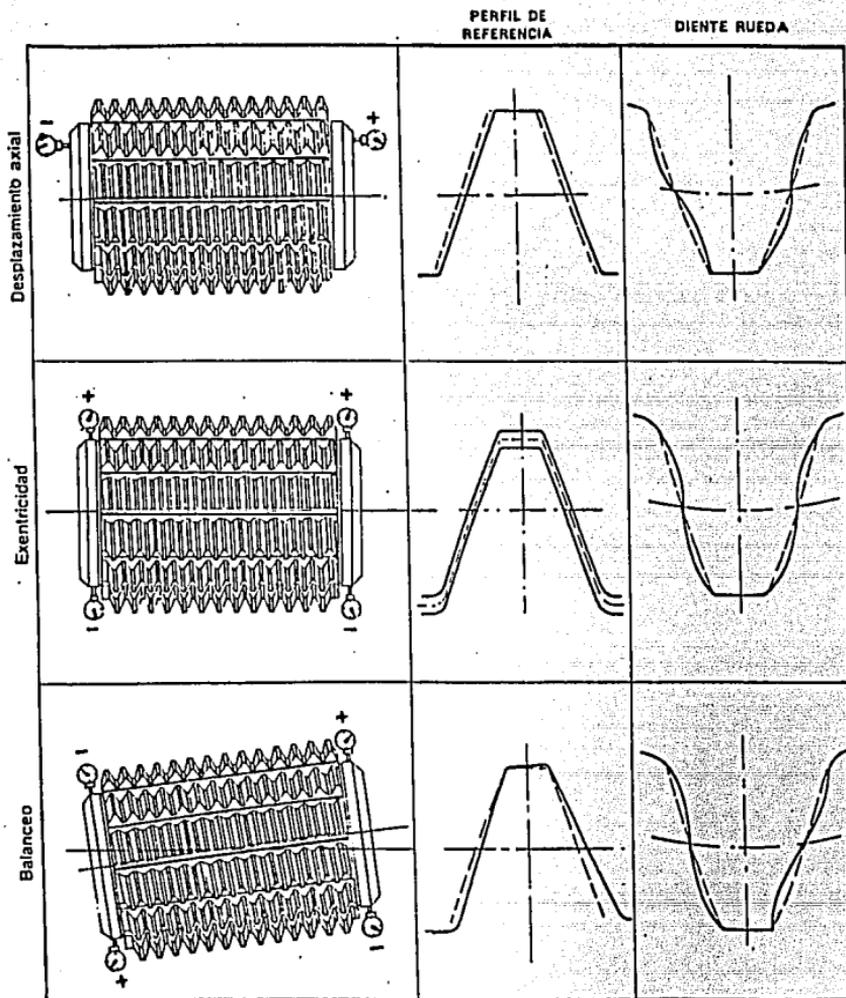


Figura 2.4.2

Consecuencia de los errores de montaje en la máquina sobre el perfil de referencia y el perfil del diente en la rueda.

2.5.- Sistemas de fresado, ventajas y desventajas.

Los sistemas de fresado utilizados se conocen como en paralelo y contramarcha por el corte de material, las denominaciones de -- corte en paralelo y en contramarcha provienen del trabajo de la fresa madre, en donde el carro portapieza realiza el movimiento de avance y rotación y la herramienta el de giro.

Se trabajará en paralelo o contramarcha en función del sentido de avance de la pieza frente a la fresa madre.

Fresado en paralelo.- La dirección del avance y el de corte es en tñ en el mismo sentido.

Fresado en contramarcha.- La dirección del avance está en con- traposición con la dirección de corte.

La figura 2.5.1 nos muestra los dos tipos de fresado.

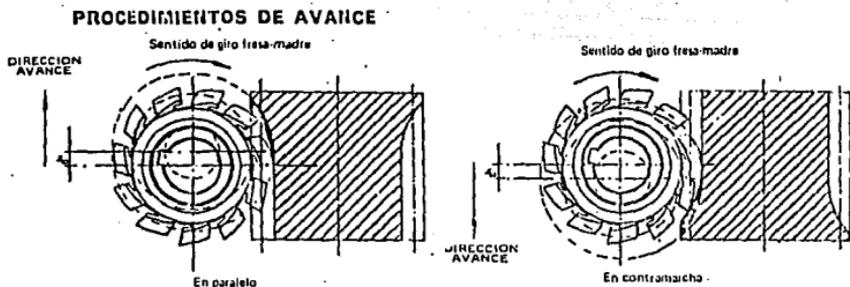


Figura 2.5.1 Sistemas de fresado en paralelo y en contramarcha.

Para el tallado de ruedas rectas y helicoidales con pequeños - ángulos de inclinación, menor o igual a 25 grados, la formación - de la viruta es diferente. El perfil básico de la viruta es el -- mismo para contramarcha y paralelo, pero mientras en la primera - se inicia el corte por la parte delgada de la viruta en forma de coma, en el segundo ocurre lo contrario.

En el fresado en contramarcha, los filos de los dientes de la fresa madre no cortan al iniciar el contacto con la pieza, sino - que únicamente presionan y rozan la superficie previamente mecani - zada de la pieza.

En el fresado en paralelo, el corte se inicia con todo el grup - so de la viruta, sin que aparezca el fenómeno de presión-roza--- miento.

La cuchilla encuentra suficiente material para la formación de la viruta y éstas se separan en un corte libre. Es especialmente recomendable para materiales tenaces de buena dureza en frío.

Quando el ángulo de inclinación es mayor de 25 grados, no existe una gran diferencia entre el empleo de paralelo y en contramarcha.

Hay una zona crítica en el generado en paralelo, que es la entrada de la fresa madre debido a un gran rozamiento de las superficies de incidencia al tallar tanto engranes rectos, como helicoidales. Mientras trabajan solo los dientes de un filete de la fresa madre, en su entrada el esfuerzo varía desde el valor cero hasta el valor máximo. Al salir las aristas del corte se produce una recuperación de las deformaciones elásticas de la pieza, herramienta, máquina y dispositivos de sujeción de la pieza. En este instante los huecos tallados en la pieza pueden presionar sobre las superficies de incidencia de la herramienta y producir un desbaste por rozamiento.

En el fresado en contramarcha, cuando se inicia el corte no alcanza un espesor mínimo de viruta, por lo que debido al fenómeno de presión-deslizamiento de las cuchillas sobre la superficie de la pieza, se produce un calentamiento adicional que provoca en el material de la herramienta un revenido con la consiguiente pérdida de dureza y aumento del desgaste, por lo que el trabajo a contramarcha no permite unas velocidades de corte elevadas como las que se utilizan en el corte en paralelo.

La calidad de dentado que se tiene en el generado en contramarcha nos dará una superficie de la pieza lisa y brillante, a causa de la presión inicial de los dientes del cortador, pero debido al avance este acabado no es regular y uniforme.

2.6.- Consecuencias de los errores de afilado

A fin de mantener unas buenas condiciones de corte (calidad de generado) y obtener una máxima duración de la herramienta, conviene controlar las huellas de desgaste (f_v) que se producen en los dientes más afectados, y cuando el valor de los mismos se acerque al máximo admisible. En la figura 2.6.1 se muestran los valores de las huellas de desgaste que se deben de analizar. Si este valor sobrepasa el máximo admisible, solo se conseguirá disminuir progresivamente el rendimiento de la herramienta.

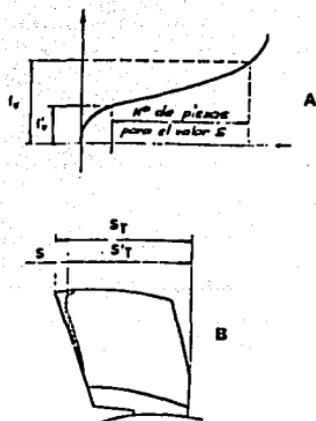
El valor máximo de huella de desgaste admisible sera:

$$f=0.3/0.6 \text{ s}$$

Este valor es el que conviene rebajar en el reafilado.

De la figura observamos que tenemos un valor residual f_v' , el cual comúnmente no se rebaja, ya que desaparece en los primeros cortes.

Lo que se pudo observar en la investigación, es que el reafilado se da después del generado de cada pieza, aunque sí se estima el valor máximo admisible de desgaste.



f_v = huella de desgaste.

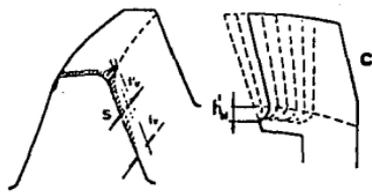
S = desgaste.

S_T = Longitud antes del afilado.

S_T' = Longitud después del afilado.

Figura 2.6.1 Valor de la huella de desgaste.

También cabe mencionar el perfil útil de la herramienta para garantizar un trabajo perfecto, esto es, hasta qué dimensiones podemos rebajar, esto es también estimado prácticamente y tenemos que la herramienta trabajará normalmente hasta con un mínimo de 30% de la longitud del diente del cortador. Fuera de esto tendremos problemas de calentamiento, deformación del perfil o bien, que los esfuerzos producidos en el corte rebasen el límite de resistencia de la herramienta. En la figura 2.6.2 se muestra el 70% de perfil útil para sucesivos reafilados.



h'_N = Profundidad a penetrar por la muela abajo del perfil --- útil.

Figura 2.6.2 Reducción de la vida útil del cortador, a este cortador solo le quedan 5 reafiladas de utilidad.

		PENFIL DE REFERENCIA	DIENTE RUEDA
ERRORES DE AFILADO	POSICION CORRECTA radial		
	Descentramiento radial		
	Descentramiento axial		
	Diferencias de division		
	Diferencia de paso HN		

Figura 2.6.2

Consecuencia de los errores de afilado sobre el perfil de referencia y el perfil del diente en la rueda.

El afilado del cortador es una operación que debe de reunir una serie de cuidados que son:

- * Evitar calentamientos
- * Exactitud en la geometría del afilado

Un calentamiento excesivo puede dar lugar a funciones tales como:

- a) Pérdida de dureza por revenido del material del cortador
- b) Aparición de fisuras

Para evitar calentamientos debe de partirse de muelas blandas en el caso de afilado y rectificado en seco y teniendo poco avance, esto evita el calentamiento en forma excesiva.

Cuando sea posible, es recomendable el uso de refrigerante, garantizando un gran caudal del mismo.

En cuanto a la exactitud del afilado, éste estará en función de la máquina y de su preparación.

Las consecuencias de los errores de afilado del cortador sobre la pieza dentada se indican en la figura 2.6.3, en la que se señalan por comparación, con la posición correcta de afilado (figura superior), de los errores de desprendimiento (positivo, negativo y abombado), de los errores de división y del error de dirección de la ranura de desprendimiento.

En resumen podemos decir que éste es uno de los capítulos base, en el cual se sustenta prácticamente el buen funcionamiento de los engranes.

Si bien una correcta fabricación es trascendental en la funcionalidad de un tren de engranes, su control y conocimiento de los procesos de fabricación nos llevará a mejorar cada uno de los mismos y nos encauzará a una correcta fabricación, ya que de cada uno de los procesos dependerá el realizar un dentado adecuado.

Para cada uno de los procesos se hace necesario conocer los parámetros decisivos para poner en ellos un cuidado especial, tanto en montajes de maquinado como de generado.

También es de gran utilidad conocer las causas de posibles errores para poder catalogarlos y ubicarlos, y poder así dar una rápida solución y evitar que el proceso de fabricación siga siendo erróneo.

CAPITULO 3.

TRATAMIENTOS TERMICOS

- 3.1.- Materiales
- 3.2.- Temple y revenido
- 3.3.- Nitruado
- 3.4.- Cementado
- 3.5.- Conclusiones

I N T R O D U C C I O N

En esta sección vamos a clasificar primeramente los materiales que son utilizados en la fabricación de engranes, dando las características de cada uno de ellos, dado que de éstas dependerá su aplicación.

Este capítulo denominado Tratamientos térmicos es de vital importancia, ya que sabemos que con un proceso térmico podemos mejorar las propiedades de los materiales usados en la fabricación de los engranes. Los procesos a tratar son: Temple (y revenido), que es el proceso más usado por su fácil aplicación a grandes lotes, en este caso, la pieza es endurecida en su totalidad y la dureza alcanzada es controlada por medio de un revenido. En los casos en que se requiera una mayor dureza, ésta se alcanzará con un endurecimiento superficial, el cual puede darse de dos maneras comúnmente, cementado y nitrurado. La elección de alguno de estos dos métodos está en función de las características químicas del material, ya que en uno lograremos el endurecimiento por medio de carburos, y en el otro será por medio de nitruros. Tales situaciones serán tratadas en el contenido de este capítulo.

Otra de las cuestiones importantes para lograr un adecuado tratamiento térmico son las temperaturas a que éstos deben hacerse, aspectos que también trataremos en el presente capítulo, según sea el caso.

3.1.- Materiales

Para la selección de materiales, la existencia de una gran variedad de materiales ferrosos y no ferrosos nos lleva a la necesidad de clasificarlos y establecer cuáles son los más utilizados en la industria para la fabricación de engranes. Vamos a hablar de aquellos materiales cuyas características sean propias para dar un tratamiento térmico o endurecimiento superficial, considerando que los engranes a fabricar serán utilizados en reductores de velocidad, los cuales en su mayoría transmitirán potencias elevadas; de ahí que sólo hablemos de materiales ferrosos, sus propiedades mecánicas y características químicas, teniendo en cuenta que estas últimas nos determinarán las propiedades mecánicas de los materiales.

Para la clasificación de los materiales nos basaremos en la designación AISI de los aceros, de los cuales tomaremos los recomendados para la fabricación de engranes cuya aplicación sea en reductores de velocidad. Es de sumo interés la adecuada selección de los materiales, teniendo en cuenta que se deben reunir ciertas características en la operación de los engranes tales como, dureza superficial alta y un núcleo tenaz con el objeto de aumentar la resistencia al impacto y al desgaste, y para absorber energía de deformación. Esto es en cierta forma debido al trabajo que están realizando o a condiciones de carga.

3.1.1.- Clasificación

Aceros AISI 4140. Esta es una aleación de acero al cromo-molibdeno, posee buenas características de endurecimiento profundo, buena ductilidad; se recomienda endurecerlo por nitrurado. Debido a su escasa demanda es difícil encontrarlo comercialmente, por lo que su adquisición es por lotes especiales.

Aceros AISI 4150. Es una aleación similar a la AISI 4140, de acero al cromo-molibdeno, existiendo como única diferencia un mayor contenido de carbono por parte del acero 4150, lo cual mejora su templabilidad, por su mayor diversidad de utilización con respecto al acero 4140, su adquisición se hace más fácil por ser más comercial.

Aceros AISI 4320, es una aleación de acero al níquel-molibdeno, el cual tiene como características una alta resistencia y ductilidad, proporcionada por el níquel y una mayor templabilidad, así como una maquinabilidad mayor proporcionada por el molibdeno, buena tenacidad, alta resistencia a la fatiga y al desgaste, se recomienda endurecerlo por cementado.

Aceros AISI 4340. Es una aleación de acero al níquel-molibdeno, sus características son similares a las del acero 4320. La única diferencia entre ambos radica en el mayor contenido de carbono en el acero 4340, lo cual mejora su templabilidad. Esta aleación de acero es recomendada para endurecerla superficialmente por nitrurado, la aleación debe contener como mínimo un 0.3% de contenido de carbono.

Acero AISI 4350. Es una aleación de acero al níquel-molibdeno, tiene como características una gran resistencia y ductilidad, alta templabilidad y alta resistencia a la fatiga.

Acero AISI 8620. Es una aleación de acero al níquel-cromo-molibdeno, por lo que su ductilidad es mayor, así como su tenacidad, se mejora su templabilidad y su resistencia al desgaste. Es uno de los materiales recomendados para endurecer por cementado.

Dentro de la gama de materiales usados en la fabricación de engranes, cabe mencionar los aceros que son usados en la compañía en que se realizó la investigación, particularmente los que se utilizan en la condición de fundición. El motivo de su uso en esta forma es el ahorro de material y disminución del peso de los engranes. Al hacer los engranes en moldes, se obtienen estos casi a las dimensiones deseadas. Estas fundiciones son denominadas aleaciones de acero Falk y son las siguientes:

Fundición de acero aleación Falk No. 1. Es una aleación de acero al bajo níquel-cromo-molibdeno. Posee características de buena templabilidad, resistente a la corrosión y al desgaste, alta tenacidad y ductilidad, es formadora de nitruros.

Fundición de acero aleación Falk No 2. Es una aleación al cromo-molibdeno, sus características son: endurecimiento profundo, buena ductilidad, mejora la tenacidad en la porción interna, buen formador de carburos por lo cual se puede cementar.

Fundición de acero aleación Falk No 3. Es una aleación al níquel-cromo-molibdeno. Sus características son similares a las de la aleación Falk No 1, pero tiene mejorada resistencia al impacto y desgaste, así como alta templabilidad. Este acero se nitrura.

Fundición de acero aleación Falk No 4. Es una aleación al níquel-cromo-molibdeno. Tiene similares características a la aleación Falk No 3, pero por su mayor contenido de carbono mejora su templabilidad y tiene alta resistencia al impacto. Se recomienda nitrurar.

Fundición de acero aleación Falk No 5. Es una aleación al bajo níquel-cromo-molibdeno, posee características tales como: buena templabilidad, es una aleación con mayor contenido de carbono, buena resistencia al desgaste y a la corrosión, así como ser apta para nitrurar.

3.1.2.- Parámetros de selección.

Uno de los parámetros en la selección del material es la dimensión de la pieza a fabricar. Esto es, para una pieza de 0 a 14 pulgadas de diámetro se fabricará de una barra rolada, para la cual se seleccionará un acero AISI 4150 si es de 0 a 10.5 pulg. de diámetro, y un acero AISI 4350 si es entre 10.5 y 14 pulg. de diámetro, esto es porque comercialmente los aceros 4150 se fabrican en barra hasta una medida de 10.5 pulg., y solo tendremos barra en 14 pulgadas de diámetro de acero AISI 4350. Una pieza de 14 a 30 pulgadas de diámetro es hecha de forja de acero AISI 4150, 4320, 4340 o bien 4350. Una pieza mayor de 30 pulgadas de diámetro se hará en fundición de acero. También es conveniente mencionar que se han agrupado en función de su dureza requerida, por lo que tendremos que para el primer grupo de 0 a 14 pulgadas de diámetro son engranes pequeños, de baja capacidad de carga y dureza

por lo que sólo se les dará un tratamiento térmico de temple y re-
vendido. Al segundo grupo de 14 a 30 pulgadas, así como para las --
fundiciones de acero aleado, la dureza a obtener puede ser mediana
o alta y estará en función del tratamiento térmico o endurecimiento
superficial utilizado en el proceso de fabricación. Para lograr la
dureza requerida, es necesario conocer la composición química de --
los materiales para poder así seleccionar el tipo de material y tra-
tamiento térmico adecuado.

3.1.3.- Prueba Jominy

La prueba Jominy consiste en calentar una muestra, cuyas dimen-
siones son de 1 pulgada de diámetro por 4 pulgadas de longitud, es-
ta muestra es llevada a la temperatura de temple en un horno eléc-
trico, se saca del horno y se enfría bruscamente con agua, como se
muestra en la figura 3.1.1. El enfriamiento se da de abajo hacia --
arriba, con lo que la muestra se va enfriando progresivamente tam-
bién de abajo hacia arriba. Después del enfriamiento con agua, se --
hace un maquinado sobre la superficie de la probeta para obtener --
una planitud sobre la cual, posteriormente se harán las mediciones
de dureza a cada 2 milímetros. Estas se graficarán para compararlas
con las bandas de dureza que especifica el material.

Esta prueba se realiza para detectar las variaciones inherentes
del material, tales como el contenido de carbono, el cual puede va-
riar de hornada a hornada, así como de sus componentes de aleación.

La prueba Jominy nos sirve para establecer un control sobre las
adquisiciones de material, esta prueba se realiza sobre una muestra
que acompaña al lote del material, el cual a su vez trae un análi-
sis químico certificado.

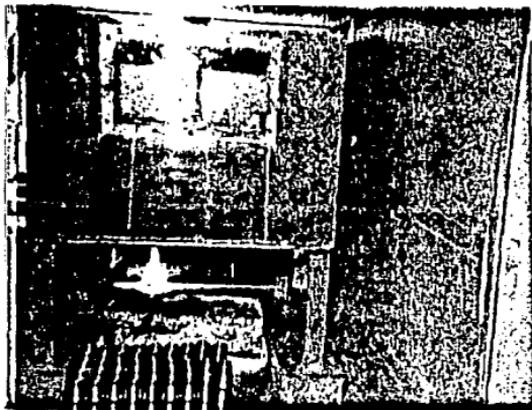


Figura 3.1.1. Dispositivo para el enfriamiento utilizado
en la prueba Jominy.

3.1.4.- Composición química de los materiales.

Acero AISI 4140

C	0.38% - 0.48%
Mn	0.75% - 1.00%
P	0.035% Máx.
S	0.040% Máx.
Si	0.15% - 0.30%
Cr	0.80% - 1.10%
Mo	0.15% - 0.25%

Acero AISI 4150

C	0.48% - 0.53%
Mn	0.75% - 1.00%
P	0.035% Máx.
S	0.040% Máx.
Si	0.15% - 0.30%
Cr	0.80% - 1.10%
Mo	0.15% - 0.25%

Acero AISI 4320

C	0.17% - 0.23%
Mn	0.40% - 0.70%
P	0.035% Máx.
S	0.040% Máx.
Si	0.15% - 0.30%
Cr	0.35% - 0.65%
Ni	1.55% - 2.00%
Mo	0.20% - 0.30%

Acero AISI 4340

C	0.35% - 0.45%
Mn	0.45% - 1.00%
P	0.035% Máx.
S	0.040% Máx.
Si	0.15% - 0.35%
Cr	0.50% - 1.50%
Ni	0.80% Mín.
Mo	0.20% - 0.40%

Acero AISI 4350

C	0.40% - 0.55%
Mn	0.60% - 0.85%
P	0.035% Máx.
S	0.018% - 0.040%
Si	0.15% - 0.30%
Cr	0.70% - 0.90%
Ni	1.65% - 2.00%
Mo	0.20% - 0.30%

Acero AISI 8620

C	0.17% - 0.23%
Mn	0.60% - 0.95%
P	0.035% Máx.
S	0.040% Máx.
Si	0.15% - 0.30%
Cr	0.35% - 0.75%
Ni	0.35% - 0.75%
Mo	0.15% - 0.25%

Fundición de acero aleación Falk No 1

C	0.27% - 0.37%
Mn	0.70% - 1.00%
P	0.05% Máx.
S	0.06% Máx.
Cr	0.60% - 0.90%
Ni	0.90% Máx.
Mo	0.30% - 0.40%

Fundición de acero aleación Falk No 2

C	0.17% - 0.23%
Mn	0.70% - 1.00%
P	0.05% Máx.
S	0.06% Máx.
Si	0.60% Máx.
Cr	0.60% - 0.90%
Mo	0.30% - 0.40%
V	0.04% - 0.06%

La adición de vanadio produce una pieza de fundición sin defectos, uniforme y de estructura dendrítica fina.

Fundición de acero aleación Falk No 3

C	0.30% - 0.37%
Mn	0.70% - 1.00%
P	0.05% Máx.
S	0.06% Máx.
Si	0.60% Máx.
Cr	0.60% - 0.90%
Ni	0.90% Máx.
Mo	0.40% - 0.50%

Fundición de acero aleación Falk No 4

C	0.38% - 0.45%
Mn	0.70% - 1.00%
P	0.05% Máx.
S	0.06% Máx.
Si	0.60% Máx.
Cr	0.60% - 0.90%
Ni	0.90% Máx.
Mo	0.40% - 0.50%

Fundición de acero aleación Falk No 5

C	0.43% - 0.48%
Mn	0.70% - 1.00%
P	0.05% Máx.
S	0.06% Máx.
Si	0.60% Máx.
Cr	0.50% - 0.70%
Ni	0.90% Máx.
Mo	0.20% - 0.30%

3.2.- Temple y revenido

3.2.1.- Temple

El temple es un tratamiento térmico a base de altas temperaturas de calentamiento y un enfriamiento rápido con el fin de endurecer una aleación ferrosa, de tal manera que la mayor cantidad de austenita se transforme en martensita.

Un tratamiento térmico se define como una combinación de factores, los cuales son temperatura y tiempo, con el fin de incrementar la resistencia del acero.

El revenido consiste en recalentar el acero endurecido por el temple a una temperatura inferior a la temperatura eutectoide, esto es con el fin de disminuir la dureza e incrementar la tenacidad, este proceso también se aplica algunas veces a aceros normalizados.

Se define como temperatura eutectoide a aquella temperatura a la cual el metal empieza a sufrir cambios estructurales.

En el diagrama de equilibrio mostrado en la figura 3.2.1, se muestran las zonas del temple y del revenido.

En el calentamiento, lo que se busca es abrir la estructura del acero para que se puedan introducir átomos de carbono en ésta, con el fin de provocar una deformación, ya que al enfriarse bruscamente, la estructura se contraerá y dicha deformación nos proporcionará una dureza; esta dureza dependerá del tipo de enfriamiento que se le aplique. A mayor rapidez de enfriamiento, mayor dureza, esta dureza también depende de la aleación del acero. El calentamiento en el temple se realiza para austenizar la estructura, o sea que la perlita y la ferrita se transformen en austenita, esto se alcanza a aproximadamente 1994°F. Esta temperatura disminuye conforme va aumentando el contenido de carbono de los aceros, tal y como se muestra en la figura 3.2.1, en la cual se ve que esas temperaturas son las marcadas en las zonas de temple, pero en la práctica, estas temperaturas son estimadas, ya que no se cuenta con instrumentos precisos para poder controlar las temperaturas dentro del horno.

El enfriamiento brusco nos baja la temperatura de la pieza hasta en 1200°F, con lo que casi la totalidad de la austenita se transforma en martensita, con algo de austenita retenida. Este tipo de transformación se muestra en la figura 3.2.2.

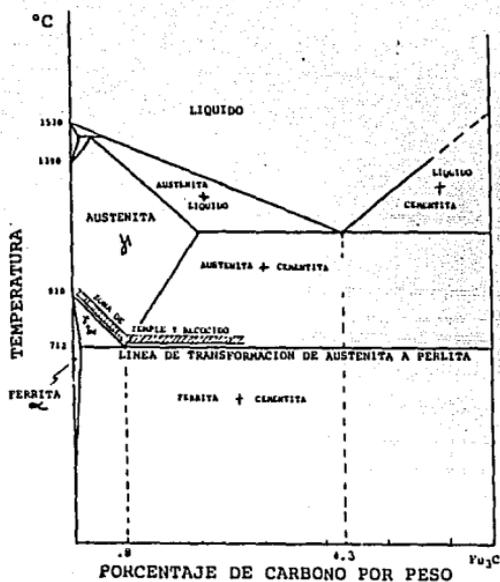


Figura 3.2.1 Zonas de temple y revenido para los aceros.

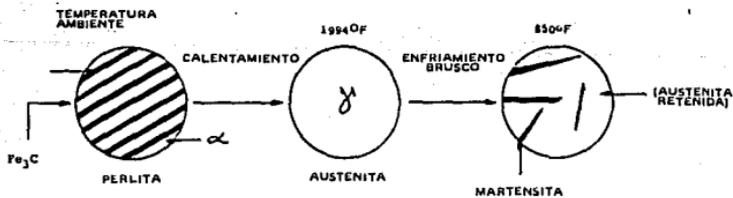


Figura 3.2.2 Secuencia del cambio de estructura que le ocurre al acero en el proceso del temple.

El proceso de enfriamiento para templar puede ser dado por medio de agua, salmuera o aceite. Un aspecto importante que se vió durante el proceso de elaboración de este estudio, es que a los aceros con un porcentaje de carbono medio, hipoeutectoides, tales como los aceros AISI 4150 y 4350, se les da un enfriamiento en -- aceite agitado tipo Quenched, sobre el cual no se tenía nign control ni sistema de drenado en el lugar del estudio. Lo que caracteriza la utilización de este aceite es su temperatura de inflamabilidad, la cual es de 320°F aproximadamente, y su rango de operación es de 140°F a 160°F, ésta es la temperatura que alcanza el -- aceite debido al enfriamiento de la pieza. Como se dijo, el enfriamiento brusco es hasta de 1200°F; posteriormente se le da un enfriamiento lento dentro del aceite agitando la pieza, de tal manera que la temperatura llegue alrededor de 200°F. Posteriormente se da el revenido.

3.2.2.- Revenido

El revenido se da calentando la pieza por debajo de la línea de temperatura crítica (eutéctica). Como ya se dijo con anterioridad, esto tiene dos funciones principales:

- 1.- Aliviar las tensiones internas.
- 2.- Disminuir la cantidad de austenita retenida.

Las tensiones internas son debidas al enfriamiento brusco, en el cual, al quedar atrapado el carbón, nos crea tensiones internas; esto nos dará un material duro pero frágil, el cual no es de gran utilidad, ya que generalmente se requieren núcleos dúctiles, los cuales se logran mediante el revenido.

El disminuir la cantidad de austenita retenida nos homogeniza la forma de la martensita, ya que en el enfriamiento brusco la tenemos en forma alargada y con puntas agudas; con el revenido, la forma de la martensita aumenta de tamaño y las puntas se redondean disminuyendo con esto la cantidad de austenita retenida, ya que se ha comprobado que cuando existe un contenido mayor del 30% de austenita retenida, la pieza se agrieta, la figura 3.2.3 nos muestra el cambio que se produce en la forma de la martensita.



Figura 3.2.3. Diferencia de forma de la martensita, la primera después del temple y la segunda después del revenido.

Un aspecto importante es que la mayoría de los aceros se deben de revenir inmediatamente después del temple, pero hay algunos como el acero AISI 4150 que se pueden revenir hasta después de un día de realizado el temple.

Las temperaturas a las cuales se da el revenido están en función del acero utilizado y estas se muestran en la tabla 3.2.4.

3.2.3.- Defectos que surgen durante el temple en el acero.

Los defectos que pueden surgir durante el temple son: grietas, deformaciones y torceduras.

Las grietas surgen durante el temple, en aquellos casos cuando las tensiones internas superan la resistencia del material. Estas se forman a temperaturas bajas, generalmente después de finalizar el enfriamiento brusco. La tendencia a formar grietas crece en el acero al aumentar el contenido de carbón, la temperatura de temple y la velocidad de enfriamiento, en el intervalo de temperatura de transformación martensítica. Otra causa de la formación de grietas es la concentración de tensiones locales.

La concentración de tensiones se produce por: cambio brusco en la sección de la pieza, escotaduras locales, cavidades, salientes, poros, etc..

La grieta es un defecto irremediable, para evitar su formación se recomienda que:

- 1.- Durante el diseño de engranes tratar de evitar salientes - bruscas, ángulos agudos, cambios de sección bruscos, etc..
- 2.- Realizar a temperaturas lo más bajas posibles el temple, debiéndose tomar en cuenta la composición química del acero para ver cual sería su temperatura mínima de temple.
- 3.- Un enfriamiento lento en el intervalo martensítico de temperatura que se puede lograr mediante el temple en dos medios (agua y aceite).
- 4.- Dar el revenido inmediatamente después del temple cuando - sea posible.

3.2.3.1.- Deformación y torcedura

La deformación es la variación de las dimensiones de la pieza, esta ocurre durante el tratamiento térmico bajo la acción del cambio brusco de temperaturas, lo cual nos provoca un repentino cambio en la estructura del material.

La deformación asimétrica de la pieza, conocida prácticamente como torcedura, se observa con frecuencia en el caso de un calentamiento de temple irregular y a alta temperatura, en una posición inadecuada de la pieza durante su inmersión en el medio para templar, y a una alta velocidad de enfriamiento. La eliminación de esos factores disminuye notablemente el efecto de torcedura.

La torcedura es más difícil de eliminar en piezas largas y delgadas. Para disminuir la torcedura en tales piezas, éstas se enfrían durante el temple en estado de apriete (en prensas, matrices o dispositivos especiales).

TABLA 3.2.4

TEMPERATURAS DE REVENIDO °F							
DUREZA REQUERIDA	1045	4150 BARRA	4150 FORJA	4350	1G.A.	3 G.A.	5 G.A.
210- 250	970	1225	12 25	1250	1250	1250	1225
225- 265	950	1200	12 00	1250	1225	1225	1225
245- 285	925	1160	11 60	1175	1160	1160	1175
255- 295	920	1150	11 50	1160	1150	1160	1160
265- 305	875	1140	11 40	1140	1140	1140	1150
270- 310	850	1130	11 40	1140	1140	1140	1140
285- 325	800	1120	11 20	1120	1120	1120	1130
295- 335		1120	11 20	1100	1120	1120	1120
300- 340		1070	1080	1080	1060	1100	1100
310- 350		1040	1040	1060	1050	1060	1080
325- 365		1000	1000	1000	1010	1020	1020
335- 375		1000	1000	1000	1000	1020	1000
340- 380		975	975	1000	1000	1010	1000
350- 390		950	975	975	975	950	975
360- 400		925	950	950	950	950	950
375- 415		900	925	925	925	925	925
390- 430		900	925	925	920	900	920
400- 445		875	900	900	900	900	900

3.3.- Nitruado

El nitruado es un proceso de endurecimiento superficial para aceros aleados en una atmosfera constituida por una mezcla en proporciones adecuadas de gas amoniaco y amoniaco disociado. La efectividad de este proceso está en función de la capacidad para formar nitruros del material; los mejores resultados se obtienen en aquellos aceros que contienen uno o más de los principales elementos de aleación que forman nitruros. Estos elementos son: aluminio, cromo y molibdeno. De ahí que se tenga un cuidadoso control y selección de los materiales usados en la fabricación de engranes que requieran de ser nitruados. Los más usados para este propósito son:

ACERO	CONDICION
AISI 4350	Forja de matriz abierta Forja de matriz cerrada Barra
AISI 4340	Forja de matriz abierta Forja de matriz cerrada Barra
AISI 4140	Forja de matriz abierta Forja de matriz cerrada Barra

Una superficie endurecida por nitruación consta de dos zonas distintas. En la zona exterior, los elementos que forman el nitruro se han convertido en nitruros. A esta región que varía en espesor hasta un máximo de 0.002 pulgadas se le denomina comúnmente como capa blanca, esto es debido a su apariencia. En la zona por debajo de esta capa blanca se precipitan solo los nitruros aleados; ahora bien la profundidad de la capa blanca la determina el grado de disociación de amoniaco. El proceso de nitruado puede hacerse de dos formas: nitruado en una sola etapa, o nitruado en dos etapas el cual es conocido como proceso Floe. El nitruado en una sola etapa se da a una temperatura en el intervalo de 925° a 975°F y la disociación del amoniaco se mantiene entre el 15 y - 30%, ajustando la cantidad de flujo. Ahora bien, el proceso de doble etapa tiene la ventaja de reducir el espesor de la capa blanca de nitruro. En la primera etapa del proceso de doble etapa, la disociación de amoniaco se mantiene en 20% durante un período de 5 a 10 horas a 975°F, durante este período se empieza a formar la capa blanca y el nitruro útil por difusión del nitrógeno fuera de ella. En la segunda etapa, la disociación de amoniaco aumenta hasta estar entre 83 y 86% y la temperatura generalmente se incrementa entre 1025 y 1050°F, durante esta segunda etapa, la composición del gas es tal que mantiene sólo una delgada capa blanca sobre la pieza terminada.

La capa blanca es frágil y tiende a astillarse desde la superficie si tiene un espesor que exceda 0.0005 pulgadas. Las capas blancas que se obtienen por el proceso de una sola etapa deben de eliminarse rectificando después de la nitruación, es por esto -- que generalmente se deja una sobremedida de por lo menos 0.002 -- pulgadas por lado de la pieza, con respecto de las dimensiones de acabado. De ahí que una de las ventajas del proceso en doble eta-

pa es que pueden omitirse el rectificado y otras operaciones de acabado, excepto en donde se tengan rigurosas tolerancias dimensionales para la pieza. La capa blanca residual del proceso de doble etapa, frecuentemente de 0.0002 a 0.0004 pulgadas, no se astilla ni se marca con hoyos y las características de fricción de la superficie son excelentes, así como buenas propiedades de resistencia mecánica y desgaste. El proceso de una sola etapa tiene como ventaja una alta resistencia a la corrosión proporcionada por el mayor espesor de la capa blanca.

3.3.1.- Proceso práctico de nitrurado de engranes

El uso del nitrurado para incrementar la dureza de las ruedas dentadas en la industria es como sigue: el proceso se inicia con un temple y revenido previo a 1100°F, con el objeto de producir una estructura sorbítica (incrementar la capacidad de absorber nitrógeno), y asegurar así una dureza mínima a alcanzar por este medio de 48 RC.

El siguiente paso es ubicar las piezas dentro del horno para llevar a cabo el nitrurado, poniendo especial atención en la colocación de las piezas, así como de la sujeción de las mismas, también se recomienda que los ejes piñón se coloquen en posición vertical dentro del horno para evitar apilamiento con las ruedas dentadas. Esto se hace con el fin de minimizar las distorsiones inherentes del proceso.

El proceso de nitrurado para engranes es dado por medio del proceso Floe, que consiste en darlo en dos etapas. En la primera etapa la disociación de amoníaco es mantenida por debajo de 30% y la temperatura entre 932°F y 977°F por un periodo de 5 a 15 horas. Este tiempo es estimado por la persona encargada del proceso y lo hace en función del tamaño de la pieza, a mayor tamaño mayor tiempo. En la segunda etapa la disociación de amoníaco es incrementada entre 60% y 85% y la temperatura es incrementada entre 977°F y 1050°F por un periodo de 5 a 10 horas.

En la mayoría de los casos se dejan sobremedidas de hasta 0.0018 pulgadas, debido a que en nuestro país, aún usando el proceso de doble etapa las distorsiones obtenidas del proceso son tales que se hace necesario un rectificado para corregirlas, esto se debe principalmente a que son las primeras incursiones de nuestra industria a este respecto.

Otro de los aspectos importantes es el temple y revenido posterior, que tiene como principal objetivo controlar la dureza del núcleo de la pieza, ya que aunque generalmente se requiere una superficie dura, es necesario tener un núcleo dúctil que nos absorba deflexiones en el arranque, frenado e incluso atorones, para este efecto se muestra la tabla 3.3.1 en la que se muestran las temperaturas de revenido de acuerdo al material y tamaño de la sección, así también se muestran las durezas recomendadas para cada caso en grados Brinell.

DUREZA MINIMA DEL NUCLEO DE LA RUEDA DENTADA NITRURADA EN FUNCION DE EL TIPO DE ACERO, TAMAÑO DE LA SECCION Y TEMPERATURA DE REVENIDO.

TAMAÑO DE SECCION 0 DIAMETRO		DUREZA MINIMA DEL NUCLEO											
		4350			4150			A. F. NO.1			A.F. NO. 3		
		TEMP. DE REVENIDO			TEMP. DE REVENIDO			TEMP. DE REVENIDO			TEMP. DE REVENIDO		
mayor de	de - a	1100	1150	1000	1100	1050	1000	1100	1050	1000	1100	1050	1000
----	4.0	325	340	365	255	265	270	265	270	285	270	285	300
4.0	8.0	310	325	340	240	245	255	240	245	255	245	255	265
8.0	12.0	300	310	325	225	235	245	225	235	245	235	245	255
12.0	18.0	285	300	310									
18.0	24.0	275	285	300									
24.0	30.0	265	275	285									
MAX. TEMP DE REVENIDO		1050	1000	950	1050	1000	950	1050	1000	950	1050	1000	950

NOTA: LAS TEMPERATURAS ESTAN DADAS EN °F

TABLA 3.3.1 Durezas mínimas del núcleo de las ruedas dentadas dependiendo del acero, temperaturas de revenido y tamaño de la sección.

3.3.2.- Profundidad de superficie endurecida

La profundidad de superficie endurecida de piezas que han sido nitruradas debe ser especificada de acuerdo a los requerimientos de diseño, o bien de acuerdo al paso diametral, tal y como se ve en la tabla 3.3.2.

Paso diametral	Profundidad de superficie endurecida (pulgadas)
20, 16	0.010 a 0.020
14, 12, 10	0.015 a 0.025
9, 8, 7	0.020 a 0.030
6	0.025 a 0.035
5 y menores	0.030 a 0.040

TABLA 3.3.2 Profundidad de superficie endurecida en función del paso diametral.

Prácticamente la máxima profundidad de superficie endurecida es de 0.030 a 0.050 pulgadas, esto se debe a que como se mencionó ya, es necesario rectificar para nuestro caso específico los dientes de las ruedas dentadas, por lo que se considera una sobremedida de hasta 0.008 pulgadas por lado.

3.3.3.- Conclusión

Este proceso de endurecimiento superficial es muy útil por --- las bajas distorsiones que presenta, y aunque sea necesario rectificar, el tiempo empleado en la corrección de distorsiones será --- bajo.

Ahora bien, como ya se mencionó en el contexto, que aún usando el proceso de doble etapa haya necesidad de rectificar, cosa que en teoría ya no sería necesario, se debe a que no se domina a plenitud el proceso, pero se está trabajando ya al respecto haciendo pruebas en las que hemos tenido oportunidad de intervenir, en la evaluación y corrección de las distorsiones, pero creemos que el mayor paso está dado al aprobar la introducción del proceso de nitruado de los engranes y podemos decir que aún con los problemas que presentan las piezas endurecidas superficialmente, con este proceso son de funcionalidad aceptable y cumplen con el principal propósito que es el de incrementar la capacidad de los trenes de engranes y disminuir su tamaño.

3.4.- Cementado

Este es un método de endurecimiento superficial, el cual es generalmente utilizado para aceros de bajo carbón, tales como de un 0.2% de carbono en su composición química o menos.

Los aceros se colocan en una atmósfera que contiene una gran cantidad de monóxido de carbono; a estos se les calienta a una temperatura de 1700°F, dando lugar a la reacción química siguiente:



en donde:

$\text{Fe}_{(e)}$ nos representa el carbono disuelto en austenita, y es la cantidad máxima de carbono que puede disolverse en austenita a 1700°F, por lo que rápidamente se forma una capa superficial de un alto contenido de carbono, la cual tiene un porcentaje de aproximadamente 1.2% en su composición química.

Existen tres tipos de procedimientos para poder cementar, estos métodos son: Procedimiento sólido, proceso líquido y proceso gaseoso.

3.4.1.- Procedimiento sólido

En este proceso se introduce la pieza en un compartimento con carbón natural, el cual es obtenido mediante leña, minerales, huesos, etc.. El acero se lleva a una temperatura de 1697°F por un tiempo de aproximadamente 16 horas, después de lo cual se austeniza a 1562°F. En este proceso de carburizado, el carbón es agregado en forma sólida o combinada. Para separar el carbón del compuesto se le pone un agregado de carbonato de bario, el cual funciona como un catalizador.

La desventaja por este método es que no es muy adecuado para producir partes delgadas carburizadas, y su ventaja es que no requiere una atmósfera preparada, es eficiente y económico para un procesamiento individual de piezas.

3.4.2.- Proceso líquido

Este se realiza por medio de sales diluidas que contienen cianuro fundido, el cual varía entre un 0.20% a un 0.10%, esto es de acuerdo a la profundidad de superficie endurecida requerida. En estas sales se introduce la pieza y se calienta a una temperatura de 932°F, con un tiempo de 16 horas para lograr la homogenización de la pieza, para que posteriormente se austenice la pieza a 1562 °F. El procedimiento termina con un temple y revenido posterior, mejorándose con esto las características del cementado. El tiempo de homogenización puede variar dependiendo del tamaño de la pieza.

3.4.3.- Procedimiento gaseoso

Este procedimiento es el más utilizado, ya que se tiene un mayor control sobre las distorsiones de la pieza, por lo cual es el que detallaremos.

Primeramente hablaremos de los materiales que son utilizados para este propósito, a continuación se muestra una lista de los aceros estándar para el carburizado de engranes en Mecánica Falk.

ACERO	CONDICION
AISI 4320	Forja de matriz abierta Forja de matriz cerrada Barra
AISI 8620	Forja de matriz cerrada Forja de matriz abierta Barra
Fundición de acero aleación Falk No. 2	Fundición

Por medio de este proceso, la dureza superficial que se obtiene es de 58 a 62 RC.

La profundidad de superficie endurecida es específicamente de acuerdo al paso diametral, tal y como es mostrado en la tabla ----
3.4.1. Esta profundidad es determinada por barras patrón que acompañan a cada lote de carburizado de engranes. Las barras patrón deben ser del tipo de acero de los elementos carburizados y sus dimensiones están estandarizadas de la siguiente forma.

Diámetro de 0.75 pulgadas y longitud de 2.5 pulgadas.

El contenido de carbón superficial es medido por medio de un análisis espectrográfico de 0.005 pulgadas de la superficie exterior, esta capa debe contener de 0.65% a 0.90% de carbón en el carburizado. Este contenido es determinado en las probetas mencionadas anteriormente.

TABLA 3.4.1

PROFUNDIDAD DE SUPERFICIE ENDURECIDA PARA ENGRANES RECTOS Y HELICOIDALES

RANGO DE PASO DIAMETRAL TRANSVERSAL	PASO DIAMETRAL DEL CORTADOR	PROFUNDIDAD DE SUP. ENDURECIDA (PULGADAS)	
		ANTES DEL RECTIFICADO	DESPUES DEL RECTIFICADO
23.01 - 14.00	20, 16, 14	.020 - .030	.010 - .020
13.86 - 12.00	12	.025 - .035	.015 - .025
11.55 - 8.00	10, 9, 8	.035 - .045	.020 - .030
8.08 - 6.00	7, 6	.040 - .050	.025 - .035
5.77 - 5.00	5	.045 - .060	.030 - .040
4.62 - 4.00	4	.055 - .075	.035 - .050
4.04 - 3.50	3 1/2	.065 - .085	.040 - .060
3.46 - 3.00	3	.070 - .090	.050 - .070
2.88 - 2.50	2 1/2	.080 - .100	.060 - .080
2.31 - 2.00	2	.095 - .115	.070 - .090
2.02 - 1.75	1 3/4	.105 - .125	.080 - .100
1.73 - 1.50	1 1/2	.120 - .145	.090 - .110
1.44 - 1.25	1 1/4	.140 - .170	.105 - .130
	1	.160 - .190	.125 - .150

En el caso de microestructura, esta consiste primeramente de un temple martensítico con 25% de austenita retenida como máximo, no es recomendable una red continua de carburos porque sería muy dura y por lo tanto quebradiza.

3.4.3.1.- Fijación en el horno

Algunas piezas requieren una sujeción especial durante el proceso de carburizado y temple. La sujeción debe permitir que exista una corriente y circulación homogénea de la atmósfera en el horno, así como un calentamiento y enfriamiento uniforme. Esto es con el fin de prevenir y controlar el pandeo o distorsiones de las partes. Siempre que sea posible, los ejes piñón deben de suspenderse verticalmente durante el proceso. Los ejes piñón demasiado largos (más de 40 pulgadas) deben ser carburizados rigurosamente en forma vertical.

3.4.4.- Procedimiento práctico para el cementado

- 1.- Las partes deben ser precalentadas a 1525°F manteniéndolas a esa temperatura durante 20 minutos.
- 2.- El carburizado es dado a 1800°F para una profundidad de superficie endurecida de 0.30 pulgadas y mayores, y a 1700°F para una profundidad de superficie menor de 0.30 pulgadas.
- 3.- Después del carburizado, las partes deben de ser enfriadas a la temperatura de difusión de 1525°F, manteniéndolas a esa temperatura hasta que sea homogénea en todo el cuerpo, considerando la velocidad de enfriamiento de 0.75 horas por cada pulgada de sección máxima.
- 4.- En el caso de que se requieran profundidades de superficie endurecida grandes, las piezas deben de ser enfriadas en el horno o cámara de enfriamiento hasta unos 800°F.
- 5.- Terminado el proceso de carburizado, todos los grados de acero son templados en aceite agitado, el cual tiene una temperatura de operación de 140 a 160°F.
- 6.- Se concluye el cementado con un revenido, tomándose como base la tabla 3.2.4, la cual es mostrada en la sección de temple y revenido.
- 7.- Posteriormente, las ruedas dentadas son limpiadas por medio de un procedimiento denominado Sand Blast, el cual consiste en proyectar partículas metálicas sobre la superficie de las ruedas dentadas para quitar la cascarilla que se forma después del tratamiento térmico.

Generalmente después del carburizado se tienen desviaciones en hélice, perfil y espaciamiento fuera de tolerancias, por lo cual debe darse un rectificadillo para corregir dichas distorsiones. A su vez, después de cada operación de rectificadillo es necesario dar un recocido a 375°F.

3.5.- Conclusión

El tratamiento térmico es un factor importante para poder incrementar la capacidad de los trenes de engranes y así reducir dimensiones de los mismos.

En el temple y revenido que se les da a las piezas, éstas no -- presentan problemas, ya que aún teniendo en cuenta las deformaciones, se da un maquinado de acabado posterior al revenido en donde son corregidas estas deformaciones. Los problemas que sí llegan a presentarse se deben básicamente a descuidos de los encargados de esta sección, ya que las piezas llegan a agrietarse cuando hay --- tiempos grandes entre el temple y la aplicación del revenido, también una dureza diferente en la superficie de una pieza debido a - un calentamiento irregular o demasiado prolongado; descartamos la diferencia de dureza por variaciones en la composición química, ya que todo el material es inspeccionado a su llegada a la planta.

En el proceso de nitrurado, su principal problema son las des-- viaciones inherentes al proceso. Esto es porque en este caso, el - endurecimiento superficial se da sobre una pieza terminada, así -- que con la mejora del proceso nos evitaríamos un rectificado posterior.

Para el proceso de cementado, el problema de distorsión es aún mayor si lo comparamos con el de nitrurado, pero el proceso resulta más económico. Es un proceso que tampoco se domina a plenitud, por lo cual las distorsiones alcanzan altas magnitudes, e incluso los barrenos en donde se ubicará el eje llegan a agrandarse en uno de los extremos, haciéndose necesaria la aplicación de cargas sobre las piezas para lograr enderezarlas.

C A P I T U L O 4

CONTROL DE ERRORES DURANTE LA FABRICACION DE ENGRANES NITRURADOS

- 4.1.- Excentricidad
- 4.2.- Espaciamiento inadecuado
- 4.3.- Error de perfil
- 4.4.- Error en la hélice
- 4.5.- Huelgo entre dientes
- 4.6.- Error compuesto
- 4.7.- Procedimientos de medición para el control de errores en la fabricación de engranes nitrurados
- 4.8.- Correcciones

INTRODUCCION

En este capítulo vamos a referirnos a los errores que se tienen durante el proceso de fabricación de engranes rectos y helicoidales, en los que es muy importante tener un control adecuado para lograr un funcionamiento eficiente. El no llevarlo a cabo nos producirá malos contactos, disminución de vida útil, bajo rendimiento, funcionamiento ruidoso e incluso, que el tren llegue a fallar prematuramente.

Lo más frecuente es encontrar en el campo un funcionamiento -- ruidoso que puede ser causado por malos contactos, y estos se producen por un error en la hélice, envolvente o paso, aunque no puede descartar la posibilidad de que el ruido sea producido por vibraciones inducidas por la fuente motriz, desalineamiento en el montaje o bien por problemas en los cojinetes. Todo lo anterior -- nos lleva a la necesidad de comprobar que los errores de fabricación sean mínimos, de tal manera que se puedan clasificar dentro de las tolerancias aceptables, según sea su aplicación.

Los errores de los engranes se dan en las siguientes características de su forma:

- a) Error de perfil
- b) Error en la hélice
- c) Excentricidad
- d) Espaciamiento inadecuado
- e) Huelgo entre dientes

Generalmente estos se presentan en forma combinada, pero al realizar un análisis, este tendrá que hacerse de una forma detallada en la cual será necesario evaluar individualmente dichos errores, así se podrá predecir cual de ellos es el determinante en el funcionamiento anormal en un reductor de velocidad nuevo.

Ahora bien, se hace necesaria una explicación detallada de cada una de las formas de error para comprenderlas, analizarlas y así poder plantear formas de control preventivas o en su defecto correctivas, y de una u otra forma establecer un control sobre los errores de fabricación de engranes.

Este capítulo está enfocado a analizar los errores incurridos en la fabricación de engranes y establecer las causas determinantes de la aparición o desarrollo de errores y poder así establecer las posibles correcciones o soluciones de dichos errores.

4.1.- Excentricidad

Se denomina excentricidad a la variación total de la distancia entre una superficie de revolución y una superficie patrón, medida perpendicularmente a la superficie de revolución. Las excentricidades típicas son: la excentricidad axial y la excentricidad radial.

Excentricidad radial.- Es la variación total en la dirección perpendicular al eje de rotación de la superficie patrón a la superficie de revolución. La excentricidad radial incluye excentricidad y fuera de redondez. En el caso de dientes de engranes, es medido por un sondeo específico tal como un cilindro, bola, cono, cremallera o diente de un engrane maestro, y como ya se mencionó, la medición es hecha perpendicularmente a la superficie de revolución.

Excentricidad axial.- Es la variación total en una dirección paralela al eje de rotación de una superficie patrón con respecto a la superficie de revolución.

Los tipos de excentricidad incluyen:

- a) Excentricidad simple.- Esta puede ser causada por la diferencia en distancia entre centros usados durante el generado y operación o prueba, y/o distorsiones en el montaje.
- b) Excentricidad múltiple de naturaleza cíclica.- Esta excentricidad es causada por errores en máquinas herramienta, herramientas de corte y falta de rigidez en la sujeción.
- c) Excentricidad irregular.- Causada por la variación de dureza en el tejo del engrane, la herramienta de corte inhabilitada para cortar a una profundidad constante, o por tratamiento térmico distorsionado. Esto puede ser una combinación de los incisos a) y b) descritos anteriormente, más una excentricidad extra peculiar del tratamiento térmico, material del tejo, mal estado del filo de la herramienta, etc.

4.1.1.- Métodos de medición.

Los métodos recomendados de control de excentricidad para cada número de calidad AGMA son mostrados en la Tabla I, la cual es mostrada al final de este punto.

4.1.1.1.- Control de proceso (No 1).

El control de proceso es usado para la fabricación de engranes como un medio para conseguir la calidad de engrane deseado.

El control de proceso incluye planificación de la fabricación, máquinas y su mantenimiento, corte, así como su selección y mantenimiento, control de tratamientos térmicos y aseguramiento de programas de calidad necesarios para conseguir y mantener la calidad del engrane.

4.1.1.2.- Indicadores sobre pernos (No 2).

La excentricidad puede ser medida por una indicación sobre pernos, bolas u otros dispositivos colocados en los espacios sucesivos de los dientes. Las lecturas obtenidas contienen efectos de varios otros elementos como los siguientes:

- a) Excentricidad
- b) Fuera de redondez
- c) Excentricidad axial
- d) Variación en el ángulo de hélice
- e) Variación del perfil
- f) Variación de espaciamentos
- g) Variación en el espesor del diente

4.1.1.3.- Prueba por chequeo (No 3).

Esta prueba puede realizarse de dos maneras, la primera se denomina prueba de chequeo simple y la otra prueba de chequeo doble.

a) Prueba de chequeo simple

En este tipo de prueba la excentricidad puede ser medida por la indicación de la posición de una bola de prueba; otros tipos de prueba pueden ser usados si son aplicables. Las lecturas obtenidas contienen efectos de varios otros elementos como los listados en el punto anterior. La figura 4.1 nos muestra la medición de engranes rectos y helicoidales.

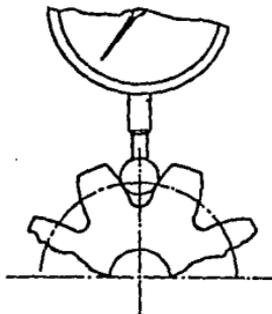


Figura 4.1 Prueba simple de chequeo de excentricidad en engranes rectos y helicoidales

b) Prueba de chequeo doble

La excentricidad de engranes rectos puede ser medida por dos brazos, uno fijo y otro libre para moverse, posicionados en lados diametralmente opuestos en el engrane para marcar contactos con los correspondientes perfiles, aproximadamente 180 grados separa a cada brazo. La diferencia o rango entre las lecturas altas y bajas en el dial indicador representa dos veces la excentricidad cuando se hace el chequeo de una revolución completa. La figura 4.2 nos muestra la medición de engranes rectos y helicoidales.

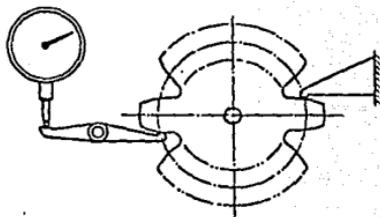


Figura 4.2 Prueba de chequeo doble para engranes rectos y helicoidales.

c) Chequeo por rodamiento (No 4)

La excentricidad puede ser medida por medio de observar la variación de la distancia entre centros o distancia de montaje entre el engrane a prueba y un engrane maestro. Los engranes son rodados directamente en un engranamiento ajustado, con un miembro en un centro móvil el cual es soltado y cargado con pesos, las lecturas contienen imprecisiones en la prueba, las cuales deben de considerarse cuando se juzgue la aceptabilidad del engrane inpeccionado.

La excentricidad puede ser medida por indicaciones del círculo de raíz o el diámetro exterior cuando la pulidora maquinó estas superficies simultáneamente con los perfiles de los dientes. Los errores en la herramienta pueden afectar estas medidas, pero las lecturas obtenidas no incluyen los efectos de otros varios elementos de mala posición, como ocurre con los métodos de indicadores sobre pernos y pruebas de chequeo.

Un indicador de la presencia de excentricidad se caracteriza por la variación del sonido, así como cambios en el contacto del diente.

TABLA I EXCENTRICIDAD

NUMERO DE CALIDAD AGMA	PASO DIAMETRAL NORMAL	METODOS RECOMENDADOS PARA CONTROL DE EXCENTRICIDAD									
		DIAMETRO DE PASO (PULGADAS)									
		3/4	1-1/2	3	6	12	25	60	100	200	
3,4,5 7 8	1/2						1	1	1	1	1
	1					1	1	1	1	1	
	2				1	1	1	1	1	1	
	4			1	1	1	1	1	1	1	
	8		1	1	1	1	1	1	1	1	
	16-19.99	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
7,8 9	1/2					2,3,4	1	1	1	1	
	1					2,3,4	1	1	1	1	
	2				2,3,4	2,3,4	1	1	1	1	
	4			2,3,4	2,3,4	2,3,4	2,3,4	2,3,4	1	1	
	8		2,3,4	2,3,4	2,3,4	2,3,4	2,3,4	2,3,4	2,3,4	1	
	16-19.99	2,3,4	2,3,4	2,3,4	2,3,4	2,3,4	2,3,4	2,3,4	2,3,4	1	
10, 11, 12, 13, 14 y 15	1/2						2,3,4	2,3,4	2,3,4	2,3,4	
	1						2,3,4	2,3,4	2,3,4	2,3,4	
	2				2,3,4	2,3,4	2,3,4	2,3,4	2,3,4	2,3,4	
	4			2,3,4	2,3,4	2,3,4	2,3,4	2,3,4	2,3,4	2,3,4	
	8		2,3,4	2,3,4	2,3,4	2,3,4	2,3,4	2,3,4	2,3,4	2,3,4	
	16-19.99	2,3,4	2,3,4	2,3,4	2,3,4	2,3,4	2,3,4	2,3,4	2,3,4	2,3,4	

Métodos Recomendados:

Número 1 - Control del proceso.

Número 2 - Indicador sobre perfil.

Número 3 - Prueba de chequeo.

Número 4 - Chequeo con reglas o bolas.

Estos métodos son generales, e se para todo tipo de ruedas dentadas, pero el área sombreada no comprende ruedas dentadas oblicuas ni hipocíclicas.

4.2.- Espaciamiento inadecuado

Espaciamiento es la distancia medida entre puntos correspondientes de dientes adyacentes.

La variación del espaciamiento es la diferencia en medidas de espaciamientos adyacentes.

El espaciamiento es un elemento inherente del paso, por lo que a continuación se definirá lo que es el paso.

El paso es la distancia teórica entre puntos correspondientes en dientes adyacentes, medidos sobre la circunferencia de paso.

La variación del paso es la diferencia entre el paso teórico y el espaciamiento.

El índice de variación es el desplazamiento de un diente de su posición lineal o angular teórica relativa a un diente de referencia.

4.2.1.- Métodos de medición

Los métodos recomendados para el control serán referidos al paso, ya que el espaciamiento entre dientes variará de acuerdo a éste, y si podemos establecer un control sobre el paso lo estaremos haciendo también para el espaciamiento. Los métodos para cada número de calidad AGMA son mostrados en la tabla II al final de este punto.

4.2.2.1.- Control del proceso (No 1).

Este control del proceso es igual al control del punto anterior (No 1)

4.2.2.2.- Instrumentos para el chequeo del paso (No 2)

Puede ser usado un cabezal divisor de una precisión apropiada en la medición de la variación del paso, de acuerdo con el número de calidad AGMA.

Es preferible hacer las medidas de la variación del paso en o cerca del círculo de paso en el plano de rotación relativo a un eje referido por una especificación de superficie. En el caso de engranes helicoidales las medidas pueden hacerse en el plano normal y dividir después por el coseno del ángulo de hélice para poder comparar con la tolerancia recomendada en el apéndice A.

Cualquier conjunto de perfiles puede ser usado para medir el paso, pero preferiblemente el lado de carga si el engrane opera en una sola dirección.

Los instrumentos de medición de paso emplean un dedo fijo y se detienen en posiciones consistentes en pares sucesivos de dientes y un dedo móvil que expone variaciones en el paso de un indicador de carátula. Las lecturas son afectadas por variaciones en el perfil y excentricidad de las ruedas dentadas cuando éstas son montadas en un instrumento de chequeo. Ver figura 4.3.

También se pueden utilizar instrumentos portátiles de medición de paso que tienen el mismo mecanismo descrito anteriormente. El instrumento es movido de diente a diente alrededor del engrane, y muestra variaciones en el indicador de carátula. Su uso es prácticamente exclusivo para engranes de grandes dimensiones.

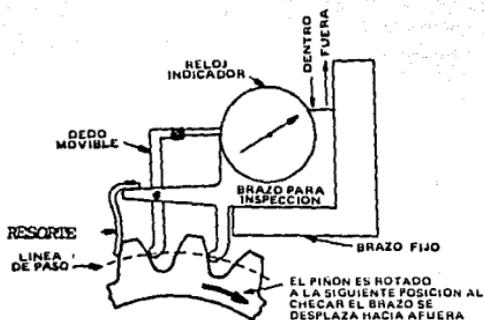


Figura 4.3 Arreglo esquemático de un instrumento de medición del paso.

4.2.1.3.- Interpretación de datos

la figura 4.4 nos compara los resultados tabulados del paso e índice medidos en la misma rueda dentada. Esta figura para propósitos ilustrativos solamente, usa una cremallera que es considerada como una rueda dentada con un infinito número de dientes; esto muestra el método de paso calculado de valores medidos de espaciamiento o índice.

Secuencia de la interpretación de datos

- a) Colocar el indicador a 0.0010 en el primer par de dientes y poner la primera lectura en la columna No 1. El colocar el indicador 10 diezmilésimas en lugar de cero tiene por objeto comprender lecturas que quedan por debajo o por arriba de dicha referencia.
- b) Registrar las lecturas sucesivas diente a diente del reloj indicador en la columna No 1.
- c) La variación de espaciamiento (columna 2) es la diferencia entre las lecturas sucesivas del indicador de la columna No 1.
- d) Todas las lecturas se suman y se dividen entre el número de dientes para encontrar el promedio de espaciamiento, el cual representa el paso correcto.
- f) Variación de paso (columna No 3), es la diferencia entre cada lectura del indicador de la columna No 1 y el promedio de espaciamiento.
- g) Para encontrar el índice de variación (columna No 4), sumar sucesivamente la variación de paso de la columna No 3.
- h) Para encontrar el índice de variación máxima, restar algebraicamente el mínimo del máximo valor de la columna No 4.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

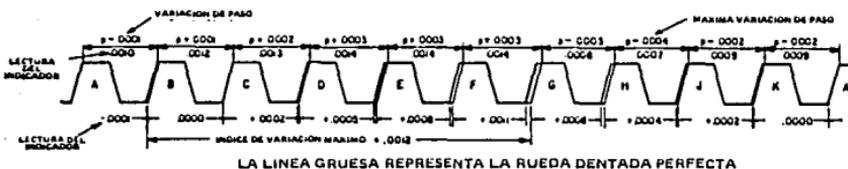
TABLA II ESPACIAMIENTO

NUMERO DE CALIDAD AGMA	PASO DIAMETRAL NORMAL	METODOS RECOMENDADOS PARA CONTROL DE ESPACIAMIENTO								
		DIAMETRO DE PASO (PULGADAS)								
		3/4	1-1/2	3	6	12	25	50	100	200 ^y mayores
6, 7 8 y 9	1/2					1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
	1					1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
	2				1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
	4			1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
	8		1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
	16-19.99	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
10 y 11	1/2					1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
	1					1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
	2				2	2	2	2	2	2
	4			2	2	2	2	2	2	2
	8		2	2	2	2	2	2	2	2
	16-19.99	2	2	2	2	2	2	2	2	2
12, 13, 14 y 15	2				2	2	2	2	2	2
	4			2	2	2	2	2	2	2
	8		2	2	2	2	2	2	2	2
	16-19.99	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Número 1 - Control de proceso.

Número 2 - Instrumentos medidores de paso.

Número 1 - El área sombreada se refiere únicamente a engranes rectos, helicoidales y herringbone.



LA LINEA GUESA REPRESENTA LA RUEDA DENTADA PERFECTA

	#1	#2	#3	#4	
DIENTES	LECTURAS INDICADOR	VARIACION ESPACIAMIENTO	VARIACION PASO	INDICE DE VARIACION	
A - B	.0010	.0002	-.0001	-.0001	-.0001
B - C	.0012	.0001	+.0001	.0000	
C - D	.0013	.0001	+.0002	+.0002	
D - E	.0014	.0000	+.0003	+.0005	
E - F	.0014	.0000	+.0003	+.0008	
F - G	.0014	.0006 MAX.	+.0003	+.0011	(-) +.0011
G - H	.0008	.0001	-.0003	+.0008	.0012 = índice de variación máximo
H - J	.0007	.0002	-.0004	+.0004	
J - K	.0009	.0000	-.0002	+.0002	
K - A	.0009	.0001	-.0002	.0000	
	10 .0110 .0011		TOTAL = 0		CONTRIBUCION ULTIMO NUMERO = 0

Figura 4.4 Comparación del paso e índice medidos en el mismo engrane.

4.3.- Error de perfil

El perfil es la forma de diente cuando es evaluado de su raíz a su punta. El perfil funcional de un diente es limitado en la parte más baja del diente por la zona de formación de la raíz y en la punta por el tipo achaflanado o parte más alta. La curva del perfil funcional de la mayoría de los engranes rectos y helicoidales es una evolvente, ver figura 4.5.

4.3.1.- Métodos de medición

Los métodos recomendados de control de perfil para cada número de calidad AGMA son mostrados en la tabla III al final de este punto.

4.3.1.1.- Control de procesos (No 1).

Este método es igual al ya descrito anteriormente.

4.3.1.2.- Instrumentos de medición del perfil-evolvente (No 2).

Este método duplica la generación de una curva evolvente en un círculo base. En pruebas de contacto el perfil de diente es medido y registra alguna desviación de la evolvente exacta en un indicador o dispositivo registrador. La prueba debe ser normal a la superficie del diente. Las variaciones del perfil deben ser medidas directamente con las tolerancias especificadas. Ver figura 4.6.

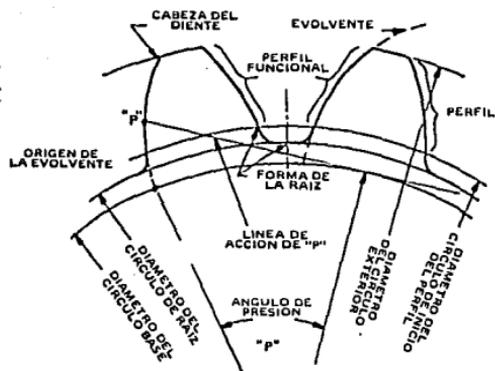


Figura 4.5 Nomenclatura del perfil de una rueda dentada.

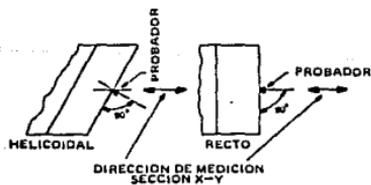
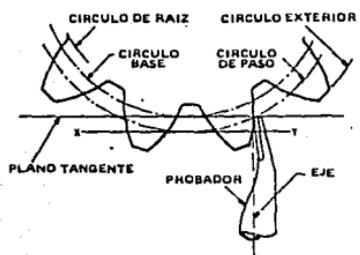


Figura 4.6 Planos de medición para la medición de la variación del perfil.

4.3.1.3.- Instrumentos de medición portátiles para la medición -- del perfil (No 3).

Pueden ser usados estos instrumentos para inspeccionar ruedas dentadas las cuales son tan grandes que no encajan en un instrumento de medición de la evolvente. Estos instrumentos usan una -- gran variedad de métodos para medir o comparar perfiles de dientes.

4.3.2.- Interpretación de tolerancias

Las tolerancias de perfiles funcionales se muestran en la figura 4.7. Los valores mostrados son el ancho de la banda hacia la -- raíz o la punta.

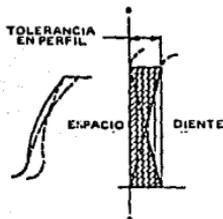


Figura 4.7 Perfiles de evolvente admisibles

4.3.3.- Interpretación de gráficas

La correcta interpretación de las gráficas producidas por el -- probador de evolvente es dependiente según el método usado en el dibujo para especificar el perfil requerido. Ello también depende según la técnica usada para producir la gráfica. Un chequeo práctico de la máquina es como sigue:

Después de montar la rueda dentada a ser inspeccionada en un -- eje adecuado o dispositivo de sujeción, la pieza es colocada en -- el instrumento y la prueba es llevada a cabo en contacto con el -- perfil del diente. Para obtener una lectura más precisa, es esencial que el probador sea marcado posicionándolo tangente al círculo base, y centrado correctamente en el origen de la evolvente a -- cero grados de rodamiento. Cuando la rueda dentada es girada en -- el instrumento, el probador detecta algunas desviaciones frente a la verdadera evolvente en el perfil de la rueda dentada. Un perfil sin desviaciones será dibujado como una línea recta. El exceso de material en el perfil es considerado una desviación positiva, cuando el material es insuficiente es considerada una desviación negativa. Ver figura 4.8.

En conclusión, para inspeccionar los perfiles de dientes en general las gráficas de evolvente son valiosas para determinar y -- controlar tipos de chafilán, diámetro de corte (si esta presente), y el diámetro donde el filete se combina con la evolvente y parte superior de la misma.

TABLA III EVOLVENTE

NUMERO DE CALIDAD AGMA	PASO DIAMETRAL NORMAL	METODOS RECOMENDADOS PARA CONTROL DE EVOLVENTE								
		DIAMETRO DE PASO (PULGADAS)								
		3/4	1-1/2	3	6	12	25	60	100	200
8, 9 B	1/2						1,2	1	1	1
	1					1,2	1,2	1	1	1
	2				1,2	1,2	1,2	1	1	1
	4			1,2	1,2	1,2	1,2	1	1	1
	8		1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1	1	1
	16-19.00	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1	1	1
10 y 11	1/2						1,2	1,3	1,3	1,3
	1					2	1,2	1,3	1,3	1,3
	2				2	2	1,2	1,3	1,3	1,3
	4			2	2	2	1,2	1,3	1,3	1,3
	8		2	2	2	2	1,2	1,3	1,3	1,3
	16-19.00	2	2	2	2	2	1,2	1,3	1,3	1,3
12, 13, 14 y 16	2				2	2	2	1,3	1,3	1,3
	4			2	2	2	2	1,3	1,3	1,3
	8		2	2	2	2	2	1,3	1,3	
	16-19.00	2	2	2	2	2	2	1,3	1,3	

METODOS RECOMENDADOS

Número 1 - Control del proceso.

Número 2 - Instrumentos de medición de evolvente.

Número 3 - Instrumento portátil de medición de perfil de dientes.

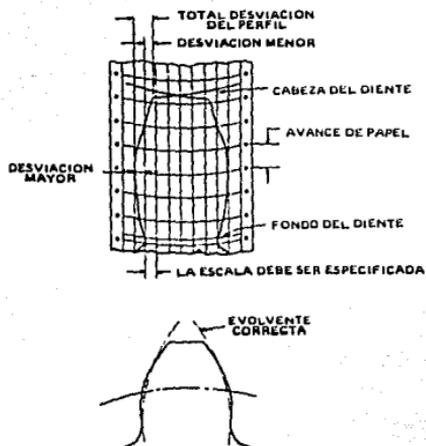


Figura 4.8 Perfil de diente y su carta correspondiente

La figura 4.9 nos muestra el método de interpretación de varias cartas típicas.

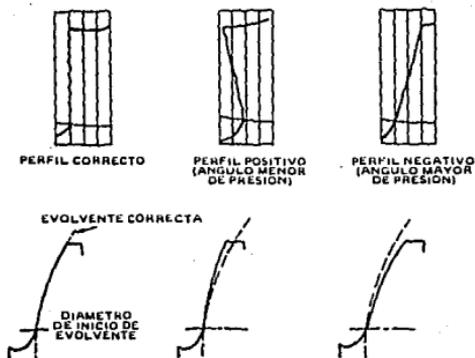


Figura 4.9 Cartas típicas de tolerancias de perfil del diente.

La figura 4.10 nos muestra cómo se colocan los límites en las cartas. En cada ejemplo, una tolerancia de cinco diezmilésimas de pulgada es mostrada. Todas las cartas deben ser apoyadas por notas evaluatorias.

Los límites pueden ser evaluados como se muestra en la figura 4.11.

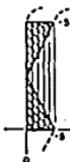
(I) GRAFICA TIPO "V" (TOL. 5)
(NO RECOMENDADA)



GRAFICA EQUIVALENTE CONSIDERANDO ANCHO DE BANDA (TOL. 5)
(RECOMENDADA)



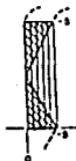
(II) GRAFICA TIPO "K" (TOL. 5)
(NO RECOMENDADA)



GRAFICA TIPO "K" (TOL. 5)
(RECOMENDADA)



GRAFICA TIPO "K" INCLINADA (TOL. 5)



(III) GRAFICA MODIFICADA TIPO "K" CON PROTUBERANCIA EN AREA DE DEDENDUM Y AREA DE ADENDUM (TOL. 5)

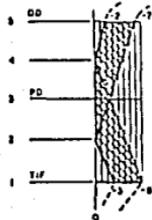


Figura 4.10 Perfiles típicos de dientes y sus cartas de tolerancias.

Tolerancias de evolvente:

- (5) OD XX.XX° -2/-7.0
- (4) XX.XX° 0/-4.5
- (3) PD XX.XX° 0/-2.5
- (2) XX.XX° 0/-5.5
- (1) TIF XX.XX° -3/-8.0

Figura 4.11 Método de tabulación de límites indicadores (referido a la carta III, figura 4.10)

4.4.- Error en la hélice

La longitud de avance de una hélice es el avance axial para -- una vuelta completa, tal como es mostrado en la figura 4.12. La - tolerancia de longitud de avance es la variación total admisible de avance. La variación de la longitud de avance es medida en una dirección normal al avance especificado de la rueda dentada. Es - la diferencia entre el trazo de avance medido y el trazo de avance especificado o teórico.

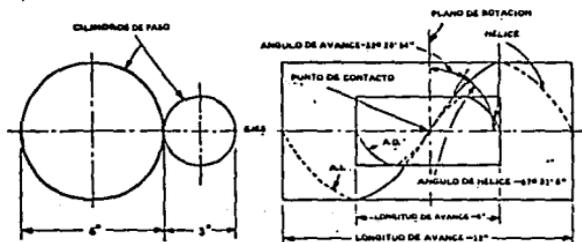


Figura 4.12 El diagrama muestra la diferencia en terminos tales como avance, ángulo de hélice y ángulo de avance

El control del avance es necesario para asegurar un adecuado contacto en todo el ancho de cara, cuando la rueda dentada y el piñón son apropiadamente montados en ejes paralelos y en el mismo plano.

4.4.1.- Métodos de medición

Los métodos recomendados de control de avance para cada número de calidad AGMA son mostrados en la tabla IV , que se presenta al final de este punto.

4.4.1.1.- Control de procesos(No 1).

Es igual al ya mencionado anteriormente.

4.4.1.2.- Instrumentos de chequeo del avance (No 2).

Se avanza un probador a través de la superficie de un diente - paralela al eje, mientras la rueda dentada gira en un periodo de tiempo determinado, basado en el avance especificado.

En operación, el probador es posicionado normal a la superfi-- cie del diente en o cerca del círculo de paso.

4.4.1.3.- Instrumentos de medición portátiles (No 3).

Estos pueden ser usados para evaluar el avance en ruedas denta das de gran diámetro, las cuales rebasan la capacidad de tamaño - de los instrumentos estándar de chequeo del avance. Este tipo de instrumentos están sujetos a variables adicionales debido a que - son portátiles.

4.4.2.- Interpretación de tolerancias

En la figura 4.13 se muestran las tolerancias admisibles de -- avance. Las tolerancias vistas son exclusivas del círculo límite al final del diente.

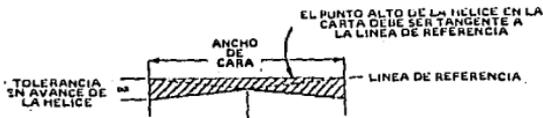


Figura 4.13 Tolerancias admisibles de avance

En dientes que deben tener crown, la tolerancia de crown es so brepuesta en la tolerancia de avance, tal y como modificaciones - de la evolvente son sobrepuestas en tolerancias de forma de la -- evolvente, excepto cuando se especifique otra cosa. La figura --- 4.14a nos muestra crown solamente. Esta no es una especificación válida. La figura 4.14b muestra el método recomendado para la es- pecificación de dientes con crown.

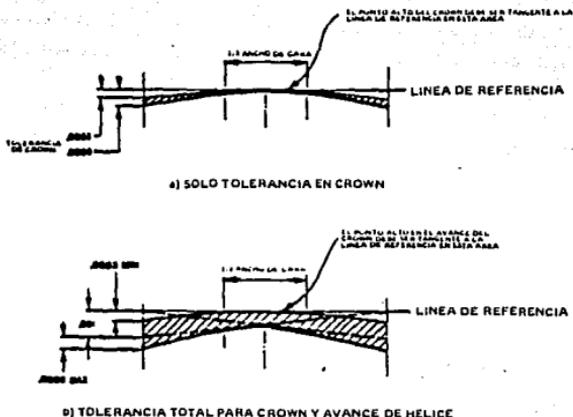


Figura 4.14 Tolerancias de avance para dientes con crown

4.4.3.- Interpretación de las gráficas de dientes

Estas gráficas representativas nos servirán para ilustrar qué mediciones de avance son interpretadas. Estas gráficas son producidas en la máquina de medición de avance por medio de un registrador eléctrico. La aguja del registrador es movida relativamente al diente del engrane a lo largo de un camino teóricamente correcto.

El registrador eléctrico convierte una hélice precisa en una línea recta paralela a una línea de referencia en la gráfica. Consecuentemente, alguna desviación en la línea de la gráfica de la línea de referencia, representa la cantidad de desviación del avance en algún punto a lo largo del ancho de cara inspeccionado.

A medida que el recorrido en el diente desliza del indicador -medidor en una máquina de medición de avance, la línea es paralela a los centros en los cuales la pieza está sujeta, de ello resulta que el camino atravesado por el indicador medidor a lo largo del diente que es chequeado debe estar siempre paralelo al eje de la rueda dentada. En el caso de una rueda dentada de diente helicoidal, el deslizamiento es transversal y la pieza gira, el indicador medidor traza una hélice a lo largo del diente en la proximidad de la línea de paso. Por lo tanto, algún movimiento del dial indicador representa un movimiento hacia arriba y hacia abajo del indicador medidor, y la cantidad total de movimiento de la aguja del dial indicador sobre la distancia inspeccionada indica la cantidad de desplazamiento del diente de la rueda dentada en el ancho de cara transversal. Referido al diagrama, la figura 4.15 nos marca este punto claramente. Notándose que el avance actual chequeado desvía del avance requerido, y que esta desviación es grande en el plano de rotación.

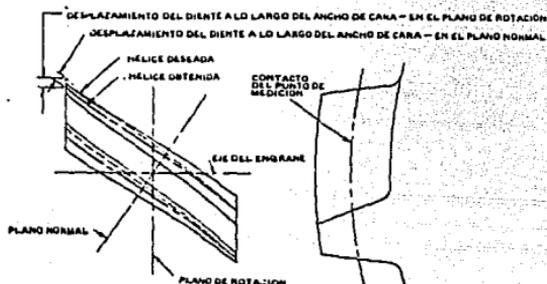


Figura 4.15 El diagrama nos muestra la cantidad de desplazamiento del flanco del diente en el ancho de cara de una rueda dentada helicoidal.

Los dientes helicoidales no obstante el contacto en el plano normal, la variación será medida sobre el plano normal. Para checar superficies exteriores helicoidales el indicador debe ser fijado tal y como se muestra en la figura 4.16.

4.4.3.1.- Avance largo y avance corto

Si el engrane checado tiene dientes helicoidales de hélice derecha, y la línea de la carta desvía de la línea de referencia en una dirección negativa, tal y como se muestra en la figura 4.17, entonces el avance actual es más corto que el avance deseado. Por otro lado, si la línea de la carta desvía de la línea de referencia en una dirección positiva, tal y como se muestra en la figura 4.18, entonces el avance actual es más grande que el avance deseado.

Cuando los dientes tienen una hélice de mano izquierda, la dirección del indicador es reversible. Aquí también, como lo muestra la figura 4.19, la línea de la carta desvía de la línea de referencia en una dirección positiva y el avance es más grande que el avance deseado. En la figura 4.20, la línea de la carta desvía en una dirección negativa y el avance actual es más corto que el avance deseado.

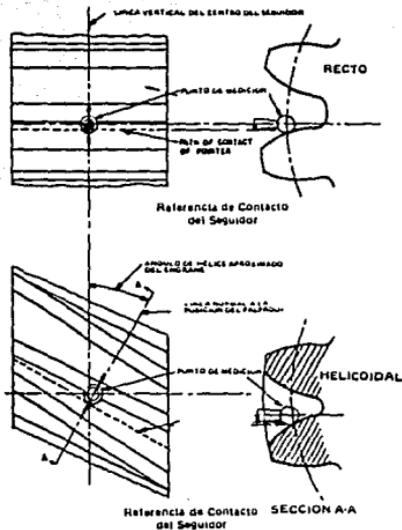


Figura 4.16 El diagrama muestra la fijación de indicadores relativos a la hélice para el chequeo del avance en ruedas dentadas.

Las definiciones para estados de avance y hélice son tales que cuando el ángulo de hélice se incrementa, la longitud del avance se hace más corta, de esta manera un menor avance nos indica un incremento en el ángulo de hélice y un mayor avance nos indica una disminución del ángulo de hélice.

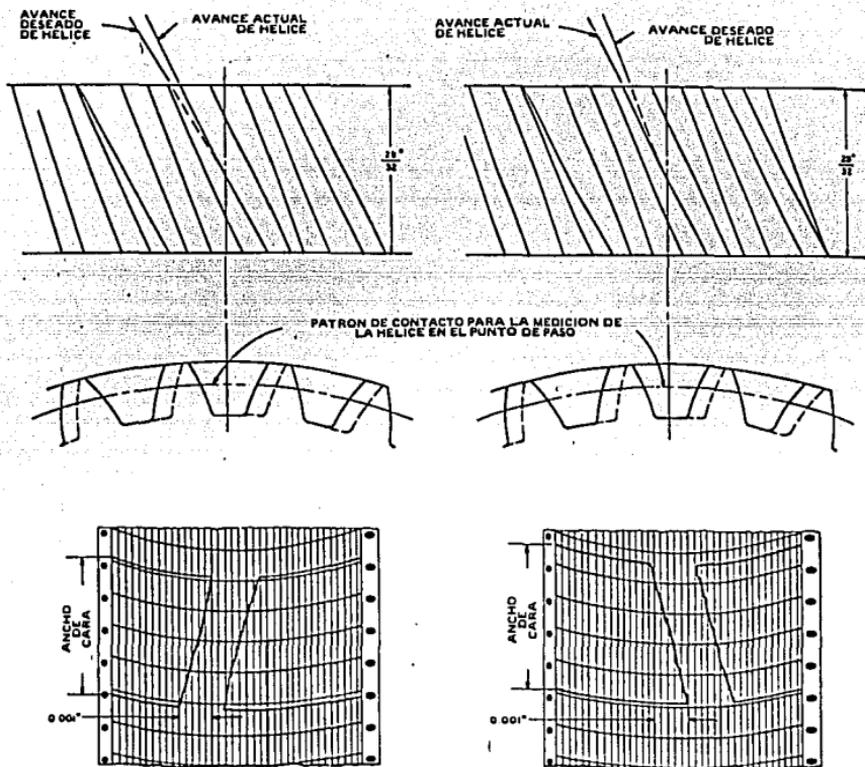


Figura 4.17 Carta de hélice de mano derecha de dientes de engranes helicoidales externos de avance corto (-)

Figura 4.18 Carta de hélice de mano derecha de dientes de engranes helicoidales externos de avance largo (+)

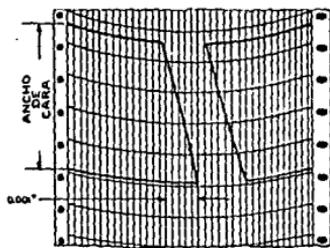
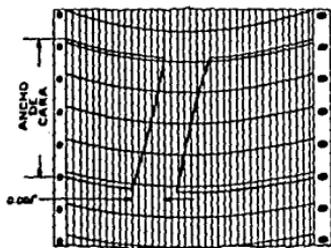
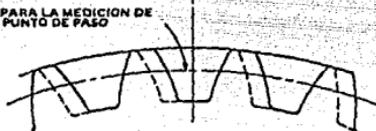
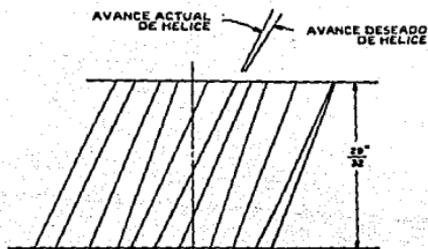
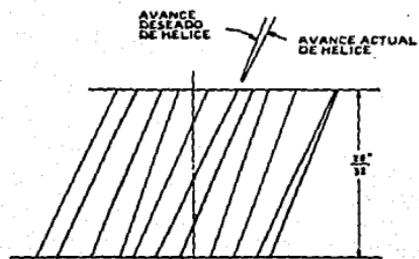


Figura 4.19 Carta de hélice de mano izquierda de dientes de engranes helicoidales externos de avance largo (+)

Figura 4.20 Carta de hélice de mano izquierda de dientes de engranes helicoidales externos de avance corto (-)

TABLA IV HELICE

NUMERO DE CALIDAD AQMA	PASO DIAMETRAL NORMAL	METODOS RECOMENDADOS PARA CONTROL DE HELICE								
		DIAMETRO DE PASO (PULGADAS)								
		3/4	1-1/2	3	6	12	25	50	100	200 y mayor
8, 9 Y 10	1/2							1,3	1,3	1,3
	1					1,2	1,2	1,3	1,3	1,3
	2				1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,3
	4			1,2	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,3
	8		1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	
	16-19.00	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	
11, 12 13, 14 Y 15	1/2						2	3	3	3
	1					2	2	3	3	3
	2				2	2	2	3	3	3
	3			2	2	2	2	3	3	3
	8			2	2	2	2	3	3	
	16-19.00	2	2	2	2	2	2	3	3	

METODOS RECOMENDADOS

Número 1 - Control del proceso.

Número 2 - Instrumento chacador de hélice.

Número 3 - Instrumentos de medición portátiles.

4.5.1.- Huelgo entre dientes

El huelgo teórico de un tren de engranes está basado en el espesor de diente de cada miembro en engranaje, así como la distancia entre centros a la cual los engranes son operados. El huelgo real está en función de las tolerancias en espesor del diente, -- excentricidad, avance, perfil y distancia entre centros. Una rueda dentada por sí sola no puede tener huelgo.

El huelgo en engranes es el claro o hueco entre las superficies de dientes acopladas. El huelgo normal es el huelgo en el punto ajustado de engranamiento en el círculo de paso, en una dirección normal a las superficies de los dientes cuando los engranes son montados en sus posiciones de ensamble. De esta manera, un engranamiento simple tendrá un valor simple (mínimo) de huelgo normal. El huelgo normal puede ser convertido a huelgo transversal al dividir el valor del huelgo normal entre el producto del coseno del ángulo de avance y el coseno del ángulo de presión.

La tolerancia de holgura es la cantidad admisible de huelgo normal de un engranamiento individual en su punto ajustado. Estas tolerancias se muestran en la tabla 4.5.1 que se da al final de este punto.

NOTA: En casos extremos, grandes revoluciones del engrane y el piñón pueden ser requeridas para hallar el punto ajustado de engranamiento debido a la acción cazadora del diente y a la excentricidad de cada miembro.

La variación de holgura es la diferencia entre el huelgo máximo y el mínimo en un par determinado de engranes. Este valor incluye la excentricidad de cada miembro.

4.5.1.- Métodos de medición

Un método de medición es el realizado a través del control de procesos, que ya se tocó en una parte anterior de este capítulo.

Otros métodos son los que se realizan con indicadores de carátula (en el ensamble de engranes). En estos métodos el huelgo es medido a través de la distancia de montaje de operación. Un método recomendado es el de sujetar el piñón sólidamente contra la rotación y montar un indicador de carátula contra la superficie del diente, con el eje indicador de movimiento perpendicular a esa superficie. El huelgo normal puede entonces ser leído en el indicador al girar el engrane hacia adelante y hacia atrás. Esta lectura incluye los efectos de errores por excentricidad de los cojinetes, ejes y engranes. El indicador puede ser posicionado en el plano de rotación cuando sea más conveniente, y las lecturas convertidas a la dirección normal.

Otro método de medición es a través de un calibrador vernier de dientes de engranes, el huelgo puede ser obtenido por chequeo del espesor del diente usando un vernier de dientes de engranes.

4.6.- Error compuesto

Se denomina error compuesto debido a que generalmente los errores se presentan combinados. En este punto estamos tratando el error compuesto por el método de inspección denominado de acción compuesta, el cual tratamos a continuación.

TABLA 4.5.1
 ESPECIFICACIONES DE ESPESORES DE DIENTES
 PARA ENGRANES EN GENERAL - TODAS LAS
 FORMAS

PASO DIAMETRAL DEL CORTADOR	RECTIFICADO			HUELGO FINAL NOMINAL	
	P _H	ESPESOR	TOLERANCIA		
			— MAYOR		— MENOR
3/4	(.XXX-.013)	.002	.003	.036 - .046	
1	(.XXX-.012)	.002	.003	.034 - .044	
1 1/4	(.XXX-.011)	.002	.003	.030 - .040	
1 1/2	(.XXX-.010)	.002	.003	.028 - .038	
1 3/4	(.XXX-.009)	.002	.003	.024 - .034	
2	(.XXX-.008)	.002	.003	.022 - .032	
2 1/2	(.XXX-.007)	.002	.003	.020 - .028	
3	(.XXX-.006)	.002	.002	.016 - .024	
3 1/2	(.XXX-.005)	.001	.002	.016 - .022	
4	(.XXX-.004)	.001	.002	.012 - .018	
5	(.XXX-.003)	.001	.001	.010 - .014	
6	(.XXX-.003)	.001	.001	.008 - .012	
7 y mayores	(.XXX-.002)	.001	.001	.006 - .010	

El método de control de acción compuesta, es un método de inspección en la fabricación de engranes que usa un dispositivo de engrane rodante y un engrane maestro para evaluar la acción compuesta de un engrane. Las características que pueden ser evaluadas por este método son: variación compuesta de diente a diente (esta incluye los efectos de perfil, paso, espesor del diente y variaciones de hélice), variación total compuesta (es el rango obtenido entre la máxima y mínima variación compuesta cuando el engrane es girado 360°), y el espesor funcional del diente.

El método de acción compuesta se evalúa por medio de la variación en la distancia entre centros cuando un engrane es rotado con un engrane maestro en un engranaje ajustado; esto se hace para engranes rectos, helicoidales y herringbone. Conforme el engrane se va girando se obtienen variaciones en la distancia entre centros, las cuales pueden ser debidas a errores de perfil, espaciamiento, hélice o bien, de espesor del diente. Estas variaciones son registradas en una carta de errores, la cual está conectada a los engranes por medio de un transductor rodante que transforma las variaciones a señales eléctricas y estas a su vez son convertidas a valores de la carta.

La figura 4.6.1 nos muestra una carta de errores de dientes de engranes, esta figura muestra la interpretación de datos para una variación de diente a diente y variación total compuesta. La forma de evaluar tales variaciones es de la siguiente manera:

Si denominamos con la letra A, a la lectura en la carta o dial indicador de la variación total compuesta del engrane.

Llamamos B a la variación total compuesta del engrane maestro.

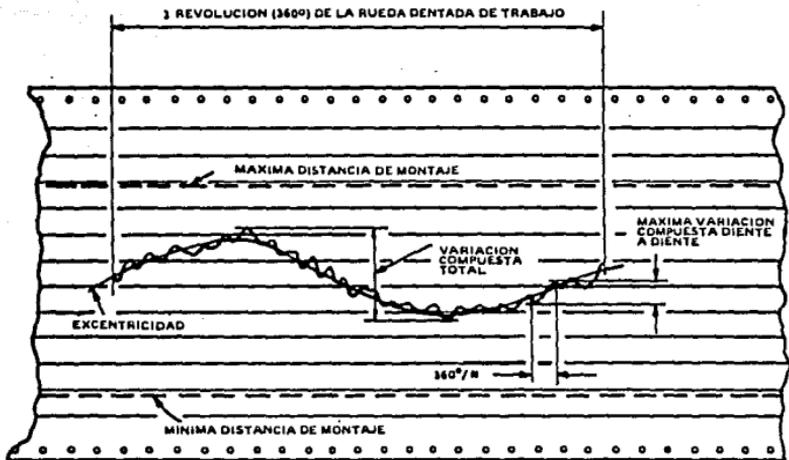
Y llamamos C a la tolerancia total admisible en la distancia entre centros en el plano de la pieza.

Entonces se aplican los siguientes criterios:

Si $A + B \leq C$	La pieza es aceptada
$B + C \leq A$	La pieza es rechazada
$B - C \geq A$	La pieza esta en duda, se repite la prueba y se vuelven a analizar los resultados.

En el caso de ser rechazada la pieza entonces se procede a realizar un análisis individual.

La figura 4.6.2 nos muestra un diagrama esquemático de un dispositivo rodante de engranes, ésta es presentada para mostrar sólo los requerimientos cinemáticos del dispositivo. No suponemos que es una construcción aceptable.



- Figura 4.6.1 Carta de errores de dientes de engranes cuando funciona con un engrane maestro en un dispositivo rodante.

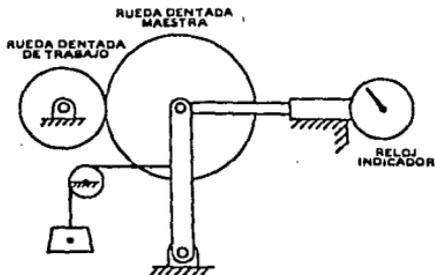


Figura 4.6.2 Diagrama esquemático de un dispositivo de engrane rodante.

4.6.1.- Métodos recomendados de control

Los métodos recomendados de control de acción compuesta para cada número de calidad AGMA, son mostrados en la tabla 4.6 para engranes rectos, helicoidales y herringbone. Los números en la tabla se refieren a los siguientes procesos.

Control de procesos (No 1), el cual ya fue mencionado anteriormente.

Método de acción compuesta (No 2).- Este es el método de doble flanco de inspección de engrane rodante, llamado así por el engranamiento ajustado en que operan, en el cual el engrane es montado con un engrane rodante de prueba (engrane maestro). La variación en la distancia entre centros ocurre cuando los engranes están girando, lo cual es registrado en una carta por medio de un indicador.

NUMERO DE CALIDAD AGMA	PASO DIAMETRAL NORMAL	METODOS RECOMENDADOS PARA CONTROL DE ACCION COMPUESTA								
		DIAMETRO DE PASO (PULGADAS)								
		1	1	2.5	4.0	10	25	50	100	y mayores
5, 6, & 7	20-200	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2				
8, 9 y 10	20-200	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2				
	2-18.00		1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	
11 y 12	20-200	2	2	2	2	2				
	4-10			1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
13, 14, 15 y 16	11-18.00		2	2	2	2	2	1,2	1,2	1,2
	20-200	2	2	2	2	2				

Número 1 Control de procesos

Número 2 Método de acción compuesta

Tabla 4.6 Métodos recomendados de acción compuesta para engranes rectos, helicoidales y herringbone.

4.7.- Procedimientos de medición para el control de errores en la fabricación de engranes nitrurados en Mecánica Falk.

Los errores de excentricidad, hélice, perfil y espaciamiento, también son causados por un tratamiento térmico mal realizado, es tos tratamientos térmicos pueden ser: cementado o nitrurado, además de contar con alabeo, ovalamiento y distorsiones en general - de dimensiones de la pieza. Por lo general cada lote que se manda a nitrurar o cementar es evaluado en los errores de fabricación, para conocer la cantidad de error que se obtiene del endurecimiento superficial, lo que se ha observado es que no se conoce la manera de realizar estos tratamientos térmicos hablando particularmente de engranes, ya que informes que tenemos del nitrurado de engranes dado en E.E.U.U. mencionan que no se presentan alteraciones de consideración en los engranes y que no es necesario rectificar. Actualmente se esta trabajando al respecto junto con el personal encargado de tratamientos térmicos para lograr tener un control sobre estas distorsiones debidas al tratamiento térmico, con esto lograremos disminuir este problema y con un rectificaco pequeño corregir las distorsiones sobrantes en caso de que esto sea aplicable, en caso contrario se recurrira a otro tipo de correcciones mencionadas en el punto siguiente.

4.7.1.- Verificación de la hélice

La verificación de la hélice en los dientes de los engranes se hace por medio de la máquina Klingelberg, dicha máquina esta habilitada para realizar con ella todo tipo de medición en los engranes.

Para la medición de la hélice, primeramente seleccionamos la función "hélice" en la máquina, después fijamos la pieza en la máquina junto con dos indicadores de carátula, uno de los indicadores de carátula lo instalamos en el barreno de la pieza y el otro indicador en la cara de referencia, de tal manera que ambos indicadores de carátula no registren variaciones al girar la pieza, ver figura 4.7.1, con lo cual estamos asegurando que la pieza esté concéntrica y que esté en una posición de planitud con respecto a la máquina. Posteriormente se prosigue a realizar la inspección de la hélice a lo largo del ancho de cara, tomándose las mediciones por los flancos, tanto superior como inferior del diente. Las variaciones obtenidas son registradas en gráficas que la misma máquina va procesando por medio de una señal eléctrica, tales variaciones pueden ser en sentido positivo o sentido negativo (mayores o menores al punto de referencia). En el caso de no haber variaciones, la gráfica será una línea recta que parte del punto de referencia. En la figura 4.7.2a mostramos un ejemplo de medición y evaluación de la desviación de la hélice.

Denominamos flanco superior del diente al lado que dependiendo del sentido de giro de la rueda dentada, sea el primero en hacer contacto con el diente de la otra rueda dentada.

Si la hélice se desvía hacia la derecha de la hélice perfecta en el flanco inferior, esto nos indicará que tenemos un ángulo de hélice menor al deseado. En el caso contrario, si la hélice se -- desvía hacia la izquierda de la hélice deseada en el mismo flanco inferior, nos indicará que tenemos un ángulo de hélice mayor, con esto podemos tomar las medidas necesarias de corrección cuando di chas desviaciones queden fuera de tolerancia.

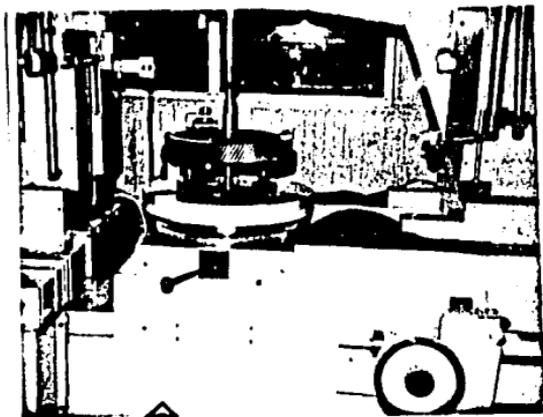


Fig. 4.7.1 Montaje de la pieza en máquina verificadora

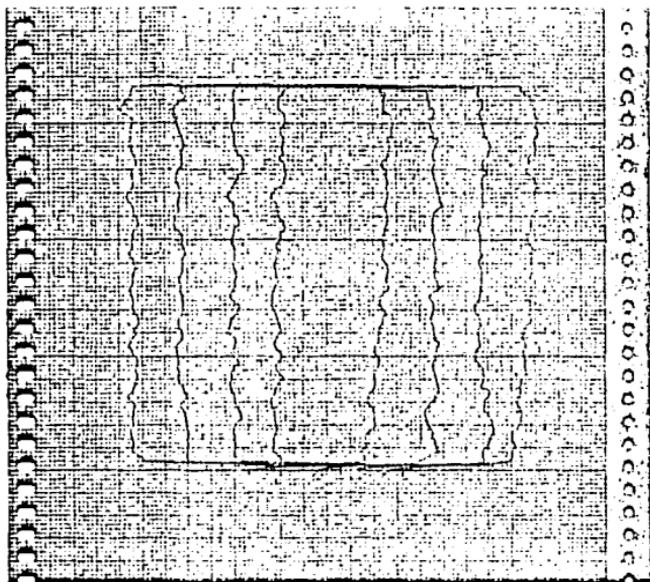


Fig. 4.7.2a Gráfica de hélice de un engrane rectificad

4.7.2.- Verificación de la evolvente

Una vez realizada la inspección de la hélice y teniendo aún la pieza montada sobre la máquina, procedemos a realizar la inspección de la evolvente, cambiando la máquina a la función "evolvente", dicha inspección se realiza sobre el perfil del diente, si la evolvente es correcta, tendremos una gráfica en la cual sólo esté una línea recta, en caso contrario, tendremos una gráfica -- con crestas y valles, y su evaluación se realizará midiendo el ancho de banda comprendido entre la mayor y menor cresta. Este ancho de banda se compara con las tolerancias. Las mediciones se -- realizan en ambos lados del diente, en la figura 4.7.2b se muestra esta gráfica. Es de hacer notar que este tipo de error se presenta en muy pocas ocasiones, por lo que generalmente el error -- obtenido queda dentro de tolerancias.

4.7.3.- Excentricidad

Esta medida es de vital importancia ya que el dentado debe de realizar el contacto sobre la línea de paso. Y si el dentado no es concéntrico a el barreno de la rueda dentada, no tendremos la misma presión de contacto en todos los dientes.

Seleccionamos la función "excentricidad" en la máquina, esta inspección se realiza a través de una esfera que se introduce en el espacio entre cada par de dientes y obtenemos lecturas, estas lecturas la máquina las va registrando en una gráfica, dichas lecturas deberán de ser iguales entre si, en caso contrario, se ve -- cuál es la variación que existe en los 360° del engrane y la comparamos con las tolerancias admisibles, según el número de calidad.

Además de que el cerebro de la máquina nos dará automáticamente los valores de desviación de la concentricidad. La figura ---- 4.7.2c nos muestra esta evaluación.

Para la evaluación, imprimimos los valores del digital de la máquina, estos valores están en micras, haciendo las transformaciones correspondientes podemos comparar la lectura de desviación máxima obtenida con la tolerancia.

4.7.4.- Espaciamiento entre dientes

La medición de espaciamiento se hace en la misma máquina, introduciendo la función "espaciamiento" y posicionando las puntas de la máquina que se usan para este proposito en dos puntos adyacentes en el flanco que se va a realizar la medición, ya sea superior o inferior, y tomamos la primera lectura como un punto de referencia. La medición se realiza diente a diente en los 360°. La máquina sigue la secuencia graficando una a una las variaciones -- con respecto a la referencia. Al finalizar se mandan a imprimir -- los valores del digital y éstos son transformados a diezmilésimas de pulgada para compararlos con las tolerancias admisibles y catalogar la magnitud del error en un número de calidad ACMA. Esto se ilustra en la figura 4.7.2c.

Realizadas las 4 evaluaciones de hélice, excentricidad, evolvente y espaciamiento, se procede a analizar la causa del error o errores encontrados. Para tal efecto hemos estructurado la siguiente tabla 4.7.2, la cual es una recopilación de la experiencia de personas especializadas en el proceso de fabricación de -- granes, así como lo que hemos aprendido del trabajo diario.

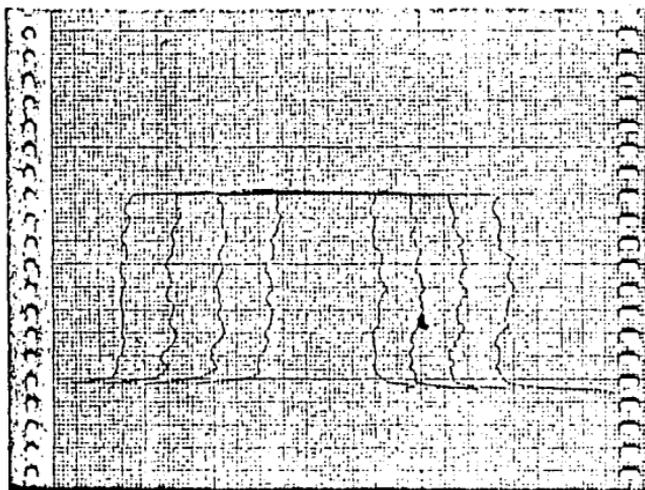


Fig. 4.7.2b Gráfica de evolvente de un engrane rectificadо

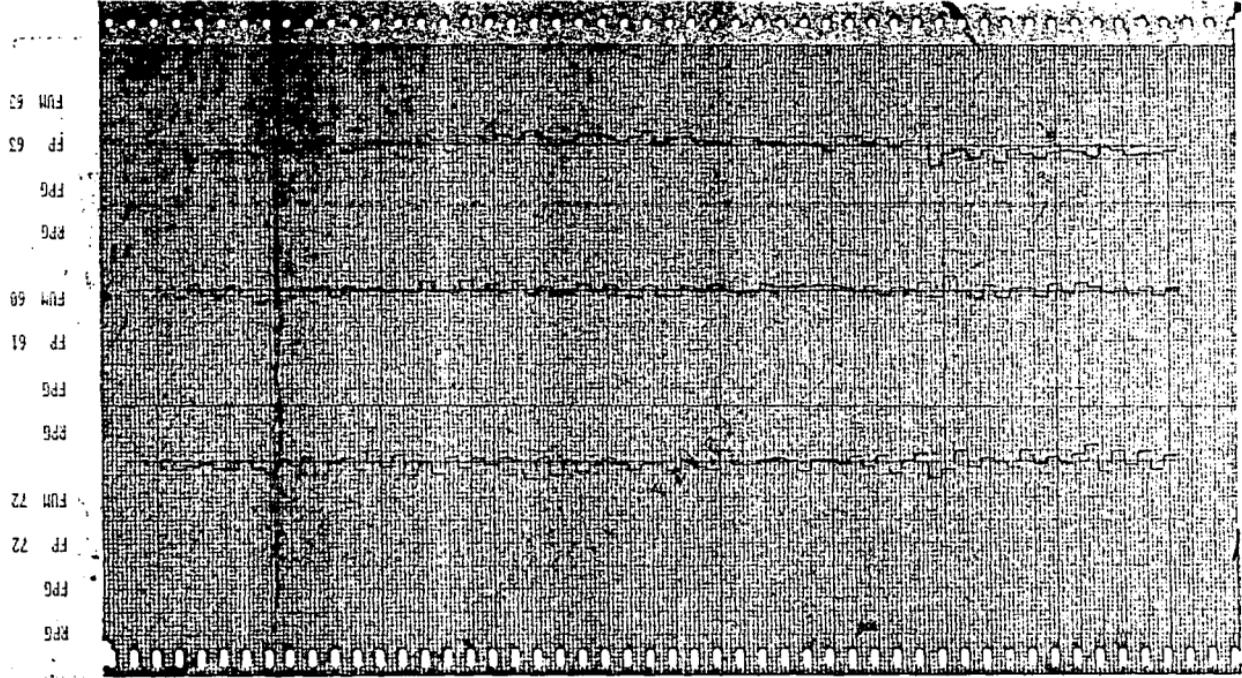


FIG. 7.2c Orfática de concentrabilidad y espaciamiento de un engrane rectificador.

TABLA 4.7.2

Tipos de errores y sus posibles correcciones

TIPO DE ERROR	POSIBLES CAUSAS DE ERRORES
HELICE	-MAL MONTAJE DE LA PIEZA -MAL MONTAJE DEL CORTADOR -DIFERENCIAL EQUIVOCADO -EXCENRICIDAD DE LA PIEZA ANTES DEL GENERADO -BARRENO FUERA DE CILINDRICIDAD -PISTAS PARA EL CENTRADO EXCENTRICAS PARA EL CASO DE EJES PIÑON -MANDRIL EXCENTRICO -CORTADOR DESAFILADO O MAL AFILADO -CARA DE REFERENCIA DE LA PIEZA FUERA DE PERPENDICULARIDAD CON RESPECTOS AL BARRENO
EVOLVENTE	-CORTADOR DESAFILADO -MAQUINA GENERADORA EN MAL ESTADO -FALTA DE RIGIDEZ EN LA PIEZA O EL CORTADOR -MAL MONTAJE DE LA PIEZA O EL CORTADOR
EXCENTRICIDAD	-MAL TORNEADO Y/O RECTIFICADO -FUERA DE CONCENTRICIDAD DEL DIAMETRO EXTERIOR CON RESPECTOS AL DIAMETRO INTERIOR
ESPACIAMIENTO	-EL ESPACIAMIENTO ES EL RESULTADO DE LOS ERRORES ANTERIORES.

Como se puede observar, el llevar a cabo cuidadosamente las recomendaciones indicadas en el capítulo 2 nos llevará a disminuir los errores y teniendo especial cuidado con la excentricidad de las piezas torneadas y rectificadas antes de generar, así como el verificar el estado del filo del cortador, aunado a una eficiente capacitación y supervisión de los operarios de tornos, rectificadoras, generadoras y afilado de cortadores, se puede lograr el control de estos errores incurridos durante el proceso de fabricación. En casos especiales en que debido al estado de la maquinaria, premura de producción, etc., esto no sea posible por el tiempo que implica, se establecen a continuación métodos correctivos.

4.8.- Corrección de errores de fabricación

En este apartado trabajaremos con las posibles correcciones, -- una vez terminada la fabricación de la rueda dentada. Esto se -- plantea debido al gran costo que significa tanto el material como la fabricación en sí. De pruebas realizadas se han implementado -- algunos métodos que nos permiten disminuir los errores para poder usar la pieza, o al menos recuperar el material para volver a pro -- cesarlo, si en dicha pieza se ha incurrido en errores y que por -- tal motivo no cubren la calidad deseada. Cabe mencionar que los -- errores a que nos estamos refiriendo son los ya tratados en el -- contenido de este capítulo y les denominamos "errores" debido a -- que en ningún proceso se obtienen los requerimientos del mismo al 100%, esto significa que no tendremos una fabricación perfecta. La diferencia entonces, de la aceptación de una pieza, radica en que los errores obtenidos en su fabricación estén dentro del rango de tolerancias; estas tolerancias están de acuerdo al número de cali -- dad AGMA que se requiera, dichos números de calidad son presenta -- dos al final de este capítulo, en el apéndice A.

Ahora bien, tendremos la posibilidad de que los errores fuera de tolerancia se les pueda disminuir de tal manera que se hagan -- accesibles a un número de calidad determinado. Esto se puede lo -- rar por medio de los siguientes métodos:

- * Lapeado
- * Rectificado
- * Repasado

Existe también la posibilidad del remaquinado, pero este proce -- dimiento entra dentro de un caso especial debido a la inversión -- adicional que su práctica requiere, y éstos en su caso serían; -- volver a procesar la pieza, diseño de un compañero especial, etc.

A continuación trataremos cada una de las posibilidades de cor -- rección de errores, explicándolas individualmente.

4.8.1.- Lapeado

El lapeado de engranes es primordialmente un método de correc -- ción de pequenísimas deformaciones producidas durante el corte o tratamiento térmico, el cual comprende: perfil de la evolvente, -- ángulo de hélice, espaciamiento y excentricidad. También el lapea -- do tiene la función de pulir la superficie de los dientes.

Es necesario hacer hincapié de que el lapeado de engranes de -- ninguna manera se debe de tomar como una operación de salvamento de ruedas dentadas defectuosas que acusen errores muy grandes, di -- gamos que sean tres veces mayores que el valor establecido como -- "tolerancia de producción" en las hojas de corte, en cuanto a des -- viación de hélice se refiere.

En general el proceso de lapeado consiste en cubrir la rueda -- dentada con una capa de material abrasivo, usando un engrane la -- peador maestro de hierro colado o bien con su mismo compañero, y -- rodando los engranes en una máquina lapeadora o en su propia caja de engranes. Esto nos ayuda a corregir posibles picados correcti -- vos y a producir rodamientos de engranes suaves y silenciosos.

TABLA 4.8

Tipos de lapeadores, simbología y designación así como sus características.

SIMBOLO	DESIGNACION-CARACTERISTICAS
A W-7	Medio- este compuesto se aplica como se recibe y su aplicación a los engranes puede ser por brocha, paleta o por atomizador al rocío.
B #80	Compuesto- Ahorra tiempo- éste es un polvo mezclado -- con aceite 600W. Se aplica a los dientes de los engranes durante su rotación y después de haber sido cubiertos -- con aceite lubricante. Mientras tengan rotación los engranes, los dientes deben conservarse bien cubiertos con la mezcla de compuesto lapeado.
C #303 1/2	Compuesto de lapeado ya mezclado. Cubra todos los dientes antes de empezar el lapeado y cuide que los dientes estén bien cubiertos con el compuesto mientras se -- lleve a cabo la operación de lapeado.
#70	Compuesto de lapeado ya mezclado. Apropriado para - paso diámetral 10 o más fino.
#20	Compuesto de lapeado ya mezclado. Apropriado para - pasos mayores que el paso diámetral 10.
D R-1	Medio- (grano 240) Usado en desbastar engranes cónicos espirales.
E R-1	Fino- (grano 280) Usado en todos los trabajos generales y en acabado medio en engranes cónicos espirales.
Los compuestos R-1 tienen una base de aceite y en máquinas automáticas es aplicado en chorro constante sobre los engranes con presión -- producida por una unidad de bomba apropiada. Para algunos trabajos de pulido éste es aplicado a mano con brocha.	
F R-5	Medio- (grano 150) Usado en engranes bastos y en trabajos de desbaste.
G R-5	Fino- (grano 280) Usado en engranes rectos y helicoidales.
Los compuestos R-5 tienen una base de grasa y son aplicados normalmente con brocha.	
H H41	Medio- (grano 320)- compuesto de aloxita usado para pulido basto de engranes ferrosos y corte de desbaste de - sinfines y engranes no ferrosos.
I H-41	Fino- (grano 800)-compuesto de aloxita usado para pulido fino de todos los tipos de sinfines y engranes.

Los compuestos H-41 son aplicados a mano con brocha.

TABLA 4.8 CONT.

SIMBOLO	DESIGNACION-CARACTERISTICAS
J W9	Medio- Usado casi exclusivamente en el lapeado de engranes durante los periodos de rodaje sin carga. Las unidades son armadas en la caja y el compuesto aplicado sobre los engranes durante el proceso de lapeado.
K 1158	Ahorra-tiempo- Usado en engranes suaves para el lapeado final. Se añade un litro de aceite 600W a una libra del compuesto, se mezcla cuidadosamente y se aplica con brocha.
L	Compuesto de lapeado de desbaste- Se mezclan partes iguales de vidrio molido 120 y vidrio molido 80 con aceite de rectificar oscuro de servicio pasado de la "City Service Company". La proporción debe ser: una parte de vidrio y dos o tres partes de aceite. Aplicar con brocha o paleta.
M	Compuesto de lapeado para acabado. Se usa una mezcla de 20% de vidrio molido 120 con 80% de aceite, hasta que los piñones se deslustren; después de esto el porcentaje de vidrio se reduce. Se lavan piñón y engrane para lo cual una mezcla de aproximadamente 20% de alúmina diluida y 80% de aceite rojo de máquina se usa como compuesto lapedor.
N R-1	Para uso en máquinas lapeadoras y probadoras GLEASON (Igual que el "D"). 12 Galones de aceite "Condensoil # 60" 5 Partes de "Cut slip Oil" 48 Libras de Carborundum FFFFA Polvo abrasivo que se mezcla con aceite #240 de grado de grano
O L-1 1/2	Aceite Houghton absorbido- (Se añade carburo de silicio como vehículo en cantidad suficiente para producir los efectos de lapeado deseados).
P #60	Aceite no fluido
Q #275	Esmeril (variedad de conrindón) para engranes de pasos - bastos.
R #350	Esmeril (variedad de conrindón) para engranes de pasos - finos
S 1A	Compuestos de "CLOVER" para engranes tratados
T Fórmula	Tomar 35% en volumen de grano abrasivo Alundum No 240, mezcle el abrasivo con 50% en volumen de aceite no fluido #A-000000 mezcle cuidadosamente. Añada el faltante 25%, con grasa No 1 Marfax. Mezcle cuidadosamente.

TABLA 4.8 CONT.

SIMBOLO	DESIGNACION-CARACTERISTICAS
U 240RA	Engranajes corona sinfin- Usando la máquina lapeado ra Fellows 4L. Mezcle el compuesto con aceite no fluido y bombee dentro de la caja, haga el lapeado de desbaste. desconecte la bomba durante el ciclo de acabado.
V W-5	Compuesto para acabado medio, aplicado con brocha.
W	Medio-Etiqueta verde-Mezclado con aceite SAE-50 para formar una pasta delgada, aplicar con brocha.
X	Medio-Etiqueta amarilla-Mezclado con aceite SAE-50 para formar una pasta delgada, aplicar con brocha.
Y 280	Grano a 4 partes de aceite no fluido
Z 280 180	En partes iguales para factor de lapeado
AA R-7	Rebajado con agua o aceite soluble
BB R-5	Usado sin adelgazador y aplicado con brocha
CC .99	Ahorra tiempo-Adelgazador con aceite soluble
DD	FFF-RA Carborundum Aceite de lapeado No 12 Compuesto de Brunko No 457 Para 148 Kg. de carborundum usar 225 litros de aceite de lapear #12. Cuando se requiere más lapeado use 190 litros de aceite de lapeado #12. Si ocurren rayas o marcas añada compuesto Brunko No 457
EE W-4	Engranajes de paso basto
FP W-4	Engranajes de paso fino
GG #111	Ahorra tiempo-aplicado con brocha y recogido con charola (para lapeado fino y para bronce).
HH W-9	Carborundum-medio - para lapeados más pesados
II	Fino, medio y grados bastos o toscos, aplicados con brochas.
JJ	Carborundum de grado fino para engranes cónicos espirales
KK #120GG	Polvo de Carborundum mezclado con grasa semi-fluida # 4615 (#00)

TABLA 4.8 CONT.

SIMBOLO	DESIGNACION-CARACTERISTICAS
LL	Compuestos MELITE-Mezclar partes iguales en volumen de grasa de petróleo ligero #00, o aceite de máquina pasado. Aplique ligeramente con una brocha sobre toda la superficie. Cuando el acabado final esté próximo a presentarse, añada aceite o querosina a las superficies.
MM LCH y LCB	Compuestos-ya mezclados-en grados convenientes para todas las aplicaciones. Especificar los materiales y el tipo de lapado requeridos.

Como ya se dijo, el lapeado no debe considerarse como un "cura todo" con relación a los errores producidos en el corte de engranes. Si se lleva demasiado lejos puede ser dañino en vez de beneficioso y como es sabido, el lapeado hace desaparecer imperfecciones menores de aquellos engranes que podrían ser descartados debido a estas imperfecciones, pero que frecuentemente pueden ser mejorados con dicho proceso.

Los compuestos de lapeado son aplicados en dos formas: fluida y en forma de pasta. El método usual es aplicar el compuesto del lapeado con una brocha de pintar en cantidad suficiente para cubrir la superficie completa. En el caso de engranes muy grandes, las superficies deben ser humedecidas con aceite para máquinas -- antes de aplicar el compuesto.

La velocidad a la cual giran los engranes durante su lapeado debe ser regulada para prevenir que el compuesto de lapeado sea lanzado. Una velocidad precisamente abajo del punto donde esto sucede es la recomendada.

Los tipos de compuesto lapeador existen para una amplia gama de aplicaciones y son mostrados en la tabla 4.8.

En general los lapeados de engranes rectos y helicoidales se hacen utilizando un compuesto lapeador que tiene el símbolo J (W9), que es fabricado por la compañía Carborundum. Las velocidades son: para piñón sera de 130 rpm, y para una rueda dentada sera de 20 rpm, y se estima una disminución en el espesor de 0.001 pulgadas en 3000 ciclos, equivalentes a 2.5 horas girando la rueda dentada a 20 rpm.

Después de que se ha completado la operación de lapeado, los engranes deben ser cuidadosamente lavados con un solvente adecuado como lo es la querosina o un solvente industrial equivalente para remover todas las partículas del abrasivo, teniendo especial cuidado de que éstas no se introduzcan en los rodamientos. Algunas veces esto es seguido por un prolongado rodaje con un abrasivo fino como la alumina diluida.

4.8.2.- Rectificado

Este procedimiento consiste en dar varias pasadas con una piedra abrasiva al perfil del diente, con el fin de corregir desviaciones de un tratamiento térmico superficial, así como errores -- que se presentan como resultado de la fabricación de las ruedas dentadas tales como: hélice, espaciamiento y perfil de la evolvente.

Ahora bien, en este proceso los errores son disminuidos con el objeto de mejorar la calidad del engrane fabricado, esto es que los rangos de tolerancia son más cerrados con respecto a los especificados en la hoja de corte. Con esto, la rueda dentada será -- más precisa y podrá entonces catalogarse dentro de un número de calidad mayor, en la figura 4.8.1 se muestra el proceso de rectificado.



Figura 4.8.1 Proceso de rectificado en una rueda dentada

4.8.3.- Repasado

Este método de corrección consiste en volver a montar la pieza en la máquina generadora, teniendo especial cuidado en checar su excentricidad y paralelismo con el plato o mesa de la máquina, -- también deben tenerse precauciones extremas al montar el cortador nuevamente. Esto es debido a que se considera que los errores obtenidos en la fabricación de la pieza se debieron al mal montaje del cortador o la pieza, con esto debemos comprender que el operario debe seguir rigurosamente las indicaciones en tolerancias. -- Ahora, si los rangos de tolerancia en montaje prácticamente son -- de 0.0005 pulgadas, debe buscarse el quedar abajo de este límite con el propósito de garantizar la corrección de los errores obtenidos en el generado con una nueva pasada del cortador. Es de prima importancia en este procedimiento de corrección el tener en cuenta que con una nueva pasada o pasadas del cortador tendremos en cada una de ellas una disminución en el espesor del diente, -- por lo que se hace necesario un control en la disminución de tal espesor, para no llegar a debilitar el diente y que éste al funcionar rebase su límite de resistencia. Para tales propósitos se muestra la tabla 4.8.5, que nos muestra la cantidad en que se puede disminuir el espesor del diente (en pulgadas), en función del paso diametral.

4.8.4.- Remaquinado

Este método considerado como especial, consiste en remaquinar el tejo (material de la rueda dentada), abajo de la mínima dimensión que nos indica el plano, con esto tendremos una disminución en el diámetro exterior. Una vez hecho esto se procederá a generar nuevamente. Con esto tendremos una disminución en el diámetro de paso de operación del piñón, que debe ser compensada con el -- fin de no variar la distancia entre centros, con la fabricación -- de un piñón compañero especial.

TOLERANCIAS DE ESPESOR DE EL DIENTE PARA REMAQUINADO

DESVIACION ACEPTABLE DE ESPESOR CORDAL FINAL, DESPUES DE EL REPASADO	
PASO DIAMETRAL	DESVIACION ACEPTABLE
20	- .009"
16	- .009"
14	- .011"
12	- .011"
10	- .013"
9	- .013"
8	- .013"
7	- .013"
6	- .015"
5	- .015"
4	- .015"
3.5	- .020"
3.0	- .020"
2.5	- .025"
2.0	- .025"

Tabla 4.8.5 Tolerancias para la disminución del espesor del diente

El no variar la distancia entre centros es debido a que esta distancia es considerada en el montaje, en el caso de trenes - cubiertos. En algunas ocasiones la disminución necesaria del diámetro exterior es tan pequeña que casi queda completa la altura - del diente, en este caso se recomienda extremar las precauciones en el montaje de pieza y cortador, así como la posición en que va a iniciarse el generado.

El diseño de un compañero especial de la rueda dentada es considerando un aumento en el adendo en función de la cantidad rebajada del diámetro exterior, a esto se le denomina corrección del adendo. Lo máximo permisible que se puede disminuir o rebajar al diámetro exterior esta dado en función del diámetro de paso, esto se muestra en la tabla 4.8.6, y su respectiva corrección en el -- adendo se muestra en la tabla 4.8.7.

D P	MAXIMA DISMINUCION DEL DIA.	D P	MAXIMA DISMINUCION DEL DIA.
20	.010	3 1/2	.050
16	.010	3	.060
12	.015	2 1/2	.070
10	.018	2	.090
9	.020	1 3/4	.100
8	.022	1 1/2	.100
7	.025	1 1/4	.100
6	.030	1	.100
5	.035	3/4	.100
4	.045	1/2	.100

Figura 4.8.6 Disminución permisible del diámetro exterior en el remaquinado

DIAMETRO EXTERIOR	CORRECCION DE ADDENDUM
MAX. OD a .002 *	---
> .002 a .006 *	.002
> .006 a .010 *	.004
> .010 a .014 *	.006
> .014 a .018 *	.008
> .018 a .022 *	.010
> .022	---

> Y MENORES

Figura 4.8.7 Correcciones de adendo en función de la disminución del diámetro exterior

El capítulo tratado nos establece los lineamientos a seguir en la evaluación de los errores cometidos durante la fabricación de los engranes. Específicamente de aquellos que dependen directamente del generado de los dientes de los engranes, lo consideramos como uno de los puntos centrales de este trabajo de tesis, porque en función a este capítulo podremos evaluar parámetros del dentado tales como: hélice, excentricidad, evolvente, espaciamento, -- así como en algunos casos de acabado. De dicha evaluación, podremos catalogar la pieza en un número de calidad AGMA, o bien, si la magnitud de los errores obtenidos rebasan las tolerancias admisibles, el tomar las decisiones convenientes para con la pieza, y en el caso optar por una posible corrección, dependiendo de las condiciones dadas y del proceso de recuperación de la pieza, así como de los dispositivos y maquinaria a usar.

Ahora bien, el catalogar los parámetros de mayor importancia e influencia en el error, también nos ayuda a plantear alternativas de solución, y/o en algunos casos, dado lo apremiante de la situación para ensamblar las piezas, tomar la aceptación de la desviación o error.

C A P I T U L O 5

FALLAS EN EL FUNCIONAMIENTO DE LOS ENGRANES

- 5.1.- Fallas debidas a desgaste y rayadura.
- 5.2.- Fallas por sobrecarga.
- 5.3.- Fallas debidas a fatiga.
- 5.4.- Otros tipos de fallas.

I N T R O D U C C I O N

Este capítulo tiene gran importancia, ya que es de gran utilidad en el estudio de fallas, las cuales son regularmente producidas durante el funcionamiento de los engranes en los reductores - de velocidad.

Como se sabe, el análisis de fallas es muy complejo debido a - la gran diversidad y maneras en que éstas se presentan; por tal - motivo, se hace necesario agruparlas de tal manera que se puedan utilizar como patrones de comparación en la evaluación y determinación de las fallas.

En base a la experiencia, se realizó la siguiente agrupación, considerándolas como las fallas más comunes o frecuentes.

- Fallas debidas a desgaste y rayadura
- Fallas por sobrecarga
- Fallas por fatiga en los dientes
- Otros tipos de fallas

Cabe hacer mención que para cada una de las fallas anteriores, se tendrá influencia de varios factores simultáneamente, e incluso en dos diferentes fallas, los mismos factores combinados con otro u otros factores se comportarán de diferente forma para darnos -- unas fallas las cuales seran diferentes en apariencia una con res- pecto a las otras.

En el contenido trataremos y propondremos causas y correccio- nes de las fallas, considerando las condiciones en que se presen- taron y las apariencias que tengan las fallas.

En el punto denominado "Otros tipos de fallas", no se profundi za en éstas, debido a que se presentan con muy poca frecuencia en comparación con la aparición de las fallas que se tratan al in- cicio de este capítulo. O bien, son fallas propias de la fabrica- ción, como es en el caso de interferencia. Así como también se da el caso de que son producidas por un funcionamiento inadecuado o en condiciones impropias, como es en el caso de fallas por corro- sión, la cual se debe a una contaminación del aceite lubricante - por parte de un agente químico extraño.

5.1.- Fallas debidas a desgaste y rayadura

El desgaste lo definiremos como la pérdida de material en la su-
perficie del diente, con la consecuente pérdida en la forma de --
evolvente que tiene el perfil del diente, con una consecuente for-
mación de rugosidad debida al contacto de metal con metal.

El rayado es una forma de deterioro en el cual ocurre un consi-
derable daño en la superficie de los dientes. Este daño es más se-
vero que en el desgaste, y algunas veces también recibe el nom-
bre de raspadura.

En muchos juegos de engranes, con cargas moderadas que operan a
velocidades de rotación no muy altas (menores de 1750 rpm), las pe-
lículas de aceite lubricante se mantienen relativamente gruesas en-
tre los dientes de los engranes, con lo cual se evita el contacto
de metal con metal en cualquier forma y no se presenta el desgaste
excepto durante el arranque de la máquina y en el paro también, en
estas condiciones se pueden apreciar las marcas originales de las
herramientas de corte sobre los dientes, aún después de largos pe-
riodos de operación.

En condiciones de película fluida, la viscosidad del aceite a -
la temperatura y presión de las condiciones de trabajo nos determi-
nará la habilidad de soporte de carga en los dientes del engrane,
así como la resistencia al movimiento de deslizamiento entre las
superficies del engrane. En la práctica, no siempre es posible el
tener una lubricación con película fluida.

Cuando las superficies descansan bajo presión, la película de -
lubricante es desplazada fuera del área de presión, esto es porque
el movimiento es necesario para poder establecer y mantener la pe-
lícula de aceite lubricante.

En condiciones de baja velocidad de rotación, cargas pesadas, -
temperaturas extremas, superficies rugosas e irregulares, así como
cantidades escasas de lubricante, o el uso de un lubricante de me-
nor densidad al requerido, nos dara como resultado que exista so-
lamente una película parcial de lubricante sobre el área de carga.
Con estas condiciones de película habrá un cierto grado de contac-
to de metal entre las superficies. A estas condiciones de peli-
cula parcial se le da el nombre de estado de lubricación límite. Es-
te estado de lubricación límite se da en los casos en que el acei-
te lubricante utilizado es de menor densidad al requerido para esa
aplicación, o cuando la cantidad de aceite lubricante no es el ade-
cuado para un funcionamiento en óptimas condiciones de la unidad,
por lo cual se da un contacto de metal entre las superficies.

5.1.1.- Desgaste

Primeramente vamos a definir este término como sigue. Sabemos -
que las superficies de los dientes generalmente muestran una cierta
ondulación y aspereza, características inherentes dejadas por -
las herramientas de corte durante el generado del diente, o sea --
que hay innumerables pequeñas rugosidades (montes y valles) en la
superficie de los dientes.

Cuando las superficies operan juntas, en condiciones de lubrica-
ción límite, el contacto se efectúa entre las crestas de las ondu-
laciones de las superficies.

En este caso tenemos que se presentan los efectos de corte de la película de aceite lubricante entre las superficies, gran fricción y deformación del metal, inserción de los montes del material más duro en el material más blando, lo cual produce la ruptura de las partículas desgastadas y la creación de nuevas rugosidades y finalmente, la soldadura de las pequeñas áreas altas que han sido pulidas. Estas soldaduras pequeñas se rompen inmediatamente, continuando el movimiento y pueden llegar a romper otras secciones, de tal forma que el material se transfiera de una superficie a otra. Se forman nuevas rugosidades, algunas de las cuales caen, formando partículas de desgaste. Estos efectos son los responsables tanto del desgaste como de la fricción.

Ahora bien, la viscosidad del aceite es un factor muy importante en condiciones de lubricación límite, pues los más viscosos son retenidos mejor en las superficies de los dientes que los de menor viscosidad, y tienen mayor resistencia a ser eliminados o desplazados de las áreas de presión. Sin embargo, los aceites especialmente diseñados para lubricación límite no confían en estos efectos, sino que además cuentan con materiales aditivos, los cuales pueden variar desde agentes reductores de fricción hasta agentes de extrema presión muy activos (denominados EP), estos se seleccionan, dependiendo de la severidad de las condiciones para las cuales está diseñado el lubricante. Su función es la de interponer una película lubricante normalmente mayor entre las superficies en contacto, que lo que se lograría con un lubricante normal, con lo cual se reduce al mínimo el contacto de metal con metal y la consecuente fricción y desgaste.

Estos aditivos de extrema presión son relativamente inactivos a bajas temperaturas, pero aumentan su actividad rápidamente conforme se incrementa la temperatura. En vista de que las temperaturas locales generadas en los engranes son muy elevadas debido al contacto metálico, los aditivos reaccionan con rapidez para formar película en las superficies expuestas del metal.

Por lo tanto, la actividad de los aditivos es hasta cierto punto determinada automáticamente por los requerimientos de los engranes.

5.1.2.- Rayadura

Los fenómenos antes descritos en condiciones de una lubricación límite (corte, deformación, inserción y soldadura), producen altas temperaturas en las pequeñas áreas de contacto, las cuales son de una corta duración y se conocen como temperaturas instantáneas. En el caso de cargas ligeras y bajas velocidades, la pequeña cantidad de calor involucrado es conducida hacia el exterior y no se produce un aumento excesivo en la temperatura general de las superficies.

Por otra parte, en el caso de cargas pesadas y grandes velocidades de rotación, el número de contactos, o sea, el número de veces que hace contacto un área determinada, puede ser tan grande que el calor generado no pueda ser disipado, provocando el consecuente calentamiento de las superficies.

Cuando el lubricante es inadecuado, o cuando la condición de trabajo es tan extrema para cualquier lubricante, puede ocurrir soldadura, ruptura y/o flujo excesivo de las superficies del material. Al daño que de todo esto resulta se le conoce como rayado o abrasión, o bien, en su forma más leve como desgaste.

5.1.3.- Apariencia

Los dientes de los engranes de acero asumirán un aspecto desde un gris opaco, hasta bruñido. Así, un brillo demasiado intenso nos indicará un desgaste excesivo (el cual puede ser resultado de mala lubricación o por corrosión).

El desgaste, como se ve en la figura 5.1.1, ocurre primero en las puntas de los dientes cuando los esfuerzos de compresión y -- las velocidades de rotación son altas. Así mismo, puede presentar se al principio de la vida del engrane, es decir, poco después de que empieza a operar en condiciones de velocidad y carga máxima. El área afectada se endurece mostrando marcas (un endurecimiento por trabajo), en la dirección de la rotación. Una revisión de -- dichas marcas mostrará un aspecto de ruptura y arrastre. Aquí se hace necesario vigilar el funcionamiento para ver el tipo de desgaste, si es del tipo que desaparece después de un periodo inicial, o bien, si progresa hasta llegar a convertirse en rayadura.

El rayado implica daños más graves y extensos a las superficies de los dientes que el desgaste, lo cual se muestra en la figura 5.1.2. En estas condiciones, la eliminación del material es relativamente rápida.

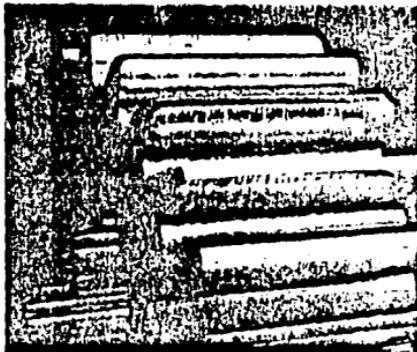


Figura 5.1.1. En esta figura se aprecia la apariencia del desgaste a velocidades altas y con una compresión elevada.



Figura 5.1.2. Apariencia de la rayadura sobre la superficie de una rueda dentada.

Es probable que el rayado sea progresivo debido a que la rugosidad en forma de bordes en la dirección del deslizamiento tiende a cortar a través de la película lubricante. No obstante, aún la mala alineación causa que la carga pesada en combinación con grandes velocidades de rotación nos provoque rayadura y la eliminación del material puede tender a corregir la mala alineación y a llevar la carga pesada. Después de esto, en algunas ocasiones puede interrumpirse el rayado, haciendo una limpieza del lubricante y de la unidad en general.

5.1.4.- Control del desgaste y rayadura

Como se mencionó en este punto, el desgaste y el rayado implican que hay un contacto de metal con metal a través de la película de lubricación, pero este tipo de daño en la superficie no es necesariamente debido a una falla en la lubricación.

En algunos casos el diseño de fabricación, el proceso de fabricación, o la aplicación a que son sometidos los engranes producen condiciones que ningún lubricante puede resistir, como por ejemplo, rugosidad excesiva de las superficies, vibraciones o cargas de impacto, o bien, cargas excesivas sobre los dientes junto con bajas velocidades de rotación causando esto desgaste o bien rayadura.

Ahora bien, en algunos casos la causa de falla se debe a una incorrecta práctica de lubricación, por ejemplo:

- 1) El uso de un tipo de viscosidad menor al adecuado
- 2) El no poder mantener el nivel adecuado de aceite, flujo, temperatura y distribución sobre el ancho de cara de los engranes.

Estos factores relativos a la lubricación y enfriamiento de engranes se interrelacionan en varias formas, por ejemplo, tal vez se utilice un aceite correcto en el servicio, pero debido al mal enfriamiento, la temperatura puede llegar a ser tan elevada que su viscosidad sea inferior a la recomendada.

Frecuentemente si es posible detectar e identificar la condición que causa la falla para que sea corregida antes de que los engranes sean severamente dañados, ejemplo de esto se ve en que algunas veces si es posible repararla, rectificar las superficies o mejorar las prácticas de lubricación, así como también en ciertas instancias es posible detener el desgaste y rayado utilizando aceites de mayor viscosidad. Sin embargo, cuando los engranes son claramente inadecuados para la aplicación que se pretende, no es posible que con los cambios de lubricante se solucione el problema, en este caso los engranes se deben reemplazar.

5.2.- Fallas por sobrecarga

La sobrecarga se produce cuando los esfuerzos que se generan durante la operación del engrane rebasan el límite de resistencia a la fluencia del metal, esto solo puede ocurrir en los casos de inicio o paro de la unidad, o bien cuando los engranes están mal diseñados, o cuando la unidad sufre atorones, los cuales se deben a la presencia de un material sólido extraño dentro de la unidad de operación. Generalmente éste es el material de trabajo de la unidad.

5.2.1.- Flujo plástico por sobrecarga

El flujo plástico se refiere a la deformación permanente de la superficie metálica de los dientes de los engranes, debido a carga excesiva; asimismo, tendremos flujo plástico debido a cargas de impacto en engranes cuyo material sea suave o dúctil.

Este tipo de falla por sobrecarga es una de las más comunes en los reductores de velocidad, debido a que en algunos instantes, tales como arranques o atorones se rebasa la capacidad de las unidades. Por ejemplo, una unidad diseñada para 1000 H.P. a la cual le colocamos un motor de 1000 H.P., el motor en el arranque nos puede dar hasta 3 veces su capacidad de par torsional, ya que como se sabe, si hay mucha resistencia del reductor al inicio de su operación, el motor tenderá a dar más par si esto le es requerido, para poner en funcionamiento el equipo. Ahora bien, lo mismo sucede en los atorones. Inclusive podemos observar que el medidor de corriente se incrementará hasta el máximo, con lo cual nos puede proporcionar hasta 6 veces la capacidad del motor. De esto que estamos hablando, fue posible saberlo por prácticas realizadas a motores usando el freno de potencia para estimar los valores. La figura 5.2.1 nos muestra una falla por sobrecarga la cual nos provocó que hubiera fluencia plástica.



Figura 5.2.1. Falla por fluencia plástica causada por sobrecarga.

5.2.2.- Falla por sobrecarga debida a impacto

Ahora tenemos también la falla por sobrecarga pero considerando que tuvo una carga de impacto, la cual en el mismo instante de la sobrecarga-impacto se produce la fractura. La apariencia de este tipo de falla es mostrado en la figura 5.2.2.



Figura 5.2.2. Aspecto de una falla por impacto-sobrecarga en el diente de un engrane.

Las superficies en este tipo de fractura serán más burdas y granulares que en el caso de fracturas por fatiga.

Los materiales más dúctiles tendrán un aspecto más fibroso y -- destrozado.

5.2.3.- Corrección

Al igual que otras fallas, el advertirlo nos puede permitir su corrección a tiempo. Por ejemplo, será posible reducir la carga de los dientes al disminuir el rendimiento de energía, o bien, la carga de choque si esta se debe a una condición externa; o en otros -- casos, cuando la viscosidad ha sido demasiado baja, como por ejemplo, la que se obtiene a altas temperaturas de operación; se puede detener la fluencia plástica sustituyendo el aceite lubricante por uno de mayor viscosidad, ya que éste nos proporcionará un mejor -- amortiguamiento con una película adecuada de lubricante para la -- fricción; esto a su vez trae desventajas tales como que el aceite de mayor viscosidad no sea el adecuado para los rodamientos, considerando que en la mayoría de los casos se usará éste, tanto para lubricar como para refrigerar los trenes y rodamientos de la unidad. Ahora bien, entre las causas de la ruptura tenemos una mala -- alineación, fallas de los cojinetes, así como el paso de grandes -- piezas o partículas a través de los engranes. También tenemos el caso de que cuando se rompen varios dientes o partes de algunos, -- su inspección nos puede revelar que la primera ruptura fue por fatiga del material y las demás ocurrieron como un resultado de una carga de choque causada por partículas del diente roto.

5.3.- Fatiga en los dientes

Fatiga en la superficie de los dientes es una de las fallas que se presenta con mayor frecuencia, como resultado del picado que se presenta sin excepción en todos los dientes en el inicio de operación de los engranes. La apariencia de este tipo de falla es clasificada como un picado inicial, picado destructivo y en algunas ocasiones despostillado. Si bien la fatiga se da en un sistema dinámico que determina el comportamiento relativo de los materiales, -- cuando se les somete a cargas repetidas o fluctuantes como resultado del trabajo desarrollado, la presencia de picadura provocará fatiga en los dientes de las ruedas dentadas en relativamente pocos ciclos, a consecuencia del debilitamiento del diente.

El sistema dinámico de esfuerzos se presenta cada vez que el -- diente pasa a través del engraneje rodando y deslizándose uno con respecto del otro, la superficie y subsuperficie del material están sujetas a tensión, compresión y esfuerzo cortante, tal y como se ilustra en la figura 5.3.1.

En la figura 5.3.1, en la vista superior derecha, en donde las ruedas giran a la misma velocidad es comparable al contacto entre los dientes del engranaje en la línea de paso donde no hay deslizamiento, asemejándose a una banda plana de contacto más que a una línea debido a la deformación elástica que ocurre bajo la carga. -- La banda está bajo compresión, la cual es máxima en el centro, -- mientras que en los extremos del contacto el material se desplaza formando abolladuras al frente y detrás de la banda. Tal desplazamiento produce la tensión y el corte de la subsuperficie en las áreas indicadas, cuya magnitud depende de los materiales y fuerzas aplicadas.

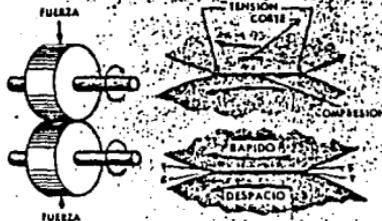


Figura 5.3.1. Esfuerzos que se generan en los dientes de los engranes al estar en funcionamiento.

Cuanto menor sea el radio de una u otra, más estrecha será la banda de contacto y mayores las tensiones de la unidad. La ilustración inferior de la figura 5.3.1 ubicada a la derecha, simula la situación entre los dientes del engrane al alejarse de la línea de paso donde se está deslizándose, así como la acción de rodadura. Las fuerzas de fricción imponen tensiones adicionales de la superficie, o sea, compresión en las líneas marcadas con la letra C y tensión en las marcadas con T. En cualquier caso, cada parte de metal que está en y cerca inferiormente a la superficie, está sujeta a compresión, tensión y corte cada vez que se pone en contacto. Después de un gran número de repeticiones de tensión puede ocurrir alguna falla en la superficie, pueden formarse pequeñas grietas en y debajo de ésta, aumentar de tamaño y finalmente unirse. Por último, las pequeñas partes de metal son separadas y forzadas a salir, dejando huecos. La fatiga superficial puede ocurrir después de algunas revoluciones, si debido a las condiciones de carga las tensiones son mayores de lo previsto.

5.3.1.- Picado inicial

Los puntos altos o la rugosidad de la superficie del diente de los engranes nuevos son sometidos a altas tensiones. Aún en condiciones normales, las pequeñas áreas involucradas pueden presentar fatiga en relativamente pocos ciclos.

Cuando estos puntos altos o la rugosidad se encuentran a corta distancia de la línea de paso, en donde puede ocurrir el deslizamiento y rodadura, pueden eliminarse durante los primeros ciclos de operación sin llegar a causar fatiga, originando sólo una picadura inicial correctiva. Tal picadura se presenta en y cerca de la línea de paso donde hay rodamiento pero no acción de deslizamiento por lo cual se denomina "picadura de la línea de paso", dicho tipo de picadura se muestra en la figura 5.3.2.



Figura 5.3.2 Apariencia que muestra una picadura que se genera en la línea de paso de los engranes.

El hecho de que la dirección de deslizamiento sea inversa en la línea de paso, también se considera como un factor de que se genere picadura en la línea de paso.

La picadura inicial puede ser corregida cuando se elimina la rugosidad pues la tensiones se relevan, lo que provoca que esta se detenga.

5.3.2.- Picadura destructiva

Esta falla se presenta generalmente en las áreas de la raíz de los dientes impulsores y después de largos periodos de operación, dicha picadura se muestra en la figura 5.3.3.



Figura 5.3.3. Apariencia de la picadura destructiva

Sin embargo si la carga es suficientemente grande, este tipo de picadura ocurrirá con frecuencia en un período de operación relativamente corto. Ahora el hecho de que este tipo de picadura se presente en la área de la raíz del diente impulsor se da por dos motivos:

- 1) El impulsor es generalmente menor en diámetro y registra un mayor número de revoluciones y el menor número de dientes - del impulsor está sujeto a más esfuerzos sucesivamente.
- 2) En los dientes impulsores la dirección de deslizamiento es opuesta a la del rodamiento entre las superficies, y el alargamiento del metal de la superficie que resulta, favorece la presencia de grietas debidas a la fatiga y finalmente a la formación de picaduras.

En el caso de picadura progresiva o destructiva, ésta sigue formándose y aumenta de tamaño conforme se destruyen los bordes o con forme se unen unas a otras afectando el diente, dando como resultado un funcionamiento ruidoso y si esta condición prevalece los - dientes pueden llegar a fracturarse.

Otra de las causas que producen picadura destructiva es el tener engranes mal acoplados o alineados. El metal que está en la punta o extremos de los dientes puede esforzarse hasta sobrepasar su límite de resistencia, lo que producirá picadura como la que - se ilustra en la figura 5.3.4.



Figura 5.3.4. Picadura destructiva causada por un des-- alineamiento que provoca que el material rebase su límite de resistencia a la tensión.

En algunos casos la picadura destructiva también se denomina -- "cascado", especialmente cuando porciones grandes de material se "astillan" o cuando pequeñas porciones se unen con otras, formando huecos más grandes.

5.3.3.- Causas y correcciones

La picadura ha sido definida como una de las causas de que se presente la fatiga, que resulta de una combinación de demasiada tensión y prolongado tiempo de operación, los cuales superan la resistencia que el material del engrane tiene contra la fatiga. Generalmente el "esfuerzo excesivo" es el resultado de sobrecargas. Por otra parte, este tipo de falla puede ocurrir debido a una durabilidad inadecuada de la superficie del material del engrane.

La resistencia a la compresión, la cual es aproximadamente proporcional a la dureza Brinell, es el factor más importante en la durabilidad de la superficie del material.

Cuando se detecta picadura destructiva, sería recomendable reducir las cargas del engrane. Sin embargo, esto no resulta práctico a menos que las cargas excesivas se deban a una mala alineación, lo cual sí puede corregirse. De otra manera, los engranes deberán ser vigilados cuidadosamente para determinar el grado de picadura y a su tiempo deberán ser reemplazados con engranes adecuados antes de llegar a la fractura de los dientes.

Los medios de los cuales dispone el diseñador de engranes para reducir las tensiones en las superficies de los dientes incluyen:

- 1) Utilización de diámetros más grandes o caras más amplias en los engranes, medidas que producen una reducción de esfuerzos en los dientes de los engranes.
- 2) Utilización de ángulos de presión mayores o formas modificadas de los dientes, lo cual produciría un radio más largo del diente del piñón y menor esfuerzo de compresión para determinada carga del diente.
- 3) Como se ha indicado ya, el uso de materiales más duros y de mayor resistencia .

Aunque la picadura no es el resultado de falla debido a la lubricación, puede ser retardada en algunos casos al utilizar un aceite de una viscosidad mayor que la normal o bien con características adicionales contra el desgaste y/o corrosión, lo cual tenderá a mejorar la distribución de esfuerzos.

Fundamentalmente, la fatiga es un problema metalográfico ya que un incremento en la dureza del material del diente debe de minimizar el problema de fatiga en la superficie, considerando que tendremos falla por fatiga, cuando el máximo esfuerzo a que está sometida la rueda dentada sea menor que el de la resistencia a la cedencia del material. Un perfil de diente con dureza elevada nos evitará que se dé el picado, aunque tendremos fragilidad con el incremento de dureza, pero si una repentina sobrecarga es tal que sobrepase el límite de resistencia del material, el problema deja de ser fatiga, para analizarse desde otro punto de vista como lo sería la falla por impacto.

Una ruptura por fatiga es de un aspecto liso y pulido, además de que muestra una serie de círculos laminados, denominados dunas, alrededor de un punto focal de inicio, esta fractura es de un color brillante generalmente.

5.3.4.- Ruptura por fatiga

Este tipo de ruptura es el resultado de una excesiva repetición de esfuerzos flexionantes que sobrepasan el límite de resistencia del material. A menudo también participan en ello algún tipo de elevador de esfuerzos, como los defectos de la superficie o subsuperficie del material, como lo podrían ser las entalladuras, muescas, poros en el material, etc.. Generalmente las rupturas debidas a fatiga ocurren a causa del incremento gradual de una o varias rupturas durante períodos muy grandes. La superficie de la ruptura final será generalmente bastante suave y el ojo de la misma, es decir el elevador de tensión en donde se inició, será visible.

5.4.- Otros tipos de falla

5.4.1.- Grietas de temple

Son el resultado de excesivos esfuerzos internos, los que no son liberados inmediatamente después del temple, éstas se presentan en piezas que han sido templadas, ya sea por una excesiva dureza alcanzada por medio de este proceso o bien por dejar un período de tiempo considerable antes de revenir las piezas, así, también por este medio se pueden originar puntos blandos o duros, los cuales bajo carga pueden originar fatiga. Generalmente las grietas son visibles y pueden correr atravesando la parte superior de la superficie del diente, o bien en la raíz a lo largo de esta, un ejemplo de esto se muestra en la figura 5.4.1.

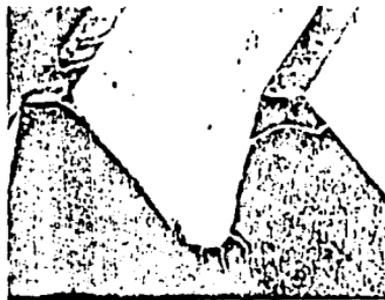


Figura 5.4.1. Grietas generadas en el temple de una rueda dentada.

Si la grieta es grande, esta puede resultar en una falla simi-- lar a la que se tiene en una falla por sobrecarga después de pocos ciclos de operación relativamente.

5.4.2.- Material extraño en el lubricante

Con frecuencia los dientes de los engranes se dañan debido a el paso de materiales a través de los mismos. Dichos materiales inclu yen abrasivos finos tales como polvo, suciedad, oxidos, arena, es-- camas de fundición, partículas de material desgastado de los mis-- mos engranes y a veces grandes piezas de metal tales como tuercas, herramientas o virutas.

Los abrasivos finos que contaminan el lubricante de los siste-- mas de engranajes pueden tener efecto de pulimento, lo cual produ ce un desgaste rápido, particularmente en la raíz y las puntas de los dientes en donde el deslizamiento es mayor. Las superficies -- quedarán lisas, bien pulidas, pero se alterará el perfil de evol-- vente de los dientes; este tipo de daño debe ser considerado como abrasión y diferenciarse del desgaste debido al contacto metal con metal.

Cuando los materiales o materias en el lubricante son burdas y angulosas tales como arena, las superficies de los dientes ten-- drán un aspecto de raspadura, tal y como se ve en la figura 5.4.2.

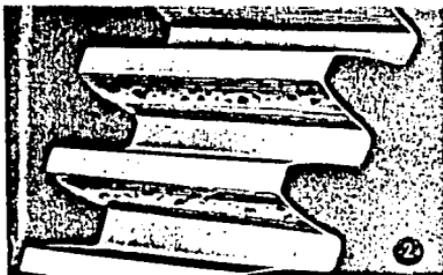


Figura 5.4.2. Aspecto que muestra la acción de un agente extraño en el material lubricante sobre la superficie de los dientes.

Ahora bien, cuando una partícula relativamente grande y dura - pasa a través del engranaje, puede muesquear o transtornar única-- mente los dientes ajustados, pero sin embargo, la velocidad de las ruedas dentadas será tal que entrarán todos los dientes en contac-- to, con lo cual cada diente presentará marcas similares a aquellas del par original, tal y como se muestra en la figura 5.4.3.

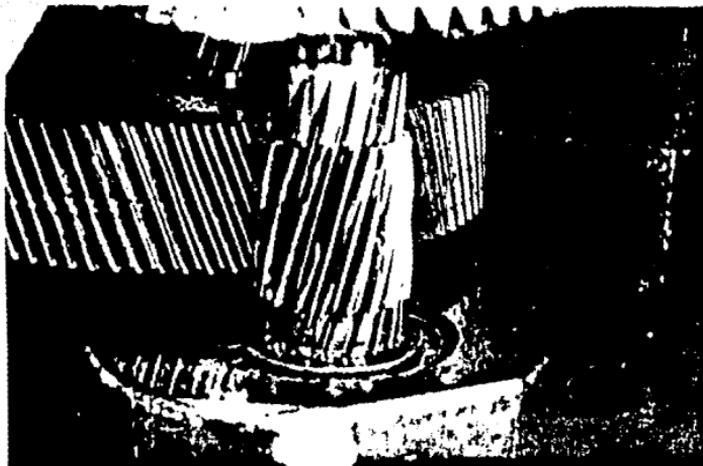


Fig. 5.4.3. Marcas dejadas por una partícula relativamente grande sobre la superficie de los dientes de una rueda dentada.

5.4.3.- Corrosión

Se presenta como un deterioro de la superficie del diente debido a la acción química de un ácido o por contaminación excesiva del lubricante, más que por la humedad existente en el lugar de operación del engranaje. Esto puede ocurrir bajo diferentes circunstancias; por ejemplo, si el lubricante viene contaminado con algún ácido, el perfil del diente llega a picarse ligeramente y de no tomar medidas de protección inmediata el picado progresará hasta llegar a la corrosión de los dientes de la rueda dentada. Este caso no es común encontrarlo, solo en raras ocasiones, si bien se tiene un control adecuado de la selección y limpieza del lubricante, también se protegen todos los componentes de un sistema de engranes contra la corrosión.

5.4.4.- Interferencia

Para que los dientes engranen y compartan cargas en forma adecuada, deben ser diseñados y fabricados con precisión, pequeños errores en la forma o espaciado de los dientes pueden causar los siguientes efectos:

- 1) Que la punta del diente impulsado penetre en el flanco del impulsor en el punto de acoplamiento.
- 2) Que la punta del diente impulsor penetre en el flanco del impulsado en el punto de separación. A este contacto inadecuado se le conoce como interferencia.

Este contacto denominado como contacto con interferencia también puede ser causado por una distancia entre centros reducida, de tal manera que no exista huelgo en el engranaje entre piñón y rueda dentada, aunque como ya se mencionó básicamente es ocasionado por el sobreespesor del diente de las ruedas dentadas. La concentración de cargas en este caso es tal que ningún lubricante puede resistirla. El resultado de esto es la presencia de un cierto grado de corte, como puede observarse en la figura 5.4.4.

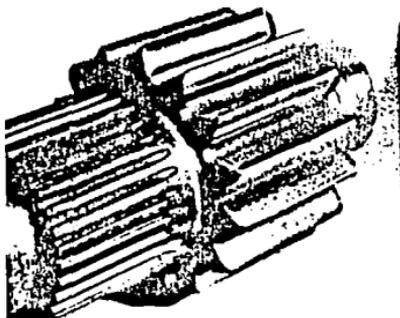


Figura 5.4.4. Marcas dejadas por el efecto de interferencia en el engranaje, notándose una marca en la zona de fin de contacto en el momento de estar rotando.

En estos tipos de falla, generalmente tendremos la presencia de picadura en todos los trenes de engranes, en los primeros periodos de trabajo de los mismos, esto se debe a que generalmente tendremos irregularidades en las superficies de los dientes, debidas al grado de acabado obtenido de la generación de ruedas dentadas; dichas irregularidades tenderán a desaparecer y expandirse en los inicios de operación. La corrección o propagación de este picado está en función de las condiciones de trabajo, lubricación, así como de que las irregularidades no sean demasiado críticas, de tal forma que se eliminen con los primeros arranques y frenados de la unidad, de seguir este tipo de falla, podrá llegar a ser tal que nos ocasionen un desgaste acelerado, con el consecuente debilitamiento del diente y falla de éste.

CONCLUSIONES

Como se ha visto en el contexto del presente trabajo, el estudio de la fabricación y funcionamiento de engranes abarca tanto selección, manufactura, evaluación de manufactura y condiciones de funcionamiento de las unidades, ya que nuestro estudio se basa en la fabricación y el funcionamiento de engranes rectos y helicoidales, estamos contemplando las variantes que nos presentarían sus aplicaciones en los reductores de velocidad.

Si consideramos en un conjunto todos los problemas que nos provocan los errores en la fabricación, nos da una idea del porqué del estudio de la fabricación de los engranes, ya que conociendo la manera correcta de realizar los procesos de fabricación de engranes rectos y helicoidales para reductores de velocidad, nos evitaríamos muchas fallas cuando se encuentran en funcionamiento dentro de las unidades.

Como se puede observar del contenido del trabajo, la fabricación es de vital importancia, debido a que una fabricación bien realizada nos evitaría problemas, ya que son los errores de fabricación -- los que harán que la unidad, hablando ya del funcionamiento del reductor de velocidad, tenga problemas de mal contacto en los dientes debido a desviaciones de la hélice de los engranes; o bien el mismo problema nos podrá dar como resultado que se tengan contactos cruzados en el ensamble de las piezas.

A su vez, un problema de espaciamiento nos provocará ruido excesivo en el funcionamiento de la unidad, así como desgaste en los engranes y vibraciones, lo cual influye en la vida útil de estos.

La excentricidad nos provocará que haya contactos fuertes sólo en determinadas secciones de las ruedas dentadas, así como contactos a diferentes alturas de los dientes, fallando el engrane prematuramente por fatiga y/o sobrecarga.

El error de perfil o evolvente también es uno de los causantes de fallas, pues si el engrane está diseñado para tener un contacto en la línea de paso y tenemos error en el perfil, pudiera darse el caso de que tuvieran protuberancias en la punta del diente, éste se esforzara sólo en esa área, teniendo como resultado que se realice un esfuerzo en voladizo, ya que el contacto debe de ser en la línea de paso.

El huelgo entre dientes también nos generará problemas si éste es muy grande, ya que habrán aceleraciones instantáneas, las cuales nos ocasionarán un funcionamiento ruidoso e impactos en los dientes provocándonos desgaste y que el engrane pudiera fatigarse en los dientes.

También es necesario mencionar que un tratamiento térmico mal realizado nos provocará problemas, ya sea en la dureza requerida para una aplicación dada o que tenga tensiones internas o agrietamientos que repercutirán en el funcionamiento de los reductores de velocidad haciendo que los engranes fallen repentinamente y nos dañen otras partes del reductor de velocidad.

Una vez que se ha asegurado una adecuada fabricación nos enfrentamos ahora a los problemas que se presentan en el funcionamiento - de los reductores de velocidad.

El funcionamiento presenta una predicción más compleja debido a los diversos modos de aplicación, por mencionar alguno, en las cementerías, en cuyas instalaciones se tiene constantemente una atmósfera de polvo de cemento, el cual si se llega a introducir a los trenes de engranes nos contaminará el lubricante refrigerante y esto nos acelerará el desgaste en los dientes, disminuyéndonos con esto la vida de los engranes.

La lubricación es otro de los problemas a los cuales se les tiene que hacer frente, esto es necesario para evitar el desgaste excesivo y el sobrecalentamiento de los engranes, ya que esto nos provocaría cambios estructurales en el acero de los engranes y una falla prematura, así como que se presentará un flujo metálico en el perfil del diente, lo que nos provocaría deformaciones y consecuentemente concentraciones de carga y esfuerzos, llegando a fracturarse el diente.

Los engranes de los reductores de velocidad trabajan muchas veces en condiciones de lubricación límite, o sea que la capa de lubricación es muy pequeña y parcial, esto es debido a su funcionamiento generalmente de baja velocidad, en las cuales no logra formarse la cuña de aceite entre las superficies metálicas de un espesor aceptable, y esa pequeña capa es la que soportará la carga que se produzca entre las superficies, por lo que se requieren de aceites de lubricación más viscosos y con aditivos para evitar que la carga llegue a romper la película de aceite.

Otras fallas son inducidas por elementos externos al engranaje - tales como vibraciones de la máquina, las que se deban a desbalances o a fallas de los rodamientos, y esto nos provocará que se rompa la película de lubricación entre los engranes y genere un desgaste acelerado en estos y una disolución del lubricante debido a las altas temperaturas que se generan debido al contacto de metal con metal.

Otra de las fallas comunes es que los engranes fallen debido a una mala aplicación de los reductores, o sea que fallen por sobrecarga. Para esto se deben de tomar en cuenta para la selección del reductor los siguientes factores:

- Tipo de potencia
- Velocidad de funcionamiento
- Picos de carga de la unidad motriz
- Par de la máquina a ser movida
- Temperatura ambiente
- Medio ambiente (humedad, corrosión, u otros gases o líquidos)
- Sentido de rotación o si va a girar en ambos sentidos
- Tipo de reductor y del arreglo de las flechas
- Accesorios que lleva la otra máquina

Estos es con el fin de seleccionar adecuadamente el tamaño del reductor, así como su método de lubricación y tipo de lubricante.

B I B L I O G R A F I A

- 1.- "Nomenclature of Gear-Tooth, Wear and Failure"
NORMAS AGMA 110.03, Vigencia desde 1964
- 2.- "Nomenclature of Gear Tooth Failure Modes"
NORMA ANSI/AGMA 110.04, Agosto 1980
- 3.- "Metallography and Heat Treatment of Iron and Steel"
Albert Sauveur, Conferencia Nueva York y Londres 1973
- 4.- "The Design, Manufacture and Application of Gears"
Dale W. Dudley, Edit. Mc Graw Hill Book Company, Inc.
New York-Toronto-London, 1962
- 5.- "Gear Drive Systems, Designs and Application"
Peter Lynwander, Edit. Marcel Dekker, Inc.
New York and Basel, 1986
- 6.- "Cinemática de las máquinas"
Gillet, Edit. CECSA 5a. Edición
- 7.- "Diseño en Ingeniería Mecánica"
Joseph Edward Shigley, Edit. Mc Graw Hill
2a. Edición
- 8.- "Análisis Cinemático de Mecanismos"
Joseph Edward Shigley, Edit. Mc Graw Hill
2a. Edición
- 9.- "Defectos y fallas de los metales"
Polushkin E. P. , Edit.
- 10.- "Manual de Mantenimiento Industrial"
L.C. Morrow, Edit. Continental, S.A. de C.V.
Tomo II