

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE FALLA DE UN VARIADOR DE VELOCIDADES CON ENGRANE HELICOIDAL DE COBRE ACOPLADO A UN TORNILLO SINFIN DE ACERO

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

LUIS FERNANDO BUSTAMANTE REVELO

EMAIL: nandobu88@outlook.com

ÁLVARO ROLANDO CUÁSQUER VILLOTA

EMAIL: rolando.cuasquer@gmail.com

DIRECTOR: ING. CARLOS DÍAZ

EMAIL: carlos.diaz@epn.edu.ec

CODIRECTOR: ING. RICARDO SOTO

EMAIL: ricardo.soto@epn.edu.ec

Quito, Septiembre 2015

DECLARACIÓN

Nosotros, Bustamante Revelo Luis Fernando y Cuásquer Villota Álvaro Rolando, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Bustamante Revelo Luis Fernando

Cuásquer Villota Álvaro Rolando

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Bustamante Revelo Luis Fernando y Cuásquer Villota Álvaro Rolando, bajo mi supervisión.

Ing. Carlos Díaz

DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Ricardo Soto

CODIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi familia, en especial a mis padres por el invaluable e inmenso esfuerzo que han realizado para brindarme la oportunidad de alcanzar esta meta, y sueño también. A mis hermanos, por su apoyo incondicional en todo momento. A mis compañeros por su buen consejo a lo largo de la carrera. A nuestro Director, por habernos guiado con generosidad y paciencia en la realización del proyecto a través de su dedicación y amplio conocimiento, y cómo no, a todo el personal que trabaja en el Laboratorio de Metalografía por su colaboración en desarrollo de los ensayos requeridos en la elaboración de este trabajo.

Luis

Agradezco a Dios por ser tan generoso conmigo. A mis queridos padres por todo el esfuerzo y sacrificio realizado para ver cumplida esta meta que no es solo mía sino de toda mi familia. A mis hermanos por su apoyo constante a lo largo de toda la carrera. Al Ingeniero Carlos Díaz por toda su ayuda para la realización de este proyecto. Al personal del Laboratorio de Metalurgia por su cooperación en la realización de los ensayos.

Rolando

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mi padre y a mi madre, a sus manos trabajadoras, su dedicación en formar personas de bien, y su anhelo de ver a sus hijos valiéndose por sí mismos. De igual manera a mis hermanos, Elizabeth y Richard, por estar siempre presentes y brindarme aliento en cualquier situación.

Luis

Dedico este proyecto a Dios por ayudarme a cumplir esta meta. A mi padre Miguel por sus consejos y su apoyo incondicional. A mi madre Margarita por su paciencia y perseverancia. A mis hermanos Javier, Rosa y Jairo por confiar siempre en mí.

Rolando

CONTENIDO

DECLARACIÓN	II
CERTIFICACIÓN	III
AGRADECIMIENTO	IV
DEDICATORIA	V
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE GRÁFICAS	XIV
ÍNDICE DE TABLAS	XV
RESUMEN	XVII
PRESENTACIÓN	XVIII
CAPÍTULO I	1
MARCO TEÓRICO	1
1.1 DESCRIPCIÓN DEL REDUCTOR DE VELOCIDAD DE SINFÍN- CORONA	1
1.2 ENGRANE SINFÍN CORONA	2
1.3 TIPOS DE ENGRANES DE TORNILLO SINFÍN	3
1.3.1 TORNILLO SINFÍN CILÍNDRICO Y CORONA CILÍNDRICA	3
1.3.2 TORNILLO SINFÍN CILÍNDRICO Y CORONA GLOBOIDAL	3
1.3.3 TORNILLO SINFÍN Y CORONA GLOBOIDAL	3
1.4 FORMA DE LOS FLANCOS EN TORNILLOS SINFÍN	4
1.5 MATERIALES	6
1.6 TRATAMIENTOS TÉRMICOS	7
1.6.1 TRATAMIENTOS TÉRMICOS PREVIOS	7
1.6.2 ENDURECIMIENTO	8
CAPITULO II	11
MODOS DE FALLA	11

2.1	INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE FALLA.....	11
2.2	ETAPAS DEL ANÁLISIS DE FALLA.....	12
2.2.1	HISTORIAL DE LA PIEZA	12
2.2.2	EXAMEN VISUAL Y RECOLECCIÓN DE MUESTRAS.....	12
2.2.3	ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	12
2.2.4	ENSAYOS MECÁNICOS	13
2.2.5	EXAMEN MACROSCÓPICO	13
2.2.6	EXAMEN MICROSCÓPICO	13
2.2.7	ANÁLISIS QUÍMICO	14
2.2.8	INFORME, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	14
2.3	MODOS DE FALLA EN ENGRANAJES	14
2.3.1	FALLA POR FATIGA	15
2.3.2	FALLA POR IMPACTO	23
2.3.3	FALLA POR DESGASTE.....	26
2.3.4	FRACTURA POR ESFUERZO	31
CAPITULO III.....		35
ESTUDIO CASO PRÁCTICO		35
3.1	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS Y GEOMÉTRICAS DEL REDUCTOR 35	
3.2	GENERACIÓN DEL MODELO CAD.....	38
3.3	ANÁLISIS QUÍMICO	42
3.4	EXAMEN MACROSCÓPICO	43
3.4.1	MACROSCOPIA DEL TORNILLO SINFIN	43
3.4.2	MACROSCOPIA DE LA CORONA.....	45
3.5	EXAMEN MICROSCÓPICO.....	47
3.5.1	METALOGRAFÍAS	47
3.5.2	METALOGRAFÍAS PARA EL CASO DE ESTUDIO	52
3.6	ENSAYO DE DUREZA.....	57
3.6.1	ENSAYO DE DUREZA EN EL SINFIN	57
3.6.2	ENSAYO EN LA CORONA	59
3.7	ANÁLISIS DE ESFUERZOS	60

3.7.1	RELACIÓN DE FUERZAS	61
3.7.2	ESFUERZOS EN LOS DIENTES DE LA CORONA	64
3.8	SIMULACIÓN DE ESFUERZOS EN LA CORONA	66
3.8.1	CONDICIONES NOMINALES.....	66
3.8.2	CONDICIONES DE SOBRECARGA	70
CAPÍTULO IV.....		73
ANÁLISIS DE RESULTADOS		73
4.1	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS Y GEOMÉTRICAS DEL REDUCTOR 73	
4.2	COMPOSICION QUÍMICA	74
4.2.1	COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL TORNILLO SINFÍN	74
4.2.2	COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA CORONA.....	74
4.3	MACROSCOPIA	75
4.3.1	MACROSCOPIA DEL TORNILLO SINFÍN	75
4.3.2	MACROSCOPIA DE LA CORONA	76
4.4	MICROSCOPIA.....	76
4.4.1	MICROESTRUCTURA DEL TORNILLO SINFÍN	76
4.4.2	MICROESTRUCTURA DE LA CORONA	77
4.5	DUREZA	78
4.5.1	DUREZA DEL TORNILLO SINFÍN.....	78
4.5.2	DUREZA DE LA CORONA	79
4.6	ESFUERZOS	79
CAPITULO V.....		81
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		81
5.1	CONCLUSIONES	81
5.2	RECOMENDACIONES	82
BIBLIOGRAFÍA		83

ANEXOS	86
ANEXO A	87
RESULTADOS DEL ANÁLISIS QUÍMICO	87
ANEXO B	89
CATÁLOGO DEL REDUCTOR	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Reductor de tornillo sinfín – corona	1
Figura 1.2 Tipos de engranes de tornillo sinfín: 1) Tornillo sinfín cilíndrico / Corona cilíndrica, 2) Tornillo sinfín cilíndrico / rueda globoidal, 3) Tornillo sinfín y corona globoidal	3
Figura 1.3 Diagrama de equilibrio hierro carbono.....	8
Figura 2.1 Diagrama de Whöler.....	16
Figura 2.2 Falla por flexión en la longitud media del diente.....	17
Figura 2.3 Marcas de trinquete.....	18
Figura 2.4 Fractura debido a pitting severo	19
Figura 2.5 Fractografía mostrando el avance de las etapas de macropitting .	20
Figura 2.6 Engranaje recto con micropitting cerca de la línea de paso	21
Figura 2.7 Fisura en un engranaje cementado debido a fatiga bajo la superficie endurecida.....	22
Figura 2.8 Esquema que relaciona los modos de falla de pitting y spalling....	23
Figura 2.9 Rotura de dientes por impacto. a) Con la dirección de la fuerza aplicada. b) Desde la raíz hasta la línea de paso.....	24
Figura 2.10 Cizallamiento de diente. Se indica la dirección de la carga aplicada.	25
Figura 2.11 Chipping como resultado de impacto con cuerpo extraño.	25
Figura 2.12 Desgaste abrasivo.....	26
Figura 2.13 Desgaste por adhesión.....	27

Figura 2.14 Desgaste corrosivo.....	28
Figura 2.15 Desgaste adhesivo o scuffing.....	29
Figura 2.16 Material transferido al flanco de un piñón.....	30
Figura 2.17 Grietas longitudinales en el flanco.....	31
Figura 2.18 Fractura de la cabeza del diente.	32
Figura 2.19 Fractura a través de una grieta en la cara del diente.	32
Figura 2.20 Plano de maclado.....	33
Figura 2.21 Región de maclado.....	33
Figura 3.1 Reductor de velocidades	35
Figura 3.2 Placa del reductor.....	36
Figura 3.3 Datos de entrada.....	38
Figura 3.4 Modelo CAD del sinfín-corona.....	39
Figura 3.5 Ancho de cara F , diámetro externo de corona D_{ae} , diámetro de punta corona D_{a2} , ángulo de chaflán de dientes δ , ángulo de hélice γ	40
Figura 3.6 Diámetro de raíz de corona D_{f2} , diámetro de paso de corona D_2 , distancia entre centros a_w , diámetro de raíz de sinfín D_{f1} , diámetro de paso de sinfín D_1 , diámetro externo de sinfín D_{a1} , paso axial p	40
Figura 3.7 Fractura del filete en la zona de contacto con la corona, sin aumento.	43
Figura 3.8 Presencia de marcas de playa donde se puede distinguir tres zonas, de iniciación, propagación y desgarre. Aumento a 4X.	44
Figura 3.9 Presencia de marcas de trinquete o dientes de sierra en la raíz del filete, Aumento a 4X.	44

Figura 3.10 Marca de maquinado cercana a la raíz del filete, de un ancho promedio de 363 μm . Aumento a 25X.....	45
Figura 3.11 Fractura en los dientes de la corona (1) y desgarre en la raíz de los dientes (2), sin aumento.	45
Figura 3.12 Desgarre del material en la raíz de los dientes. Aumento a 4X...	46
Figura 3.13 Aplastamiento en la raíz de los dientes. Aumento a 4X	46
Figura 3.14 Granos de Zinc en una lámina galvanizada.	47
Figura 3.15 Montaje de probetas.....	49
Figura 3.16 Montaje de la probeta de acero.....	52
Figura 3.17 Profundidad de endurecido en el flanco del diente.....	53
Figura 3.18 Micrografía del tornillo sinfín en el borde del diente, estructura martensítica ataque con agua regia, a) 500X. b) 1000X.	53
Figura 3.19 Micrografía del tornillo sinfín en el centro del diente, estructura de martensita revenida con inclusiones no metálicas de sulfuro de manganeso, ataque con agua regia, a) 100X, b) 500X.....	54
Figura 3.20 Extracción de la muestra de la corona.	54
Figura 3.21 Probeta de la corona	55
Figura 3.22 Presencia de fase delta en el borde de la falla, 500X.....	55
Figura 3.23 Deformación de la microestructura por aplastamiento en el borde de la falla, 500X.....	56
Figura 3.24 Presencia de maclas cercanas al borde de la falla, producto del sobreesfuerzo, 1000X. Nótese la presencia de grietas que provienen de la fase delta.	56
Figura 3.25 Microestructura en forma de dendritas, 100X.....	57

Figura 3.26	Distribución de la microindentaciones en la sección del filete del sinfín, se puede apreciar la zona endurecida, la misma que presenta un color más claro y cuyo espesor de aproximadamente 1,5 mm. Aumento a 10X.....	58
Figura 3.27	Microindentación a) en el borde del diente (punto 1), b) en el centro del diente (punto 16). Aumento 40X.....	59
Figura 3.28	Distribución de las microindentaciones a lo largo de la dirección radial de la corona.....	59
Figura 3.29	Microindentacion en la corona, a) Cerca al borde exterior de la corona (punto 1), b) Zona interna de la corona (punto 5). Aumento 40X.	60
Figura 3.30	Relación de fuerzas entre sinfín-corona.....	61
Figura 3.31	Descomposición de fuerzas.	62
Figura 3.32	Configuración del sólido para la simulación.	66
Figura 3.33	Superficies con movimiento restringido.....	67
Figura 3.34	Resultados, a) Esfuerzo máximo b) acercamiento	68
Figura 3.35	Refinamiento de la malla	69
Figura 3.36	Curva de convergencia para diferentes tamaños de mallado.....	70
Figura 3.37	Simulación con sobrecarga de 30%.....	71
Figura 3.38	Simulación con sobrecarga de 76,5%.....	72

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 2.1 Causas de falla en engranajes carburizados	11
Gráfica 4.1 Dureza vs distancia en el filete del sinfín	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Las formas estándar de conformidad con la norma DIN 3975-1.....	4
Tabla 1.2 Materiales utilizados para la fabricación de tornillos sinfín y coronas	6
Tabla 2.1 Modos de falla en engranajes	15
Tabla 3.1 Valores para funcionamiento a régimen nominal.	36
Tabla 3.2 Geometría general del engrane.	37
Tabla 3.3 Características de los componentes principales.	37
Tabla 3.4 Mediciones en el laboratorio.	37
Tabla 3.5 Parámetros geométricos y dimensionales.	39
Tabla 3.6 Comparación de parámetros.....	41
Tabla 3.7 Composición química del tornillo sinfín.....	42
Tabla 3.8 Composición química de la corona.	42
Tabla 3.9 Propiedades mecánicas de la aleación de cobre CuSn12Ni2-B.	43
Tabla 3.10 Reactivos comunes.....	51
Tabla 3.11 Dureza obtenida en la sección transversal del filete del tornillo sinfín desde el borde hasta el centro del mismo.	58
Tabla 3.12 Dureza en la sección transversal de la corona.	60
Tabla 3.13 Resumen de fuerzas.....	64
Tabla 3.14 Resumen de resultados para el cálculo de esfuerzos.....	65
Tabla 3.15 Resultados de la simulación y resistencia de la corona.	69
Tabla 3.16 Valores de sobrecarga.	70

Tabla 4.1 Error en la comparación.....	73
Tabla 4.2 Comparación de la composición química [%] del tornillo sinfín.....	74
Tabla 4.3 Comparación de la composición química [%] de la corona.....	75

RESUMEN

En el presente proyecto se desarrolla el proceso del análisis de falla orientado a un tornillo sinfín de acero y una corona de aleación de cobre, elementos mecánicos que conforman un reductor de velocidades perteneciente a un sistema mecánico de transmisión para la industria petrolera.

En el análisis de falla de componentes mecánicos, cualesquiera sean estos, un factor fundamental es el estudio de su funcionalidad, los procesos involucrados en su manufactura y su comportamiento ante las condiciones de operación, ya que serán determinados los tipos de sollicitaciones mecánicas a las que se someten los materiales, constituyendo así diferentes puntos de vista desde los cuales se puede tratar el caso.

Para la investigación referente al dimensionamiento se ha utilizado el modelado computacional en base a datos de catálogo y medición de parámetros geométricos de los elementos de estudio, y respecto al análisis de cargas, se ha desarrollado el cálculo manual de esfuerzos que luego es respaldado mediante simulación.

Se ha realizado la caracterización, tanto del material, como de la falla, la primera de ellas utilizando herramientas esenciales como lo son la micrografía, análisis químico y de dureza, y la segunda con la macrografía en base a las particularidades típicas de diferentes tipos de falla.

Finalmente se procesan los datos obtenidos en cada examen, sentando una relación entre ellas de manera que sea posible dar forma a una hipótesis y establecer la conclusión que responda a todas las interrogantes de la falla analizada.

PRESENTACIÓN

La falla de un equipo puede acarrear graves consecuencias económicas y en el peor de los casos pérdidas humanas, de ahí la importancia de realizar un análisis de falla con el objetivo de determinar y subsanar la causa raíz de la falla.

En el presente proyecto se presenta caracterización y análisis de falla de un variador de velocidades con engrane helicoidal de cobre acoplado a un tornillo sinfín de acero, el mismo que transmitía potencia a un agitador de lodos de perforación.

El análisis de falla se fundamenta en ensayos metalográficos en los que constan la macrografía y micrografía, además para comprobar el tipo y propiedades de los materiales se realizan ensayos de dureza y de composición química, finalmente para conocer el esfuerzo nominal se realiza el análisis de esfuerzos acompañado de la simulación computacional.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se estudia el principio de funcionamiento, características y particularidades del mecanismo de transmisión por sinfín-corona, así como también las variantes respecto a su geometría, los materiales en que se elaboran los componentes mecánicos y los respectivos tratamientos térmicos a los que se someten durante la manufactura.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL REDUCTOR DE VELOCIDAD DE SINFÍN- CORONA

El reductor está conformado por un tornillo sinfín y una rueda helicoidal, el engrane formado una flechas no paralelas y que no se cruzan, el ángulo que forman estas flechas es de 90° , como es ilustrado en la Figura 1.1.

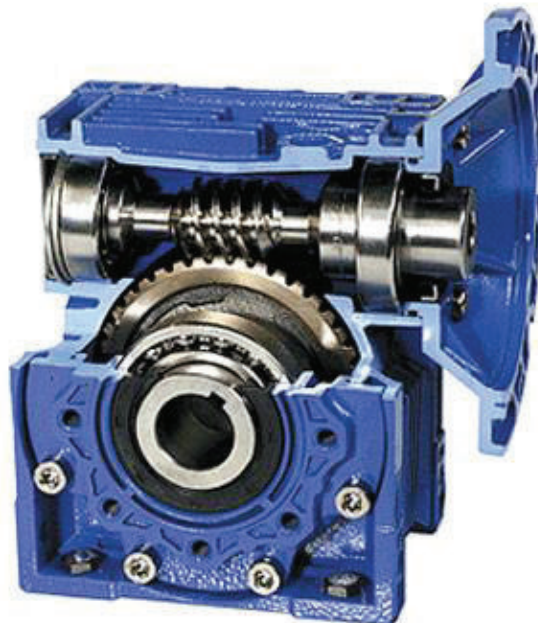


Figura 1.1 Reductor de tornillo sinfín – corona

Fuente: (Motovario, 2015)

Este tipo de reductores presentan ventajas frente a otro tipo de reductores, principalmente en la capacidad de incrementar el par de transmisión en una sola etapa, su funcionamiento es suave, su costo es inferior en comparación con reductores de engranajes cilíndricos o cónicos (Niemann, 1973).

Debido a la transmisión por deslizamiento entre el piñón y el tornillo sinfín, este tipo de reductor es menos eficiente, la eficiencia disminuye a medida que la relación de reducción de velocidad aumenta, por ejemplo, en una relación de reducción de velocidad de 10:1, la eficiencia del reductor puede ser de aproximadamente 90%, en cambio, en una relación de reducción de alrededor de 50:1, la eficiencia del reductor de tornillo sinfín baja a aproximadamente al 70% (Holloday, Nwaoha, & Onyewuenyi, 2012).

1.2 ENGRANE SINFÍN CORONA

El tornillo sinfín generalmente hace contacto en un solo diente y puede, por lo tanto, producir relaciones de transmisión tan altas como número de dientes de la rueda dentada tenga. En comparación con otros conjuntos de engranajes, que se limitan típicamente a una relación de transmisión de hasta 10:1, el conjunto sinfín-corona puede lograr relaciones de transmisión de hasta 360:1, aunque la mayoría de los fabricantes citan rangos de entre 3:1 y 100:1. Las relaciones por encima de 30:1 en general, tienen un hilo o filete en el tornillo sinfín, mientras que proporciones inferiores a 30:1 tienden a tener múltiples hilos (Norton, 1992).

Otra de las propiedades del tornillo sinfín es la capacidad de autobloqueo, es decir un par de torsión aplicado a la rueda helicoidal no hará girar al tornillo sinfín, por ello son utilizados para sujetar cargas por ejemplo en elevadores de automóviles, por lo general esta propiedad es posible para ángulos de avance inferiores a 6°.

Los ángulos de presión estándar para engranes sinfín son 14.5, 17.5, 20, 22.5, 25, 27.5 o 30, con ángulos superiores a estos valores se produce mayor fricción, mayores cargas en los cojinetes y esfuerzos de flexión más elevados en el tornillo sinfín.

Los tornillos sinfín y su respectivos engranes no son intercambiables, sino que se fabrican y reemplazan en conjunto.

1.3 TIPOS DE ENGRANES DE TORNILLO SINFÍN

Los engranajes de tornillo sinfín y corona según su forma se tiene de tornillo sinfín y corona cilíndrica, de tornillo sinfín cilíndrico y corona globoidal y de tornillo sinfín y corona globoidal, a continuación se describe cada uno de ellos (Mitcalc, 2014):

1.3.1 TORNILLO SINFÍN CILÍNDRICO Y CORONA CILÍNDRICA

La corona es igual a los engranajes cilíndricos comunes, el contacto es puntual, se utiliza para la transmisión de pequeñas potencias y velocidades reducidas, su producción es barata, la configuración se ilustra en la parte 1) de la Figura 1.2.

1.3.2 TORNILLO SINFÍN CILÍNDRICO Y CORONA GLOBOIDAL

El tornillo sinfín mantiene su forma, los dientes de la corona es cóncava, el contacto entre los dientes es lineal, por lo que transmite mayor potencia, su esquema se ilustra en la parte 2) de la Figura 1.2.

1.3.3 TORNILLO SINFÍN Y CORONA GLOBOIDAL

El tornillo sinfín se adapta a la forma de la corona, su transmisión de potencia es mayor, su fabricación es más complicada, por lo que son más costosos, como puede apreciarse en la parte 3) de la Figura 1.2.

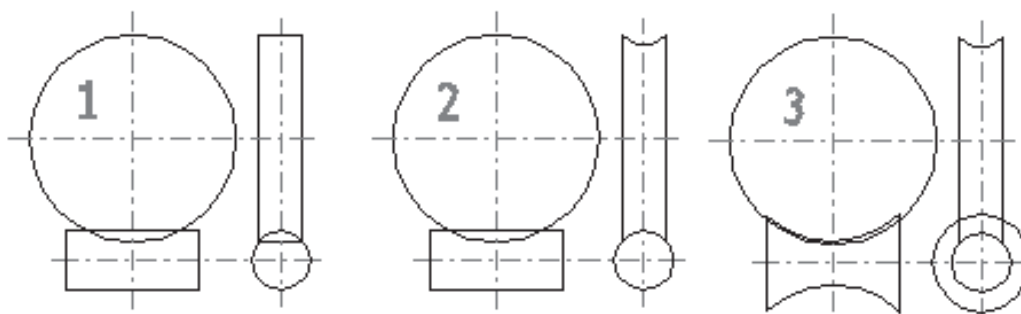


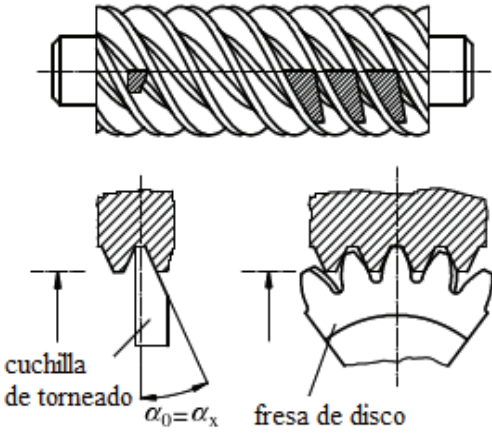
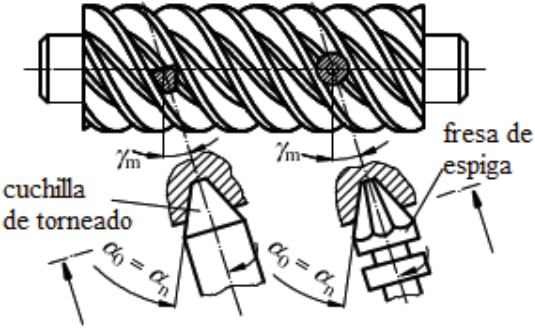
Figura 1.2 Tipos de engranes de tornillo sinfín: 1) Tornillo sinfín cilíndrico / Corona cilíndrica, 2) Tornillo sinfín cilíndrico / rueda globoidal, 3) Tornillo sinfín y corona globoidal

Fuente: (Mitcalc, 2014)

1.4 FORMA DE LOS FLANCOS EN TORNILLOS SINFIN

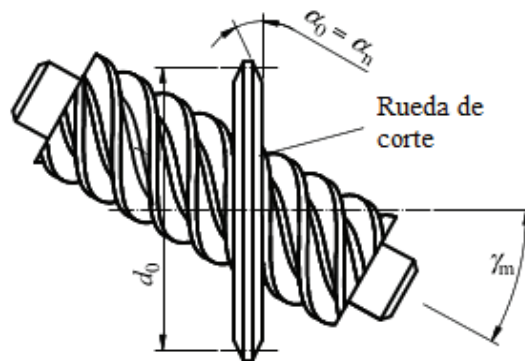
Los tornillos sinfín tienen varias formas de flancos dependiendo de la herramienta y la forma de mecanizado. Las formas estándar de conformidad con la norma DIN 3975-1 son de tipo ZA, ZN, ZK, ZC y ZI, todos a excepción del perfil ZC tienen un emparejamiento convexo /convexo. Por el contrario el perfil ZC está previsto para un emparejamiento cóncavo/convexo. En el emparejamiento convexo/convexo las líneas de contacto tienen una anchura muy pequeña, en cambio en el emparejamiento cóncavo convexo, la anchura de las líneas de contacto es mayor por lo que se da una menor presión hertziana y una película lubricante mayor, en la convexo se presentan los distintos tornillos sinfín según su forma (Mitcalc, 2014).

Tabla 1.1 Las formas estándar de conformidad con la norma DIN 3975-1

Forma de los flancos	Esquema
<p>Tornillo sinfín ZA</p> <p>Los hilos poseen una forma trapecial en la sección axial o en la sección normal, su fabricación es en torno con buril.</p>	 <p>The diagram illustrates the ZA worm gear profile. It shows a 3D perspective view of the gear. Below it, two cross-sectional views are shown: one formed by a turning tool (cuchilla de torneado) with an angle $\alpha_0 = \alpha_x$, and another formed by a disk mill (fresa de disco).</p>
<p>Tornillo sinfín ZN</p> <p>Se trabaja con la cuchilla de torneado con una inclinación γ_m, se puede trabajar también con una fresa madre, pero es menos preciso.</p>	 <p>The diagram illustrates the ZN worm gear profile. It shows a 3D perspective view of the gear. Below it, two cross-sectional views are shown: one formed by a turning tool (cuchilla de torneado) with a lead angle γ_m and a normal angle $\alpha_0 = \alpha_n$, and another formed by a hob (fresa de espiga) with a normal angle $\alpha_0 = \alpha_n$.</p>

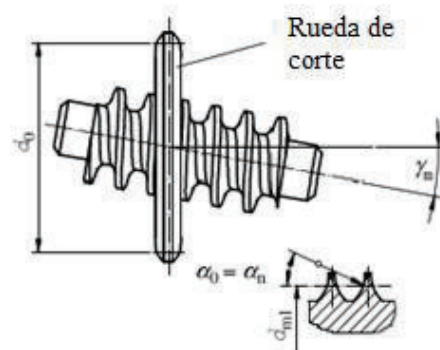
Tornillo sinfín ZK

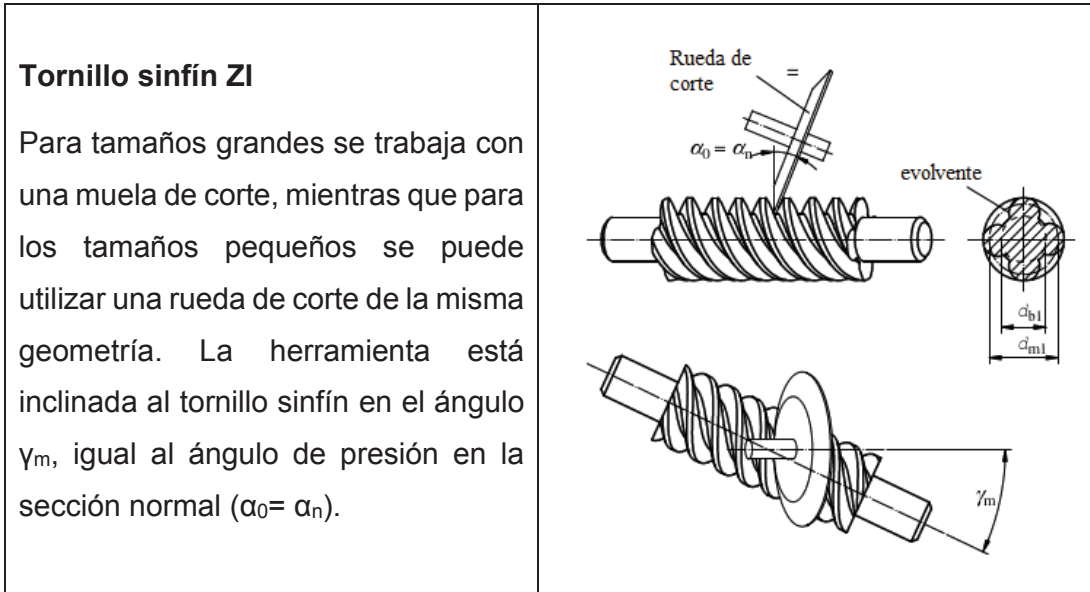
Se trabaja con una muela o una rueda de corte de forma trapezoidal inclinada al tornillo sinfín en el ángulo γ_m , por lo tanto el ángulo de filo de la herramienta es igual al ángulo de presión de la rosca en la sección normal ($\alpha_0 = \alpha_n$). En la sección axial, los dientes son ligeramente convexos. Este es similar al tornillo sinfín ZN, especialmente en diámetros pequeños.



Tornillo sinfín ZC

Los flancos de este son cóncavos. Se trabaja bien con una muela de corte o una rueda de corte con un flanco convexo cuyo eje está inclinado en el ángulo γ_m , al eje de la pieza de trabajo. Así, el filo de la herramienta es igual al ángulo de presión sección normal ($\alpha_0 = \alpha_n$). Para este tornillo sinfín, es importante que, debido a los flancos cóncavos, las tensiones de contacto son significativamente menores que otros, la capacidad de carga es 25 a 30% superior. Los parámetros de deslizamiento son mejores, así la eficiencia es mayor. Los hilos tienen una raíz más grande, lo que resulta en una capacidad de carga de flexión superior.





Fuente: (Jelaska, 2012)

1.5 MATERIALES

En el funcionamiento del tornillo sinfín y corona se produce una gran fricción por deslizamiento, para poder mantener el desgaste y la producción de calor dentro de los límites adecuados, es importante diseñar el conjunto sinfín-corona con materiales adecuados. En el caso del tornillo sinfín es frecuente utilizar acero capaz de ser cementado ya que de esta manera obtiene resistencia superficial y tenacidad subsuperficial. Para la fabricación de la corona es muy común utilizar aleaciones de cobre ya que tienen un bajo coeficiente de fricción. Entre los materiales frecuentemente utilizados se tiene aquellos indicados en la Tabla 1.2 (Norton, 1992):

Tabla 1.2 Materiales utilizados para la fabricación de tornillos sinfín y coronas

Componente	Material
Sinfín	(AISI - SAE)1045, 1050, 4140, 4142, 4150, 4320, 4340, 4620
Corona	Para potencias altas: bronce fosforado o al estaño. Para potencias menores: bronce al manganeso.

Fuente: (Norton, 1992)

1.6 TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Los tratamientos térmicos son fundamentales en la fabricación de engranajes de precisión, tanto que representan un 30% del costo de manufactura, pues su buena práctica aporta sustancialmente a la confiabilidad y durabilidad de este tipo de elementos mecánicos (Davis, 2005).

1.6.1 TRATAMIENTOS TÉRMICOS PREVIOS

Si bien se requiere controlar las propiedades mecánicas del material para engranajes mediante tratamientos térmicos, de tal manera que al final de su manufactura se encuentren prestos a funcionar satisfactoriamente, existe una serie de tratamientos a los que se somete al material, durante la fabricación, como preparación para los siguientes pasos, con la finalidad de obtener una calidad adecuada del producto.

1.6.1.1 Recocido

El enfoque de este tipo de tratamiento es la reducción de dureza, mejorando la maquinabilidad del material, mediante el calentamiento hasta determinada temperatura, luego una permanencia en dicho punto y finalmente un enfriamiento a determinada velocidad.

1.6.1.2 Normalizado

En este proceso, el material es calentado por sobre la temperatura crítica A_3 de la Figura 1.3 y luego se enfría en aire fuera del horno, principalmente con el objetivo de eliminar esfuerzos residuales, mejorar la maquinabilidad, aunque con una dureza un tanto superior a la que resulta del recocido, y además para controlar la estabilidad dimensional del elemento mecánico durante el carburizado.

Desde el punto de vista térmico, el normalizado produce una austenización con un subsiguiente enfriamiento por aire o nitrógeno, mientras que en el aspecto microestructural se aprecia la homogeneización de la estructura cristalina.

1.6.1.3 Alivio de Esfuerzos

Es utilizado para eliminar los esfuerzos residuales existentes en el material e impedir el desarrollo de unos nuevos, esto se logra mediante la elevación de la temperatura por debajo de la temperatura crítica A_1 de la Figura 1.3, el mantenimiento a dicha temperatura por un tiempo suficiente y un enfriamiento adecuadamente lento.

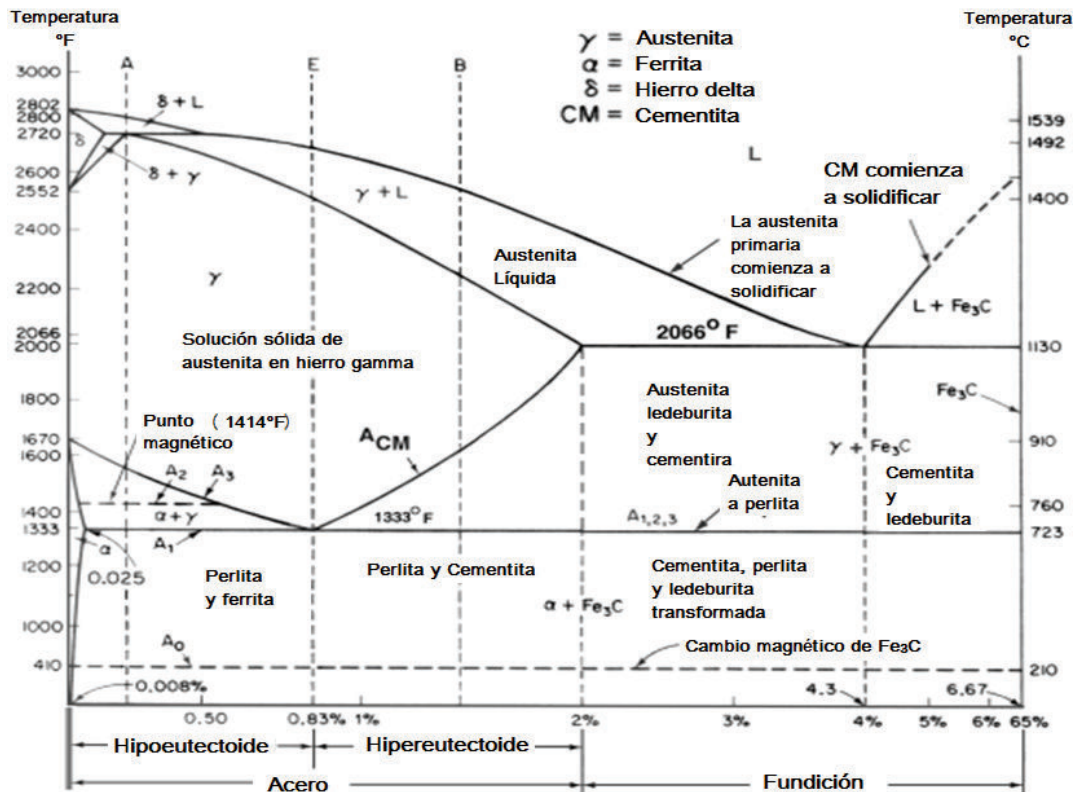


Figura 1.3 Diagrama de equilibrio hierro carbono

Fuente: (Gómez, 2012).

1.6.2 ENDURECIMIENTO

El endurecimiento del material es fundamental para que los engranajes puedan cumplir su función prestando atención en el tiempo de vida útil, lo cual implica que los tratamientos utilizados para este propósito, y que se describen individualmente a continuación, tienen que dar como resultado: mayor dureza,

mayor resistencia a la tracción, baja ductilidad y alta tenacidad, permitiendo así el trabajo sin problemas del engranaje en condiciones críticas de servicio.

1.6.2.1 Endurecimiento Directo

Se refiere a los tratamientos térmicos que no producen únicamente endurecimiento superficial, sino que incrementan la dureza en todos los puntos de la geometría del engranaje, debido a las diferencias en las velocidades de enfriamiento en el engranaje generadas por sus formas.

Durante el tratamiento, las capas más externas de material sufren un enfriamiento más severo que las internas, en consecuencia, se generan gradientes de dureza, y ésta dependerá entonces de la profundidad en la pieza y del rigor del enfriamiento.

El endurecimiento se obtiene por temple, con el calentamiento del material dentro del rango austenítico, seguido de un enfriamiento de alta velocidad que dificulte la difusión del carbono, formando así martensita.

1.6.2.2 Endurecimiento Superficial

El objetivo de este tratamiento es por una parte, el de aumentar la dureza sólo en la superficie de la pieza, mejorando la resistencia al desgaste, y por otra el de mantener la dureza del núcleo, para una mejor absorción de impactos y vibraciones en el engranaje.

La dureza adecuada en el interior de la pieza está en un rango de 30 a 40 HRC, mientras que la superficie debe estar bajo los 50HRC, pues al sobrepasar este valor, tiende a aumentar su sensibilidad de muesca, es decir que se fragiliza.

1.6.2.2.1 Carburizado

Al igual que el anterior método, el endurecimiento sustancial ocurre en la superficie, sin embargo, con el carburizado las cargas de trabajo pueden incrementarse de un 30 a un 50%. El proceso se efectúa a temperaturas entre los 800 y 1090°C, utilizando aceros que comúnmente tienen un contenido de

carbono de 0,10 a 0,20%, dando como resultado profundidades endurecidas de 0,13 a 8,25 mm.

1.6.2.2.2 Carburonitrurado

Este tratamiento térmico es una variante del carburizado y difiere de éste en dos aspectos: el primero es que además del carbono, se introduce determinadas cantidades de amonio en la atmósfera carburizante, para aportar con nitrógeno a la superficie tratada, y el segundo es el régimen en que se desarrolla, con una temperatura inferior a la del carburizado, siendo de 700 a 900°C, y un tiempo de permanencia más corto.

El nitrógeno restringe la difusión del carbono, dando como producto, una superficie endurecida de menor profundidad, dentro de un rango de 0,075 a 0,75 mm.

1.6.2.2.3 Nitruado

Es un proceso de endurecimiento superficial también, sin embargo no es adecuado para todos los tipos de engranajes, pues la dureza final es demasiado alta. Por otra parte, a modo de ventaja, se puede decir que debido a que no precisa un enfriamiento rápido, las consideraciones en cuanto a cambios dimensionales son despreciables.

El nitruado se lleva a cabo a temperaturas de 495 a 565°C, con duraciones de 10 a 80 horas, obteniéndose profundidades endurecidas de 0,20 a 0,65mm.

CAPITULO II

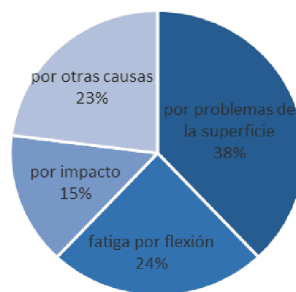
MODOS DE FALLA

En este capítulo se realiza una reseña referente al análisis de falla, detallando luego diferentes etapas en las que se obtiene información esencial para desarrollar dicho estudio, y finalmente se trata diferentes tipos de falla en engranajes, que por la naturaleza de su funcionamiento son característicos de ellos.

2.1 INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE FALLA

De acuerdo al Departamento de Comercio de Estados Unidos en el 2009, indica que las fallas le cuestan a la sociedad aproximadamente del 3% al 5% del producto interno bruto. Dicho estudio estimó que la tercera parte de ese costo podría ser eliminado haciendo un mejor uso de la tecnología actual, otra tercera parte podría ser eliminada con investigación y desarrollo a largo plazo, y la tercera parte restante sería difícil de eliminar sin mayor investigación e innovación (Hernández & Espejo, 2002)

Estudios realizados en engranajes carburizados que han sido utilizados en camiones de gran tonelaje, máquinas para herramientas, máquinas para minería, etc., mostraron que el 38% de las fallas se originaron por problemas de la superficie, 24% de fatiga por flexión, 15% por impacto y 23% por otras causas, como lo muestra la Gráfica 2.1 (Hernández & Espejo, 2002).



Gráfica 2.1 Causas de falla en engranajes carburizados

Fuente: (Hernández & Espejo, 2002)

2.2 ETAPAS DEL ANÁLISIS DE FALLA

A continuación se presenta un procedimiento de análisis de falla, que va desde el historial de la pieza hasta las conclusiones y recomendaciones.

2.2.1 HISTORIAL DE LA PIEZA

Se reúne la información referente al diseño, fabricación, montaje y funcionamiento del elemento a ser analizado, a esta información se debe añadir los certificados de control de calidad de cada una de las etapas de producción, este tipo de documentación puede ser determinante en caso de demandas judiciales cuando se encuentre inconformidades con las especificaciones técnicas (Hernández & Espejo, 2002).

2.2.2 EXAMEN VISUAL Y RECOLECCIÓN DE MUESTRAS

Esta etapa es muy importante, se debe tomar en cuenta concentradores de esfuerzos, evidencias de abusos de servicio como son: coloración debido al exceso de temperatura, productos de corrosión y apariencia de abrasión. Al final de esta etapa se selecciona muestras representativas para estudiarlas en el laboratorio, se debe hacer con mucho cuidado para no estropear las piezas en estudio, de ser necesario se debe proteger las muestras con papel inhibidor de corrosión.

Las Directrices que rigen la recolección de muestras están cubiertas en la norma ASTM E 620, E 860, E 1020, y sobre todo E 678. También se recomienda tomar muestras de otras partes del equipo averiado, ya que pueden mostrar daños que sirvan de apoyo a la investigación (American Society for Metals, 2002).

2.2.3 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Con este tipo de ensayos las piezas a ser analizadas no son alteradas en sus propiedades mecánicas, químicas o dimensionales, excepto por la limpieza superficial. Entre estos ensayos se tiene el de tintas penetrantes y partículas magnéticas para detectar discontinuidades superficiales. Para inspeccionar defectos internos se realiza ensayos de radiografía y ultrasonido (Hernández & Espejo, 2002).

2.2.4 ENSAYOS MECÁNICOS

Se usan para determinar sus propiedades mecánicas y detectar cambios de éstas en servicio. Entre los más utilizados están los ensayos de tracción, dureza, microdureza e impacto, realizándose por lo general sobre probetas preparadas por mecanizado.

2.2.5 EXAMEN MACROSCÓPICO

Consiste en atacar con un reactivo químico una superficie previamente preparada, con el fin de revelar discontinuidades macroscópicas, fisuras, cavidades de contracción y dirección de deformación plástica en el metal. El examen se hace generalmente sin aumentos pero se puede utilizar una lupa con un aumento máximo de 10X.

En algunos casos la superficie debe ser preparada previo a examen, así la pieza puede ser cortada, esmerilada o pulida (Bernau, 1958).

2.2.6 EXAMEN MICROSCÓPICO

En este examen normalmente se utiliza el microscopio óptico o el electrónico, con estos instrumentos se puede conocer las características microestructurales de cualquier material, estos equipos están acompañados de un dispositivo fotográfico para poder registrar las fotomicrografías de la muestra.

Un paso muy importante dentro de la micrografía es la preparación de la superficie, la cual debe desbastarse y pulirse hasta quedar como un espejo, esta preparación se lo hace con papeles lijados, polvos abrasivos y paños. Posterior a esto se aplica a la superficie un reactivo químico apropiado para el tipo de material a este paso se le denomina ataque.

El límite de aumentos en el microscopio óptico es de 2.000 diámetros, para conseguir aumentos mayores se utiliza el microscopio electrónico el cual utiliza haces de electrones en lugar de la radiación lumínica. Un electrón de elevada velocidad se comporta como una onda con una longitud de onda inversamente proporcional a su velocidad, los electrones acelerados con altos voltajes pueden llegar a una longitud de onda de 3 picómetros. Estos microscopios se

caracterizan por su capacidad de realizar aumentos y su poder resolutivo, en el microscopio electrónico de barrido posible aumentos de 10 a 50.000 diámetros (Callister, 1996).

En este examen lo que se busca es determinar la microestructura, concentración, presencia de microgrietas, microconstituyentes y profundidad de endurecimiento superficial.

2.2.7 ANÁLISIS QUÍMICO

Permite identificar el tipo de material y verificar la composición especificada. Cuando se encuentran pequeñas desviaciones de los intervalos de composición dados en una norma, se debe hacer un análisis cuidadoso de sus implicaciones, para no atribuir erróneamente las causas de falla debido a dichas desviaciones.

El análisis químico es una técnica complementaria a los ensayos metalográficos y ensayos mecánicos que permite identificar la calidad de los materiales.

2.2.8 INFORME, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En general el informe final debe contener la descripción del componente, el historial de fabricación y servicio, los resultados de estudios mecánicos y metalúrgicos, la determinación de la falla y finalmente las conclusiones y recomendaciones para prevenir nuevas ocurrencias de falla.

2.3 MODOS DE FALLA EN ENGRANAJES

Los engranes pueden fallar de diferentes formas, un indicio para que suceda es el ruido, temperatura y vibraciones, precedentes al fallo. Los modos de fallo en engranes se ha clasificado en cuatro grupos: fatiga, impacto, desgaste y rotura por tensión. En la tabla 2.1 se enumeran estos modos de fallo en orden decreciente de frecuencia.

En un análisis combinado de más de 1.500 estudios, los tres modos de falla más comunes son fatiga por flexión en los dientes del engrane, falla por impacto y desgaste abrasivo, en conjunto representan más de la mitad de las fallas estudiadas (Alban, 1985).

Tabla 2.1 Modos de falla en engranajes

Modo de falla	Tipo de falla
Fatiga	Flexión en los dientes, contacto superficial (pitting, spalling), contacto de rodadura, fatiga térmica
Impacto	Cizallamiento, astillado, aplastamiento, cizallamiento torsional
Desgaste	Abrasivo, adhesivo
Rotura por esfuerzo	Interna, externa

Fuente: (Alban, 1985)

2.3.1 FALLA POR FATIGA

La falla por fatiga se debe a ciclos múltiples de carga con tensiones variables, que llegan a un punto donde superan el límite de fluencia del material dichas tensiones pueden deberse a sobrecargas, mal diseño, desalineamiento, vibraciones, etc.

El estudio de la fatiga en elementos mecánicos no es una ciencia exacta, sino que es el resultado de un estudio experimental con muchos componentes de cálculo estadístico, mediante ensayos que permitan conocer la magnitud del esfuerzo a fatiga que puede soportar el elemento mecánico a un cierto número de ciclos.

El gráfico que permite relacionar estas variables se denomina diagrama de Whöler (ver Figura 2.1), este diagrama muestra el logaritmo de la resistencia a la fatiga vs el número de ciclos, para un número de ciclo de 10^6 se tiene el límite de resistencia o límite de fatiga.

La falla por fatiga depende del número de repeticiones en un rango de esfuerzos, del número de repeticiones en un rango de esfuerzos, además no ocurre por debajo del límite de fatiga. Las ranuras, discontinuidades superficiales e imperfecciones subsuperficiales aumentan la posibilidad de falla

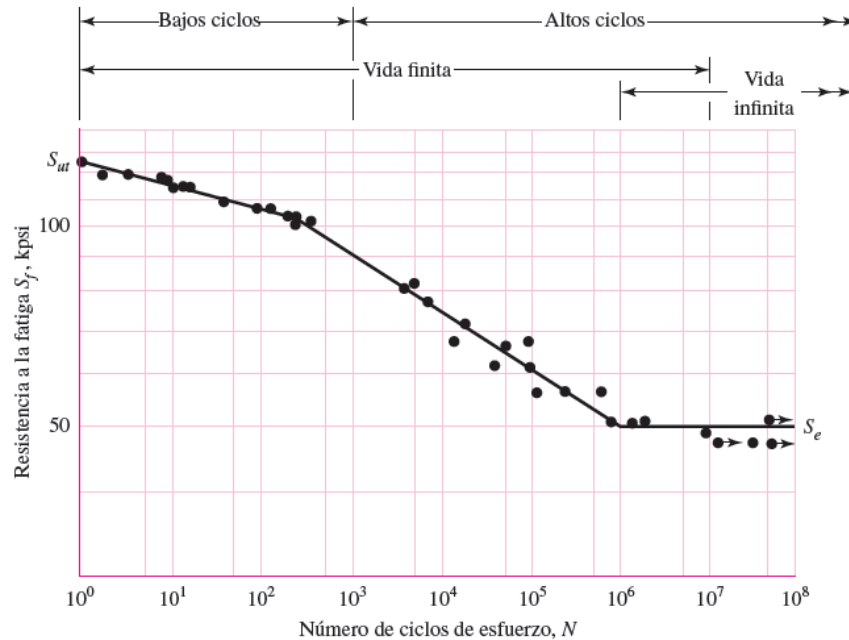


Figura 2.1 Diagrama de Whöhler

Fuente: (Budynas & Keith, 2008)

Hay tres etapas en la falla por fatiga que deben ser estudiadas de cerca: la iniciación de la grieta, la propagación de la grieta y la fractura súbita causada por el crecimiento inestable de la grieta. La primera etapa puede ser de corta duración, la segunda etapa implica la mayor parte de la vida de la pieza y la tercera etapa es instantánea (Norton, 1992).

La primera etapa es de iniciación de la grieta, debido a la concentración de esfuerzos (por la presencia de inclusiones, concentradores geométricos, etc.) aun cuando el esfuerzo nominal esté por debajo del límite elástico del material, la fluencia plástica local causa distorsión, creando bandas de deslizamiento a lo largo de los bordes cristalinos del material. Conforme los esfuerzos se alternan, aparecen más bandas de deslizamiento, las mismas que crean grietas microscópicas.

La segunda etapa constituye la propagación de la grieta, el crecimiento de la grieta se debe a esfuerzos de tensión, la grieta crece en el plano normal al esfuerzo máximo de tensión. El índice de crecimiento de la grieta es del orden de 10^{-8} a 10^{-4} pulg/ciclo, pero se va acumulando a través de un cierto número de ciclos.

Finalmente la tercera etapa es la fractura, la grieta sigue creciendo mientras estén presentes los esfuerzos cíclicos a tensión, hasta que llega el instante en que falla súbitamente. El examen visual de las piezas con falla por fatiga muestran un patrón característico. Presenta una región donde se puede distinguir el sitio de la microgrieta original, que tiene apariencia de una superficie bruñida, la fractura frágil como una superficie de apariencia mate y áspera.

2.3.1.1 Fatiga por flexión

Este tipo de falla se da generalmente por imperfecciones en la superficie de la raíz del diente del engrane (por ejemplo las marcas dejadas por la herramienta de corte) o inclusiones no metálicas cerca de la superficie, las grietas se propagan lentamente hasta alcanzar un tamaño crítico. En la Figura 2.2 se muestra un ejemplo de falla clásica de fatiga por flexión.

La fatiga por flexión de aceros cementados puede variar significativamente. Según un estudio los valores límites de resistencia medidos experimentalmente van desde 200 hasta 1.930 MPa (29 a 280 ksi), con la mayoría de los valores entre 700 y 1.050 MPa (100 y 152 ksi). Esta amplia variación en el comportamiento de la fatiga por flexión es el resultado de variaciones en el diseño y ensayo de muestras, la aleación, y las interacciones de procesamiento que producen grandes variaciones en microestructuras cementadas y la respuesta de las microestructuras a cargas cíclicas (Davis, 2005).

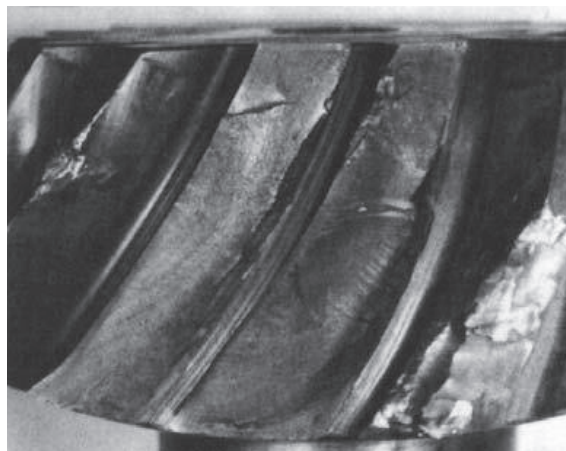


Figura 2.2 Falla por flexión en la longitud media del diente.

Fuente: (Davis, 2005)

2.3.1.1.1 Marcas de trinquete

Las marcas de trinquete o sierra son características de falla por fatiga, y son de gran utilidad, tanto en la determinación de la ubicación de inicios de falla como en la cantidad de ellos. Esto se logra ya que cuando existen núcleos de fatiga adyacentes, las grietas que parten de éstos se propagan en planos sobrepuestos, y es entonces cuando se originan las marcas de trinquete, como la fractura que une las grietas de dichos inicios de falla contiguos, como se ilustra en la Figura 2.3, en donde los círculos representan a los núcleos y las flechas señalan las marcas de sierra (ratchet marks).

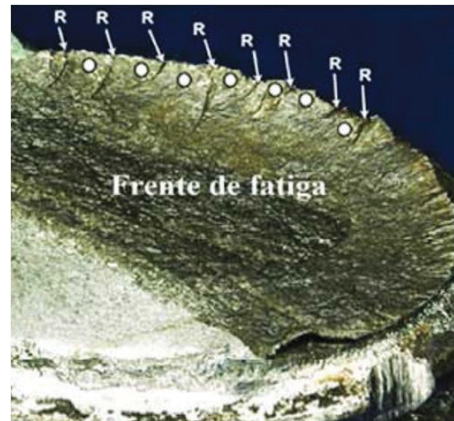


Figura 2.3 Marcas de trinquete.

Fuente: (Coltters, 2013)

Al intercalarse estas marcas características de fatiga entre núcleos de falla, el número de ellos, en general, será igual o mayor en una unidad a la cantidad de marcas de trinquete.

2.3.1.2 Fatiga por contacto

Es la fisuración de la superficie sometida a esfuerzos Hertzianos alternantes bajo condiciones de carga de rodadura y deslizamiento, tal como el ejemplo del engranaje cónico fallado de la Figura 2.4. Además de las grietas, la fatiga de contacto puede resultar en alteraciones microestructurales, incluyendo cambios en la austenita retenida, tensiones residuales, y la morfología de martensita. Para el análisis de la fatiga por contacto se cuenta con la guía ASTM E2789.

Existen varias formas de fatiga por contacto claramente distinguidos, pero los factores que controlan la nucleación y propagación de cada tipo son sólo parcialmente entendidos. La fatiga por contacto de acero cementado se puede tener de origen superficial o subsuperficial, a continuación se indica cada uno de ellos.

2.3.1.2.1 Pitting de origen superficial

Este es el tipo de picadura característica de rodadura y deslizamiento combinados, tal como ocurre en los dientes de engranajes. El esfuerzo cortante máximo ya no está bajo la superficie del metal, sino más bien es llevado a la superficie debido a la fricción en la zona de contacto. Debido a las condiciones de trabajo en la superficie, el lubricante se vuelve crítico. Es por esta razón que las transmisiones, y varios otros tipos de sistemas de engranajes requieren lubricantes con aditivos especiales.

2.3.1.2.2 Pitting de origen subsuperficial

Es el resultado de fatiga debajo de la superficie en la región de mayores esfuerzos de corte. Esta picadura se produce en los engranajes de alta velocidad y en transmisiones de potencia aeroespacial. También es típico en cojinetes antifricción. El origen es típicamente una inclusión no metálica o discontinuidad en la estructura, en el área de mayor esfuerzo de corte por debajo de la superficie. La propagación de la grieta es inicialmente bastante lento, hasta que una grieta penetra en la superficie, permitiendo entrar el lubricante.

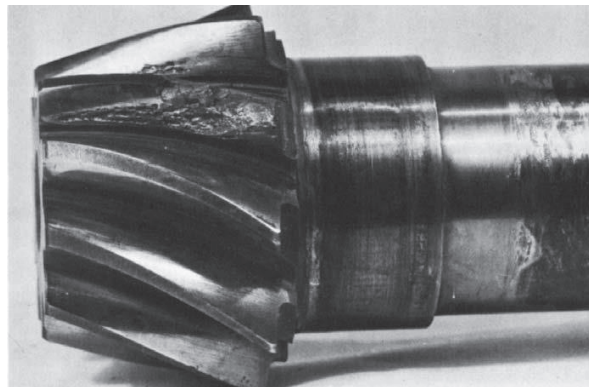


Figura 2.4 Fractura debido a pitting severo

Fuente: (Davis, 2005)

2.3.1.3 Macropitting

Se produce por la fatiga de contacto a partir de la deformación plástica, iniciación de grietas y finalmente el macropitting en o cerca de la superficie de contacto, por lo general se forman subsuperficialmente luego la fisura se extiende hacia la superficie de contacto, tal como se puede observar en el ejemplo de la Figura 2.5. El origen de la macropicadura se caracteriza por ser un área lisa paralela a la superficie de contacto, los bordes de la cavidad suelen tener un ángulo de inclinación mayor a 45° respecto a la superficie de contacto. Generalmente el origen de este tipo de defecto son las inclusiones no metálicas por debajo de la superficie de contacto. La vida del elemento con fatiga por macropicadura es estadístico ya que la gravedad del defecto y ubicación se distribuyen al azar entre los componentes de contacto macroscópicamente idénticos.

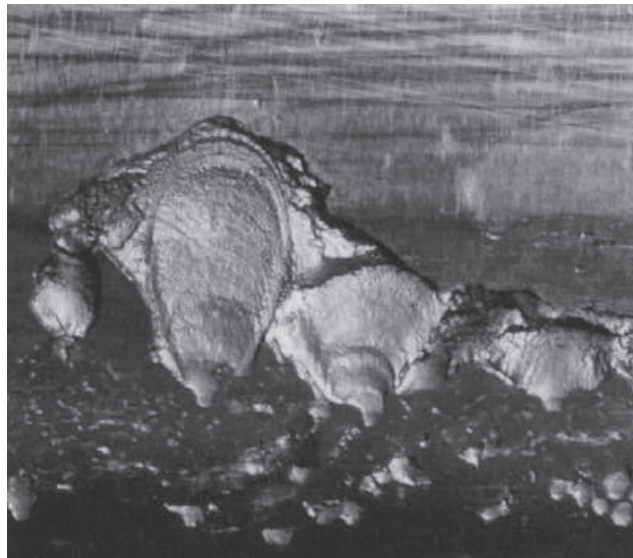


Figura 2.5 Fractografía mostrando el avance de las etapas de macropitting

Fuente: (Davis, 2005)

2.3.1.4 Micropitting

Por lo general el micropitting ocurre bajo el régimen de lubricación elastohidrodinámica (EHD), es decir, cuando el espesor de la película de aceite se adelgaza demasiado en la línea de paso del engranaje, por lo que las asperezas de las superficies opuestas comenzarán a entrar en contacto bajo

cargas elevadas, esto provoca una deformación plástica en la zona de contacto, como se ilustra en la Figura 2.6. (Noria, 2015).

En muchos casos, el micropitting no es destructivo para la superficie de los engranajes, incluso se puede detener su evolución cuando se restablecen las condiciones tribológicas (fricción, el desgaste y lubricación) del sistema. Algunas veces, se puede eliminar mediante el pulido durante el proceso de rodadura de los engranajes y se dice que se ha producido el curado de los engranajes (Terradillos & Ciria, 2014).

La profundidad de un micropitting no supera las 10 micras y es difícil de apreciar por el ojo humano que empieza a apreciar a partir de 40 micras.

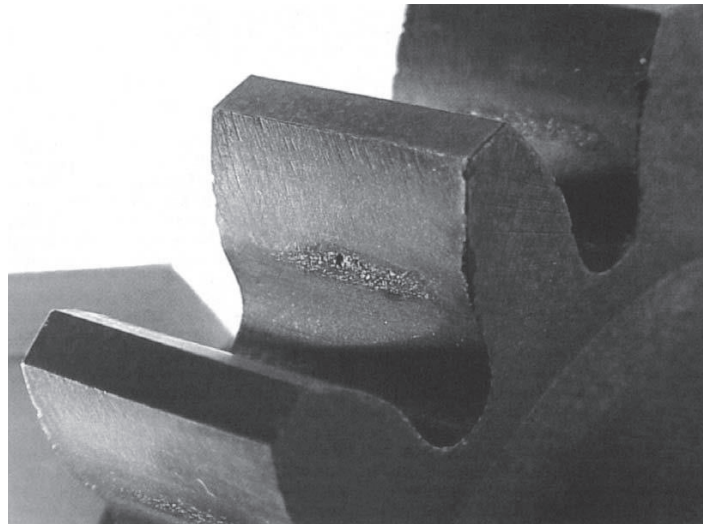


Figura 2.6 Engranaje recto con micropitting cerca de la línea de paso

Fuente: (Davis, 2005)

2.3.1.5 Fatiga bajo la superficie endurecida

Es la fractura de los componentes cementados por la formación de grietas por debajo de la superficie de contacto, dentro del campo de esfuerzos de Hertz, (ver Figura 2.7). Sin embargo, la profundidad a la que se forman las grietas es mucho mayor que las que causan macropitting, y es una función de la resistencia del material en conjunto con los esfuerzos de corte hertzianos alternantes.

En componentes endurecidos superficialmente producidos por cementación, nitruración o endurecimiento por inducción, existe un gradiente de disminución de la dureza desde la superficie hasta el interior del engranaje. Si el gradiente de resistencia al corte del material es mayor que en el gradiente de esfuerzo de corte Hertziano, se producen las fisuras por debajo de la capa endurecida. La profundidad se encuentra normalmente en (o cerca de) la interfaz superficie endurecida-núcleo, además de esto se suma los esfuerzos de tensión residuales debido a las cargas cíclicas.

Generalmente es causada por una superficie endurecida demasiado delgada, por la dureza insuficiente del núcleo, por sobrecarga en los engranajes.



Figura 2.7 Fisura en un engranaje cementado debido a fatiga bajo la superficie endurecida

Fuente: (Davis, 2005)

2.3.1.6 Desgaste adhesivo severo (spalling)

El Spalling no se considera un modo inicial de falla, sino más bien una continuación o propagación de macropitting y rodadura contacto fatiga. Es muy común hacer referencia a este modo de fallo como pitting y spalling. La diferencia entre los dos modos de falla radica en la profundidades de los mismos para el caso de pitting la profundidad aproximada es de 10 μm y para el spalling de 20-100 μm , ver la Figura 2.8.

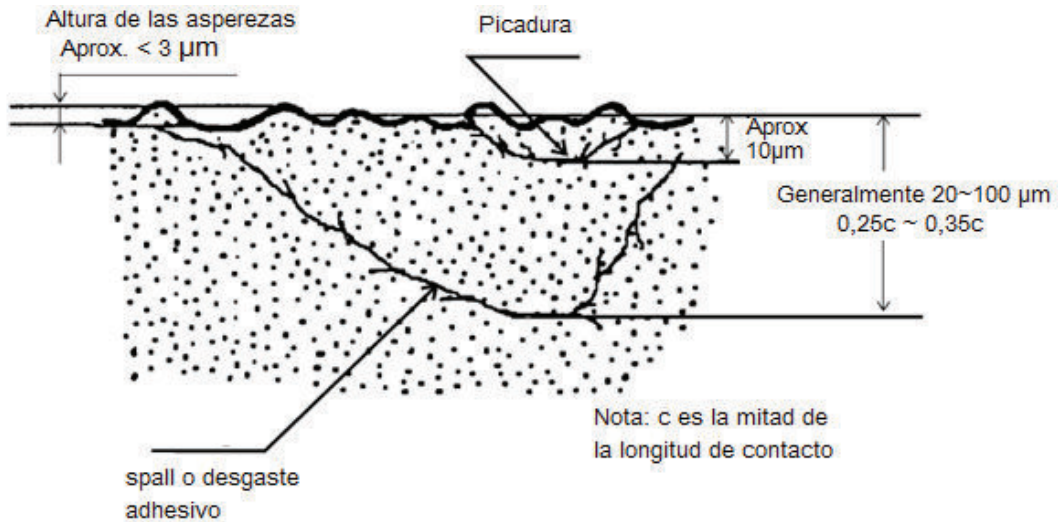


Figura 2.8 Esquema que relaciona los modos de falla de pitting y spalling

Fuente: (Davis, 2005)

2.3.1.7 Fatiga térmica

La fatiga térmica se produce debido a tensiones térmicas fluctuantes, no necesariamente por cargas de origen externo. La causa de las tensiones térmicas es la restricción a la dilatación y/o en elementos sometidos a cambios de temperatura. La magnitud de la tensión térmica depende de la variación de temperatura, el coeficiente de dilatación térmica del material, y el módulo de elasticidad (Callister, 1996).

2.3.2 FALLA POR IMPACTO

Se produce por cargas dinámicas repentinas que crean tensiones locales mucho mayores que la aplicación gradual de las mismas cargas. Si la magnitud es suficientemente alta como para fracturar el elemento se dice que una falla por impacto. Dentro de este tipo de falla se tiene la siguiente subclasificación.

2.3.2.1 Rotura de dientes por impacto

El impacto puede producir el desprendimiento de uno o más dientes en un bajo número de ciclos, pudiendo ser uno o dos de ellos, en una forma rápida, de tal manera que el desgarramiento no muestra evidencias de material estirado o con marcas características de fatiga como se aprecia en la parte a) de la Figura 2.9. La

fractura se produce debido a la carga desarrollada por el impacto, la cual supera la resistencia a la tensión del material, por lo que el inicio de la falla se da, por lo general, en la raíz del diente sometida a tracción como se ilustra en la parte b) de la Figura 2.9.

Un factor agravante del riesgo de fractura por impacto es el desalineamiento, debido a deficiencias en la fabricación del engrane o también a defectos en los rodamientos, que conducen a la deflexión del eje, dejando vulnerables a los extremos del diente, en donde más probablemente iniciará la falla.

Este tipo de falla es uno de los más peligrosos, pues al romperse el diente, los restos pueden destruir catastróficamente a los demás componentes del sistema mecánico.

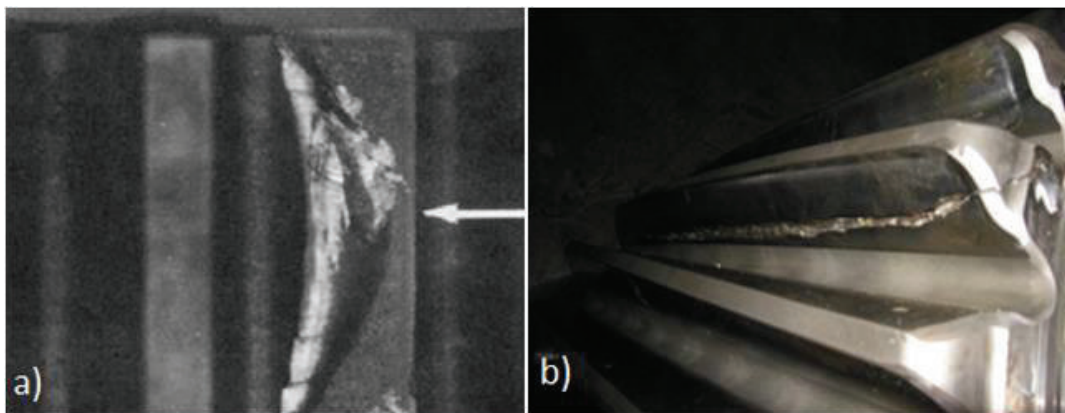


Figura 2.9 Rotura de dientes por impacto. a) Con la dirección de la fuerza aplicada. b) Desde la raíz hasta la línea de paso.

Fuente: (Davis, 2005)

2.3.2.2 Cizallamiento de dientes por impacto

De manera similar a la fractura por impacto, el corte ocurre por la aplicación de una carga desarrollada por el impacto, con la diferencia de que el área de fractura es brillante, y corresponde a una falla por cizalladura. Esto responde a un comportamiento dúctil del material. La Figura 2.10 muestra la cizalladura del diente de un engranaje en donde la forma de la fractura en general es recta o cóncava a través del diente.

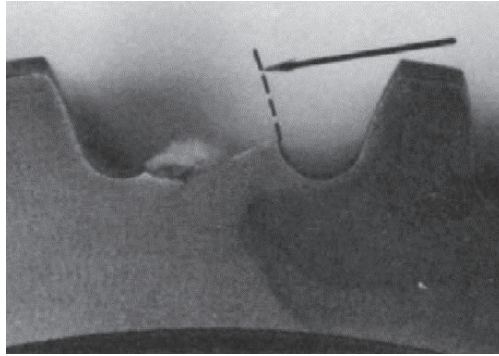


Figura 2.10 Cizallamiento de diente. Se indica la dirección de la carga aplicada.

Fuente: (Davis, 2005)

El impacto puede generarse, por ejemplo, con el bloqueo de uno de los dos elementos engranados, con lo que el impulso del otro, si es lo suficientemente grande, procede a cizallar al diente en contacto.

2.3.2.3 Chipping o desastillamiento del diente

A pesar de ser considerada como falla por impacto, éste no ocurre directamente entre las superficies de los engranajes, sino que se debe a la presencia de algún objeto extraño, el cual al intercalarse en la zona de engrane, desarrolla una carga que impacta repentinamente los flancos, conduciendo a la falla correspondiente, como en el ejemplo mostrado en la Figura 2.11.



Figura 2.11 Chipping como resultado de impacto con cuerpo extraño.

Fuente: (Davis, 2005)

Por objeto extraño, se hace referencia a todo tipo de elemento suelto dentro de la caja de engranajes, tal como restos de dientes o de otras partes, pernos, o también objetos olvidados en el montaje o mantenimiento de los equipos.

2.3.3 FALLA POR DESGASTE

Los conjuntos de engranajes, debido a su funcionamiento, son susceptibles al desgaste de varios tipos, como son los causados por abrasión, adhesión, y corrosión, a continuación se describe cada uno de ellos.

2.3.3.1 Desgaste abrasivo

El desgaste abrasivo tiene lugar cuando partículas de alta dureza, como restos metálicos, arena, etc. se encuentran libres en el lubricante, y al circular sobre las superficies de engrane producen ligeras ranuras en la dirección del deslizamiento entre flancos, como se observa en el ejemplo de la Figura 2.12. Esto conduce a una pérdida de forma en el diente por la pérdida de material, por lo tanto, con el tiempo el funcionamiento empezará a tornarse ruidoso y en casos severos, el desgaste será tal que la resistencia del material ya no sea la suficiente, con la consecuente falla.



Figura 2.12 Desgaste abrasivo.

Fuente: (Davis, 2005)

Al constatar los indicios de desgaste abrasivo, en los lomos de los flancos de los dientes, como ya se ha descrito, y si es factible la continuidad de la operación de los engranajes, inmediatamente deben hacerse los siguientes correctivos: desalojar todas las partículas libres dentro de la caja de engranajes

principalmente la sedimentación en el depósito de aceite, asegurar la limpieza del aceite con la sustitución del mismo y del filtro correspondiente.

2.3.3.2 Desgaste adhesivo

El desgaste de tipo adhesivo se desarrolla de forma similar al desgaste abrasivo, en las zonas de engrane, como lo muestra la Figura 2.13, pues es donde existen elevadas presiones, temperaturas y velocidades de deslizamiento entre superficie.

Cuando la capa de lubricante tiene un espesor insuficiente para prevenir el contacto directo metal con metal en las superficies conjugadas, la alta presión empieza causando deformación plástica en los puntos más prominentes del engrane, dando como resultado superficies cristalizadas. Parte de la energía de deformación se transforma en calor, la cual contribuye a la formación de juntas entre las partes deformadas, mismas que debido al cambio de forma, han cambiado de microestructura, teniendo una dureza superior.

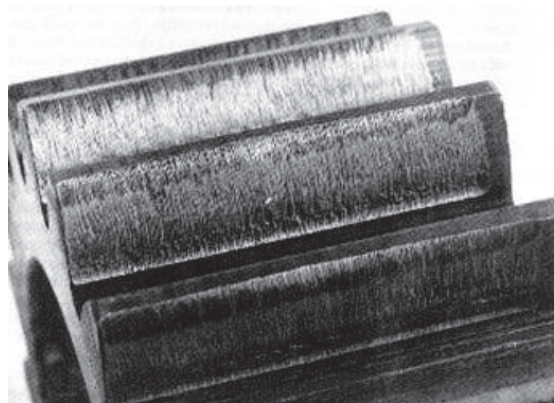


Figura 2.13 Desgaste por adhesión.

Fuente: (Davis, 2005)

A medida que el deslizamiento continúa con el funcionamiento del engrane, las partículas endurecidas, o juntas soldadas, se adhieren a las superficies de los flancos de diente o también se desprenden para circular libremente con el lubricante, y en todo caso, estas partículas empezarán a cortar las superficies de los dientes con ayuda de alta presión en la dirección del deslizamiento.

El desgaste producido de este modo en principio, para engranajes nuevos, es beneficioso, pues alisa las superficies en contacto, distribuyendo de mejor manera las cargas aplicadas, en lo que se denomina periodo de asentamiento del engrane. Sin embargo, luego de este periodo puede llegar hasta casos severos de desgaste adhesivo, que toman el nombre de scuffing, mismo que se detalla en el siguiente tema.

Si bien puede apuntarse como culpable a factores como las formas del perfil de diente, materiales, acabados o tratamientos, la fuente principal para fallos de este tipo es el lubricante y las condiciones en que se desarrolla la lubricación.

2.3.3.3 Desgaste corrosivo

Este tipo de desgaste es un daño superficial del engranaje debido a la acción química de ciertas sustancias activas que muchas veces son componentes del lubricante, comúnmente ácidos y aditivos, además de la humedad y otros agentes corrosivos que han contaminado el aceite, cuyo efecto tiene como agravante las altas temperaturas de rodaje.

A menudo, la corrosión ataca a los bordes de grano, resultando en un pitting muy fino, que se distribuye en los flancos de los dientes en el engranaje, como se ilustra en la Figura 2.14, y que muy probablemente conduce a la falla.

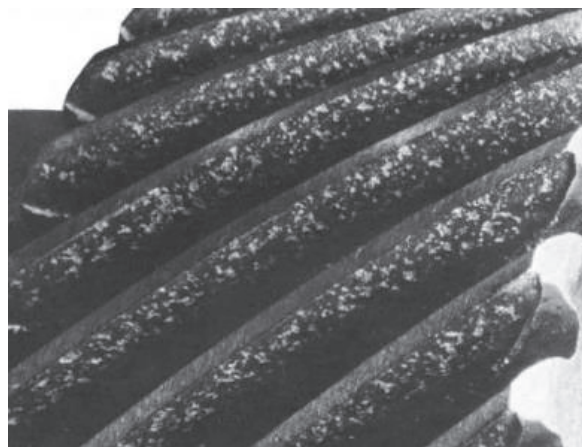


Figura 2.14 Desgaste corrosivo.

Fuente: (Shiple, 1967)

Por lo tanto se debe controlar los efectos de aditivos en el lubricante tales como anti-desgaste, alta presión, etc., regularizar el recambio de aceite, impedir el ingreso de agentes externos a la caja de engranajes y además poner cuidado en las posibles reacciones químicas en el material durante la fabricación del elemento mecánico.

2.3.3.4 Desgaste adhesivo severo (scuffing)

El Scuffing es un tipo severo de desgaste adhesivo que generalmente puede atribuirse a la mala calidad del lubricante o las condiciones de lubricación, mas no a la resistencia del material, por lo que la dureza no es un indicativo de resistencia al scuffing. Es un daño local, que ocurre en las zonas de los engranajes, en donde existe alta presión de contacto, altas velocidades de deslizamiento y por ende altas temperaturas, es decir, en los flancos de los dientes. Se manifiesta por la presencia de superficies color mate, pequeños desgarros y rugosidad microscópica en la dirección de deslizamiento, indicados en el ejemplo de la Figura 2.15.

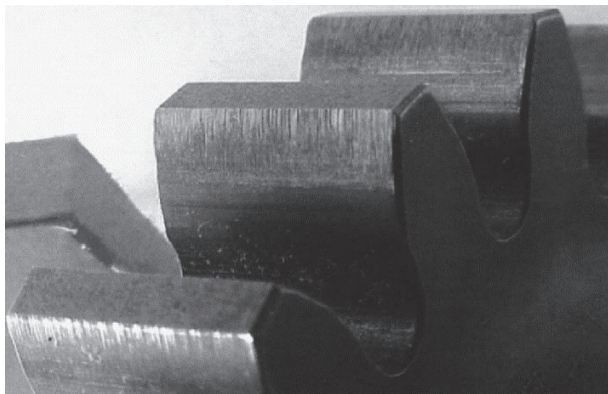


Figura 2.15 Desgaste adhesivo o scuffing

Fuente: (Davis, 2005)

El mecanismo mediante el cual se explica este tipo de falla es el desarrollo de microsoldaduras en estado sólido entre las partes sobresalientes de las superficies engranadas, debido a las altas presiones y temperaturas. Luego de ello, con el deslizamiento se produce una transferencia de material cuando las juntas soldadas se desprenden de una de las superficies y una contaminación

del medio lubricante cuando las juntas se desprenden por completo de la superficie de engrane. Es por ello que un análisis que muestra transferencia de material hacia una superficie es una evidencia de falla por scuffing. La Figura 2.16 muestra el material depositado en la superficie del flanco que ha fallado por scuffing.

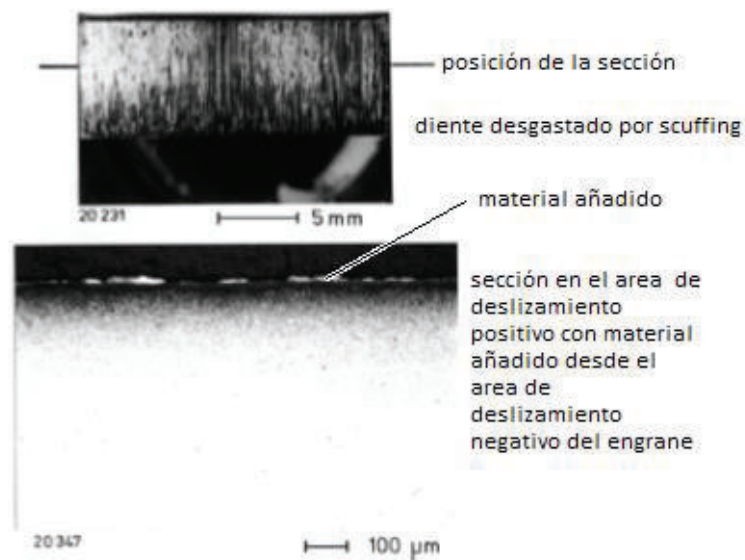


Figura 2.16 Material transferido al flanco de un piñón.

Fuente: (Davis, 2005)

El daño a través de este tipo de falla es instantáneo, es decir, ocurre inmediatamente después de la puesta en marcha del engrane, a diferencia del pitting o el desgaste, que son evidentes después de un considerable periodo de funcionamiento.

Entonces las medidas a tomar en cuanto a la lubricación son: asegurar el espesor suficiente de la película de aceite tal que se evite el contacto metal-metal en el engrane, controlar la degradación del aceite como resultado de la contaminación con partículas metálicas principalmente, evacuar el calor transferido al aceite, y considerar la inclusión de aditivos anti scuffing que reaccionan con el metal en las zonas de alta presión, formando capas que impiden las microsoldaduras y el contacto directo entre superficies engranadas.

2.3.4 FRACTURA POR ESFUERZO

Se produce como resultado de la acumulación de esfuerzos residuales dentro del engranaje, cuando estos son de tal magnitud que superan la resistencia del material, tomando origen en los puntos críticos, pudiendo ser éstos internos o externos.

2.3.4.1 Fractura interna

Generalmente ocurre en la interface entre la capa superficial endurecida y lo que sería el núcleo del engranaje, justamente en la zona superior del diente, como consecuencia de los esfuerzos residuales sumados con los esfuerzos desarrollados por las cargas de trabajo. Se puede identificar los inicios de la falla, mediante el apareamiento de grietas que atraviesan de un extremo a otro las caras del diente, como se aprecia en la Figura 2.17.

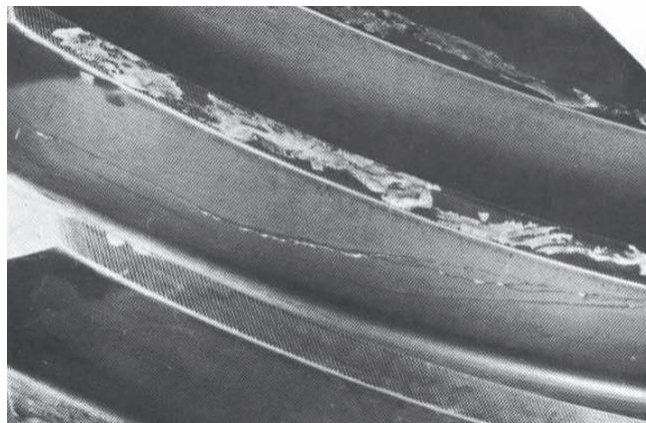


Figura 2.17 Grietas longitudinales en el flanco.

Fuente: (Shiple, 1967)

Cuando se ha evidenciado lo anterior, el engranaje debe ser reemplazado, por uno con mayor profundidad de endurecimiento, con nuevas consideraciones de diseño, tratamiento, o material base, ya que la etapa final puede ser el desprendimiento total o parcial de la cabeza del diente, tal como se ilustra a continuación en la Figura 2.18.

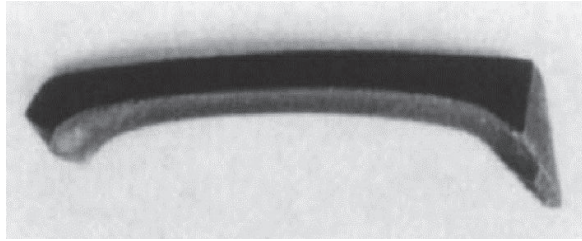


Figura 2.18 Fractura de la cabeza del diente.

Fuente: (Davis, 2005)

2.3.4.2 Fractura externa

Es aquella que tiene origen en los concentradores de esfuerzos presentes en la geometría del elemento mecánico, por lo cual son relativamente fáciles de analizar. Al igual que en la fractura interna, se debe a los esfuerzos residuales, que en este caso encuentran como detonante las concentraciones de esfuerzos, tales como los impuestos por el diseño, o también los que resultan de una fabricación defectuosa, como puede ser una grieta en la cara del diente, caso que se muestra en la Figura 2.19 a modo de ejemplo, en donde el engranaje falló antes de su montaje.

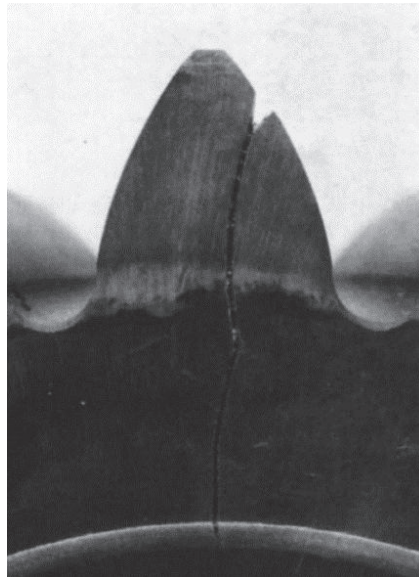


Figura 2.19 Fractura a través de una grieta en la cara del diente.

Fuente: (Davis, 2005)

2.3.4.3 Maclaje

El maclaje es un tipo de deformación plástica producida por la aplicación de un esfuerzo de cizalladura a la red atómica en la orientación que muestra la Figura 2.20, de manera que el desplazamiento de átomos inicia a partir de un plano llamado de maclado, cuya dirección es la misma de dichos esfuerzos.

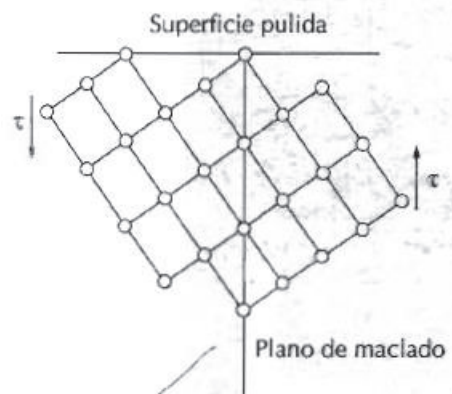


Figura 2.20 Plano de maclado.

Fuente: (Callister, 1996)

Como resultado del cambio de posiciones de los átomos, el plano de maclado divide a la red en partes simétricamente orientadas, siendo la magnitud del desplazamiento proporcional al ancho de la región de maclado, que se muestra en la Figura 2.21, y proporciona la apariencia de bandas en la observación microscópica.

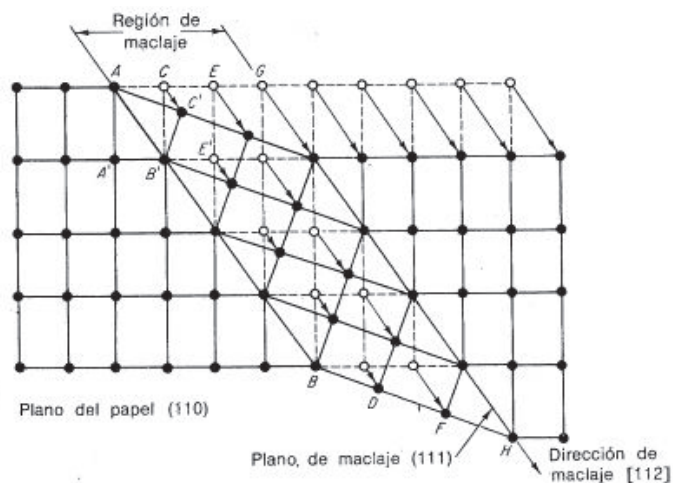


Figura 2.21 Región de maclado.

Fuente: (Avner, 1995)

La importancia del maclado radica en el hecho de que, como es evidente, genera una nueva red cristalina con una orientación diferente a la original, la cual puede favorecer a sistemas de deslizamiento respecto a la orientación de las cargas, permitiendo así una deformación neta aún mayor.

CAPITULO III

ESTUDIO CASO PRÁCTICO

Para realizar el análisis de falla de los elementos mecánicos que son objeto de estudio de este trabajo es necesario tener el conocimiento de datos fundamentales sobre varios aspectos del mecanismo, por lo cual este capítulo está orientado a recabar información, a través de diferentes exámenes, referente a constitución geométrica, especificaciones, dureza, características de falla, microestructura y esfuerzos de trabajo.

3.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS Y GEOMÉTRICAS DEL REDUCTOR

Para la caracterización del reductor de velocidades se ha utilizado tanto la información del catálogo del fabricante (ver anexo B), como también los datos recolectados en la inspección de los elementos mecánicos en el laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla.

El presente estudio de caso corresponde al análisis de un reductor de velocidades marca ROSSI (Figura 3.1) de corona globoide y sinfín cilíndrico con perfil de diente tipo ZI, montados dentro de una carcasa monobloque de fundición, utilizando lubricación con aceite sintético mediante baño.

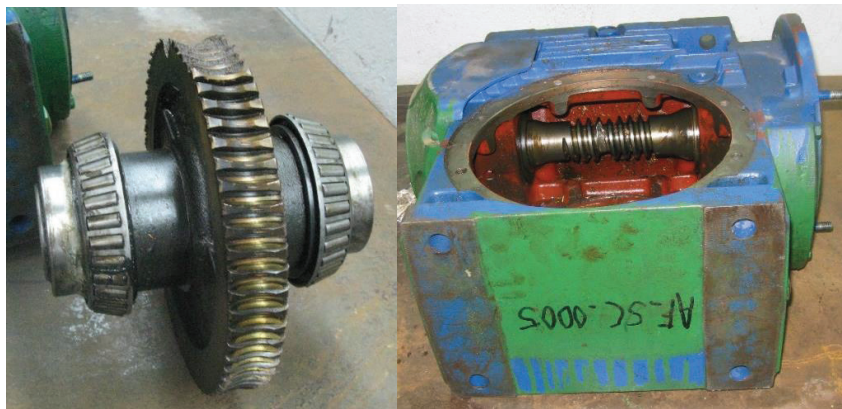


Figura 3.1 Reductor de velocidades
Fuente: Propia.

De acuerdo a los datos de placa que se muestran en la Figura 3.2, la denominación del reductor es MRV 161 UO2A. Las letras MR indican el tipo de máquina, es decir motor-reductor, la letra V significa que es de simple reducción, 161 es el tamaño del reductor haciendo referencia a la distancia entre ejes en [mm], y la letra O indica ortogonalidad entre ejes.



Figura 3.2 Placa del reductor

Fuente: Propia.

Con dicha denominación, es posible extraer del catálogo información importante, referente a características del funcionamiento a régimen nominal (Tabla 3.1), propiedades geométricas del engrane sinfín-corona (Tabla 3.2), y los materiales de fabricación para los principales componentes del reductor (Tabla 3.3).

Tabla 3.1 Valores para funcionamiento a régimen nominal.

Ítem	Valor
Potencia de entrada $P_1 = P_i$	7,5 [kW]
Potencia de salida $P_2 = P_o$	5,8 [kW]
Velocidad de entrada n_1	1.400 [rpm]
Velocidad de salida n_2	22,2 [rpm]

Fuente: (Rossi Habasit Group, 2011)

Tabla 3.2 Geometría general del engrane.

Ítem	Valor
Número de dientes sinfín Z_1	1
Número de dientes corona Z_2	63
Relación de transmisión i	63
Módulo axial m_x	4,4 [mm]
Ángulo de Hélice γ	$5^\circ 5' = 5,083^\circ$

Fuente: (Rossi Habasit Group, 2011)

Tabla 3.3 Características de los componentes principales.

Componente	Material / Fabricación
Carcasa	Fundición 200UNI ISO185 / Maquinado
Sinfín	Acero 20MnCr5 UNI7846-78 / Maquinado, Rectificado, Superacabado, Cementado/Templado
Corona	Aleación de cobre CuSn12Ni 2 – B / Maquinado
Rodamiento sinfín lado motor	NSK HR 32212C
Rodamiento sinfín lado ventilador	31310A
Rodamientos corona	SKF 32020 X/Q

Fuente: (Rossi Habasit Group, 2011)

Además, en el laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla se realizó la medición de algunos parámetros, fundamentales para el siguiente apartado, los cuales se encuentran tabulados a continuación, en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Mediciones en el laboratorio.

Ítem	Valor
Paso axial en el sinfín p	13,6 [mm]
Ángulo de presión normal α	18°
Diámetro exterior del roscado del sinfín D_{a1}	57,8 [mm]
Longitud de la rosca del sinfín L	113 [mm]
Ancho de la corona F	39 [mm]

Fuente: Propia.

3.2 GENERACIÓN DEL MODELO CAD

En este apartado se procede al cálculo dimensional de los diferentes parámetros, tanto del sinfín como de la corona, utilizando el programa computacional AUTODESK INVENTOR 2015, el cual requiere como datos de entrada, el módulo de engrane, el número de dientes y el ancho de la corona, número de roscas y longitud roscada en el sinfín, ángulos de hélice y presión normal, tal como se muestra en el cuadro de diálogo de la Figura 3.3.

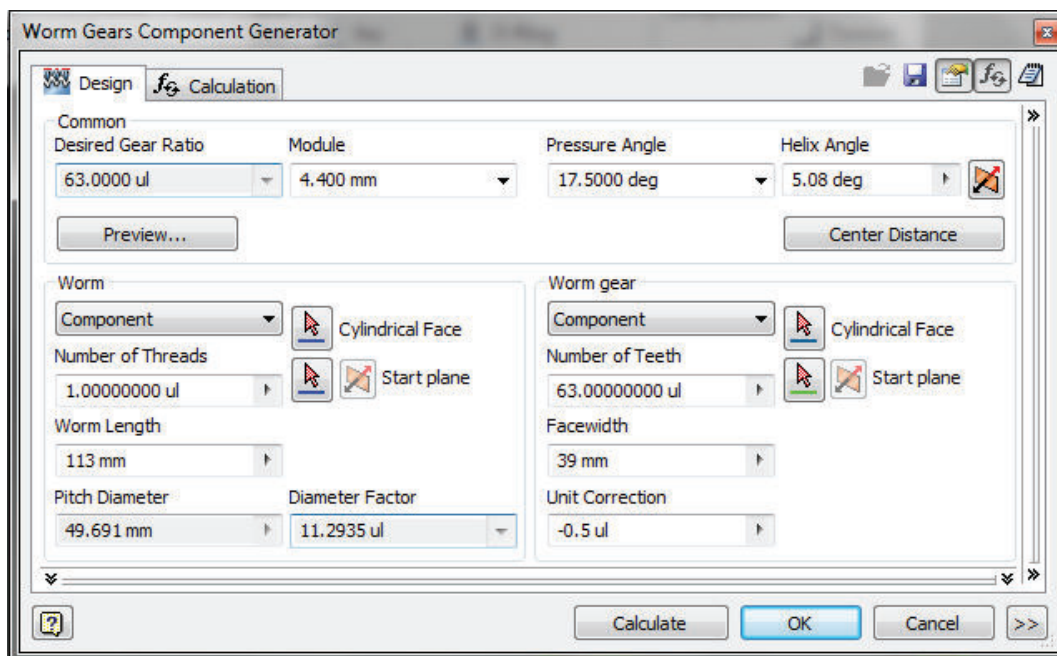


Figura 3.3 Datos de entrada.

Fuente: Propia.

Como puede apreciarse en la anterior Figura 3.3, se han introducido los datos presentados en las tablas 3.2 y 3.4, con la excepción del valor para el ángulo de presión normal, se ha decidido seleccionar un valor normalizado contiguo al indicado, en este caso de $17,5^\circ$.

De esta manera se desarrolla el modelo tridimensional, como se indica en la Figura 3.4, obtenido en base a los parámetros geométricos y dimensionales calculados por el programa, que se listan en la Tabla 3.5.

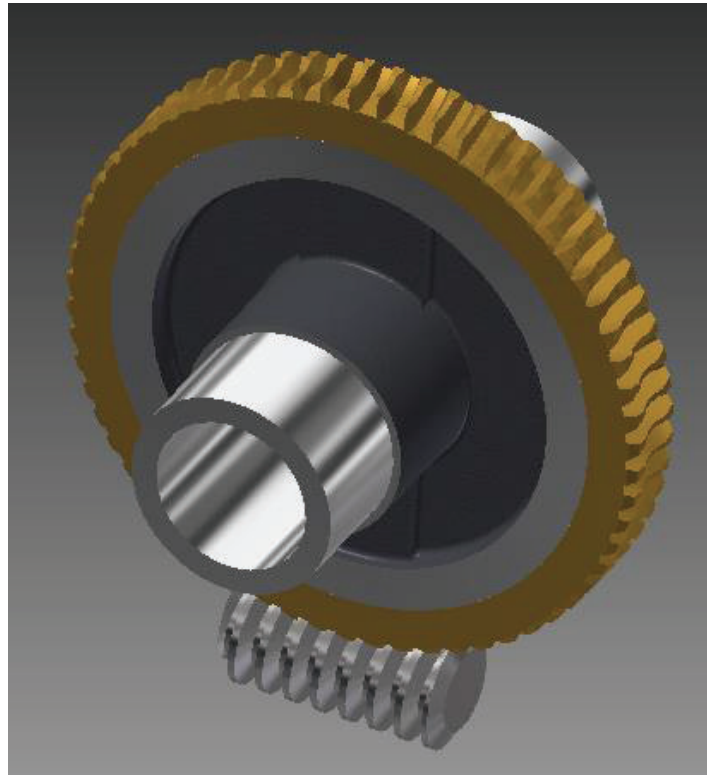


Figura 3.4 Modelo CAD del sinfín-corona.

Fuente: Propia.

Tabla 3.5 Parámetros geométricos y dimensionales.

Ítem	Valor
Paso axial en sinfín p	13,878 [mm]
Diámetro externo de corona D_{ae}	287,093 [mm]
Diámetro de punta corona D_{a2}	282,693 [mm]
Ángulo de chaflán de dientes corona δ	41,82°
Diámetro de raíz de corona D_{f2}	263,333 [mm]
Diámetro de paso de corona D_2	278,293 [mm]
Distancia entre centros a_w	161,792 [mm]
Diámetro de raíz de sinfín D_{f1}	39,131 [mm]
Diámetro de paso de sinfín D_1	49,691 [mm]
Diámetro externo de sinfín D_{a1}	58,491 [mm]
Factor de diámetro q	11,294

Fuente: Propia.

Hay que destacar que de todos aquellos parámetros geométricos y dimensionales que se pueden obtener en el mencionado programa computacional, se ha seleccionado tanto los más representativos como los necesarios para valorar al modelo y los que posteriormente serán requeridos en cálculos de esfuerzos. Las Figura 3.5 y 3.6 muestran gráficamente las dimensiones generales del conjunto sinfín-corona.

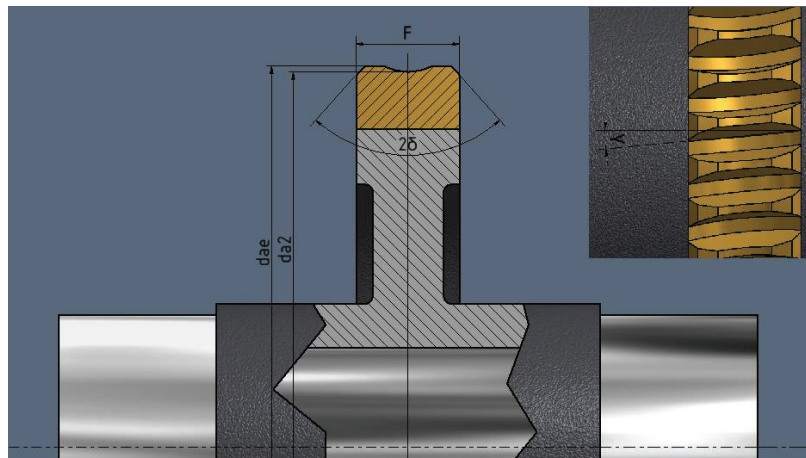


Figura 3.5 Ancho de cara F , diámetro externo de corona D_{ae} , diámetro de punta corona D_{a2} , ángulo de chaflán de dientes δ , ángulo de hélice γ .

Fuente: Propia.

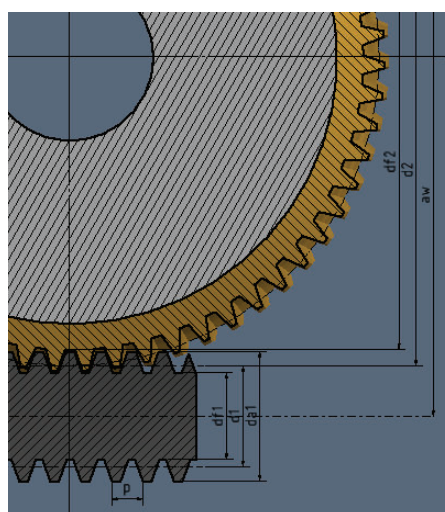


Figura 3.6 Diámetro de raíz de corona D_{f2} , diámetro de paso de corona D_2 , distancia entre centros a_w , diámetro de raíz de sinfín D_{f1} , diámetro de paso de sinfín D_1 , diámetro externo de sinfín D_{a1} , paso axial p .

Fuente: Propia.

Para valorar si el modelo CAD diseñado cumple con lo requerido para cálculos posteriores, se procede a comparar algunos parámetros tanto del sinfín como de la corona, con los medidos en laboratorio, otros provenientes del catálogo del producto, y aquellos calculados manualmente, con los arrojados por AUTODESK INVENTOR 2015.

El desarrollo del cálculo es el siguiente:

$$D_2 = \frac{Z_2 \cdot p}{\pi} = 272,728[\text{mm}]$$

$$D_1 = 2a_w - D_2 = 49,272[\text{mm}]$$

$$q = \frac{D_1 \cdot \pi}{p} = 11,382$$

Ahora se resumen los valores a compararse en la tabla 3.6.

Tabla 3.6 Comparación de parámetros.

Parámetro	Expresión	Mediciones, datos de catálogo y cálculos manuales	Resultados del modelo CAD
Diámetro de paso corona	D_2	272,728 [mm]	278,293 [mm]
Diámetro de paso sinfín	D_1	49,272 [mm]	49,691 [mm]
Factor de diámetro	q	11,382	11,294
Paso axial sinfín	p	13,6 [mm]	13,878 [mm]
Distancia entre ejes	a_w	161 [mm]	161,792 [mm]
Diámetro exterior sinfín	D_{a1}	57,8 [mm]	58,491 [mm]

Fuente: Propia.

Como es evidente, se tiene una aproximación bastante buena, por lo cual se puede trabajar con cualquiera de las columnas de datos, sin embargo, para apegarse a la realidad se utilizará la primera de ellas.

3.3 ANÁLISIS QUÍMICO

El análisis de composición química de las muestras tomadas del tornillo sinfín y corona, se lo realiza mediante espectrometría de chispa, la misma que consiste en detectar las longitudes de onda característica de cada elemento, esto se da cuando sus electrones son excitados gracias a una chispa eléctrica, esta chispa es producida en un pequeño espacio existente entre dos electrodos (Pérez, 2014).

Este análisis se realizó en el Laboratorio de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional, empleando el espectrómetro de Chispa marca BRUKER, modelo Q4TASMAN. Los resultados de la composición química del tornillo sinfín y la corona se encuentran en el anexo A, a continuación se presenta un resumen de dichos resultados en las tablas 3.7 y 3.8.

Tabla 3.7 Composición química del tornillo sinfín.

Elementos	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni	%Cu	%Al	%Ce	%Pb	%Sb	%Ti	%Fe
Obtenidos en laboratorio	0.24	0.31	1.41	0.03	0.01	1.17	0.03	0.07	0.15	0.04	0.02	0.05	0.01	0.01	96.3

Fuente: Departamento de Metalurgia Extractiva, EPN.

Tabla 3.8 Composición química de la corona.

Elementos	%Zn	%Pb	%Sn	%Ni	%Si	%Ag	%Sb	%Nb	%Te	%Cu
Obtenidos en laboratorio	0.01	0.10	10.83	1.47	0.01	0.02	0.02	0.01	0.07	87.39

Fuente: Departamento de Metalurgia Extractiva, EPN.

De acuerdo con la composición química se determina que el material del tornillo sinfín (Nayar, 2000) corresponde al acero 20MnCr5 (UNI 7846-78), y para el caso de la corona (Steelnumber, 2011) corresponde a un broce al níquel CuSn12Ni2 (EN1982-98).

La Tabla 3.9 presenta las propiedades mecánicas pertenecientes al tipo de aleación de cobre que ha sido determinado mediante el análisis químico.

Tabla 3.9 Propiedades mecánicas de la aleación de cobre CuSn12Ni2-B.

Propiedad Mecánica	Magnitud	
	MPa	ksi
Resistencia a la tensión	280	40,61
Límite elástico	160	23,21
Elongación [%]	12%	

Fuente: (MSU Metallschmelzwerk Ulm, 2015)

3.4 EXAMEN MACROSCÓPICO

Este examen se realizó en el Microscopio Estereoscópico Olympus SZX7, con este examen se busca localizar el inicio de la fractura, el mecanismo y dirección de la propagación de las grietas y el tipo de carga involucrado en la falla.

3.4.1 MACROSCOPIA DEL TORNILLO SINFIN

A continuación se presentan las fotomacrografías del tornillo sinfín. La Figura 3.7 muestra la fractura del filete del tornillo sinfín en la zona donde se transmite carga. Al realizar un acercamiento en la mencionada zona se observan marcas características de falla por fatiga, como lo son las marcas de playa y marcas de trinquete en las Figuras 3.8 y 3.9 respectivamente. La Figura 3.10 por su parte permite evidenciar la presencia de una marca de maquinado cerca de la raíz del diente.



Figura 3.7 Fractura del filete en la zona de contacto con la corona, sin aumento.

Fuente: Propia.

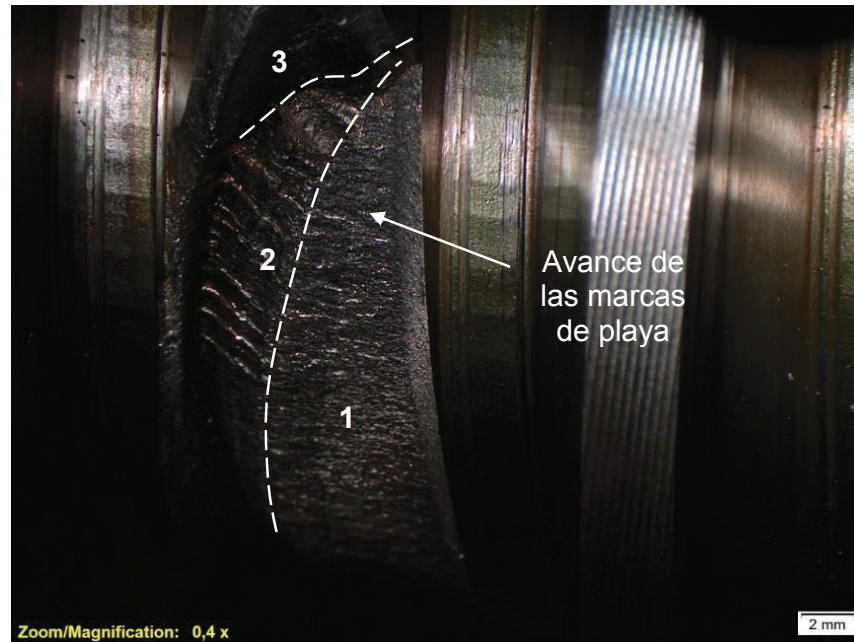


Figura 3.8 Presencia de marcas de playa donde se puede distinguir tres zonas, de iniciación, propagación y desgarre. Aumento a 4X.

Fuente: Propia.

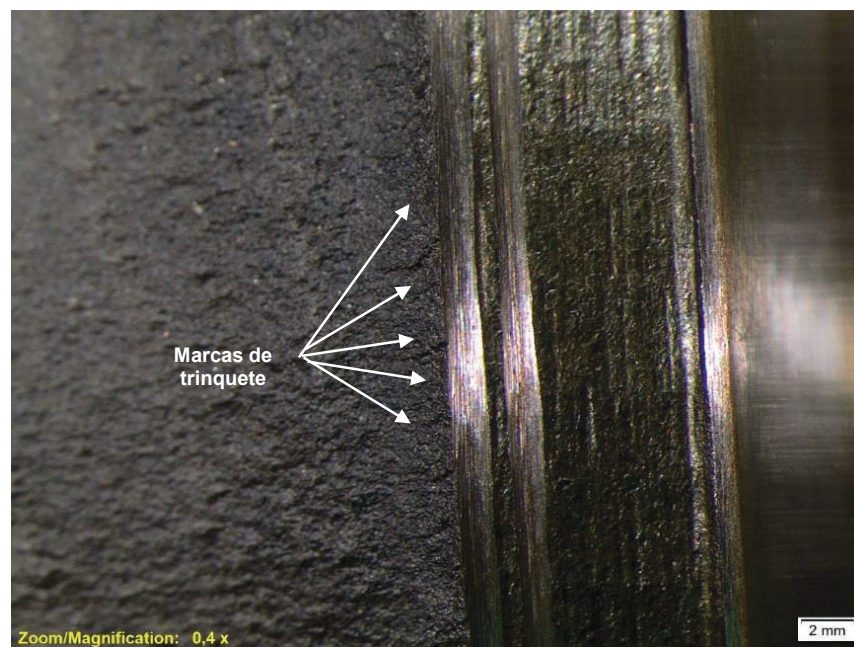


Figura 3.9 Presencia de marcas de trinquete o dientes de sierra en la raíz del filete, Aumento a 4X.

Fuente: Propia.

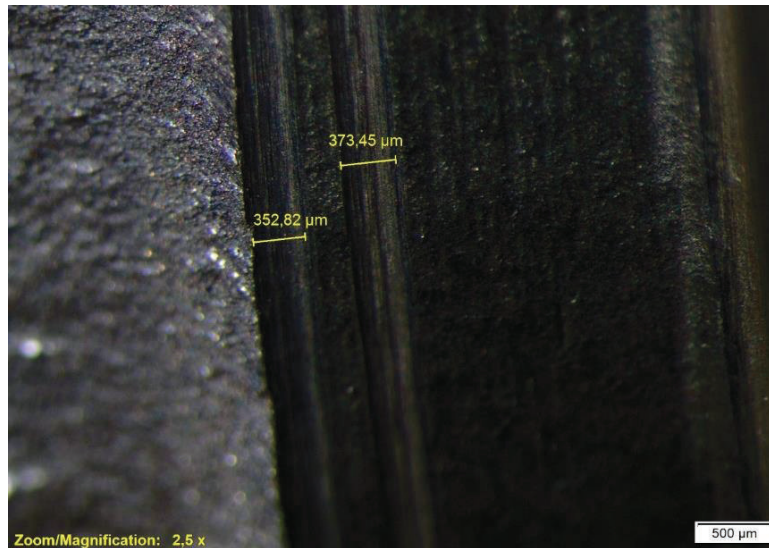


Figura 3.10 Marca de maquinado cercana a la raíz del filete, de un ancho promedio de 363 μm . Aumento a 25X.

Fuente: Propia.

3.4.2 MACROSCOPIA DE LA CORONA

En esta sección se presentan las fotomicrografías de la corona en donde se puede apreciar la zona mayormente afectada (zona 1 de la Figura 3.11), en las Figuras 3.12 y 3.13 se hace un acercamiento a la zona de falla.

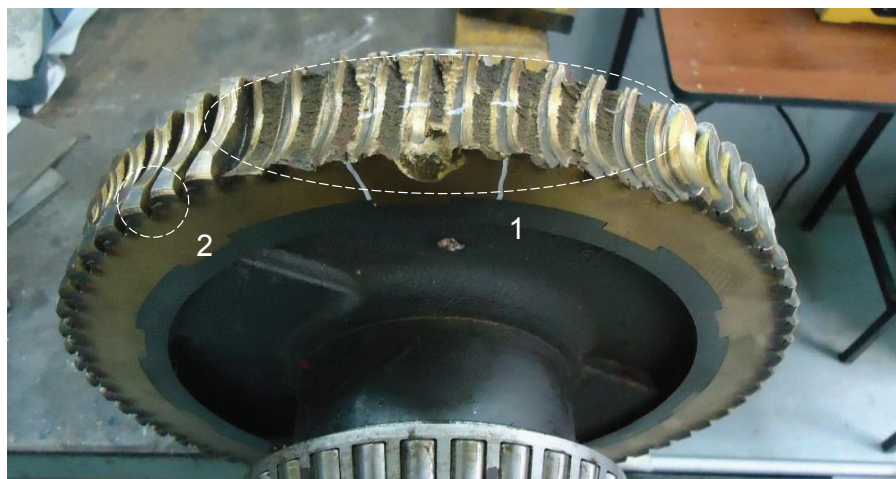


Figura 3.11 Fractura en los dientes de la corona (1) y desgarre en la raíz de los dientes (2), sin aumento.

Fuente: Propia.

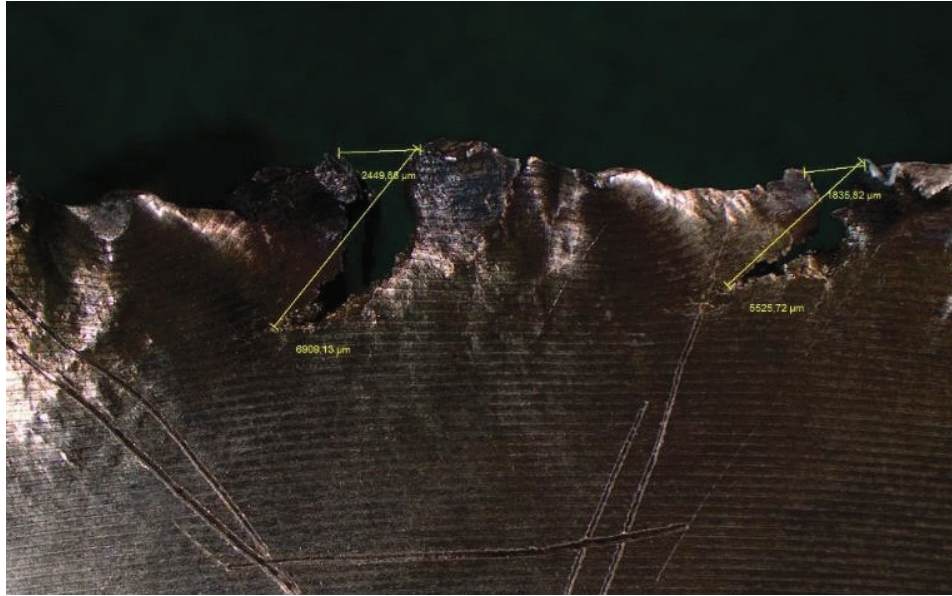


Figura 3.12 Desgarre del material en la raíz de los dientes. Aumento a 4X

Fuente: Propia.



Figura 3.13 Aplastamiento en la raíz de los dientes. Aumento a 4X

Fuente: Propia.

3.5 EXAMEN MICROSCÓPICO

La importancia de la observación microscópica radica en la posibilidad de la predicción de propiedades y comportamiento de los materiales mediante la comprensión de cómo estos se encuentran asociados con la estructura y, por qué no, con los defectos presentes en dichos materiales.

En ciertos materiales, las estructuras que los componen son de dimensiones macroscópicas, tal como se muestra en la siguiente Figura 3.14, donde se distinguen a simple vista los granos como elementos estructurales en la superficie de una lámina metálica galvanizada.



Figura 3.14 Granos de Zinc en una lámina galvanizada.

Fuente: (Chemie master, s.f.)

Sin embargo, los metales en general se encuentran constituidos por granos microscópicos en el orden de micrómetros, por lo cual deben observarse con ayuda de instrumentos ópticos o electrónicos de modo que puedan investigarse adecuadamente sus características.

3.5.1 METALOGRAFÍAS

Es una técnica de investigación de la estructura de los materiales, denominada así debido a que los metales fueron los primeros materiales en someterse a este tipo de análisis, y se considera como una herramienta elemental para la caracterización estructural de materiales, ya que en base a la observación de su microestructura, determinación de tamaño y forma de grano, distribución de

fases e inclusiones permite adquirir conciencia sobre aspectos como propiedades mecánicas, tratamientos térmicos y procesos de manufactura a los cuales se encuentra sometido un material en estudio.

Por tanto, el microscopio es un instrumento fundamental en la investigación, del cual se distinguen dos clases: el óptico, en el cual se observan las distintas regiones de la microestructura gracias al contraste generado por las diferentes características en las propiedades de reflexión que ellas poseen, y el electrónico, en el cual se utilizan haces de electrones con altas velocidades y pequeñas longitudes de onda, en el orden de 0,003 nm, que luego de incidir en el material, son captados por lentes magnéticas para generar las imágenes.

3.5.1.1 Extracción de la probeta

Consiste en la separación de una porción del material o elemento mecánico analizado, de manera que su localización sea conveniente, por ejemplo considerando zonas de falla, orientaciones de distorsión de grano por trabajado, endurecimientos superficiales, e incluso zonas donde el material posiblemente se ha mantenido intacto.

La extracción se desarrolla por corte, mediante el aserrado para materiales blandos, y con discos abrasivos para materiales duros, siempre en presencia de algún medio refrigerante para no sobrecalentar la muestra y, por consiguiente, no alterar la microestructura del material. El tamaño recomendado para las muestras es de 20x20x15 mm.

3.5.1.2 Montaje o empastillado

Consiste en embutir las muestras dentro de algún material, generalmente polimérico, de manera que la probeta embebida sea manejable, por ejemplo cuando se cuenta con bajas dimensiones. A menudo se utilizan polímeros no agresivos con el metal, termoestables para asegurar rigidez, y de curado en frío para evitar sobrecalentamientos producidos por polimerizaciones con temperatura y presión.

La recomendación para el tamaño del embutido es de 20 a 25 mm de diámetro, como las que se ilustran en la Figura 3.15.

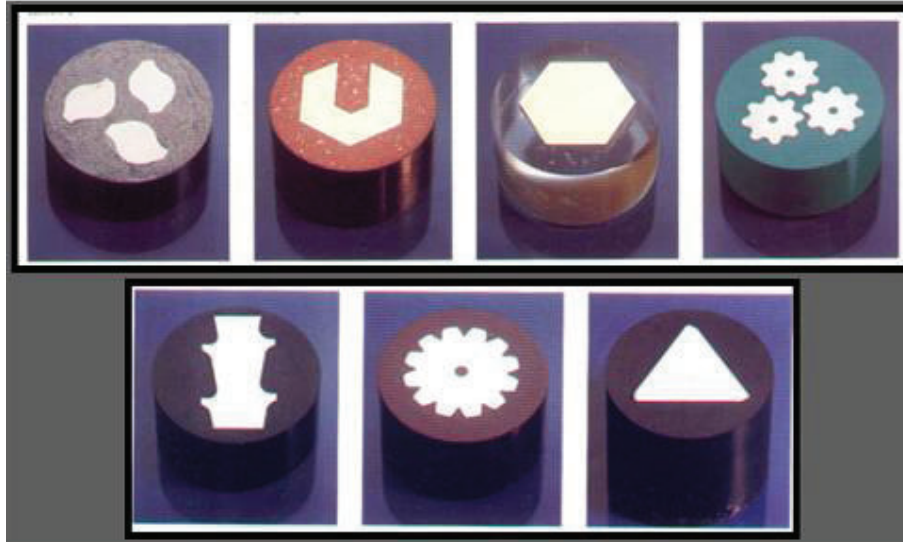


Figura 3.15 Montaje de probetas.

Fuente: (González, 2009)

3.5.1.3 Desbaste

Consiste en pulir la superficie analizada de la probeta, utilizando abrasivos tales como hojas de lija, avanzando desde los más bastos hasta los más finos. La señal para continuar el desbaste con un abrasivo más fino es la eliminación total de las líneas producidas por el anterior, luego de lo cual, se debe girar la probeta un ángulo de 90° para cambiar el sentido de las nuevas marcas.

Hay que tener en cuenta que en esta etapa se define la planitud de la probeta, lo cual es fundamental en la observación, ya que debido a los grandes aumentos en los microscopios, no es posible enfocar simultáneamente superficies que se encuentran a diferentes niveles.

Este paso puede realizarse manualmente o con ayuda de aparatos, además en ocasiones se utiliza lubricantes o refrigerantes que impiden el sobrecalentamiento.

3.5.1.4 Pulido

La finalidad del pulido es eliminar por completo los rayones generados en la fase anterior, dando como resultado una superficie especular, de modo que pueda observarse únicamente los detalles y características propios de la microestructura del material.

Este acabado se logra mediante el pulido sobre una rueda giratoria cubierta con paño, en donde se depositan partículas abrasivas de tamaño determinado, siempre en presencia de refrigeración, tal como chorros de agua que evitan sobrecalentamientos.

3.5.1.5 Ataque químico

Se fundamenta en el hecho de que los diferentes microconstituyentes o fases, así como planos cristalográficos de distinta orientación en un determinado material, poseen diferentes velocidades de reacción con compuestos químicos utilizados como atacantes. Esta diferencia de velocidad resulta en diferentes coloraciones, proporcionando un contraste, por medio de un ataque selectivo, que permite revelar la microestructura del material o aleación.

Generalmente se utilizan como atacantes químicos a ciertos ácidos orgánicos disueltos en agua, alcohol o glicerina. Los más comunes se listan en la Tabla 3.10.

Las consideraciones más importantes para el ataque químico son: el material de análisis y el tiempo de ataque. La primera se refiere a que existe una correspondencia entre reactivos y tipos de materiales, como se muestra en la tabla siguiente. La segunda por su parte indica que se debe controlar adecuadamente el tiempo de exposición del material ante el reactivo, pues un subataque no proporciona un contraste adecuado, y por el contrario un sobreataque obscurece la superficie sin que se puedan diferenciar las fases.

Tabla 3.10 Reactivos comunes.

Nombre del Reactivo	Composición	Aplicaciones
Ácido Nítrico (Nital 2%)	Ácido nítrico.....2 cm3. Alcohol.....100 cm3.	Aceros, Hierros, Fundiciones
Ácido Pítrico (Picral)	Ácido pítrico.....4 gr. Alcohol.....100 cm3.	Aceros de baja aleación
Ácido clorhídrico	HCl concentrado.....1 cm3. Agua.....100 cm3.	Aceros templados
Reactivo de Bolton	Ácido pítrico.....6 gr. Alcohol etílico.....78 cm3. Ácido nítrico.....2 cm3. Agua.....20 cm3.	Fundiciones
Ácido Nítrico concentrado	Ácido nítrico concentrado 50 cm3.	Latones $\alpha + \beta$
Persulfato de amonio	Persulfato de amonio ..10 gr. Agua100 gr.	Cobre y sus aleaciones
Cloruro férrico ácido	Cloruro férrico.....5 gr. Agua.....5 cm3. Ácido clorhídrico.....30 cm3. Alcohol isoamílico.... 30 cm3. Alcohol 96°.....30 cm3.	Cobre, zinc y sus aleaciones
Ácido Nítrico	A) Diluido en concentraciones de 0.5, 1 y 10% B) Ácido nítrico diluido en alcohol	Zinc y eutéctico Zn- Al
Ácido fluorhídrico	Ácido fluorhídrico5 ml Agua....99,5 ml	Aluminio

Fuente: (Pampa, 2015)

Básicamente existen dos formas de ataque, una que consiste en sumergir la probeta en el reactivo, y otra es aplicando el compuesto químico con algodón o con la ayuda de un gotero, sobre la superficie del material.

Luego de la reacción que tuvo lugar, se debe asegurar la eliminación completa del reactivo mediante el lavado con alcohol o agua, cuyos restos se eliminan con una corriente de aire.

3.5.2 METALOGRAFÍAS PARA EL CASO DE ESTUDIO

En el presente trabajo, se aplican las técnicas metalográficas para ambos materiales (tornillo sinfín y la corona), en acero aleado y aleación de cobre respectivamente, en concordancia con los procesos involucrados, que se han detallado en los apartados anteriores, con la finalidad de caracterizar los materiales estudiando sus propiedades químicas, mecánicas y metalúrgicas.

3.5.2.1 Micrografía del acero

La muestra del material proviene de un fragmento del filete del sinfín fallado, lo cual facilitó su extracción, sin embargo, debido a su tamaño, se optó por hacer un montaje en resina, tal como se muestra en la Figura 3.16.



Figura 3.16 Montaje de la probeta de acero.

Fuente: Propia.

Nótese que la superficie trabajada es la resultante de una sección normal al flanco del diente, lo cual facilita la apreciación de la profundidad endurecida por el tratamiento térmico indicado por el fabricante en el catálogo, al cual se hace referencia en la Tabla 3.3.

El ataque químico se realiza inicialmente con nital y picral, sin embargo, no al no alcanzar un contraste definido y se opta por usar agua regia, la cual es una mezcla de ácido nítrico y ácido clorhídrico, de modo que también se define el contorno de la interface entre la zona endurecida de las capas superficiales y el núcleo del diente, como lo muestra la Figura 3.17.

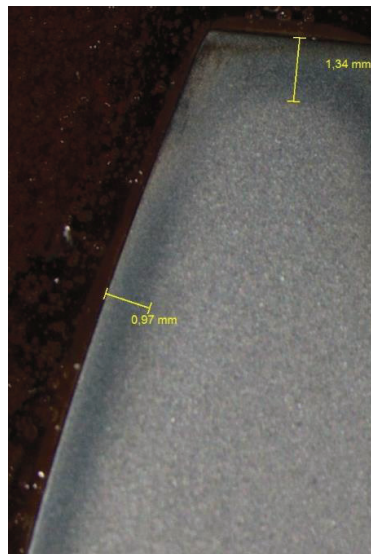


Figura 3.17 Profundidad de endurecido en el flanco del diente.

Fuente: Propia.

Por lo tanto, se tendrán dos tipos de microestructuras, que en este caso resultan ser, para la zona dura martensita, y para la relativamente blanda martensita revenida, cuyas micrografías se muestran en las Figuras 3.18 y 3.19, respectivamente.

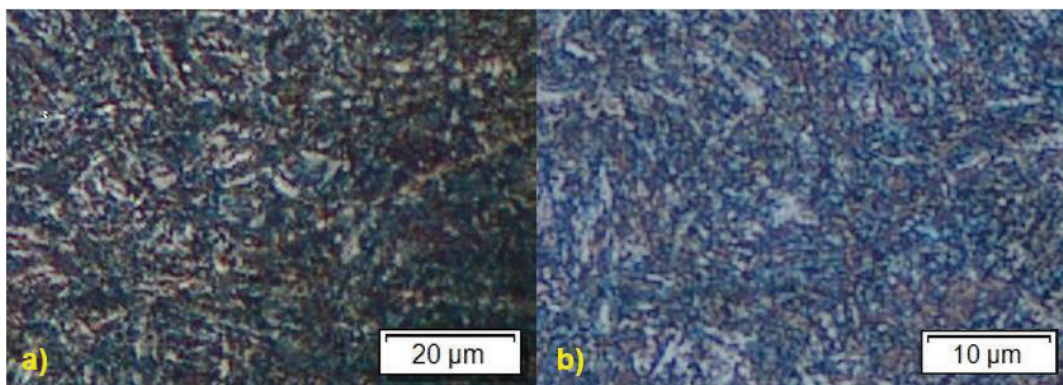


Figura 3.18 Micrografía del tornillo sinfin en el borde del diente, estructura martensítica ataque con agua regia, a) 500X. b) 1000X.

Fuente: Propia.

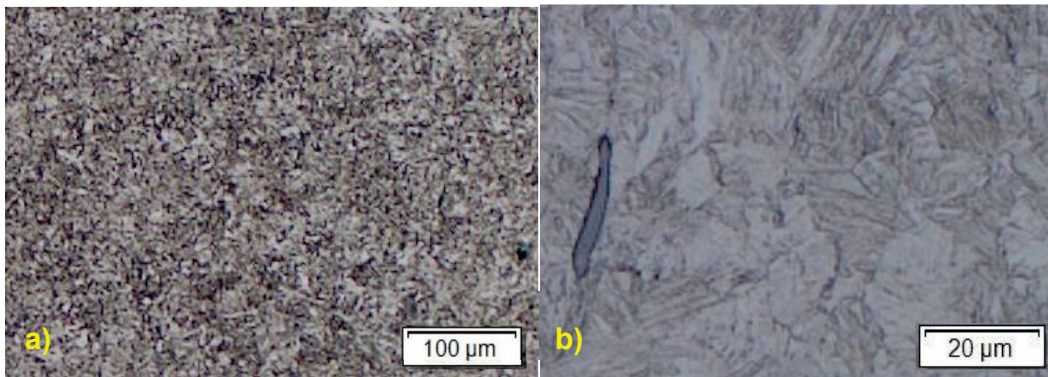


Figura 3.19 Micrografía del tornillo sinfín en el centro del diente, estructura de martensita revenida con inclusiones no metálicas de sulfuro de manganeso, ataque con agua regia, a) 100X, b) 500X.

Fuente: Propia.

3.5.2.2 Micrografía de la corona de aleación de cobre

La porción de material para el análisis corresponde al sector circular de la corona en la zona de fractura de los dientes, misma que se utilizó para la observación macroscópica descrita en la sección 3.4.2.

La extracción de la muestra fue por corte con sierra, como lo ilustra la Figura 3.20, con un tamaño adecuado para un fácil manejo sin requerir un montaje.

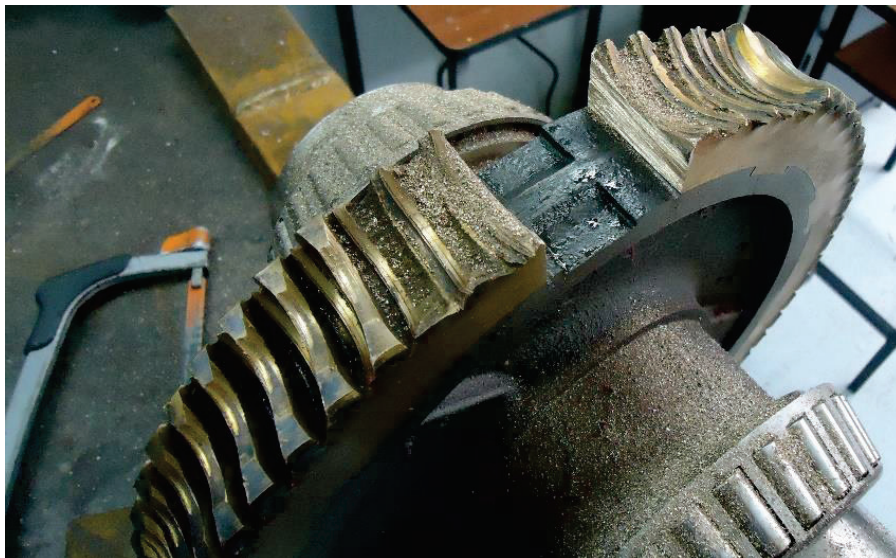


Figura 3.20 Extracción de la muestra de la corona.

Fuente: Propia.

Posteriormente se realiza un corte radial del sector circular de corona, con el fin de analizar la microestructura del elemento mecánico, como se presenta en la Figura 3.21.



Figura 3.21 Probeta de la corona

Fuente: Propia.

Luego de usar cloruro férrico como reactivo en el ataque químico, es posible observar la microestructura y las fases presentes en el material, ver Figuras 3.22, 23, 24 y 25.

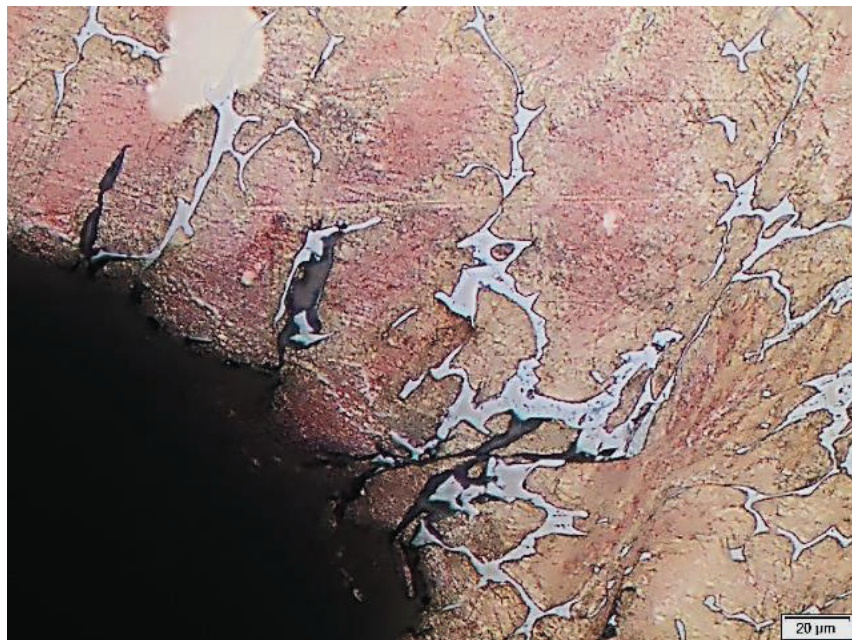


Figura 3.22 Presencia de fase delta en el borde de la falla, 500X.

Fuente: Propia.

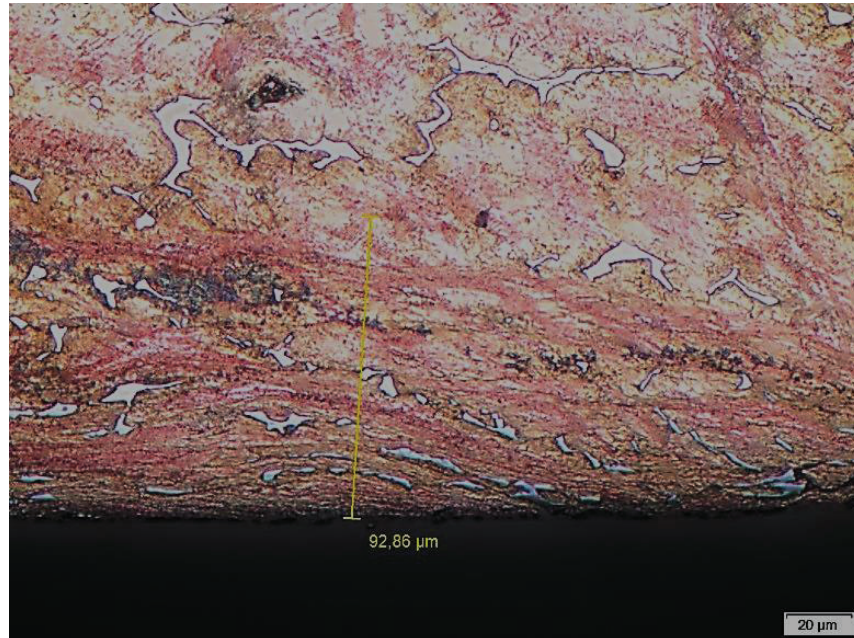


Figura 3.23 Deformación de la microestructura por aplastamiento en el borde de la falla, 500X.

Fuente: Propia.

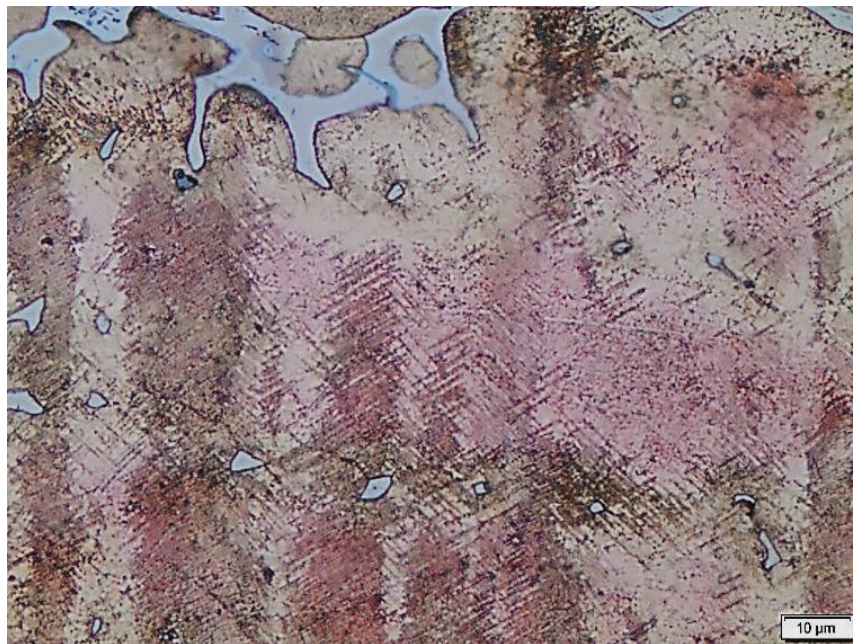


Figura 3.24 Presencia de maclas cercanas al borde de la falla, producto del sobreesfuerzo, 1000X. Nótese la presencia de grietas que provienen de la fase delta.

Fuente: Propia.



Figura 3.25 Microestructura en forma de dendritas, 100X.

Fuente: Propia.

3.6 ENSAYO DE DUREZA

El ensayo se realizó en el microdurómetro automático Metkon Duroline M, este equipo puede medir la microdureza en escala Vickers. Para el ensayo del tornillo sinfín se utilizó una precarga de 1.000 [gf] y para el ensayo de la corona una precarga de 100 [gf]. Este equipo tiene un microscopio que permite observar las microindentaciones en el material con aumentos de 10x o 40X

3.6.1 ENSAYO DE DUREZA EN EL SINFÍN

Para poder conocer el cambio de la dureza que va desde la capa endurecida del filete del sinfín hasta el núcleo del mismo se realiza el ensayo a lo largo de la sección transversal del filete, efectuándose una distribución de microindentaciones como se muestra en la Figura 3.26. Los valores de dureza para los puntos analizados se listan en la Tabla 3.11.

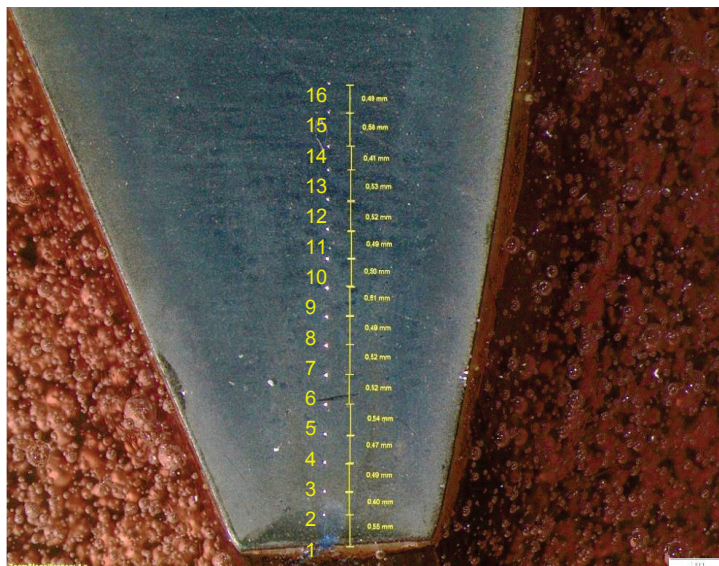


Figura 3.26 Distribución de la microindentaciones en la sección del filete del sinfín, se puede apreciar la zona endurecida, la misma que presenta un color más claro y cuyo espesor de aproximadamente 1,5 mm. Aumento a 10X

Fuente: Propia.

Tabla 3.11 Dureza obtenida en la sección transversal del filete del tornillo sinfín desde el borde hasta el centro del mismo.

Microindentación	Distancia	HV	HRC
1	0,3	761,4	63,0
2	0,8	720,0	61,0
3	1,3	583,2	55,0
4	1,8	475,9	48,0
5	2,3	478,3	48,0
6	2,8	479,9	48,0
7	3,3	461,4	47,0
8	3,8	458,5	47,0
9	4,3	473,3	48,0
10	4,8	485,7	49,0
11	5,3	491,2	49,0
12	5,8	463,6	47,0
13	6,3	479,9	48,0
14	6,8	477,1	48,0
15	7,3	471,7	48,0
16	7,8	440,4	45,0

Fuente: Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla, EPN.

La Figura 3.27 ilustra en su parte a) la huella del indentador en las capas cercanas al borde del diente, mientras que en la parte b) se muestra de manera similar la marca del indentador pero esta vez en el núcleo del diente, pudiéndose apreciar claramente la diferencia en el tamaño del área de huella generada.

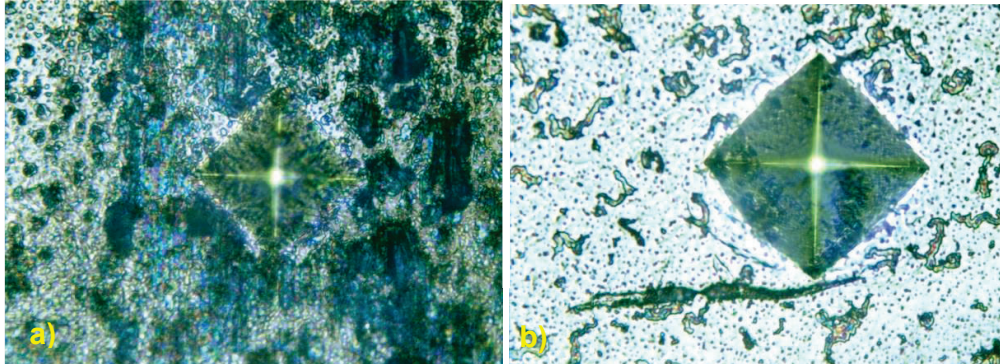


Figura 3.27 Microindentación a) en el borde del diente (punto 1), b) en el centro del diente (punto 16). Aumento 40X.

Fuente: Propia.

3.6.2 ENSAYO EN LA CORONA

El ensayo de dureza de la corona se lo realiza en la sección radial de la corona, tomando cinco mediciones con una separación aproximada de 1mm. A continuación en la Figura 3.28 se presenta la ubicación de dichas indentaciones, y en la Tabla 3.12 se listan los valores de dureza correspondientes a los puntos analizados así como también el promedio entre ellos.



Figura 3.28 Distribución de las microindentaciones a lo largo de la dirección radial de la corona

Fuente: Propia.

Tabla 3.12 Dureza en la sección transversal de la corona.

Número de microindentación	HV
1	106
2	108
3	106
4	112
5	106
Promedio	107,6

Fuente: Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla, EPN.

La Figura 3.29 por su parte presenta las marcas del indentador tanto en el borde de la corona como en su núcleo, pudiéndose apreciar una diferencia despreciable respecto de las áreas de huella de microindentación.



Figura 3.29 Microindentación en la corona, a) Cerca al borde exterior de la corona (punto 1), b) Zona interna de la corona (punto 5). Aumento 40X.

Fuente: Propia.

3.7 ANÁLISIS DE ESFUERZOS

Previo al análisis de esfuerzos se realiza la descripción de cómo se encuentran relacionadas las fuerzas que se ejercen entre sí la corona y el tornillo sinfín durante el funcionamiento del conjunto en el sistema mecánico, y además se

determinan sus valores de manera que puedan ser utilizados en el posterior cálculo de esfuerzos.

3.7.1 RELACIÓN DE FUERZAS

Durante el funcionamiento del sistema mecánico se produce un estado tridimensional de cargas, pues las fuerzas que el sinfín ejerce sobre la corona, y por ende las reacciones opuestas a ellas, tienen componentes axiales, radiales y tangenciales en ambos elementos mecánicos.

Para el análisis de las fuerzas mencionadas se tomará como referencia (Mott, 2006), se usarán los subíndices 1 y 2 para las fuerzas a las que se somete el sinfín y la corona, respectivamente. Si se considera un plano que corta al tornillo sinfín en una sección normal al flanco del diente, formando un ángulo igual a γ (ángulo de paso del tornillo) con su eje, como se muestra en la Figura 3.30, se observan las fuerzas normales F_{nb1} y F_{nb2} en el punto de rodadura C. Estas fuerzas normales a los flancos, son las causantes de las fuerzas de rozamiento $F_{nb1} \cdot \mu$ y $F_{nb2} \cdot \mu$, cuyos sentidos están dados por el movimiento relativo entre el sinfín y la corona.

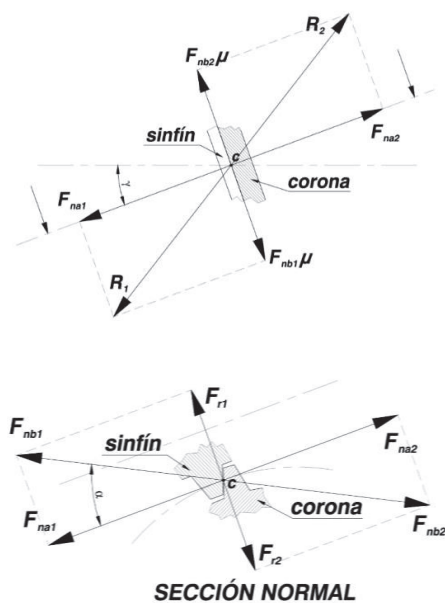


Figura 3.30 Relación de fuerzas entre sinfín-corona.

Fuente: Propia

También obsérvese que la fuerza F_{nb1} se descompone en una fuerza normal F_{na1} y una radial F_{r1} ; por su parte, la fuerza F_{nb2} se descompone en una fuerza tangencial F_{n2} y una radial F_{r2} , mientras la suma vectorial entre la fuerza F_{na1} y $F_{nb1} \cdot \mu$ dan origen a la fuerza resultante R_1 , misma que se descompone a su vez en una fuerza tangencial y axial al sinfín F_{t1} y F_{a1} respectivamente. De manera similar, la resultante R_2 es obtenida a partir de la suma vectorial entre las fuerzas F_{n2} y $F_{nb2} \cdot \mu$, para descomponerse luego en las fuerzas tangencial y radial a la corona, F_{t2} y F_{a2} respectivamente, tal como se indica en la Figura 3.31.

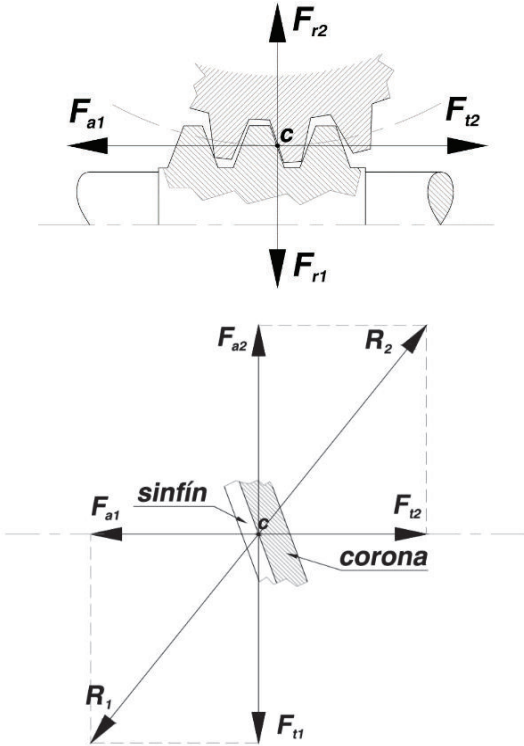


Figura 3.31 Descomposición de fuerzas.

Fuente: Propia

En resumen las fuerzas actuantes en los elementos mecánicos son:

$$F_{t2} = F_{a1} = 2T_0/D_2 \tag{3.1}$$

$$F_{a2} = F_{t1} = F_{r2} \frac{\cos \alpha \sin \gamma + \mu \cos \gamma}{\cos \alpha \cos \gamma - \mu \sin \gamma} \quad (3.2)$$

$$F_{r1} = F_{r2} = \frac{F_{t2} \sin \alpha}{\cos \alpha \cos \gamma - \mu \sin \gamma} \quad (3.3)$$

$$F_{nb1} = F_{nb2} = F_{t2} \cos \alpha \cos \gamma \quad (3.4)$$

Donde T_o es el par torsional de salida, D_2 es el diámetro de la circunferencia de paso de la corona, α es el ángulo de engrane en la sección normal, μ es el coeficiente de rozamiento entre el sinfín y la corona, γ es el ángulo de hélice o de paso del sinfín.

Hay que destacar que por facilidad se utilizará unidades de medida del Sistema Inglés, pues las ecuaciones tomadas de (Mott, 2006) así lo hacen, y al final se transformarán los valores al Sistema Internacional.

El par torsional en [lbf.pulg] de salida es:

$$T_o = 63000 \cdot P_o / n_2 \quad (3.5)$$

Siendo P_o la potencia de salida en [hp] y n_2 la velocidad de giro de la corona en [rpm].

El coeficiente de rozamiento se puede estimar, de acuerdo a la velocidad de deslizamiento v_s en [pie/min], con:

$$\mu = 0.124e^{(-0.074v_s^{0.645})}; \text{ para } v_s < 10 \frac{\text{pies}}{\text{min}} \quad (3.6)$$

$$\mu = 0.103e^{(-0.110v_s^{0.450})} + 0.012; \text{ para } v_s > 10 \frac{\text{pies}}{\text{min}} \quad (3.7)$$

Por su parte, la velocidad de deslizamiento es:

$$v_s = \frac{v_{r2}}{\sin \gamma} = \frac{v_{t1}}{\cos \gamma} \quad (3.8)$$

Donde v_{r2} es la velocidad radial del círculo de paso de la corona y v_{t1} es la velocidad tangencial de la línea de paso del sinfín, ambas en [pie/min].

Los valores para las fuerzas actuantes se detallan en la tabla 3.13.

Tabla 3.13 Resumen de fuerzas.

Ítem	Valor	
	Sistema Inglés	Sistema Internacional
$F_{t2} = F_{a1}$	4.103,09 [lbf]	18.251,05 [N]
$F_{a2} = F_{t1}$	109,97 [lbf]	484,86 [N]
$F_{r1} = F_{r2}$	1.301,79 [lbf]	5.787,13 [N]
$F_{nb1} = F_{nb2}$	3.897,80 [lbf]	17.334,71 [N]
T_o	22.033,62 [lbf.pulg]	2.489,46 [Nm]
μ	0,025	0,025
v_s	705,06 [pie/min]	3,583 [m/s]

Fuente: Propia

3.7.2 ESFUERZOS EN LOS DIENTES DE LA CORONA

Para el cálculo del esfuerzo en los dientes de la corona se toma como referencia el procedimiento de (Mott, 2006). El esfuerzo en [psi] al que se encuentran sometidos los dientes de la corona se puede calcular de manera satisfactoria de la siguiente manera

$$\sigma = \frac{W_d}{yFp_n} \quad (3.9)$$

Donde W_d representa la carga dinámica en [lbf] presente en los dientes de la corona, y es el factor de forma de Lewis, F es el ancho de cara de la corona en [pulg] y p_n es el paso circular normal de la corona en [pulg].

La carga dinámica, se puede calcular con:

$$W_d = F_{t2}/K_v \quad (3.10)$$

Con:

$$K_v = 1200/(1200 + v_{r2}) \quad (3.11)$$

Siendo K_v un factor de velocidad y v_{r2} la velocidad de los puntos contenidos en la circunferencia de paso de la corona en [pie/min]:

$$v_{r2} = \pi D_2 n_2 / 12 \quad (3.12)$$

Los valores para el factor de forma de Lewis se obtienen a partir de la siguiente expresión, específica para conjunto sinfín – corona (Shama & Purohit, 2005, pág. 453).

$$y = 0,314 + 0,015(\alpha - 14,5^\circ) \quad (3.13)$$

El paso circular normal se obtiene de:

$$p_n = p \cos \gamma \quad (3.14)$$

$$p_n = \pi \cos \gamma / P_d \quad (3.15)$$

En donde p es el paso circular y P_d es el paso diametral, ambos en [pulg].

Los resultados del cálculo de esfuerzos y los parámetros necesarios para ello se detallan en la tabla 3.14.

Tabla 3.14 Resumen de resultados para el cálculo de esfuerzos.

Ítem	Valor	
	Sistema Inglés	Sistema Internacional
σ	14.683,70 [psi]	101,24 [MPa]
W_d	4.316,74 [lbf]	19.198,52 [N]
K_v	0,95	0,95
v_{r2}	62,47 [pie/min]	0,317 [m/s]
y	0,359	0,359
p_n	0,533 [pulg]	13,538 [mm]

Fuente: Propia.

El valor obtenido en el esfuerzo a flexión en los dientes de la corona debe ser comparado con la resistencia a la tracción del material constituyente del elemento mecánico para determinar si el diseño cumple o no satisfactoriamente.

3.8 SIMULACIÓN DE ESFUERZOS EN LA CORONA

Luego de que se ha realizado el cálculo manual de los esfuerzos en la corona, se procede a la realización de la simulación de los mismos, desarrollándose dos casos, el primero, bajo cargas nominales de funcionamiento, y el segundo, bajo cargas tales que los esfuerzos resultantes alcancen el valor de la resistencia del material.

3.8.1 CONDICIONES NOMINALES

Este estudio se realiza utilizando el software AUTODESK INVENTOR 2015 con la finalidad de, por un lado, determinar el máximo valor del esfuerzo, y por otro, determinar la zona del diente en que dicho esfuerzo tiene lugar, de manera que pueda verificarse la concordancia con un criterio adecuado para dar validez o no a la simulación.

El procedimiento para la simulación es como sigue:

Se separa una parte de la corona, correspondiente a unos cuantos dientes de ella, ya que de este modo se estudia solamente a aquellos que están sometidos a la carga y los aledaños a estos, tal como muestra la Figura 3.32, además de que se reduce el volumen de mallado.

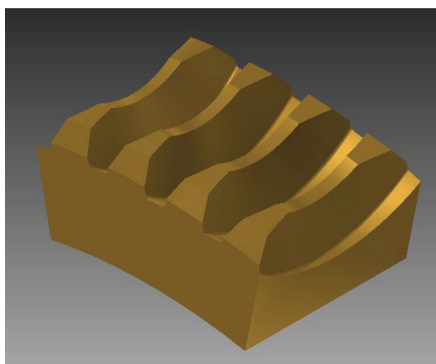


Figura 3.32 Configuración del sólido para la simulación.

Fuente: Propia.

Se creó una nueva simulación de tipo estático, habiéndose asignado los materiales a los elementos mecánicos, en concordancia con aquellos indicados por el fabricante.

En cuanto a las restricciones, se limitó los movimientos de la superficie interna y de las secciones transversales del sólido que se indican en la siguiente Figura 3.33.

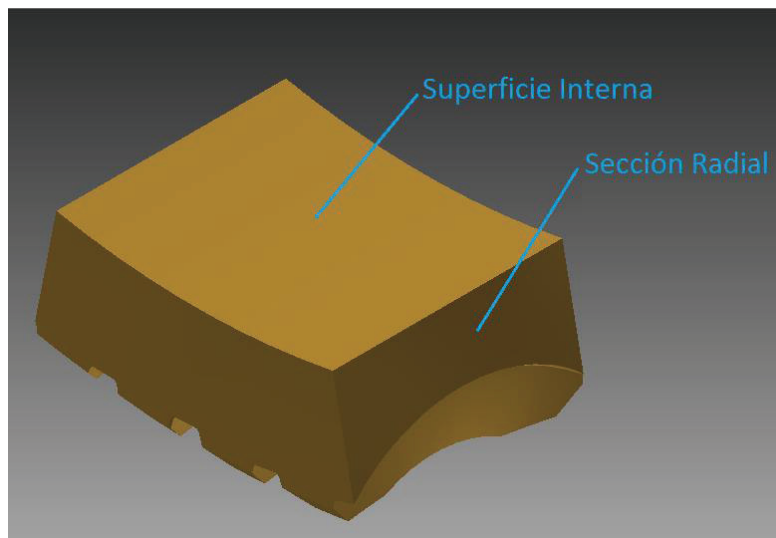


Figura 3.33 Superficies con movimiento restringido.

Fuente: Propia.

La carga aplicada corresponde al esfuerzo σ_n en [psi] generado por la fuerza normal F_{nb2} sobre la superficie A de la cara del diente. Dicha área se cuantificó como 1,08 [pulg²]. Además se considera el número equivalente de dientes en contacto ε en el acople (Jelaska, 2012):

$$\varepsilon = 1,47 + 0,1015 \ln \frac{z_2}{\cos^3 \gamma} \quad (3.16)$$

Por tanto la carga σ_n es:

$$\sigma_n = \frac{F_{nb2}}{A \left(1,47 + 0,1015 \ln \frac{z_2}{\cos^3 \gamma} \right)} = 1.804,54 \text{ [psi]} \quad (3.17)$$

El mallado se realizó con diferentes tamaños, refinándose cada vez más hasta que se alcance la convergencia adecuada de los resultados.

La distribución de esfuerzos resultante se muestra en la Figura 3.34, y los valores se presentan en la tabla 3.15, donde además se indica la resistencia a la fluencia de la aleación en estudio.

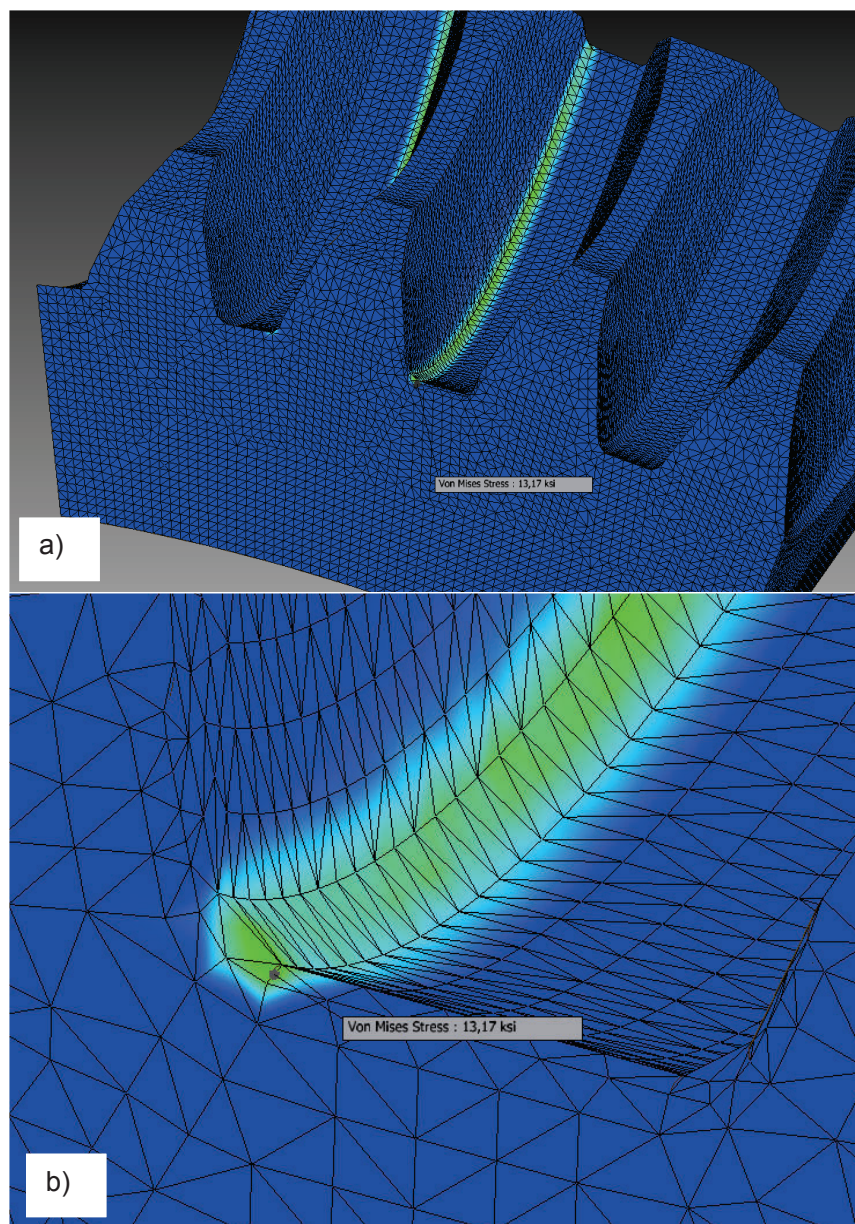


Figura 3.34 Resultados, a) Esfuerzo máximo b) acercamiento

Fuente: Propia.

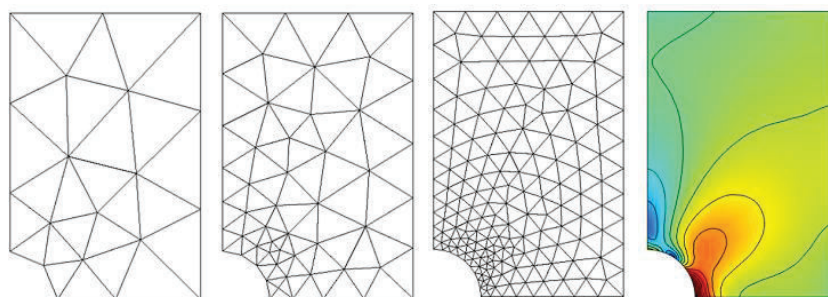
Tabla 3.15 Resultados de la simulación y resistencia de la corona.

Simulación	Esfuerzo Máximo		Resistencia a la Fluencia	
	MPa	[ksi]	[MPa]	[ksi]
Carga Nominal	90,8	13,170	160	23,206

Fuente: Propia.

3.8.1.1 Convergencia de la solución

El software utilizado en la simulación genera de manera automática la gráfica de convergencia en base a las soluciones para diferentes tamaños de elementos, partiendo de un mallado relativamente basto, continuando luego con tamaños progresivamente menores (ver figura 3.35), los elementos de malla disminuyen en tamaño, pero aumentan en cantidad, por lo tanto los requisitos computacionales aumentan para la simulación.

**Figura 3.35** Refinamiento de la malla

Fuente: (Comsol, 2013)

En algunos casos las simulaciones no convergen a un solo valor. Las concentraciones de tensión o singularidades son los puntos teóricos de esfuerzo infinito. A medida que aumenta la densidad de malla, los resultados se acercarán a un valor infinito cerca de singularidades de esfuerzo, los resultados nunca convergen a un valor finito. Una solución a este problema puede ser editar el modelo y cambiar la forma de la geometría. Por ejemplo, si se tiene una esquina aguda en el modelo, se puede añadir un filete.

La gráfica obtenida del estudio se ilustra en la figura 3.36, donde se puede observar que los resultados del esfuerzo empiezan a converger a partir de la

quinta solución, y además se muestra un radio de convergencia de 0,625%, el cual representa el porcentaje en el que difieren la sexta y séptima solución, la última de las cuales corresponde al valor para el esfuerzo mostrado en la Tabla 3.15.



Figura 3.36 Curva de convergencia para diferentes tamaños de mallado.

Fuente: Propia.

3.8.2 CONDICIONES DE SOBRECARGA

De manera similar al caso anterior, se utilizó en el software la misma configuración, de los elementos mecánicos, de restricciones y de mallado, sin embargo, se incrementó la carga, es decir el esfuerzo σ_n , primero con un 30% y luego con un 76,5% extra, donde el esfuerzo generado es aproximadamente igual a la resistencia del material (tabla 3.9), en lo que serían las condiciones de falla.

A continuación, la Tabla 3.16 muestra los valores para las cargas aplicadas al eje del sinfín, con el correspondiente porcentaje de incremento respecto a la carga nominal y el esfuerzo máximo resultante.

Tabla 3.16 Valores de sobrecarga.

Sobrecarga [%]	Carga		Esfuerzo	
	[MPa]	[ksi]	[MPa]	[ksi]
30	158,58	23,459	117,35	17,02
76,5	213,74	31,850	156,17	22,65

Fuente: Propia.

A continuación, en las Figuras 3.37 y 3.38, se muestra además la distribución de esfuerzos para las mencionadas condiciones de carga, 30% y 76,5%, respectivamente.

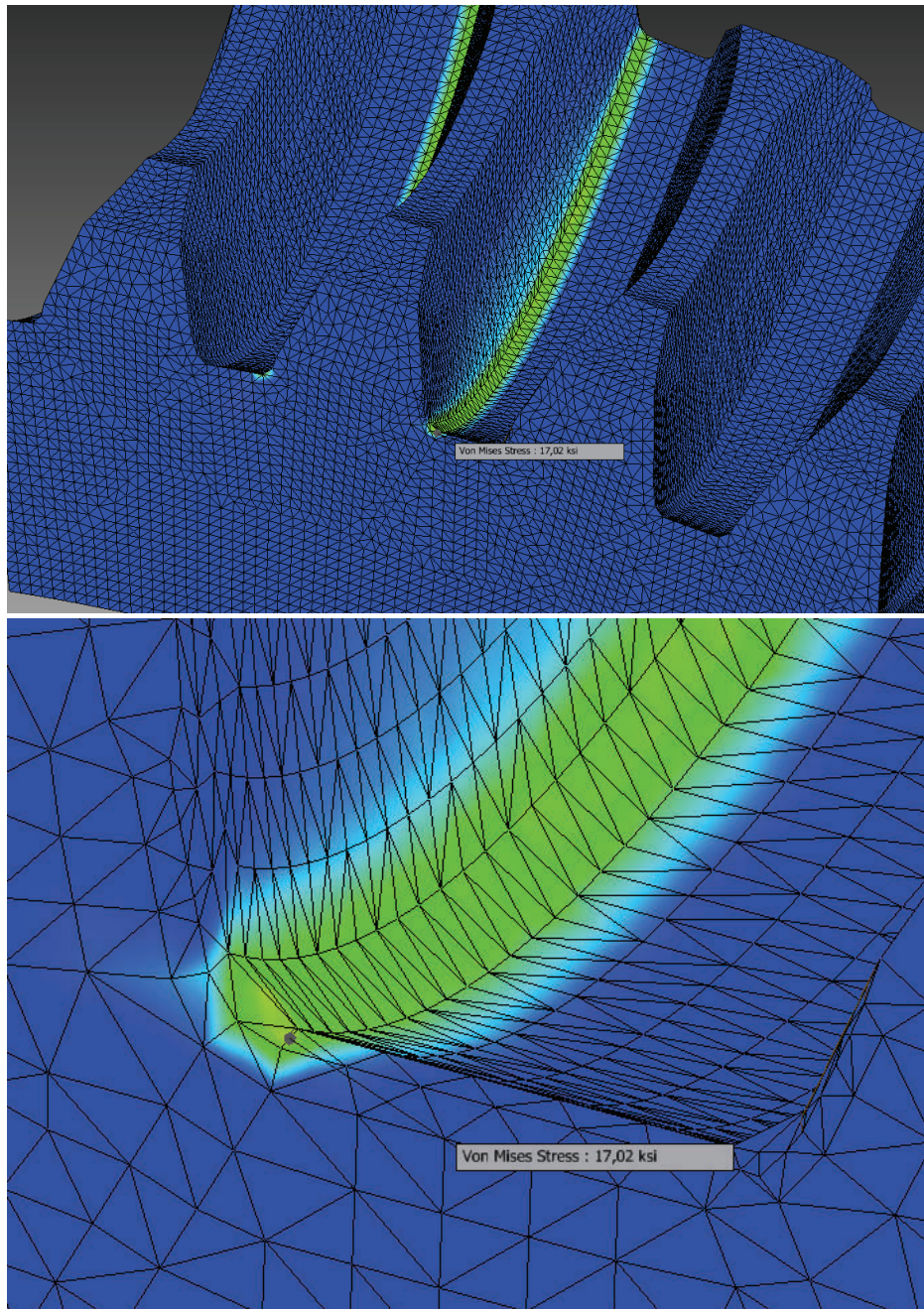


Figura 3.37 Simulación con sobrecarga de 30%.

Fuente: Propia.

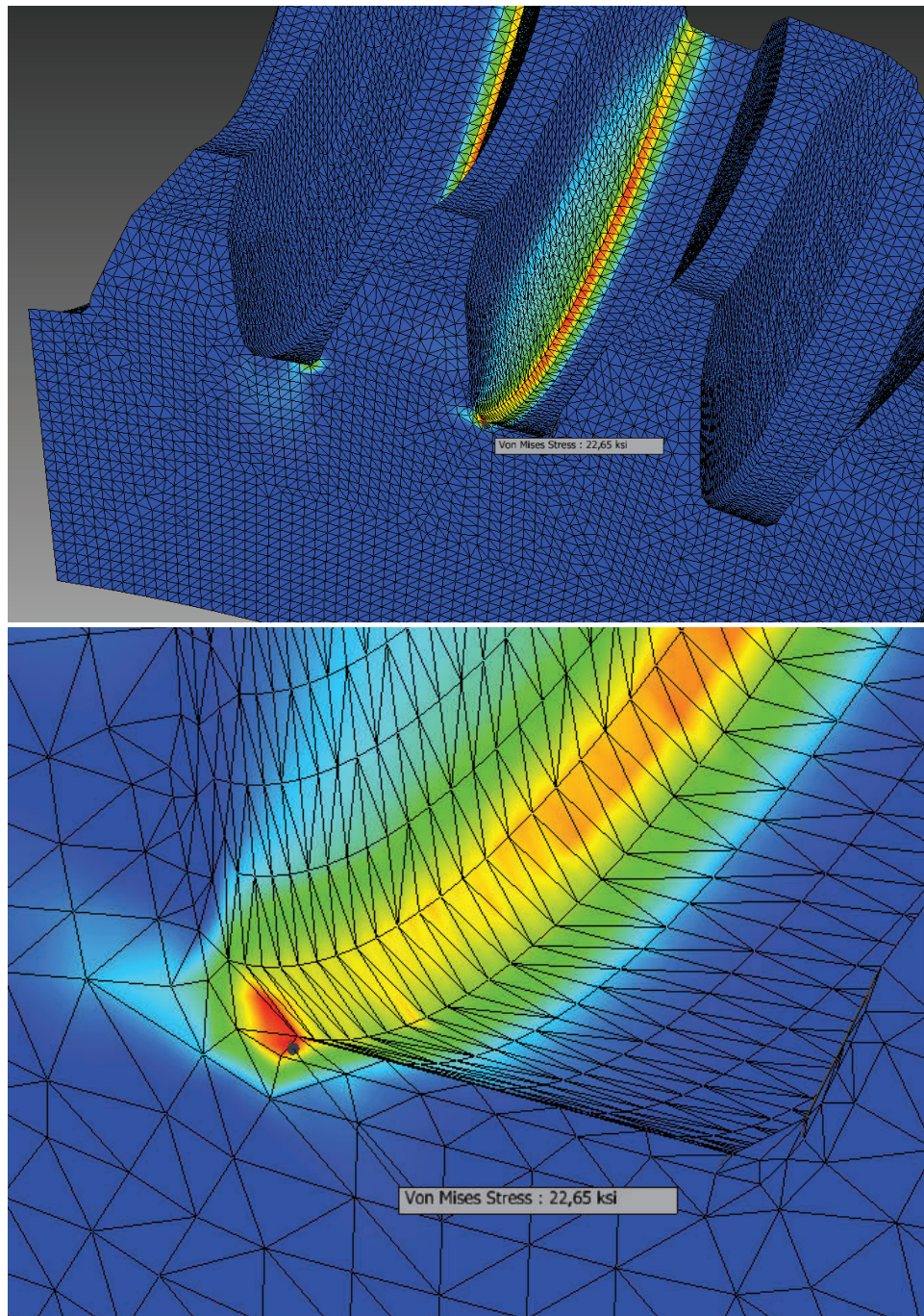


Figura 3.38 Simulación con sobrecarga de 76,5%.

Fuente: Propia.

CAPÍTULO IV

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se procesa la información correspondiente al estudio de caso práctico en el capítulo anterior, de tal manera que, mediante criterios ingenieriles, las hipótesis tomen forma y se de paso a una conclusión final de cómo se produjo o desarrolló la falla.

4.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS Y GEOMÉTRICAS DEL REDUCTOR

Los parámetros fundamentales correspondientes al conjunto sinfín-corona, determinados mediante el catálogo del fabricante y algunas de las mediciones geométricas, indicados en 3.1, permiten realizar el modelado CAD, cuyo resultado son los datos presentados en la tabla 3.6. Al comparar aquellos con el resto de las mediciones y datos del catálogo, además de los cálculos manuales desarrollados en 3.2, y que se listan también en la mencionada tabla, es evidente la baja diferencia obtenida. En la tabla 4.1 se muestra el error obtenido al realizar la comparación entre lo calculado, obtenido de tablas y el modelado por software, el valor obtenido es relativamente bajo, por lo cual es posible afirmar que el diseño cumple satisfactoriamente con los aspectos geométricos.

Tabla 4.1 Error en la comparación.

Parámetro	Expresión	Error [%]
Diámetro de paso corona	D_2	2,04
Diámetro de paso sinfín	D_1	0,85
Factor de diámetro	q	0,77
Paso axial sinfín	p	2,04
Distancia entre ejes	a_w	0,49
Diámetro exterior sinfín	D_{a1}	1,20

Fuente: Propia.

4.2 COMPOSICION QUÍMICA

A continuación se presentan los resultados de la composición química del tornillo sinfín y la corona:

4.2.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL TORNILLO SINFÍN

Del resultado de composición química realizado a la probeta de acero en el Laboratorio de Metalurgia Extractiva (DEMEX), se hace una comparación con la norma UNI 7846-78, verificando la presencia de elementos aleantes en su composición química, comprobándose que corresponde a un acero al cromo-manganeso (20MnCr5), en la Tabla 4.2 se presenta los resultados del laboratorio y los presentados por la norma. En la tabla se observa la presencia de otros aleantes en porcentajes muy pequeños a excepción del cobre que es de 0.15, pero en si no tiene un efecto negativo, más bien aumenta la resistencia a la corrosión del acero (hasta una composición $Cu < 0,3\%$) (Evans, 1987).

4.2.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA CORONA

También se analiza los resultados de la composición química de la muestra de la corona, haciendo una comparación con los valores proporcionados en la norma UNI EN 1982, se comprueba que de acuerdo a los aleantes corresponde a una aleación de cobre al níquel (CuSn12Ni2-B), en la Tabla 4.3 se presentan la comparación de los resultados del laboratorio y de la norma.

Tabla 4.2 Comparación de la composición química [%] del tornillo sinfín.

Elementos	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni	%Cu	%Al	%Ce	%Pb	%Sb	%Ti	%Fe
Según Norma	0.17-0.22	0.15-0.40	1.1-1.4	0.035 máx.	0.035 máx.	1.0-1.3	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Obtenidos en laboratorio	0.24	0.31	1.41	0.03	0.01	1.17	0.03	0.07	0.15	0.04	0.02	0.05	0.01	0.01	96.3

Fuente: Propia.

Tabla 4.3 Comparación de la composición química [%] de la corona.

Elementos	%Zn	%Pb	%Sn	%Ni	%Si	%Ag	%Sb	%Nb	%Te	%Cu	%Al	%Fe	%Mn	%P	%S
Según Norma	máx. 0.3	máx. 0.2	11.3 - 13.0	1.5 - 2.4	máx. 0.01	---	máx. 0.05	1.5 - 2.4	---	84 - 87	máx. 0.01	máx. 0.15	máx. 0.10	máx. 0.05	máx. 0.04
Obtenidos en laboratorio	0.01	0.10	10.83	1.47	0.01	0.02	0.02	0.01	0.07	87.39	---	---	---	---	---

Fuente: Propia.

4.3 MACROSCOPIA

Gracias al examen macroscópico realizado en la sección 3.4, se logra determinar algunas características importantes de la falla, a continuación se presenta un análisis de cada elemento mecánico fallado.

4.3.1 MACROSCOPIA DEL TORNILLO SINFIN

De acuerdo a la Figura 3.7, se puede identificar el sentido de giro del tornillo sinfín ya que el rodamiento más robusto es el que recibe la reacción de la fuerza axial, por lo tanto se puede identificar en el filete del sinfín la zona sometida a esfuerzos de tensión (a la derecha del filete) y la zona de compresión (a la izquierda del filete), con esto se puede hacer una primera localización del origen de la fractura en el filete del tornillo sinfín, ya que la zona donde recibe los esfuerzos de tensión es más crítica.

Al hacer un aumento en la zona de fractura (Figura 3.8) se puede observar la presencia de marcas de playa y su dirección de avance, estas marcas de playa son típicas en elementos mecánicos sometidos a esfuerzos de fatiga debido a las cargas cíclicas, se puede observar tres zonas, la primera es de iniciación la misma que presenta una superficie relativamente grande con respecto a las dos áreas restantes, esto indica que el tornillo sinfín estuvo sometido a cargas de fatiga muy altas, la segunda superficie es la de propagación y finalmente la zona de desgarre.

Se puede ratificar la presencia de esfuerzos de fatiga en la Figura 3.9, en la imagen se puede observar marcas de trinquete o dientes de sierra, estas son típicas en las fallas por fatiga, dichas marcas indican el origen de la fractura, pueden ser el resultado de esfuerzos elevados o de altas concentraciones de esfuerzos, justamente dichos concentradores de esfuerzo se observa cerca de las marcas de trinquete, estos concentradores de esfuerzo se deben al mecanizado del tornillo sinfín y tienen un ancho aproximado de 352μ (ver Figura 3.10).

4.3.2 MACROSCOPIA DE LA CORONA

En la Figura 3.11 se observa la fractura total de los dientes en una sección de la corona comprendida por once dientes, el resto de dientes se encuentran deformados plásticamente y desgarrados en la raíz por efecto de sobrecargas y por ende sobreesfuerzos de flexión en la raíz del diente, que al ser muy grandes dichos esfuerzos superan el límite de fluencia del material provocando desgarros en la raíz de los dientes de la corona y deformaciones plásticas (Figura 3.12).

Al hacer un aumento en la Figura 3.13 se puede observar en aplastamiento del material en la base del diente, quizás debido al atrapamiento de fragmentos de dientes de la corona que previamente se fracturaron.

4.4 MICROSCOPIA

Al analizar las microscopías en ambos elementos, se puede destacar que se han establecido en zonas del material que derivan en regiones convenientes para el estudio, tal como se ha descrito en la sección correspondiente al tema, en el capítulo anterior.

4.4.1 MICROESTRUCTURA DEL TORNILLO SINFIN

Al observar la Figura 3.17, se aprecia diferentes coloraciones en la superficie analizada, en el borde y en el núcleo del diente, lo cual es un indicio del endurecimiento superficial. Si se amplifica la observación en el microscopio, tal como lo muestra la Figura 3.18, para el borde del diente, y la Figura 3.19 para el

núcleo es posible identificar las microestructuras como martensita y martensita revenida, respectivamente.

Por lo tanto, como resultado del análisis micrográfico se verifica el endurecimiento correspondiente al tratamiento térmico que se indica en la tabla 3.3. Este resultado también puede comprobarse con el análisis de dureza, que es tratado en la sección 4.5.

Cabe mencionar la presencia de sulfuro de manganeso dentro de la microestructura, tal como se puede observar en la Figura 3.19b.

4.4.2 MICROESTRUCTURA DE LA CORONA

La Figura 3.22, tomada del borde de fractura, muestra zonas de coloración gris, que corresponden a la fase delta, de acuerdo al diagrama de fase cobre estaño de la Figura 4.1.

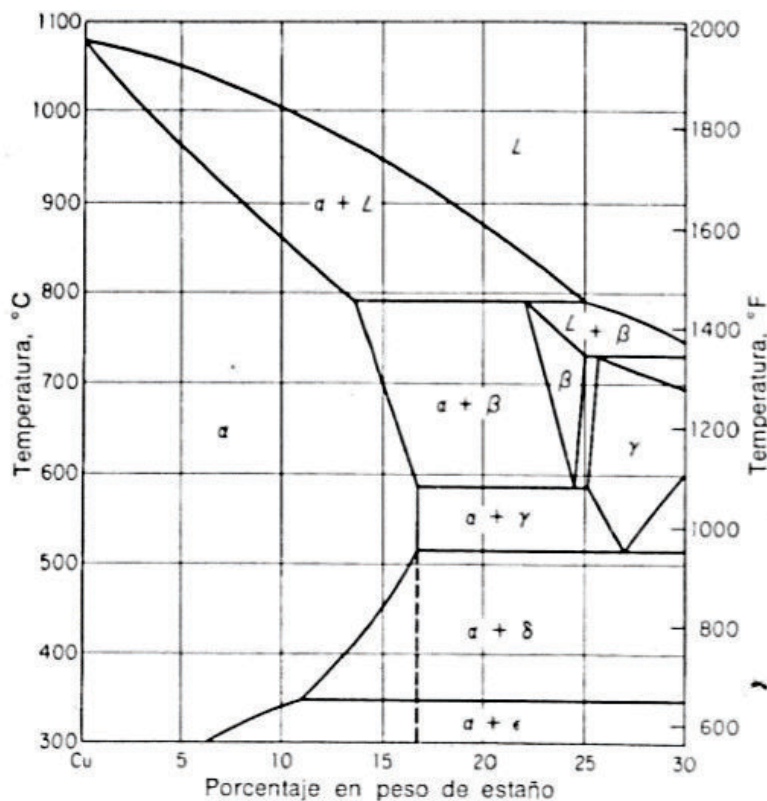


Figura 4. 1. Diagrama de fases Cobre Estaño.

Fuente: (Askeland, 1998)

La formación de la fase delta se atribuye al proceso de forja, para el cual es destinado este tipo de material, como método de endurecimiento, ya que por tratamiento térmico no es posible (Askeland, 1998) .

Debe también destacarse en la Figura 3.22 y 3.24 que las fisuras se propagan a través de la fase delta, lo cual indica que ésta fragiliza al material.

Las Figuras 3.23 y 3.24 son evidencia del fuerte sobre-esfuerzo al que se sometió el material, pues en la primera de ellas se observa un severo aplastamiento en el borde de falla, y en la segunda destaca el desarrollo de maclas como producto del desplazamiento de material.

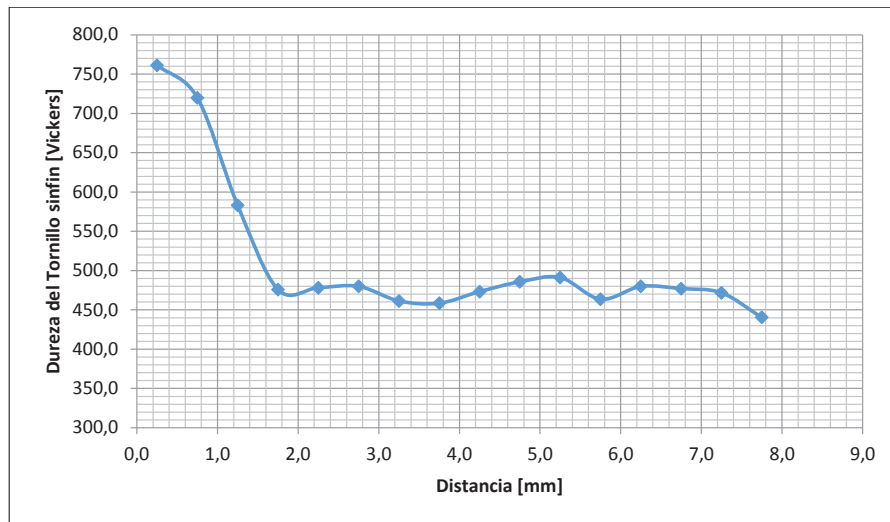
4.5 DUREZA

A continuación se presenta el análisis de los resultados de la dureza tanto del tornillo sinfín como de la corona.

4.5.1 DUREZA DEL TORNILLO SINFÍN

El ensayo de dureza se lo realizó a la sección radial del flanco del sinfín (Figura 3.26) con la finalidad de comprobar el cambio de dureza que se da desde la capa cementada del diente hasta el núcleo del mismo, para observar esta variación se realiza la gráfica dureza vs distancia en el flanco del sinfín, tomando como referencia el borde del flanco.

En la gráfica 4.1 se puede apreciar la variación de la dureza hasta una distancia aproximada de 1,3 mm, que corresponde a la capa cementada de la superficie del sinfín y que presenta una microestructura de tipo martensítica, esta tiene un promedio de dureza de 688,2 HV, el valor tabulado (Brandão, Martins, Seabra, & Castro, 2014) para este tipo de acero cementado es de aproximadamente de 700 HV, dando una variación del 1,7% el cual es relativamente bajo. Hacia el interior de la muestra este valor de dureza disminuye debido a que se requiere que sea menos dura para que absorba de mejor manera las vibraciones.



Gráfica 4.1 Dureza vs distancia en el filete del sinfín

Fuente: Propia.

4.5.2 DUREZA DE LA CORONA

Con los resultados de la Tabla 3.12 se puede notar que los valores de la dureza no varían considerablemente en la sección radial de la corona, con los valores de la tabla se calcula el promedio dando un valor de 107,6 HV, comparando este valor con el valor tabulado de 96 HV (Steelnumber, 2011) se nota que el valor obtenido en el ensayo de dureza es el 11% mayor al tabulado, esto se debe posiblemente a que este tipo de materiales se somete a un proceso de endurecimiento por forja (Askeland, 1998).

4.6 ESFUERZOS

El esfuerzo calculado analíticamente para la corona es de 14.683,70 [psi] (tabla 3.14) mientras que el límite de fluencia S_y es 23.210 [psi] (tabla 3.9), por lo tanto el factor de seguridad f_s analítico es 1,58.

De acuerdo a (Vanegas, 2011) el factor de seguridad mínimo recomendado para aceros o metales dúctiles, como en este caso la corona, se encuentra dentro del rango de 1,5 a 2, basado en el límite fluencia del material y considerando cargas variantes en el análisis a fatiga.

Tomando en cuenta los gráficos de la Figura 3.36, se observa que el esfuerzo máximo se encuentra en la zona de raíz del diente en la parte del extremo, lo cual concuerda con la falla observada en la corona, por tanto la simulación es válida.

Además al analizar la curva de la Figura 3.36, se observa que la simulación converge hacia el valor del esfuerzo nominal presentado en la Tabla 3.15 por tanto el resultado obtenido se considera como válido.

El esfuerzo calculado mediante simulación es de 13.170 [psi] (tabla 3.15), sin embargo el análisis se realizó en condiciones estáticas, por lo que al considerar el factor de velocidad como factor dinámico fundamental ($K_v = 0,95$) en la ecuación del esfuerzo en la corona, se obtiene un valor apto para la comparación con el esfuerzo analítico, tomando en cuenta dicho factor dinámico se tiene un valor de 14.434,58 [psi].

Al comparar estos valores del esfuerzo, analítico y por simulación, el error que se obtiene es de 1,72%, el mismo que es aceptable.

Como análisis final, se procede al cálculo del torque al cual se sometió el eje de la corona para que el esfuerzo transmitido a las raíces de los dientes sea suficiente para producir la falla observada en el elemento mecánico.

Utilizando las ecuaciones del cálculo analítico y considerando como esfuerzo en la corona al límite de fluencia de la aleación de cobre, con los respectivos reemplazos, al despejar el torque de falla en el eje de la corona, se tiene que $T_F = 33.470,69$ [lb.f.pulg].

Este resultado permite conocer el valor aproximado del torque con el cual los dientes de la corona empezaron a fallar a flexión, como producto de algún tipo de sobrecarga en el sistema mecánico del cual formaba parte el reductor de velocidades analizado.

CAPITULO V

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- En el presente trabajo, se ha cumplido los objetivos planteados en el proyecto de titulación, a partir de diferentes análisis se establece una hipótesis de falla tomando en consideración distintos modos de falla.
- La simulación realizada verifica su validez al concordar la ubicación de esfuerzos máximos con la ubicación de las zonas de inicio de falla en los dientes de la corona.
- El cálculo del factor de seguridad en la corona revela que este presenta un valor de 1,58, mismo que se encuentra dentro del rango de 1,5 a 2, recomendado para metales dúctiles.
- El análisis metalográfico realizado a la corona evidencia la existencia de una fase secundaria la cual favorece el desplazamiento de la fractura a través de este componente.
- El diseño, la composición química, el análisis metalográfico, las propiedades mecánicas y la simulación efectuada a los componentes corona-sinfín determinan que la falla es por sobrecarga y no por cuestiones de material.
- La falla en la corona es de tipo frágil y se atribuye al incremento de carga en el sistema mecánico del cual el reductor forma parte, con lo que se supera el límite de fluencia del engranaje de aleación de cobre, provocando la deformación plástica en todos sus dientes y desprendimiento de material en determinadas zonas de él.
- La falla en el tornillo sinfín es posterior a la de la corona y se debe a que la deformación y pérdida de dientes del engranaje producen interferencia en el acople, generando sobreesfuerzos en el filete del sinfín que, con los agravantes de la presencia de defectos de maquinado y sulfuro de manganeso en la microestructura, lo sensibilizan hasta fracturarse por fatiga.

5.2 RECOMENDACIONES

- En cualquier tipo de equipo sometido al análisis de falla, es fundamental contar con la placa proporcionada por el fabricante, ya que por una parte conforman información esencial, y por otra permiten acceder a datos adicionales e información más completa, siendo de gran utilidad también.
- Al realizar la medición de los diferentes parámetros en los elementos mecánicos, muchas veces es conveniente aproximar sus valores a aquellos que sean normalizados, ya que su fabricación en general es regida bajo normas.
- Respecto al análisis micrográfico y químico, es recomendable la toma de muestras en zonas donde el material no ha sido afectado por la falla, de modo que se pueda tener una conclusión más amplia en base a las diferencias así determinadas.
- Se recomienda utilizar el valor del torque máximo calculado en la sección 4.5, como base para determinar otras magnitudes en el sistema mecánico completo, cuando se conozca su configuración, misma que no está definida en el presente análisis.
- Se recomienda en las simulaciones, establecer un proceso iterativo en su configuración para ajustar progresivamente el comportamiento virtual a la realidad, es decir, calibrar el modelo.
- En equipos mecánicos de este tipo se recomienda, cuando sea posible, evitar las sobrecargas, principalmente arranques bruscos o frecuentes, inercia rotacional en la corona al apagar el equipo, caso contrario instalar un fusible mecánico o un embrague en el eje de salida.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Alban, L. (1985). *Systematic Analysis of Gear* (1 ed.). Alcraft, D.A.: American Society for Metals.
- [2] American Society for Metals. (2002). *Failure Analysis and Prevention* (Vol. 11). ASM Handbook Committee.
- [3] Askeland, D. R. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. México: International Thomson.
- [4] Avner, S. (1995). *Introducción a la Metalurgia Física* (2 ed.). Mexico D.F.: McGraw-Hill.
- [5] Bernau, R. L. (1958). *Elementos de Metalografía y de Acero al Carbono* (1 ed.). Santiago de Chile: Andrés Bello.
- [6] Brandão, J., Martins, R., Seabra, J., & Castro, M. (2014). International Gear Conference. *On the simulation of simultaneous fatigue and mild wear during a macropitting gear test*, 527.
- [7] Budynas, R. G., & Keith, N. J. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (8 ed.). México, D. F.: McGraw-Hill.
- [8] Callister, W. D. (1996). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Barcelona: Reverté.
- [9] *Chemie master*. (s.f.). Recuperado el 2 de junio de 2015, de <http://www.chemie-master.de/FrameHandler.php?loc=http://www.chemie-master.de/pse/pse.php?modul=Zn>
- [10] Coltters, R. (2013). *Análisis de Fractura*. Recuperado el 15 de marzo de 2015, de <http://www.analisisdefractura.com/marcasdesierraotrinquete.htm>
- [11] Davis, J. R. (2005). *Gear Materials, Properties, and Manufacture*. Ohio: ASM International.

- [12] Gómez, D. (2012). *EAF automoción*. Recuperado el 19 de marzo de 2015, de <http://eafdgomez2012.blogspot.com/2012/12/diagrama-fe-ctratamientos-termicos-de.html>
- [13] González, A. E. (25 de marzo de 2009). *Mailxmail*. Obtenido de <http://www.mailxmail.com/curso-montaje-metalograficas/muestras-embutidas-montaje-caliente-montaje-frio>
- [14] Hernández, H., & Espejo, E. (2002). *Mecánica de fractura y análisis de falla* (1 ed.). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- [15] Holloday, M., Nwaoha, C., & Onyewuenyi, O. (2012). *Process Plant Equipment: Operation, Control, and Reliability*. Nueva Jersey: John Wiley & Sons.
- [16] Jelaska, D. T. (2012). *Gears and Gear Drives*. Nueva Jersey: John Wiley & Sons.
- [17] Mitcalc. (29 de agosto de 2014). *Mechanical, Industrial and Technical Calculations*. Recuperado el 13 de marzo de 2015, de <http://www.mitcalc.com/doc/gear4/help/en/gear4.htm>
- [18] Motovario. (2015). *Motovario, Driving Industries*. Recuperado el 3 de marzo de 2015, de <http://www.motovario.com/spa/productos/reductores-de-tornillo-sin-fin>
- [19] Mott, R. L. (2006). *Diseño de Elementos de Máquinas* (4 ed.). México D.F.: Pearson Education.
- [20] MSU Metallschmelzwerk Ulm. (2015). Copper casting alloys European Standard EN 1982:2008. 5-6. Obtenido de http://www.msu-ulm.com/cms/upload/Images_Header/MSU_Copper_Casting_Alloys_2011.pdf
- [21] Nayar, A. (2000). *The Steel Handbook* (1 ed.). New Delhi: McGraw-Hill.
- [22] Niemann, G. (1973). *Tratado Teórico Práctico de Elementos de Máquinas* (2 ed., Vol. II). Barcelona: Labor.
- [23] Noria. (2015). *Noria Litín América, estrategia en lubricación*. Obtenido de <http://noria.mx/noria>

- [24] Norton, R. (1992). *Diseño de maquinaria: Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos* (4 ed.). México, D.F.: McGraw-Hill.
- [25] Pampa, U. N. (2015). *Conocimiento de Materiales*. Recuperado el 01 de abril de 2015, de <http://190.105.160.51/~material/materiales/labortatorio.htm>
- [26] Pérez González, A., Rodríguez Cervantes, P. J., & Sancho Brú, J. L. (2007). *Mantenimiento mecánico de máquinas* (2 ed.). Castellón: Universitat Jaume I.
- [27] Pérez, G. (1 de Enero de 2014). *espectrometria .com*. Recuperado el 5 de Julio de 2015, de http://www.espectrometria.com/tipos_de_espectrometra
- [28] Rossi Habasit Group. (diciembre de 2011). Catálogo Reductores y motorreductores de sinfín. pág. 100.
- [29] Shama, C., & Purohit, K. (2005). *Design of Machine Elements*. Nueva Delhi: Prentice Hall.
- [30] Shipley, E. E. (1967). Gear Failures. *Failures*, 12.
- [31] *Steelnumber*. (2011). Recuperado el 25 de junio de 2015, de http://www.steelnumber.com/en/steel_alloy_composition_eu.php?name_id=1622
- [32] Terradillos, J., & Ciria, J. I. (2014). Análisis del Aceite como Herramienta de Mejora del Comportamiento de las Multiplicadoras de Aerogeneradores. *Ingeniería del mantenimiento en Canarias*, 72.
- [33] Vanegas, L. (2011). *Diseño I*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.

ANEXOS

ANEXO A

RESULTADOS DEL ANÁLISIS QUÍMICO



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA



Resultados de análisis por Espectrometría de Chispa

Solicitante : Sr. Rolando Cuasquer
No. Referencia : RM - 8219
Fecha : 14 - 05 - 2015
Muestras recibidas : Una muestra de acero

La cuantificación de los metales presentes en la muestra se realizó empleando el Espectrómetro de Chispa marca BRUKER modelo Q4TASMAN. A continuación los resultados obtenidos:

Metales	Tornillo sinfin (%)
Carbono (C)	0,24
Silicio (Si)	0,31
Manganeso (Mn)	1,41
Fósforo (P)	0,03
Azufre (S)	0,01
Cromo (Cr)	1,17
Molibdeno (Mo)	0,03
Níquel (Ni)	0,07
Cobre (Cu)	0,15
Aluminio (Al)	0,04
Cerio (Ce)	0,02
Plomo (Pb)	0,05
Antimonio (Sb)	0,01
Titanio (Ti)	0,01
Hierro (Fe)	96,13


Ing. Ernesto de la Torre-Ch. PhD.
Jefe de Departamento




MSc. Evelyn Criollo T.
Jefe de Laboratorio



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA**



Resultados de análisis por Espectrometría de Chispa

Solicitante : Rolando Cuasquer
No. Referencia : RM - 8219
Fecha : 14 - 05 - 2015
Muestras recibidas : Un muestra de bronce

La cuantificación de los metales presentes en la muestra se realizó empleando el Espectrómetro de Chispa marca BRUKER modelo Q4TASMAN. A continuación los resultados obtenidos:

Metales	Corona (%)
Zinc (Zn)	0,01
Plomo (Pb)	0,10
Estaño (Sn)	10,83
Níquel (Ni)	1,47
Silicio (Si)	0,01
Plata (Ag)	0,02
Antimonio (Sb)	0,02
Niobio (Nb)	0,01
Teluro (Te)	0,07
Cobre (Cu)	87,39

Ernesto de la Torre Ch.
 Ing. Ernesto de la Torre Ch., PhD.
Jefe de Departamento



Evelyn Criollo T.
 MSc. Evelyn Criollo T.
Jefe de Laboratorio

ANEXO B

CATÁLOGO DEL REDUCTOR

Products

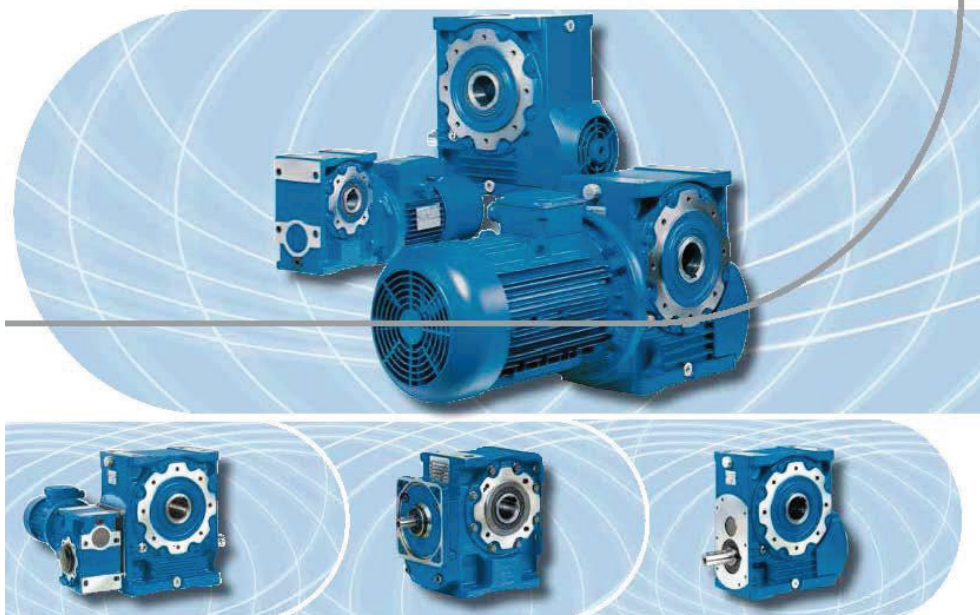


A04

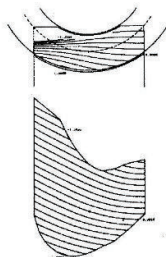
Reductores
y motorreductores de sinfín

Réducteurs et
motoréducteurs à vis

Edition December 2011

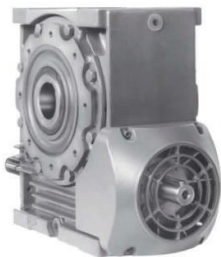


2 - Características

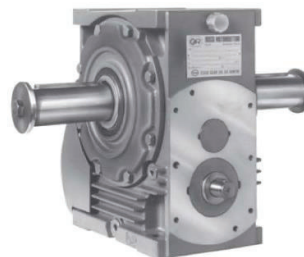


Líneas y superficies de contacto determinadas mediante ordenador para controlar el proyecto de cada engranaje
Lignes et zone de contact déterminées sur ordinateur pour contrôler le projet de chaque engranage.

2 - Caractéristiques



Tapa de ventilador con disco central removido para utilizar el sinfín de doble salida.
 Couvre-ventilateur avec disque central enlevé pour pouvoir utiliser la vis à double sortie.



Reductor ejecución UO2B:
 extremo di sinfín reducido (sirve también para obtener R IV, MR IV, MR 2IV, MR V 160 ... 250 con acoplamiento). Arbol lento de doble salida.
Reducteur exécution UO2B:
 extrémité de vis réduite (sert également à obtenir R IV, MR IV, MR 2IV, MR V 160 ... 250 avec accouplement). Arbre lent à double sortie.

Tren de engranajes:

- de sinfín; de 1 engranaje cilíndrico y sinfín; de 2 engranajes cilíndricos y sinfín (solo motorreductor);
- engranajes de sinfín con relaciones de transmisión ($i = 10 \dots 63$) **exactos e iguales** para los distintos tamaños; $i = 7$ para MR V 32 ... 81;
- 10 tamaños de los que 4 dobles (normal y reforzado) con distancia entre ejes de la reducción final según la serie R 10 (32 ... 250) para un total de **14 tamaños**;
- relaciones de transmisión nominales según la serie R 10 (10 ... 315; hasta 16 000 en los grupos);
- sinfín cilíndrico de acero 16 CrNi4 o 20 MnCr5 UNI 7846-78 (según el tamaño) cementado/templado con perfil de **evolvente (ZI)** rectificad y **superacabado**;
- **rueda para sinfín con perfil bien conjugado al del sinfín a través de optimización de la fresamatrix, con cubo de fundición esferoidal o gris (según el tamaño) y corona de bronce al Ni CuSn12Ni2-B (EN1982-98) con elevada pureza y contenido de fósforo controlado;**
- engranaje cilíndrico de acero 16CrNi4 UNI 7846-78 cementado/templado con perfil rectificado, dentado helicoidal;
- capacidad de carga del tren de engranajes calculada a la rotura y al desgaste; control de la capacidad térmica.

Normas específicas:

- relaciones de transmisión nominales y dimensiones principales según los números nominales UNI 2016 (DIN 323-74, NF X 01.001, BS 2045-65, ISO 3-73);
- cremallera de referencia según BS 721-83; perfil de evolvente (ZI) según UNI 4760/4-77 (DIN 3975-76, ISO/R 1122/2-69);
- alturas del eje según UNI 2946-68 (DIN 747-67, NF E 01.051, BS 5186-75, ISO 496-73);
- bridas de fijación B14 y B5 (esta última con centrado «hembra») derivadas de UNEL 13501-69 (DIN 42948-65, IEC 72.2);
- taladros de fijación serie media según UNI 1728-83 (DIN 69-71, NF E 27.040, BS 4186-67, ISO/R 273);
- extremos del árbol cilíndricos (largos o cortos) según UNI ISO 775-88 (DIN 748, NF E 22.051, BS 4506-70, ISO/R775-88) con taladro roscado en cabeza según UNI 9321 (DIN 332 Bl. 2-70, NF E 22.056) excluida la correspondencia d-D;
- chavetas UNI 6604-69 (DIN 6885 Bl. 1-68, NF E 27.656 y 22.175, BS 4235.1-72, ISO/R 773-69) salvo para casos específicos de acoplamiento motor/reductor en los que están rebajadas;
- formas constructivas derivadas de UNEL 05513-67 (DIN 42950-64, IEC 34.7);
- capacidad de carga y rendimientos del engranaje de sinfín determinados en base a **BS 721-83** integrada con ISO/CD 14521.

b - Motor eléctrico

Ejecución normal:

- motor **normalizado según IEC**;
- asincrónico trifásico, cerrado, ventilado externamente, con rotor de jaula;
- polaridad única, frecuencia 50 Hz, tensión $\Delta 230 \text{ V Y } 400 \text{ V} \pm 10\%$ ¹⁾ hasta el tamaño 132, $\Delta 400 \text{ V} \pm 10\%$ a partir del tamaño 160;
- **clase de rendimiento IE2** según IEC 60034-30 (cálculo según IEC 60034-2-1, grado de incertidumbre bajo) excluidas las potencias inferiores a 0,75 kW - que no están comprendidas en el campo de aplicabilidad de la norma - y las potencias evidenciadas en el cuadro de pág. 10 válidas para servicio S3 70% (indicado en la placa);

Train d'engrenages:

- à vis; à 1 engranage cylindrique et vis; à 2 engranages cylindriques et vis (seulement motoréducteur);
- engranages à vis, avec rapports de transmission ($i = 10 \dots 63$) **entiers et égaux** pour les différentes tailles; $i = 7$ pour MR V 32 ... 81;
- 10 tailles dont 4 sont doubles (normale et renforcée) avec entre-axes réduction finale selon la série R 10 (32 ... 250) pour un total de **14 tailles**;
- rapports de transmission nominaux selon la série R 10 (10 ... 315; jusqu'à 16 000 pour les groupes combinés);
- vis cylindrique en acier 16CrNi4 ou 20 MnCr5 UNI 7846-78 (selon la taille) cimentée/trempeée avec profil à **développante (ZI)** rectifié et **superfini**;
- roue à vis avec profil adéquatement conjugué à celui de la vis par optimisation de la fraise-mère, avec moyen en fonte sphéroidale ou grise (selon la taille) et **bronze au Ni CuSn12Ni2-B (EN1982-98)** avec pureté élevée et teneur du phosphore contrôlée;
- engranage cylindrique en acier 16CrNi4 UNI 7846-78 cimentée/trempeée avec profil rectifié, denture hélicoïdale;
- capacité de charge du train d'engrenages calculée à rupture et usure; vérification de la capacité thermique.

Normes spécifiques:

- rapports de transmission nominaux et dimensions principales selon les nombres normaux UNI 2016 (DIN 323-74, NF X 01.001, BS 2045-65, ISO 3-73);
- crémaillère de référence selon BS 721-83; profil à développante (ZI) selon UNI 4760/4-77 (DIN 3975-76, ISO/R 1122/2-69);
- hauteurs d'axe selon UNI 2946-68 (DIN 747-67, NF E 01.051, BS 5186-75, ISO 496-73);
- brides de fixation B14 et B5 (cette dernière avec centrage «trou») tirées de UNEL 13501-69 (DIN 42948-65, IEC 72.2);
- trous de fixation série moyenne selon UNI 1728-83 (DIN 69-71, NF E 27.040, BS 4186-67, ISO/R 273);
- bouts d'arbre cylindriques (longs ou courts) selon UNI ISO 775-88 (DIN 748, NF E 22.051, BS 4506-70, ISO/R775/88) avec trou taraudé en tête selon UNI 9321 (DIN 332 Bl. 2-70, NF E 22.056), correspondance d-D exclue;
- clavettes parallèles UNI 6604-69 (DIN 6885 Bl. 1-68, NF E 27.656 et 22.175, BS 4235.1-72, ISO/R 773-69) sauf pour certains cas d'accouplement moteur/réducteur où elles sont surbaissées;
- positions de montage tirées de UNEL 05513-67 (DIN 42950-64, IEC 34.7);
- capacité de charge et rendement de l'engrenage à vis selon **BS 721-83** intégrée avec ISO/CD 14521.

b - Moteur électrique

Exécution normale:

- moteur **normalisé** selon IEC;
- asynchrone triphasé, fermé et ventilé extérieurement, avec rotor à cage;
- polarité unique, fréquence 50 Hz, tension $\Delta 230 \text{ V Y } 400 \text{ V} \pm 10\%$ ¹⁾ jusqu'à la taille 132, $\Delta 400 \text{ V} \pm 10\%$ à partir de la taille 160;
- **classe de rendement IE2** selon IEC 60034-30 (calcul selon IEC 60034-2-1, degré d'incertitude bas) à l'exception des puissances inférieures à 0,75 kW - qui n'entrent pas dans le domaine d'applicabilité de la norme - et les puissances mises en évidence à la page 10 qui sont valables pour le service S3 70% (indiqué dans la plaque);

3 - Designación

	MÁQUINA MACHINE	R	reductor	réducteur
		MR	motorreductor	motoreducteur
	TREN DE ENGRANAJES TRAIN D'ENGRENAGE	V	de sinfín	engrenages à vis
		IV	1 engranaje cilíndrico y sinfín	1 engranage cylindrique et vis
		2IV	2 engranajes cilíndricos y sinfín	2 engranages cylindriques et vis
	TAMAÑO TAILLE	32 ... 250	distancia entre ejes reducción final [mm]	entre-axes réduction finale [mm]
	FIJACIÓN FIXATION	U	universal	universel
	POSICIÓN EJES POSITION AXES	O	ortogonal	orthogonaux
	MODELO MODELE	3	tamaños 32 ... 81	tailles 32 ... 81
		2	tamaños 100 ... 250	tailles 100 ... 250
	EJECUCIÓN EXECUTION	A	normal	normale
		B	extremo de sinfín reducido	extrémité de vis réduite
		C	sinfín de doble salida con extremo reducido	vis à double sortie à extrémité réduite
		D	sinfín de doble salida	vis à double sortie
	RELACIÓN DE TRANSMISIÓN RAPPORT DE TRANSMISSION	63A ... 250M		
	TAMAÑO DEL MOTOR TAILLE MOTEUR	2 ... 6		
	NÚMERO DE POLOS NOMBRE DE POLES	230.400	tan. < 132	taille < 132
	TENSIÓN IV TENSION IV	400	tan. > 160	taille > 160
	FORMA CONSTRUCTIVA POSITION DE MONTAGE	B5		
		BSR	para algunas combinaciones (ver el cap. 10)	pour certaines combinaisons (voir chap. 10)
	VELOCIDAD DE SALIDA [min ⁻¹] VITESSE DE SORTIE [min ⁻¹]			

La designación debe ser completada con la indicación de la forma constructiva, pero sólo si es **distinta** de **B3**¹⁾ (B3 o B8 para tamaños ≤ 64).
Ej.: R V 80 UO3A/25 **forma constructiva V5**.
Si el motor es freno, anteponer al tamaño del motor la letra **HBZ**.
Ej.: MR V 80 UO3A - **HBZ** 90L 4 230.400 B5/56

Para los reductores de tamaños 200 y 250, forma constructiva B7, la designación debe ser completada con la indicación de la velocidad entrada n_1 .
Ej.: R V 250 UO2A/50 $n_1 = 560 \text{ min}^{-1}$, **forma constructiva B7**

Si el motor es suministrado por el Comprador, omitir la tensión y completar la designación con la indicación **motor suministrado por nosotros**.
Ej.: MR V 80 UO3A - 90L 4 ... B5/56 **motor suministrado por nosotros**

Si el reductor o motorreductor son solicitados en una ejecución **distinta** de las citadas, indicarlo detalladamente (cap. 17).

¹⁾ Por simplicidad, la designación de la forma constructiva (ver cap. 8 y 10) se refiere sólo a la fijación mediante patas aunque los reductores tienen fijación universal (p. ej.: fijación mediante brida B14 y derivadas; fijación mediante brida B5 y derivadas, ver cap. 17).

4 - Potencia térmica P_t [kW]

En los capítulos 7 y 9 se ha indicado en rojo la potencia térmica nominal P_{tw} , que es la potencia que puede ser aplicada a la entrada del reductor, en servicio continuo y a la máxima temperatura ambiente de 40 °C y velocidad del aire $\geq 1,25 \text{ m/s}$, sin superar una temperatura del aceite de aproximadamente 95 °C.

La potencia térmica P_t puede ser superior a la nominal P_{tw} , descrita aquí arriba según la fórmula $P_t = P_{tw} \cdot ft$ donde ft es el factor térmico en función de la temperatura ambiente y del servicio con los valores indicados en el cuadro.

En los casos para los cuales en el catálogo se indica la potencia térmica nominal P_{tw} es necesario comprobar que la potencia aplicada P_t sea inferior o igual a la térmica $P_t (P_t \leq P_{tw} \cdot ft)$. Si $P_t > P_t$, examinar el uso de lubricantes especiales: consultarlos.

Para reductores y motorreductores con tren de engranajes **V** en forma constructiva B6 ó B7 multiplicar P_{tw} por **0,9**.

3 - Designation

	MACHINE	R	reductor	réducteur
		MR	motorreductor	motoreducteur
	TRAIN D'ENGRENAGE	V	de sinfín	engrenages à vis
		IV	1 engranaje cilíndrico y sinfín	1 engranage cylindrique et vis
		2IV	2 engranajes cilíndricos y sinfín	2 engranages cylindriques et vis
	TAILLE	32 ... 250	distancia entre ejes reducción final [mm]	entre-axes réduction finale [mm]
	FIXATION	U	universal	universel
	POSITION AXES	O	ortogonal	orthogonaux
	MODELE	3	tamaños 32 ... 81	tailles 32 ... 81
		2	tamaños 100 ... 250	tailles 100 ... 250
	EXECUTION	A	normal	normale
		B	extremo de sinfín reducido	extrémité de vis réduite
		C	sinfín de doble salida con extremo reducido	vis à double sortie à extrémité réduite
		D	sinfín de doble salida	vis à double sortie
	RAPPORT DE TRANSMISSION	63A ... 250M		
	TAILLE MOTEUR	2 ... 6		
	NOMBRE DE POLES	230.400	tan. < 132	taille < 132
	TENSION IV	400	tan. > 160	taille > 160
	POSITION DE MONTAGE	B5		
		BSR	para algunas combinaciones (ver el cap. 10)	pour certaines combinaisons (voir chap. 10)
	VITESSE DE SORTIE [min ⁻¹]			

La designación será completada por la indicación de la posición de montaje, más únicamente si ella **diffiere** de **B3**¹⁾ (B3 o B8 para tamaño ≤ 64).

Ex.: R V 80 UO3A/25 **posición de montaje V5**.
Dans les cas de moteur frein, faire précéder la taille moteur par la lettre **HBZ**.

Ex.: MR V 80 UO3A - **HBZ** 90L 4 230.400 B5/56

Para los reductores tamaños 200 y 250, posición de montaje B7, la designación será completada por la indicación de la velocidad de entrada n_1 .
Ex.: R V 250 UO2A/50 $n_1 = 560 \text{ min}^{-1}$, **posición de montaje B7**

Lorsque le moteur est fourni par l'acheteur, omettre la tension et compléter la désignation par l'indication **moteur fourni par nos soins**.
Ex.: MR V 80 UO3A - 90L 4 ... B5/56 **moteur fourni par nos soins**
Lorsque le réducteur ou le motoreducteur est requis selon une exécution **différente** de celles indiquées ci-dessus, le préciser en toutes lettres (chap. 17).

¹⁾ La désignation de la position de montage (voir chap. 8 et 10) se réfère, pour plus de simplicité, seulement à la fixation par pattes même si les réducteurs ont la fixation de type universel (ex.: fixation par bride B14 et dérivées; fixation par bride B5 et dérivées, voir chap. 17).

4 - Puissance thermique P_t [kW]

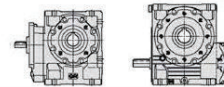
Dans les chap. 7 et 9 est indiquée en rouge la puissance thermique nominale P_{tw} , qui est la puissance qui peut être appliquée à l'entrée du réducteur, en service continu, à température ambiante maximale de 40 °C et à vitesse de l'air $\geq 1,25 \text{ m/s}$, sans que la température de l'huile ne dépasse 95 °C environ.

La puissance thermique P_t peut être supérieure à la puissance nominale P_{tw} , mentionnée ci-dessus selon la formule: $P_t = P_{tw} \cdot ft$, où ft est le facteur thermique en fonction de la température ambiante et du service (les valeurs figurent au tableau).

Lorsque le catalogue indique la puissance thermique nominale P_{tw} , il est nécessaire de s'assurer que la puissance appliquée P_t soit inférieure ou égale à la puissance thermique $P_t (P_t \leq P_{tw} \cdot ft)$. Si $P_t > P_t$, envisager l'utilisation de lubrifiants spéciaux: nous consulter.

Pour les réducteurs et motoreducteurs avec train d'engrenages **V**, position de montage B6 ou B7, multiplier P_{tw} par **0,9**.

7 - Potencias y pares nominales (reductores)
7 - Puissances et moments de torsion nominaux (réducteurs)

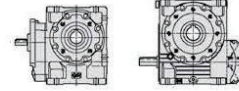


n_{k2}	n_1	Tren de engr. Train d'engr. i	ρ [kW]	M [daN m]	Tamaño reductor - Taille réducteur												
					32	40	50	63	64	80	81	100	125	126	160	161	200
25	1 250	V 50	P_{n1}	0,13	0,24	0,43	0,72	0,85	1,34	1,6	2,5	4,17	4,96	7,8	9,3	15,2	26,6
			P_{n2}	0,09	0,16	0,3	0,52	0,61	1	1,18	1,91	3,25	3,86	6,2	7,4	12,3	22
			M_{2max}	3,29	6,1	11,4	19,7	23,5	38	45,3	73	124	148	237	282	469	840
	1 000	V 40	P_{n1}	0,15	0,27	0,48	0,81	0,97	1,52	1,8	2,96	4,71	5,6	9	10,7	16,4	29
			P_{n2}	0,1	0,19	0,34	0,59	0,71	1,14	1,36	2,28	3,68	4,38	7,2	8,6	13,4	24,1
			M_{2max}	3,88	7,1	13	22,7	27	43,5	52	87	141	167	275	327	513	920
	800	V 32	P_{n1}	0,17	0,3	0,54	0,89	1,05	1,66	1,98	3,3	5,4	6,4	9,7	11,5	18,6	33
			P_{n2}	0,12	0,21	0,39	0,65	0,78	1,26	1,5	2,56	4,27	5,1	7,8	9,3	15,3	28,6
			M_{2max}	4,46	8,1	14,7	25	29,7	48,2	57	98	163	194	299	356	584	901
	630	V 25	P_{n1}	0,18	0,32	0,59	0,98	1,17	1,85	2,2	3,56	4,93	5,9	9,1	10,8	18,1	32,7
			P_{n2}	0,13	0,23	0,43	0,73	0,87	1,42	1,69	2,8	4,09	4,87	7,7	9,1	15,5	28,4
			M_{2max}	4,84	8,8	16,3	27,8	33,1	54	64	106	155	185	291	346	588	1076
500	V 20	P_{n1}	0,19	0,34	0,62	0,93	0,99	1,58	1,88	3,26	5,4	6,4	9,7	11,9	19,8	35,2	
		P_{n2}	0,14	0,25	0,46	0,66	0,79	1,28	1,52	2,69	4,47	5,3	8,4	10	17	30,5	
		M_{2max}	5,2	9,5	17,5	25,3	30,1	48,8	58	103	171	203	322	383	650	1165	
400	V 16	P_{n1}	0,17	0,31	0,56	0,91	1,09	1,75	2,08	3,41	5,6	6,6	10,6	12,6	19	34,5	
		P_{n2}	0,13	0,24	0,44	0,73	0,87	1,43	1,7	2,82	4,67	5,6	9	10,7	16,6	30,4	
		M_{2max}	5,1	9,1	16,9	28,1	33,4	55	65	108	178	212	345	410	634	1161	
22,4	1 400	IV 63	P_{n1}	0,16	0,33	0,59	0,76	0,91	1,45	1,73	3,02	5,1	6	9,3	11,1	18,5	
			P_{n2}	0,11	0,23	0,42	0,59	0,7	1,15	1,36	2,42	4,11	4,89	7,7	9,1	15,5	
			M_{2max}	4,96	9,7	18	25,7	30,6	49,8	59	105	175	208	333	396	671	
	1 400	V 63	P_{n1}	—	0,18	0,34	0,58	0,69	1,1	1,31	2,11	3,44	4,1	6,2	7,4	11,9	
			P_{n2}	—	0,12	0,23	0,4	0,48	0,79	0,94	1,57	2,61	3,11	4,84	5,8	9,5	
			M_{2max}	—	4,96	9,7	17,2	20,5	33,9	40,3	67	112	134	208	248	406	
	1 120	IV 50	P_{n1}	0,17	0,29	0,53	0,84	1	1,62	1,93	3,15	5,3	6,3	9,9	11,8	17,7	
			P_{n2}	0,12	0,22	0,41	0,66	0,78	1,29	1,53	2,54	4,29	5,1	8,2	9,8	15	
			M_{2max}	5,3	9,2	17,3	28,6	34	56	66	110	183	217	356	424	651	
	1 120	V 50	P_{n1}	0,12	0,22	0,41	0,67	0,79	1,25	1,49	2,33	3,89	4,63	7,4	8,8	14,4	
			P_{n2}	0,08	0,15	0,28	0,47	0,56	0,92	1,09	1,76	3	3,57	5,8	6,9	11,6	
			M_{2max}	3,34	6,3	11,7	20,2	24,1	39,2	46,6	75	128	152	247	294	494	
900	V 40	P_{n1}	0,14	0,25	0,45	0,76	0,9	1,42	1,69	2,76	4,41	5,3	8,4	10	15,5		
		P_{n2}	0,09	0,17	0,31	0,55	0,65	1,05	1,26	2,12	3,42	4,07	6,7	8	12,5		
		M_{2max}	3,95	7,3	13,2	23,3	27,7	44,8	53	90	145	173	284	339	532		
710	V 32	P_{n1}	0,16	0,28	0,5	0,82	0,97	1,54	1,83	3,06	5	6	9	10,7	17,3		
		P_{n2}	0,11	0,19	0,35	0,6	0,71	1,15	1,37	2,35	3,93	4,68	7,2	8,6	14,2		
		M_{2max}	4,6	8,3	15,2	25,6	30,5	49,7	59	101	169	201	312	371	610		
560	V 25	P_{n1}	0,17	0,3	0,54	0,9	1,07	1,71	2,03	3,29	4,54	5,4	8,4	10	16,7		
		P_{n2}	0,12	0,21	0,39	0,67	0,8	1,3	1,55	2,57	3,74	4,46	7	8,4	14,2		
		M_{2max}	4,96	9	16,7	28,6	34	55	66	109	180	190	300	357	607		
450	V 20	P_{n1}	0,18	0,32	0,58	0,76	0,91	1,46	1,73	3,03	4,98	5,9	9,3	11,1	18,5		
		P_{n2}	0,13	0,23	0,42	0,61	0,72	1,17	1,4	2,48	4,12	4,9	7,8	9,3	15,8		
		M_{2max}	5,3	9,7	18	25,7	30,6	49,8	59	105	175	208	333	396	671		
355	V 16	P_{n1}	0,16	0,28	0,51	0,83	0,99	1,6	1,9	3,12	5,1	6,1	9,8	11,7	17,4		
		P_{n2}	0,12	0,21	0,4	0,66	0,79	1,3	1,54	2,56	4,25	5,1	8,3	9,8	15,1		
		M_{2max}	5,2	9,2	17,3	28,6	34	56	66	110	183	217	356	424	651		
18	1 400	IV 80	P_{n1}	0,13	0,26	0,47	0,76	0,91	1,46	1,73	3,03	4,7	7,2	8,5	14,2		
			P_{n2}	0,09	0,17	0,33	0,55	0,65	1,07	1,27	2,13	3,15	3,75	5,8	6,9		
			M_{2max}	4,89	9,3	17,4	29,7	35,3	58	69	116	168	200	315	375	634	

Los valores en rojo indican la potencia térmica nominal P_{n1} (temperatura ambiente 40 °C, servicio continuo, ver cap. 4).
Para n_1 mayores de 1400 min⁻¹ o bien menores de 355 min⁻¹, ver cap. 6 y página 28.
1) El valor indicado para IV es nominal. Para las relaciones reales, ver pág. 28.
2) M_{2max} es la punta máxima del par que el reductor puede soportar.

Les valeurs en rouge indiquent la puissance thermique nominale P_{n1} (température ambiante 40 °C, service continu, voir chap. 4).
Si n_1 supérieure à 1 400 min⁻¹ ou inférieure à 355 min⁻¹ voir chap. 6 et page 28.
1) Pour IV, la valeur indiquée est la valeur nominale. Pour les rapports effectifs, voir page 28.
2) M_{2max} constitue le pic maximum du moment de torsion que le réducteur peut supporter.

7 - Potencias y pares nominales (reductores)
7 - Puissances et moments de torsion nominaux (réducteurs)



n _{N2} min ⁻¹	Tren de engr. Train d'engr. i	ρ [kW] M [daN m]	Tamaño reductor - Taille réducteur														
			32	40	50	63	64	80	81	100	125	126	160	161	200	250	
			1)	2)													
25	1 250	V 50	P _{N1}	0,13	0,24	0,43	0,72	0,85	1,34	1,6	2,5	4,17	4,96	7,8	9,3	15,2	26,6
			P _{N2}	0,09	0,16	0,3	0,52	0,61	1	1,18	1,91	3,25	3,86	6,2	7,4	12,3	22
			M _{2max}	3,29	6,1	11,4	19,7	23,5	38	45,3	73	124	148	237	282	469	840
	1 000	V 40	P _{N1}	0,15	0,27	0,48	0,81	0,97	1,52	1,8	2,96	4,71	5,6	9	10,7	16,4	29
			P _{N2}	0,1	0,19	0,34	0,59	0,71	1,14	1,36	2,28	3,68	4,38	7,2	8,6	13,4	24,1
			M _{2max}	3,88	7,1	13	22,7	27	43,5	52	87	141	167	275	327	513	920
	800	V 32	P _{N1}	0,17	0,3	0,54	0,89	1,05	1,66	1,98	3,3	5,4	6,4	9,7	11,5	18,6	33
			P _{N2}	0,12	0,21	0,39	0,65	0,78	1,26	1,5	2,56	4,27	5,1	7,8	9,3	15,3	29,6
			M _{2max}	4,46	8,1	14,7	25	29,7	48,2	57	98	163	194	299	356	584	901
	630	V 25	P _{N1}	0,18	0,32	0,59	0,98	1,17	1,85	2,2	3,56	4,93	5,9	9,1	10,8	18,1	33,7
			P _{N2}	0,13	0,23	0,43	0,73	0,87	1,42	1,69	2,8	4,09	4,87	7,7	9,1	15,5	28,4
			M _{2max}	4,84	8,8	16,3	27,8	33,1	54	64	106	155	185	291	346	588	907
500	V 20	P _{N1}	0,19	0,34	0,62	0,83	0,99	1,58	1,88	3,26	5,4	6,4	9,7	11,9	19,8	35,2	
		P _{N2}	0,14	0,25	0,46	0,66	0,79	1,28	1,52	2,69	4,47	5,3	8,4	10	17	30,5	
		M _{2max}	5,2	9,5	17,5	25,3	30,1	48,8	58	103	171	203	322	383	650	1165	
400	V 16	P _{N1}	0,17	0,31	0,56	0,91	1,09	1,75	2,08	3,41	5,6	6,6	9,9	12,6	21,9	40,5	
		P _{N2}	0,13	0,24	0,44	0,73	0,87	1,43	1,7	2,82	4,67	5,6	8,9	10,7	18,6	34,4	
		M _{2max}	5,1	9,1	16,9	28,1	33,4	55	65	108	178	212	345	410	634	1161	
22,4	1 400	IV 63	P _{N1}	0,16	0,33	0,59	0,76	0,91	1,45	1,73	3,02	5,1	6	9,3	11,1	18,5	33,1
			P _{N2}	0,11	0,23	0,42	0,59	0,7	1,15	1,36	2,42	4,11	4,89	7,7	9,1	15,5	28
			M _{2max}	4,96	9,7	18	25,7	30,6	49,8	59	105	175	208	333	396	671	1211
	1 400	V 63	P _{N1}	—	0,18	0,34	0,58	0,69	1,1	1,31	2,11	3,44	4,1	6,2	7,4	11,9	21,2
			P _{N2}	—	0,12	0,23	0,4	0,48	0,79	0,94	1,57	2,61	3,11	4,84	5,8	9,5	17,2
			M _{2max}	—	4,96	9,7	17,2	20,5	33,9	40,3	67	112	134	208	248	406	739
	1 120	IV 50	P _{N1}	0,17	0,29	0,53	0,84	1	1,62	1,93	3,15	5,3	6,3	9,6	11,8	17,7	32,2
			P _{N2}	0,12	0,22	0,41	0,66	0,78	1,29	1,53	2,54	4,29	5,1	8,2	9,8	15	27,7
			M _{2max}	5,3	9,2	17,3	28,6	34	56	66	110	183	217	356	424	651	1198
	1 120	V 50	P _{N1}	0,12	0,22	0,41	0,67	0,79	1,25	1,49	2,33	3,89	4,63	7,4	8,8	14,4	25,3
			P _{N2}	0,08	0,15	0,28	0,47	0,56	0,92	1,09	1,76	3	3,57	5,8	6,9	11,6	20,8
			M _{2max}	3,34	6,3	11,7	20,2	24,1	39,2	46,6	75	128	152	247	294	494	887
900	V 40	P _{N1}	0,14	0,25	0,45	0,76	0,9	1,42	1,69	2,76	4,41	5,3	8,4	10	15,3	27,4	
		P _{N2}	0,09	0,17	0,31	0,55	0,65	1,05	1,26	2,12	3,42	4,07	6,7	8	12,5	22,6	
		M _{2max}	3,95	7,3	13,2	23,3	27,7	44,8	53	90	145	173	284	339	532	960	
710	V 32	P _{N1}	0,16	0,28	0,5	0,82	0,97	1,54	1,83	3,06	5	6	9	10,7	17,3	31,3	
		P _{N2}	0,11	0,19	0,35	0,6	0,71	1,15	1,37	2,35	3,93	4,68	7,2	8,6	14,2	26,6	
		M _{2max}	4,6	8,3	15,2	25,6	30,5	49,7	59	101	169	201	312	371	610	929	
560	V 25	P _{N1}	0,17	0,3	0,54	0,9	1,07	1,71	2,03	3,29	4,54	5,4	8,4	10	16,7	30,3	
		P _{N2}	0,12	0,21	0,39	0,67	0,8	1,3	1,55	2,57	3,74	4,46	7	8,4	14,2	26,2	
		M _{2max}	4,96	9	16,7	28,6	34	55	66	109	160	190	300	357	607	1117	
450	V 20	P _{N1}	0,18	0,32	0,58	0,76	0,91	1,46	1,73	3,03	4,98	5,9	9,3	11,1	18,5	33,1	
		P _{N2}	0,13	0,23	0,42	0,61	0,72	1,17	1,4	2,48	4,12	4,9	7,8	9,3	15,8	28,5	
		M _{2max}	5,3	9,7	18	25,7	30,6	49,8	59	105	175	208	333	396	671	1211	
355	V 16	P _{N1}	0,16	0,28	0,51	0,83	0,99	1,6	1,9	3,12	5,1	6,1	9,4	11,7	17,4	31,7	
		P _{N2}	0,12	0,21	0,4	0,66	0,79	1,3	1,54	2,56	4,25	5,1	8,3	9,8	15,1	27,8	
		M _{2max}	5,2	9,2	17,3	28,6	34	56	66	110	183	217	356	424	651	1198	
18	1 400	IV 80	P _{N1}	0,13	0,26	0,47	0,76	0,91	1,46	1,73	3,03	4,98	5,9	9,3	11,1	18,5	33,1
			P _{N2}	0,09	0,17	0,33	0,55	0,65	1,07	1,27	2,13	3,15	3,75	5,8	6,9	11,7	21,8
			M _{2max}	4,89	9,3	17,4	29,7	35,3	57	69	116	168	200	315	375	634	1179

Los valores en rojo indican la potencia térmica nominal P_{N1} (temperatura ambiente 40 °C, servicio continuo, ver cap. 4).
Para n₁ mayores de 1400 min⁻¹ o bien menores de 355 min⁻¹, ver cap. 6 y pag. 28.
1) El valor indicado para IV es nominal. Para las relaciones reales, ver pag. 28.
2) M_{2max} es la punta máxima del par que el reductor puede soportar.

Les valeurs en rouge indiquent la puissance thermique nominale P_{N1} (température ambiante 40 °C, service continu, voir chap. 4).
Si n₁ supérieure à 1 400 min⁻¹ ou inférieure à 355 min⁻¹ voir chap. 6 et page 28.
1) Pour IV, la valeur indiquée est la valeur nominale. Pour les rapports effectifs, voir page 28.
2) M_{2max} constitue le pic maximum du moment de torsion que le réducteur peut supporter.

15 - Detalles constructivos y funcionales

15 - Détails de la construction et du fonctionnement

Engranaje de sinfín

Número de dientes z_2 de la rueda para sinfín y z_1 del tornillo sinfín, módulo axial m_x , inclinación media de la hélice γ_m , rendimiento estático η_s y momento de inercia J_s del engranaje de sinfín para reductores y motorreductores **R V, R IV, MR V, MR IV, MR 2IV**.

Para reductores y motorreductores **R IV, MR IV y MR 2IV**, el momento de inercia (excluyendo el motor) en el eje rápido es el del tornillo sinfín dividido por el cuadrado de la relación total de engranaje del engranaje cilíndrico.

Engrénage à vis

Nombre de dents z_2 de la roue à vis et z_1 de la vis sans fin, module axiale m_x , inclinaison de l'hélice moyenne γ_m , rendement statique η_s , et moment d'inertie J_s de l'engrénage à vis pour réducteurs et motorréducteurs **R V, R IV, MR V, MR IV, MR 2IV**.

Pour les réducteurs et les motorréducteurs **R IV, MR IV et MR 2IV** le moment d'inertie (moteur exclu) sur l'axe rapide est celui sur la vis sans fin divisé par le carré du rapport d'engrénage de l'engrénage cylindrique.

i		Tamaño reductor - Taille réducteur									
		32	40	50	63, 64	80, 81	100	125, 126	160, 161	200	250
7	z_2/z_1	21/3	21/3	21/3	28/4	28/4					
	m_x	2,2	2,8	3,4	3,5	4,5					
	γ_m	22° 29'	22° 29'	22° 35'	28° 35'	28° 30'					
	η_s	0,71	0,71	0,71	0,74	0,74					
10	z_2/z_1	20/2	20/2	20/2	30/3	30/3	30/3	30/3	30/3		
	m_x	2,3	2,8	3,5	3,3	4,2	5,3	6,6	8,6		
	γ_m	15° 10'	15° 10'	15° 7'	19° 52'	20° 28'	21° 20'	21° 53'	23° 1'		
	η_s	0,65	0,65	0,65	0,69	0,7	0,7	0,7	0,72		
13	z_2/z_1	26/2	26/2	26/2	26/2	26/2	26/2	39/3	39/3	39/3	
	m_x	1,8	2,3	2,9	3,7	4,7	5,9	5,2	6,8	8,5	
	γ_m	13° 28'	13° 14'	13° 36'	14° 23'	14° 48'	15° 24'	18° 48'	19° 52'	20° 38'	
	η_s	0,62	0,62	0,63	0,64	0,64	0,65	0,68	0,69	0,7	
16	z_2/z_1	32/2	32/2	32/2	32/2	32/2	32/2	32/2	32/2	48/3	48/3
	m_x	1,5	1,9	2,4	3,1	3,9	4,9	6,2	8	7,1	9
	γ_m	11° 52'	11° 53'	12° 4'	12° 47'	13° 14'	13° 47'	14° 7'	14° 52'	19° 4'	20° 21'
	η_s	0,6	0,6	0,6	0,61	0,62	0,63	0,63	0,64	0,68	0,69
20	z_2/z_1	20/1	20/1	20/1	40/2	40/2	40/2	40/2	40/2	40/2	40/2
	m_x	2,3	2,8	3,5	2,5	3,2	4,1	5,1	6,6	8,3	10,4
	γ_m	7° 41'	7° 40'	7° 46'	11° 46'	12° 1'	12° 29'	12° 24'	13° 6'	13° 36'	14° 3'
	η_s	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,61	0,61	0,62	0,63	0,63
25	z_2/z_1	25/1	25/1	25/1	25/1	25/1	25/1	50/2	50/2	50/2	50/2
	m_x	1,9	2,4	3	3,8	4,8	6,1	4,2	5,4	6,8	8,6
	γ_m	6° 55'	6° 52'	6° 58'	7° 21'	7° 34'	7° 53'	11° 33'	11° 49'	12° 28'	13° 18'
	η_s	0,48	0,48	0,48	0,5	0,5	0,51	0,59	0,6	0,61	0,62
32	z_2/z_1	32/1	32/1	32/1	32/1	32/1	32/1	32/1	32/1	32/1	64/2
	m_x	1,5	1,9	2,4	3,1	3,9	4,9	6,2	8	10,1	6,8
	γ_m	6°	6°	6° 3'	6° 25'	6° 38'	6° 55'	7° 5'	7° 27'	7° 43'	11° 22'
	η_s	0,45	0,45	0,45	0,46	0,47	0,48	0,49	0,5	0,51	0,59
40	z_2/z_1	40/1	40/1	40/1	40/1	40/1	40/1	40/1	40/1	40/1	40/1
	m_x	1,3	1,6	2	2,5	3,2	4,1	5,1	6,6	8,3	10,4
	γ_m	5° 12'	5° 10'	5° 16'	5° 54'	6° 2'	6° 16'	6° 13'	6° 13'	6° 34'	7° 3'
	η_s	0,42	0,42	0,42	0,44	0,45	0,46	0,46	0,47	0,48	0,49
50	z_2/z_1	50/1	50/1	50/1	50/1	50/1	50/1	50/1	50/1	50/1	50/1
	m_x	1	1,3	1,6	2,1	2,7	3,3	4,2	5,4	6,8	8,6
	γ_m	4° 29'	4° 25'	4° 32'	5° 7'	5° 15'	5° 27'	5° 48'	5° 56'	6° 15'	6° 41'
	η_s	0,38	0,38	0,38	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45	0,46	0,47
63	z_2/z_1		63/1	63/1	63/1	63/1	63/1	63/1	63/1	63/1	63/1
	m_x		1	1,3	1,7	2,1	2,7	3,4	4,4	5,5	6,9
	γ_m		3° 43'	3° 50'	4° 21'	4° 27'	4° 39'	4° 57'	5° 5'	5° 22'	5° 46'
	η_s		0,34	0,35	0,38	0,38	0,39	0,4	0,41	0,42	0,44
Momento de inercia (de masa) J_s [kg m ²] sobre el sinfín ≈							0,0014	0,0037	0,0078	0,0192	0,0376
Moment d'inertie (de masse) J_s [kg m ²] sur la vis ≈											

Juego angular del eje lento

El juego angular del eje lento, con sinfín bloqueado, está comprendido **aproximadamente** entre los valores indicados en el cuadro. Este varía en función de la ejecución y de la temperatura. Bajo pedido, se pueden suministrar reductores con **juego controlado o reducido** (ver cap. 17) plazo de entrega superior al normal, sobreprecio, seleccionar un factor de servicio **superior**.

Tamaño reductor Taille réducteur	Juego angular [rad] ¹⁾ Jeu angulaire [rad] ¹⁾	
	min	max
32	0,0030	0,0118
40	0,0025	0,0100
50	0,0020	0,0080
63, 64	0,0018	0,0071
80, 81	0,0016	0,0063
100	0,0013	0,0050
125, 126	0,0011	0,0045
160, 161	0,0010	0,0040
200	0,0008	0,0032
250	0,0007	0,0028

1) A 1 m desde el centro de eje lento, el juego angular en mm se obtiene multiplicando por 1 000 los valores del cuadro (1 rad = 3438').

Jeu angulaire de l'axe lent

Le jeu angulaire de l'axe lent, à vis bloquée, est compris **de façon indicative** entre les valeurs figurant au tableau. Ce jeu varie en fonction de l'exécution et de la température. Nous pouvons fournir sur demande des réducteurs avec jeu **contrôlé** ou **réduit** (voir chap. 17), ils sont toutefois sujets à un supplément de prix et un délai de livraison plus long, choisir un facteur de service **supérieure**.

1) A la distance de 1 m du centre de l'axe lent, le jeu angulaire en mm s'obtient en multipliant par 1 000 les valeurs du tableau (1 rad = 3438').