

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	15
1.1. Transmisiones mecánicas	15
1.2. Transmisiones por engranajes	16
1.2.1. <i>Transmisiones por engranajes cilíndricos</i>	16
1.2.2. <i>Transmisiones por engranajes cónicos</i>	18
1.2.3. <i>Transmisiones por engranajes cónicos desplazados</i>	18
1.2.4. <i>Transmisiones por tornillo sin fin</i>	19
1.2.5. <i>Transmisión cruzada con ruedas cilíndricas helicoidales</i>	20
1.3. Objeto de este libro	21
2. CINEMÁTICA DE LOS ENGRANAJES CILÍNDRICOS DE DENTADO RECTO	23
2.1. El perfil de evolvente	23
2.2. Transmisión paralela por perfiles de evolvente	24
2.3. Circunferencia primitiva de referencia. Ángulo de presión de referencia. Paso diametral. Módulo	25
2.4. Distancia entre ejes de funcionamiento	28
2.5. Cremallera. Dentado plano	30
2.6. Generación efectiva de los flancos de los dientes	30
2.6.1. <i>Planteamiento</i>	30
2.6.2. <i>Consideraciones previas</i>	32
2.6.3. <i>Generación de un perfil de evolvente como envolvente de las infinitas posiciones de un perfil de cremallera</i>	35
2.7. Perfil de referencia	36
2.8. Dentaduras desplazadas	39

2.9.	Penetración. Número límite de dientes por penetración	40
2.10.	Cálculo del espesor del diente	42
2.11.	Espesor cordal para K dientes	44
2.12.	Condiciones para que sea nula la holgura circunferencial entre los perfiles nominales de los dientes de un engranaje	47
2.12.1.	Introducción	47
2.12.2.	Engranajes a cero	47
2.12.3.	Engranajes en v	48
2.13.	Longitud de acercamiento. Longitud de alejamiento. Longitud de engrane	50
2.14.	Grado de recubrimiento o coeficiente de engrane	52
2.15.	Deslizamiento entre los flancos	53
2.16.	Velocidades de rodadura. Deslizamiento específico	56
2.17.	Utilización de dentaduras desplazadas para equilibrar los deslizamientos específicos máximos entre piñón y rueda	62
3.	CINEMÁTICA DE LOS ENGRANAJES CILÍNDRICOS DE DENTADO OBLICUO	65
3.1.	El Helicoide desarrollable. Generación	65
3.2.	Relaciones angulares	69
3.3.	Perfil frontal. Perfil normal	71
3.4.	Normalización	75
3.5.	Espesor cordal para K dientes	75
3.6.	Número límite de dientes por penetración	77
3.7.	Coeficiente de engrane o grado de recubrimiento	78
3.8.	Engranajes V	81
3.9.	Selección de los valores de los factores de desplazamiento	83
3.10.	Esfuerzos	86
3.11.	Longitud total del contacto	91
4.	TRANSMISIÓN ENTRE EJES QUE SE CRUZAN POR MEDIO DE RUEDAS CILÍNDRICO-HELICOIDALES	95
4.1.	Introducción	95
4.2.	Velocidad de deslizamiento	96
4.3.	Relación entre los módulos de los dentados de las ruedas	96
4.4.	Relación de velocidad	98
4.5.	Contacto entre los flancos de las ruedas cilíndrico-helicoidales en una transmisión entre ejes cruzados	98
4.6.	Anchura útil de las ruedas	101

5.	FABRICACIÓN DEL DENTADO DE RUEDAS CILÍNDRICAS	103
5.1.	El tallado de dentaduras	103
5.2.	Talla por fresa de forma	103
5.2.1.	<i>Talla por fresa de disco o fresa de módulo</i>	103
5.2.2.	<i>Tallado de las ruedas de dentado helicoidal</i>	105
5.2.3.	<i>Talla por fresa frontal</i>	107
5.3.	Talla por generación	107
5.3.1.	<i>Introducción</i>	107
5.3.2.	<i>Talla por útil cremallera</i>	108
5.3.2.1.	Máquinas Maag	109
5.3.2.2.	Máquinas Sunderland-Rollet	110
5.3.3.	<i>Talla por útil piñón</i>	111
5.3.4.	<i>Talla por fresa madre</i>	113
5.4.	Rectificado de ruedas cilíndricas	116
5.4.1.	<i>Rectificación por generación</i>	116
5.4.1.1.	Máquinas de rectificar con parejas de muelas	117
5.4.1.2.	Máquinas de rectificar con muela de disco bicónico	122
5.4.2.	<i>Rectificación por muela de forma</i>	124
5.5.	Afeitado de ruedas cilíndricas	125
5.6.	Resumen de los distintos procedimientos de fabricación del dentado de ruedas cilíndricas	128
6.	INTRODUCCIÓN AL CALCULO DE UN ENGRANAJE CILÍNDRICO	131
6.1.	Posibles causas de fallo de un engranaje como introducción al cálculo del mismo	131
6.1.1.	<i>Planteamiento</i>	131
6.1.2.	<i>Fallos por rotura del diente</i>	131
6.1.3.	<i>Fallos por deterioro superficial de los flancos</i>	132
6.2.	Presentación del proceso de cálculo de un engranaje cilíndrico	135
7.	CÁLCULO DE LA PRESIÓN SUPERFICIAL NOMINAL EN LOS FLANCOS	137
7.1.	Distribución de tensiones en un plano semifinito sometido a carga	137
7.2.	Distribución de tensiones en cilindros sometidos a carga	139
7.3.	Presión superficial en los flancos de los dientes de un engranaje	143
7.3.1.	<i>Introducción</i>	143
7.3.2.	<i>Esfuerzo normal</i>	144

7.3.3.	Radio de cilindro equivalente	144
7.3.4.	Longitud efectiva del contacto	147
7.4.	Presión nominal de Hertz	149
7.5.	Factor de simple contacto	152
8.	CÁLCULO DE LA TENSIÓN NOMINAL EN EL TALÓN DEL DIENTE	155
8.1.	Introducción	155
8.2.	Puntos de engrane decisivos para el cálculo de la tensión en el talón del diente	156
8.3.	Tensión nominal en el talón del diente para dentado recto	157
8.3.1.	Introducción	157
8.3.2.	Cálculo de la tensión nominal en el talón del diente para carga aplicada en el extremo del segmento de carga compartida	158
8.3.3.	Cálculo de la tensión nominal en el talón del diente para carga aplicada en cabeza	160
8.3.4.	Conclusión	161
8.4.	Tensión nominal en el talón del diente para dentado oblicuo	162
9.	SISTEMAS DE PRECISIÓN ISO PARA ENGRANAJES	171
9.1.	Planteamiento	171
9.2.	Definiciones	171
9.2.1.	Desviación de hélice	171
9.2.2.	Desviación de paro	172
9.2.3.	Desviación de perfil	173
9.3.	Estructura del sistema de precisión ISO	174
9.3.1.	Rango de los parámetros	175
9.3.2.	Reglas de redondeo	175
9.4.	Fórmulas correspondientes al grado de precisión 5	175
9.5.	Diferencia para la distancia entre ejes y tolerancias para la posición de ejes para cajas de engranaje	180
9.5.1.	Introducción	180
9.5.2.	Diferencias para la distancia entre ejes	181
9.5.3.	Tolerancias para la posición de los ejes	182
9.6.	Diferencias y tolerancias de espesor de diente	182
9.7.	Juego entre flancos	186
9.7.1.	Juego entre flancos debido a la diferencia de espesor	186

9.7.2. Modificación del juego entre flancos debido a la diferencia de distancia entre ejes	188
9.8. Ejemplo de aplicación	189
9.8.1. Datos	189
9.8.2. Desviación total de helice	189
9.8.3. Diferencias de espesor	190
9.8.4. Diferencias de distancia entre ejes	191
9.8.5. Tolerancias para la inclinación y desviación de los ejes	191
9.8.6. Juego entre dientes debido a las diferencias de espesor	192
9.8.7. Juego entre dientes considerando las diferencias de espesor y las diferencias de distancia entre ejes	192
9.8.8. Medida de distancia entre k dientes, M_k	193
10. FACTORES DE INFLUENCIA PARA EL CÁLCULO DE LAS SOLICITACIONES DE FUNCIONAMIENTO	195
10.1. Introducción	195
10.2. Factor de aplicación K_A	198
10.3. Factor dinámico K_V	200
10.4. Factor de distribución longitudinal de la carga aplicable a la tensión de Hertz, $K_{H\beta}$	203
10.4.1. Planteamiento	203
10.4.2. Cálculo del error de distorsión $F_{\beta\gamma}$	207
10.4.2.1. Introducción	207
10.4.2.2. Error de distorsión por fabricación y montaje, f_{ma}	208
10.4.2.3. Error de distorsión por deformación bajo carga, f_{sh}	209
10.4.2.4. Reducción del error de distorsión por rodaje, Y_{β}	213
10.5. Factor de distribución longitudinal de la carga aplicada a la tensión en el talón del diente, $K_{F\beta}$	215
10.6. Factores de distribución transversal de la carga, $K_{H\alpha}$, $K_{F\alpha}$	215
10.6.1. Planteamiento	215
10.6.2. Desviación de paso de base normal, f_{pnb}	216
10.6.3. Reducción por rodaje de error de paso de base Y_{α}	217
11. CÁLCULO DE LA SEGURIDAD DEL ENGRANAJE ANTE EL FALLO POR FATIGA	219
11.1. Introducción	219
11.2. Materiales utilizados en la fabricación de engranajes	220
11.2.1. La elección del material	220

11.2.2. <i>Fundición gris fundición nodular, fundición maleable</i>	220
11.2.2.1. Fundición gris	220
11.2.2.2. Fundición nodular	221
11.2.2.3. Fundición maleable	221
11.2.3. <i>Aceros al carbono y aceros aleados</i>	221
11.2.3.1. Aceros al carbono	221
11.2.3.2. Aceros aleados	221
11.2.3.3. Influencia de los elementos de aleación	222
11.2.3.4. Tratamientos térmicos	223
11.2.3.5. Aceros de uso general	227
11.2.3.6. Aceros de cementación y nitruración	227
11.2.3.7. Aceros de bonificación	227
11.3. Tratamiento térmico de los engranajes	228
11.3.1. <i>Introducción al tratamiento térmico de los engranajes</i>	228
11.3.2. <i>Tratamiento térmico completo</i>	229
11.3.3. <i>Cementación</i>	230
11.3.4. <i>Nitruración</i>	233
11.3.5. <i>Temple superficial a la llama o por inducción</i>	234
11.4. Valores límite admisibles de calculo para la presión superficial en los flancos, σ_{HP} , y para la tensión en el talón del diente, σ_{FP}	236
11.4.1. <i>Valores de resistencia a la fatiga superficial en los flancos, a σ_H lím, a la tensión de flexión en el talón del diente, σ_F lím</i>	236
11.4.2. <i>Cálculo del límite admisible para la presión de cálculo en los flancos, σ_{HP}</i>	246
11.4.2.1. Planteamiento	246
11.4.2.2. Factor de duración. Z_N	246
11.4.2.3. Factores de influencia debidos a la pelicula de lubricante	248
11.4.2.4. Factor de relación de durezas, Z_W	252
11.4.2.5. Factor de dimensión, Z_X	253
11.4.3. <i>Cálculo del límite admisible para la tensión de cálculo en el talón del diente, σ_{FP}</i>	254
11.4.3.1. Planteamiento	254
11.4.3.2. Factor de duración, Y_{NT}	255
11.4.3.3. Factor de sensibilidad relativa a la entalladura, $Y_{\delta relT}$	256
11.4.3.4. Factor de rugosidad relativa, Y_{RelT}	258
11.4.3.5. Factor de dimensión Y_X	260
11.5. Fiabilidad. Factor de fiabilidad	260

12. CÁLCULO SIMPLIFICADO DEL ENGRANAJE FRENTE AL FALLO POR FATIGA	263
12.1. Preámbulo	263
12.2. Cálculo simplificado del engranaje frente al fallo por fatiga superficial	263
12.2.1. Planteamiento	263
12.2.2. Factor de servicio K_B	265
12.2.3. Factor dependiente de la geometría, C_2	266
12.2.4. Factor dependiente de la velocidad, C_3	267
12.2.5. Factor volumen de ejecución del piñón, C_4	269
12.2.5.1. Factor de distribución longitudinal de carga, $K_{H\beta}$	269
12.2.5.2. Factor de distribución transversal de carga, $K_{H\alpha}$	273
12.2.6. Factor dependiente del material, C_5	273
12.2.7. Factor de efectos varios, C_6	274
12.3. Proceso de selección del material y de cálculo de las dimensiones del engranaje desde el punto de vista del fallo por fatiga superficial ...	275
12.3.1. Introducción	275
12.3.2. Dimensiones máximas para el piñón	276
12.3.3. Selección del material	277
12.3.4. Proceso de diseño del engranaje	279
12.4. Cálculo simplificado del engranaje frente al fallo por fatiga en el talón del diente	283
12.4.1. Planteamiento	283
12.4.2. Factor dependiente de la geometría, C_{B2}	285
12.4.3. Factor dependiente de la velocidad, $C_{B3} = 1/K_V$	286
12.4.4. Factor dependiente del factor de cabeza, $C_{B4} = 1/Y_{FS}$	287
12.4.5. Factor dependiente de la anchura y de los factores de distribución de carga, $C_{B5} = b/K_{H\beta} K_{H\alpha}$	288
12.4.6. Factor dependiente del material, C_{B6}	288
12.4.7. Factor de efectos varios, C_{B7}	289
12.4.8. Factor de servicio frente al fallo por rotura por fatiga en el talón del diente	290
12.5. Conclusión	290
13. LA LUBRICACIÓN DE LOS ENGRANAJES	291
13.1. Introducción	291
13.2. Principales tipos de lubricantes para los engranajes	291
13.2.1. Introducción	291
13.2.2. Aceites sin aditivos EP	292

13.2.2.1. Aceites inhibidos R y O	292
13.2.2.2. Aceites que poseen propiedades reforzadas de untuosidad	293
13.2.2.3. Aceites minerales conteniendo jabón de plomo sin aditivo azufrado	293
13.2.3. Aceites de extrema presión, EP	294
13.2.4. Lubricantes sintéticos	295
13.2.4.1. Aceites de engranajes con base de éteres de poliglicol ...	295
13.2.4.2. Aceites de engranajes con base de ésteres	295
13.2.4.3. Aceites de engranajes con base de hidrocarburos de síntesis	296
13.2.4.4. Aceites de engranajes semi-sintéticos	296
13.2.5. Aceites multigrado para engranajes	296
13.2.6. Lubricantes para engranajes que contienen lubricante sólido	297
13.2.7. Lubricantes para engranajes abiertos	297
13.3. Principales clasificaciones para lubricantes para engranaje	298
13.3.1. Introducción	298
13.3.2. Clasificaciones de viscosidad	298
13.3.3. Clasificaciones de servicio y especificaciones	301
13.4. Funciones a cumplir por los lubricantes para engranajes	301
13.5. Métodos de lubricación	302
13.5.1. Lubricación de los engranajes bajo cárter	302
13.5.1.1. Lubricación por barbotaje	302
13.5.1.2. Lubricación por inyección	304
13.5.2. Lubricación de engranajes abiertos	305
13.6. Orientaciones clásicas para la elección de un lubricante para engranajes	307
13.6.1. Método de cálculo "United"	307
13.6.2. Recomendaciones AGMA para la lubricación de engranajes ...	308
13.7. Teoría de la lubricación elasto-hidrodinámica (EHD)	310
13.7.1. Antecedentes. Lubricación hidrodinámica	310
13.7.2. Resultados del problema EHD presentados por Dowson y Higginson	313
13.8. Aplicación de la teoría EHD para la lubricación de los engranajes	316
13.9. Influencia de los lubricantes en el deterioro de los flancos por desgaste. Teoría EHD rugosa	318
13.10. Distintos aparatos de ensayo utilizados en el estudio de la lubricación de engranajes	321
13.11. Cálculo de la seguridad de los engranajes al fallo por gripado	323

13.11.1. Introducción	323
13.11.2. Representación de los diferentes parámetros implicados en el cálculo	325
13.11.3. Cálculo del flash de temperatura en la cabeza del piñón $\theta_{fla E}$	326
13.11.4. Cálculo del valor medio del flash o relámpago de temperatura sufrido por la película, $\theta_{fla int}$	333
13.11.5. Cálculo de la temperatura de los flancos	335
13.11.6. Cálculo de la temperatura integral	335
13.11.7. Cálculo del límite del gripado para la temperatura de la película de lubricante, θ_{int}	335
13.11.8. Cálculo de la seguridad del engranaje frente al fallo por gripado	337