

# CONTENIDO

## PARTE 1

### FUNDAMENTOS 1

#### Capítulo 1

##### INTRODUCCIÓN 2

- 1.1 ¿Qué es el diseño? 3
- 1.2 Diseño de sistemas mecánicos 4
- 1.3 El diseño como tarea multidisciplinaria 5
- 1.4 Diseño de elementos de máquinas 6
- 1.5 Consideraciones fundamentales de diseño 7
  - 1.5.1 Seguridad en el diseño mecánico 7
  - 1.5.2 Códigos gubernamentales y normas de la industria 12
  - 1.5.3 Manufactura 13
- 1.6 Las computadoras en el diseño 15
- 1.7 Catálogos y vendedores 17
- 1.8 Unidades 17
- 1.9 Comprobación de las unidades 18
- 1.10 Cifras significativas 20
- 1.11 Resumen 22

#### Capítulo 2

##### CARGA, ESFUERZO Y DEFORMACIÓN

##### UNITARIA 27

- 2.1 Introducción 28
- 2.2 Sección crítica 28
- 2.3 Clasificación de cargas y convención de signos 30
- 2.4 Reacciones del apoyo 34
- 2.5 Equilibrio estático 34
- 2.6 Diagrama de cuerpo libre 37
- 2.7 Vigas apoyadas 37
- 2.8 Diagramas de cortante y de momento 39
- 2.9 Funciones de singularidad 41
- 2.10 Esfuerzo 47
- 2.11 Elemento de esfuerzo 49
- 2.12 Tensor de esfuerzo 50
- 2.13 Esfuerzo plano 51
- 2.14 Círculo de Mohr 55
- 2.15 Esfuerzos tridimensionales 58
- 2.16 Esfuerzos octaédricos 61
- 2.17 Deformación unitaria 63
- 2.18 Tensor de deformación unitaria 65
- 2.19 Deformación unitaria plana 66
- 2.20 Resumen 71

#### Capítulo 2

##### MATERIALES SÓLIDOS 89

- 3.1 Introducción 90
- 3.2 Materiales dúctiles y frágiles 91
  - 3.2.1 Materiales dúctiles 91
  - 3.2.2 Materiales frágiles 92
- 3.3 Clasificación de los materiales sólidos 93
  - 3.3.1 Metales 93
  - 3.3.2 Cerámicas y vidrios 94
  - 3.3.3 Polímeros y elastómeros 95
  - 3.3.4 Compuestos 95
- 3.4 Diagramas esfuerzo-deformación unitaria 98
  - 3.4.1 Metales 98
  - 3.4.2 Cerámicas 101
  - 3.4.3 Polímeros 102
- 3.5 Propiedades de los materiales sólidos 104
  - 3.5.1 Densidad 104
  - 3.5.2 Módulos de elasticidad, razón de Poisson y módulo de cortante 106
  - 3.5.3 Resistencia II 1
  - 3.5.4 Resiliencia y tenacidad 112
  - 3.5.5 Conductividad térmica 114
  - 3.5.6 Coeficiente de dilatación **térmica** lineal 114
  - 3.5.7 Capacidad calorífica específica 115
  - 3.5.8 Constante de desgaste de Archard 121
- 3.6 Relaciones esfuerzo-deformación unitaria 121
- 3.7 Gráficas de materiales de dos parámetros 123
  - 3.7.1 Rigidez *versus* densidad 123
  - 3.7.2 Resistencia *versus* densidad 126
  - 3.7.3 Rigidez *versus* resistencia 128
  - 3.7.4 Razón de desgaste *versus* presión limitante 130
  - 3.7.5 Módulo de Young *versus* costo relativo 132
- 3.8 Resumen 134

#### Capítulo 4

##### ESFUERZOS CORTANTES Y DEFORMACIONES UNITARIAS TRANSVERSALES, NORMALES, DE TORSIÓN Y DE FLEXIÓN 139

- 4.1 Introducción 140
- 4.2 Definiciones 141
  - 4.2.1 Centroide de un **área** 141

- 4.2.2 Momento de inercia del área 142
- 4.2.3 Teorema de los ejes paralelos 144
- 4.2.4 Radio de giro 146
- 4.2.5 Módulo de sección 147
- 4.2.6 Momento de inercia de la masa 149
- 4.3 Esfuerzo normal y deformación unitaria 151
- 4.4 Torsión 153
  - 4.4.1 Esfuerzo y deformación unitaria 154
  - 4.4.2 Transferencia de potencia 156
- 4.5 Esfuerzo flexionante y deformación unitaria 158
  - 4.5.1 Miembro recto 158
  - 4.5.2 Miembro curvo 162
- 4.6 Esfuerzo cortante transversal y deformación unitaria 167
- 4.7 Resumen 173

## Capítulo 5

### DEFORMACIÓN 181

- 5.1 Introducción 182
- 5.2 Relación momento-curvatura 183
- 5.3 Funciones de singularidad 186
- 5.4 Método de superposición 192
- 5.5 Energía de deformación unitaria 195
  - 5.5.1 Esfuerzo normal 195
  - 5.5.2 Esfuerzo cortante 197
  - 5.5.3 Esfuerzo cortante transversal 199
  - 5.5.4 Estado general de esfuerzos 200
- 5.6 Teorema de Castigliano 200
- 5.7 Resumen 208

## Capítulo 6

### PREDICCIÓN DE FALLA POR CARGA ESTÁTICA 219

- 6.1 Introducción 220
- 6.2 Concentración de esfuerzos 221
  - 6.2.1 Gráficas 221
  - 6.2.2 Analogía del flujo 228
- 6.3 Mecánica de fractura 230
- 6.4 Modos del desplazamiento de grietas 230
- 6.5 Tenacidad a la fractura 231
- 6.6 Predicción de falla para un estado de esfuerzo uniaxial 234
- 6.7 Predicción de falla para un estado multiaxial de esfuerzo 235
  - 6.7.1 Materiales dúctiles 235
  - 6.7.2 Materiales frágiles 242
  - 6.7.3 Selección de un criterio de falla 245
- 6.8 Resumen 250

## Capítulo 7

### PREDICCIÓN DE LA FALLA POR CARGA CÍCLICA Y DE IMPACTO 257

- 7.1 Introducción 258
- 7.2 Fatiga 259
- 7.3 Esfuerzos cíclicos 261
- 7.4 Teoría de la fatiga durante la deformación unitaria 262
- 7.5 Resistencia a la fatiga 264
  - 7.5.1 Experimentos de viga rotativa 264
  - 7.5.2 Diagramas S-N 265
- 7.6 Regímenes de fatiga 267
  - 7.6.1 Fatiga de bajo ciclaje 268
  - 7.6.2 Fatiga de alto ciclaje de duración finita 268
  - 7.6.3 Fatiga de alto ciclaje de duración infinita 270
- 7.7 Factores de modificación del límite a la fatiga 270
  - 7.7.1 Efectos de la concentración de esfuerzos 270
  - 7.7.2 Factor del acabado de la superficie 273
  - 7.7.3 Factor de tamaño 275
  - 7.7.4 Factor de confiabilidad 275
  - 7.7.5 Factor de temperatura 276
  - 7.7.6 Efectos diversos 276
- 7.8 Daño acumulativo 279
- 7.9 Influencia del esfuerzo medio diferente de cero 280
  - 7.9.1 Materiales dúctiles 280
  - 7.9.2 Materiales frágiles 287
- 7.10 Enfoque de la mecánica de fractura a la fatiga 288
- 7.11 Esfuerzos y deformaciones por impacto inel 290
- 7.12 Resumen 298

## Capítulo 8

### LUBRICACIÓN, FRICCIÓN Y DESGASTE 307

- 8.1 Introducción 308
- 8.2 Superficies concordantes y no concordantes 309
- 8.3 Lubricación 3 10
  - 8.3.1 Lubricación hidrodinámica 3 10
  - 8.3.2 Lubricación elastohidrodinámica 3 11
  - 8.3.3 Lubricación marginal 3 13
  - 8.3.4 Lubricación parcial 3 15
- 8.4 Parámetros de superficie 3 15
- 8.5 Parámetro de película 3 17
- 8.6 Viscosidad del lubricante 3 18

- 8.6.1 Viscosidad absoluta 319
- 8.6.2 Viscosidad cinemática 321
- 8.6.3 Efectos viscosidad-presión 322
- 8.6.4 Efectos temperatura-viscosidad 326
- 8.7 Carga concentrada: deformaciones y esfuerzos 326
  - 8.7.1 Contactos elípticos 327
  - 8.7.2 Contactos rectangulares 334
- 8.8 Fricción 336
  - 8.8.1 Fricción baja 336
  - 8.8.2 Fricción alta 337
  - 8.8.3 Leyes de la fricción seca 338
  - 8.8.4 Fricción por deslizamiento de metales 338
  - 8.8.5 Fricción por deslizamiento de polímeros y plásticos 341
  - 8.8.6 Fricción por deslizamiento del caucho 342
- 8.9 Desgaste 342
  - 8.9.1 Desgaste por adhesión 342
  - 8.9.2 Desgaste por abrasión 345
  - 8.9.3 Desgaste por fatiga 345
- 8.10 Resumen 348

## Parte 2

### ELEMENTOS DE MÁQUINAS 357

#### Capítulo 9

##### COLUMNAS 358

- 9.1 Introducción 359
- 9.2 Regímenes de equilibrio 360
  - 9.2.1 Equilibrio estable 360
  - 9.2.2 Equilibrio neutral 360
  - 9.2.3 Equilibrio inestable 360
- 9.3 Columnas cargadas concéntricamente 362
  - 9.3.1 Material elástico lineal 362
  - 9.3.2 Alabeo inelástico 365
- 9.4 Condiciones de los extremos 365
- 9.5 Criterio de alabeo de Euler 367
- 9.6 Criterio de alabeo de Johnson 368
- 9.7 Criterio del AISC 372
- 9.8 Columnas cargadas excéntricamente 373
- 9.9 Resumen 379

#### Capítulo 10

##### ESFUERZOS Y DEFORMACIONES EN CILINDROS 385

- 10.1 Introducción 386
- 10.2 Tolerancias y ajustes 386
- 10.3 Efectos de presurización 389
  - 10.3.1 Cilindros de pared delgada 390
  - 10.3.2 Cilindros de pared gruesa 393

- 10.4 Efectos rotacionales 400
  - 10.4.1 Cilindros con orificio central 401
  - 10.4.2 Cilindro sólido 402
- 10.5 Ajustes a presión 404
  - 10.5.1 Masa 405
  - 10.5.2 Eje 406
  - 10.5.3 Ajuste por interferencia 407
  - 10.5.4 Fuerza y par de torsión 407
- 10.6 Ajustes por contracción 409
- 10.7 Resumen 415

#### Capítulo 11

##### EJES Y PARTES ASOCIADAS 423

- 11.1 Introducción 424
- 11.2 Procedimiento de diseño de un eje 425
- 11.3 Carga estática 428
  - 11.3.1 Momento flexionante y torsión 428
  - 11.3.2 Momento flexionante, torsión y carga axial 431
- 11.4 Carga cíclica 432
  - 11.4.1 Materiales dúctiles 432
  - 11.4.2 Materiales frágiles 437
- 11.5 Velocidad crítica de ejes giratorios 440
  - 11.5.1 Sistema de masa individual 440
  - 11.5.2 Sistema de masa múltiple 442
- 11.6 Cuñas 445
- 11.7 Volantes 448
  - 11.7.1 Dinámica 448
  - 11.7.2 Tamaño del volante 449
  - 11.7.3 Esfuerzos 452
  - 11.7.4 Materiales 454
- 11.8 Resumen 458

#### Capítulo 12

##### COJINETES Y EMPAQUES HIDRODINÁMICOS E HIDROSTÁTICOS 467

- 12.1 Introducción 469
- 12.2 Ecuación de Reynolds 469
  - 12.2.1 Derivación de la ecuación de Reynolds 470
  - 12.2.2 Importancia física de los términos en la ecuación de Reynolds 474
  - 12.2.3 Formas estándar reducidas 477
- 12.3 Cojinetes de empuje deslizantes 478
  - 12.3.1 Mecanismo del desarrollo de la presión 478
  - 12.3.2 Teoría general de los cojinetes de empuje deslizantes 480
  - 12.3.3 Cojinetes de empuje hidrodinámico sin tomar en cuenta pérdidas laterales 481

- 12.3.4 Parámetros de operación y funcionamiento 489
- 12.3.5 Cojinetes deslizantes de inclinación fija 492
- 12.3.6 Cojinetes deslizantes de almohadilla con pivote 498
- 12.3.7 Geometría de un cojinete de empuje deslizante 503
- 12.4 Chumaceras de cojinetes deslizantes 504
  - 12.4.1 Ecuación de Petrov 505
  - 12.4.2 Operación de las chumaceras deslizantes 506
  - 12.4.3 Parámetros de operación y desempeño 507
  - 12.4.4 Procedimiento de diseño 508
  - 12.4.5 Técnicas de optimización 514
  - 12.4.6 Configuraciones complejas 514
- 12.5 Cojinetes de película cambiante 516
  - 12.5.1 Cojinetes de empuje de película cambiante de superficie paralela 517
  - 12.5.2 Comentarios generales acerca de los cojinetes de película cambiante 521
- 12.6 Cojinetes hidrostáticos 521
- 12.7 Cojinetes lubricados por gas 525
- 12.8 Resumen 528

## Capítulo 13

### COJINETES DE ELEMENTOS RODANTES 539

- 13.1 Introducción 541
- 13.2 Panorama histórico 542
- 13.3 Tipos de cojinetes 543
  - 13.3.1 Cojinetes de bolas 543
  - 13.3.2 Cojinetes de rodillos 546
- 13.4 Geometría 549
  - 13.4.1 Cojinetes de bolas 549
  - 13.4.2 Cojinetes de rodillos 559
- 13.5 Cinemática 563
- 13.6 Separadores 567
- 13.7 Distribución de carga estática 568
  - 13.7.1 Relaciones de deflexión de la carga 568
  - 13.7.2 Cojinetes de bolas y de rodillos cargados radialmente 570
  - 13.7.3 Cojinetes de bolas bajo carga de empuje 573
  - 13.7.4 Precarga 576
  - 13.7.5 Clasificación de carga estática 577
  - 13.7.6 Carga estática equivalente 579
- 13.8 Lubricación elastohidrodinámica 581
  - 13.8.1 Ecuaciones relevantes 581
  - 13.8.2 Agrupamientos adimensionales 582
  - 13.8.3 Fórmula del espesor mínimo de la película 584
- 13.9 Vida de fatiga 586
  - 13.9.1 Teoría de la fatiga por contacto 586
  - 13.9.2 Distribución de Weibull 587
  - 13.9.3 Clasificación de carga dinámica 590
  - 13.9.4 Carga dinámica equivalente 591
  - 13.9.5 Factores de ajuste a la vida por fatiga 591
- 13.10 Resumen 603

## Capítulo 14

### ENGRANES 613

- 14.1 Introducción 615
- 14.2 Tipos de engranes 615
  - 14.2.1 Engranes de eje paralelo 615
  - 14.2.2 Engranes no paralelos coplanares 617
  - 14.2.3 Engranes no paralelos no coplanares 617
- 14.3 Geometría de engranes 619
  - 14.3.1 Distancia central, paso circular y paso diametral 619
  - 14.3.2 Cabeza, raíz y holgura 623
  - 14.3.3 Línea de acción, ángulo de presión e involuta del engrane 624
- 14.4 Cinemática 627
- 14.5 Razón de contacto 628
- 14.6 Espesor del diente, juego e interferencia 632
- 14.7 Tren de engranes 634
  - 14.7.1 Engranes de acoplamiento simple 634
  - 14.7.2 Trenes de engrane recto simple 635
  - 14.7.3 Trenes de engrane recto compuesto 636
- 14.8 Materiales de engranes y esfuerzos permisibles 638
- 14.9 Cargas que actúan sobre el diente de un engrane 639
- 14.10 Esfuerzos flexionantes en el diente de un engrane 640
  - 14.10.1 Factor de aplicación 643
  - 14.10.2 Factor de tamaño 644
  - 14.10.3 Factor de distribución de carga 644
  - 14.10.4 Factor dinámico 644
- 14.11 Esfuerzos de contacto en engranes 646
- 14.12 Espesor de la película elastohidrodinámica 648
- 14.13 Engranes helicoidales 650
  - 14.13.1 Relaciones de engranes helicoidales 651
  - 14.13.2 Pasos de engranes helicoidales 651
  - 14.13.3 Número equivalente de dientes y ángulo de presión 652

- 14.13.4 Proporciones de los dientes helicoidales 652
  - 14.13.5 Cargas y esfuerzos 653
  - 14.14 Resumen 656
- Capítulo 15**
- SUJETADORES Y TOMILLOS DE POTENCIA 665**
- 15.1 Introducción 667
  - 15.2 Terminología, clasificación y designación de la rosca 667
  - 15.3 Tomillos de potencia 670
    - 15.3.1 Fuerzas y par de torsión 672
    - 15.3.2 Potencia y eficiencia 675
    - 15.3.3 Tomillos de autobloqueo 677
  - 15.4 Sujetadores roscados 679
    - 15.4.1 Tipos de sujetadores roscados 679
    - 15.4.2 Análisis de carga de pernos y tuercas 680
    - 15.4.3 Parámetros de rigidez 681
    - 15.4.4 Resistencia 686
    - 15.4.5 Perno precargado: carga estática 688
    - 15.4.6 Perno precargado: carga dinámica 691
    - 15.4.7 Juntas de empaquetadura 693
  - 15.5 Sujetadores remachados 694
  - 15.6 Juntas soldadas 701
    - 15.6.1 Carga paralela y transversal 702
    - 15.6.2 Carga de torsión 702
    - 15.6.3 Flexión 704
    - 15.6.4 Resistencia de la soldadura 705
    - 15.6.5 Resistencia a la fatiga de las soldaduras 708
  - 15.7 Uniones adhesivas 709
  - 15.8 Sujetadores de presión integrados 713
  - 15.9 Resumen 719

## Capítulo 16

### RESORTES 735

- 16.1 Introducción 737
- 16.2 Materiales de los resortes 737
- 16.3 Resortes helicoidales de compresión 741
  - 16.3.1 Esfuerzo cortante de torsión 742
  - 16.3.2 Esfuerzo cortante transversal 742
  - 16.3.3 Esfuerzos de torsión combinado y de cortante transversal 742
  - 16.3.4 Deflexión 744
  - 16.3.5 Condiciones de los extremos y longitudes del resorte 745
  - 16.3.6 Alabeo y oscilación 748
  - 16.3.7 Carga cíclica 751

- 16.4 Resortes helicoidales de extensión 755
- 16.5 Resortes helicoidales de torsión 760
- 16.6 Resortes de hojas 765
- 16.7 Resortes Belleville 768
- 16.8 Resumen 772

## Capítulo 17

### FRENOS Y EMBRAGUES 781

- 17.1 Introducción 782
- 17.2 Embragues de disco de empuje 784
  - 17.2.1 Modelo de presión uniforme 784
  - 17.2.2 Modelo de desgaste uniforme 785
- 17.3 Embragues cónicos 788
  - 17.3.1 Modelo de presión uniforme 789
  - 17.3.2 Modelo de desgaste uniforme 790
- 17.4 Frenos de bloque o de zapata corta 791
- 17.5 Frenos de tambor de zapata larga, internos y de expansión 794
  - 17.5.1 Zapata autoenergizante 796
  - 17.5.2 Zapata desenergizante 797
- 17.6 Frenos de tambor de zapata larga, externos y de contracción 801
- 17.7 Frenos de zapata con pivote cargados simétricamente 803
- 17.8 Frenos de banda 807
- 17.9 Embragues deslizantes 810
- 17.10 Consideraciones de temperatura 810
- 17.11 Resumen 814

## Capítulo 18

### ELEMENTOS FLEXIBLES DE MÁQUINAS 826

- 18.1 Introducción 827
- 18.2 Bandas planas 828
  - 18.2.1 Longitud de la banda 828
  - 18.2.2 Fuerzas en la banda 829
  - 18.2.3 Deslizamiento 832
- 18.3 Bandas sincrónicas 832
- 18.4 Bandas en V 833
  - 18.4.1 Potencia nominal normal de entrada 835
  - 18.4.2 Tamaño de la banda impulsora 836
  - 18.4.3 Factor de corrección de arco 836
  - 18.4.4 Potencia nominal de diseño y distancia central 837
- 18.5 Cables metálicos 841
  - 18.5.1 Esfuerzo de tensión 842
  - 18.5.2 Esfuerzo flexionante 844
  - 18.5.3 Presión de aplastamiento 845
  - 18.5.4 Fatiga 846
- 18.6 Cadenas de rodillos 849
  - 18.6.1 Operación de cadenas de rodillos 849

- 18.6.2 Cinemática 850
- 18.6.3 Incremento de la cuerda 851
- 18.6.4 Longitud de la cadena 851
- 18.6.5 Potencia nominal 852
- 18.6.6 Selección del tamaño de la rueda catarina y de la distancia central 854
- 18.7 Resumen 858

## Capítulo 19

### PROYECTOS DE DISEÑO 867

- 19.1 Introducción 869
- 19.2 Diseño de una mezcladora vertical 869
  - 19.2.1 Cinemática de los engranes del agitador 871
  - 19.2.2 Sistema de transmisión de potencia 873
  - 19.2.3 Notas adicionales 874
- 19.3 Sistema de frenos de una montaña rusa 874
  - 19.3.1 Interacción del frotador del freno y la aleta 875
  - 19.3.2 Sistema de accionamiento de freno 877
  - 19.3.3 Pernos de montaje del cilindro 880
- 19.4 Dimensionamiento de los frenos de un automóvil 881
  - 19.4.1 Fuerza de desaceleración y de frenado 882
  - 19.4.2 Dimensiones de los frenos 885

- 19.4.3 Autobloqueo 888
- 19.5 Resumen 888

### Apéndice A

#### PROPIEDADES DE LOS MATERIALES 899

### Apéndice B

#### RELACIONES ESFUERZO-DEFORMACIÓN UNITARIA 904

- B.1 Leyes de la transformación de esfuerzos 904
- B.2 Leyes de la transformación de la deformación unitaria 906
- B.3 Ley de Hooke generalizada 906
- B.4 Importancia física de las constantes de los materiales elásticos 915
- B.5 Ecuaciones esfuerzo-deformación unitaria en términos del módulo de elasticidad y de la razón de Poisson 918
- B.6 Resumen 921

### índice 923