

MECÁNICA VECTORIAL PARA INGENIEROS **ESTÁTICA**

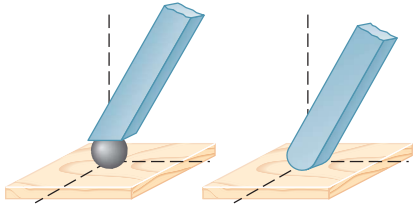
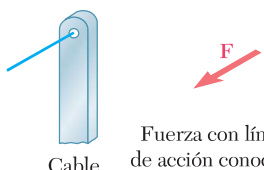
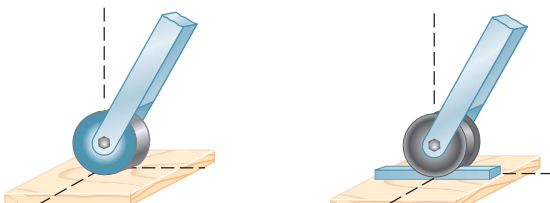
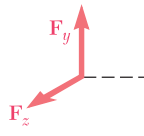
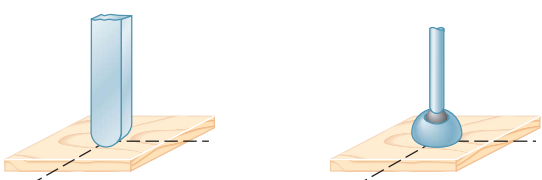
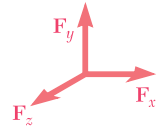
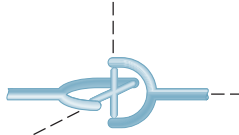
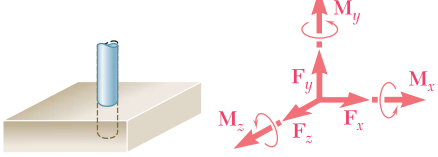
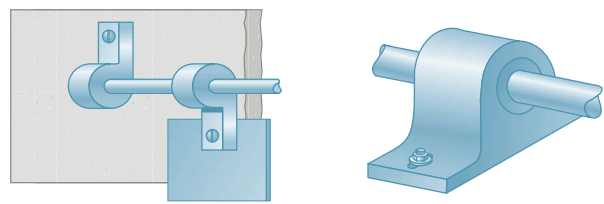
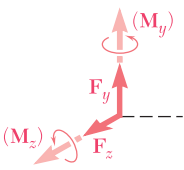
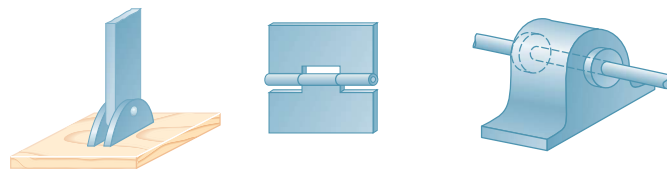
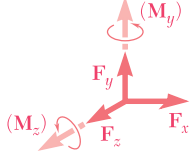
BEER | JOHNSTON | MAZUREK | EISENBERG
NOVENA EDICIÓN



**Mc
Graw
Hill**

www.geocienciasvirtual.blogspot.com.co

Reacciones en los soportes y conexiones para una estructura tridimensional

 Bola Superficie sin fricción Fuerza con línea de acción conocida (una incógnita)	 Cable Fuerza con línea de acción conocida (una incógnita)
 Rodillo sobre superficie rugosa Rueda sobre riel	 Dos componentes de fuerza
 Superficie rugosa Rótula (bola y cuenca)	 Tres componentes de fuerza
 Junta o unión universal Tres componentes de fuerza y un par	 Apoyo fijo Tres componentes de fuerza y tres pares
 Bisagra y cojinete que soportan sólo carga radial	 Dos componentes de fuerza (y dos pares; véase la página 192)
 Pasador y ménsula Bisagra y cojinete que soportan empuje axial y carga radial	 Dos componentes de fuerza (y dos pares; véase la página 192)

MECÁNICA VECTORIAL PARA INGENIEROS

Estática

REVISIÓN TÉCNICA

ARGENTINA

Ricardo Bosco

Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires

COLOMBIA

Carlos Eduardo Muñoz Rodríguez
Jaime Guillermo Guerrero Casadiego
Rubén Darío Arboleda Vélez
Wilson Rodríguez Calderón

Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá
Universidad Nacional de Colombia
Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín
Universidad de la Salle, Bogotá

MÉXICO

Antonio Rubén Benítez Gasca
Carlos Mellado Osuna

Universidad Veracruzana
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey,
campus La Marina

Constantino Anaya Hill
Danelia Hernández Suárez

Instituto Tecnológico de Culiacán
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey,
campus Ciudad Obregón

Eduardo Soberanes Lugo
Francisco Terán Arévalo
Gerardo Gaytán Guerra
Gladys Karina Ruiz Vargas
Ignacio Ramírez Vargas
José Antonio Corona López
José Luis Carranza Santana

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, campus Sinaloa
Instituto Tecnológico Regional de Chihuahua
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, campus Toluca
Universidad Anáhuac, campus Norte
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, campus Hidalgo
Instituto Tecnológico de Veracruz
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,
Instituto Politécnico Nacional

Juan Abugaber Francis

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,
Instituto Politécnico Nacional

Juan Ocariz Castelazo
Klara Goiz Hernández
Luis Adolfo Torres González
Martín Darío Castillo Sánchez

Universidad Nacional Autónoma de México
Universidad Autónoma de Sinaloa
Universidad Iberoamericana, campus León
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,
Instituto Politécnico Nacional

Raúl Escalante Rosas
Raúl Soto López
Roberto Carlos Tinoco Guevara

Universidad Nacional Autónoma de México
Universidad de Occidente, campus Culiacán
Universidad Iberoamericana, campus Ciudad de México

Novena edición
**MECÁNICA VECTORIAL
PARA INGENIEROS**

Estática

FERDINAND P. BEER (finado)

Late of Lehigh University

E. RUSSELL JOHNSTON, JR.

University of Connecticut

DAVID F. MAZUREK

U.S. Coast Guard Academy

ELLIOT R. EISENBERG

The Pennsylvania State University

Revisión técnica:

Javier León Cárdenas

Universidad La Salle, campus Ciudad de México

Felipe de Jesús Hidalgo Cavazos

*Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey
campus Monterrey*



MÉXICO • BOGOTÁ • BUENOS AIRES • CARACAS • GUATEMALA
MADRID • NUEVA YORK • SAN JUAN • SANTIAGO • SÃO PAULO
AUCKLAND • LONDRES • MILÁN • MONTREAL • NUEVA DELHI
SAN FRANCISCO • SINGAPUR • SAN LUIS • SIDNEY • TORONTO

www.geocienciasvirtual.blogspot.com.co

Director Higher Education: Miguel Ángel Toledo Castellanos

Editor sponsor: Pablo Eduardo Roig Vázquez

Coordinadora editorial: Marcela I. Rocha M.

Editor de desarrollo: Edmundo Carlos Zúñiga Gutiérrez

Supervisor de producción: Zeferino García García

Traducción: Jesús Elmer Murrieta Murrieta

MECÁNICA VECTORIAL PARA INGENIEROS ESTÁTICA

Novena edición

Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra,
por cualquier medio, sin la autorización escrita del editor.



DERECHOS RESERVADOS © 2010, respecto a la novena edición en español por
McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.

A Subsidiary of The McGraw-Hill Companies, Inc.

Corporativo Punta Santa Fe

Prolongación Paseo de la Reforma 1015, Torre A

Piso 17, Colonia Desarrollo Santa Fe

Delegación Álvaro Obregón

C.P. 01376, México, D.F.

Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana, Reg. Núm. 736

La sección de créditos de este libro comienza en la página 603 y es considerada como una extensión de la página legal.

ISBN-13: 978-607-15-0277-3

(ISBN: 970-10-6103-9 edición anterior)

Traducido de la novena edición de Vector mechanics for engineers. Statics, ninth edition.

Copyright © 2010 by The McGraw-Hill Companies, Inc. All rights reserved.

ISBN: 0-07-352923-0

1234567890

109876543210

Impreso en México

Printed in Mexico

Acerca de los autores

Los autores de esta obra con frecuencia son cuestionados acerca de cómo fue que, estando uno en Lehigh y otro en la University of Connecticut, empezaron a escribir sus libros juntos y cómo logran seguir colaborando en las revisiones subsecuentes.

La respuesta a estas preguntas es sencilla. Russ Johnston inició su carrera académica en el departamento de ingeniería civil y mecánica de Lehigh University y allí conoció a Ferd Beer, quien había comenzado a trabajar en ese departamento dos años antes y estaba a cargo de los cursos de mecánica.

Ferd se sintió muy complacido al descubrir que el joven contratado para impartir cursos de ingeniería estructural a nivel de posgrado no sólo estaba dispuesto, sino también ansioso por ayudarlo a reorganizar los cursos de mecánica. Ambos creían que dichos cursos deberían impartirse a partir de unos cuantos principios básicos, y que los distintos conceptos involucrados serían mejor comprendidos y recordados por los estudiantes si se les presentaban en forma gráfica. Juntos escribieron apuntes para las clases de estática y dinámica, a los cuales posteriormente agregaron problemas que supusieron resultarían interesantes para los futuros ingenieros, y poco después produjeron el manuscrito de la primera edición de *Mecánica para ingenieros*.

Al publicarse la segunda edición de *Mecánica para ingenieros* y la primera de *Mecánica vectorial para ingenieros*, Russ Johnston estaba en el Worcester Polytechnic Institute y para las ediciones subsecuentes en la University of Connecticut. Mientras tanto, Ferd y Russ habían asumido funciones administrativas en sus respectivos departamentos y se dedicaban a la investigación, la consultoría, y a asesorar estudiantes de posgrado —Ferd en el área de procesos estocásticos y vibraciones aleatorias y Russ en la de estabilidad elástica y en diseño y análisis estructurales—. Sin embargo, su interés por mejorar la enseñanza de los cursos básicos de mecánica no había disminuido y continuaron impartiendo los mientras revisaban sus libros y comenzaban a escribir el manuscrito de la primera edición de *Mecánica de materiales*.

La colaboración entre estos dos autores ha abarcado muchos años y muchas revisiones exitosas de todos sus libros, y las contribuciones de Ferd y Russ a la educación en ingeniería los han hecho acreedores de numerosas distinciones y reconocimientos. Recibieron el Western Electric Fund Award por parte de sus respectivas secciones regionales de la American Society for Engineering Education por su excelencia en la instrucción de estudiantes de ingeniería y, además, el Distinguished Educator Award de la división de mecánica de esa misma asociación. A partir de 2001, el reconocimiento denominado New Mechanics Educator Award de la división de mecánica ha sido nombrado Beer and Johnston en honor a estos autores.

Ferdinand P. Beer. Nacido en Francia y educado en Francia y Suiza, obtuvo una maestría en La Sorbona y un doctorado en ciencias en el área de mecánica teórica en la Universidad de Ginebra. Emigró a Estados Unidos después de servir en el ejército francés durante la primera parte de la Segunda Guerra Mundial, e impartió clases por cuatro años en el Williams College en el programa conjunto de ingeniería y artes Williams-MIT. Después de su servicio en el Williams College, Ferd ingresó al profesorado de Lehigh University donde enseñó durante 37 años. Ocupó varios puestos, incluyendo el de profesor distinguido de la universidad y director del departamento de mecánica e ingeniería mecánica. En 1995 recibió un grado honorario de Doctor en Ingeniería por la Lehigh University.

E. Russell Johnston, Jr. Nacido en Filadelfia, Russ posee un título de ingeniero civil de la University of Delaware y un doctorado en ciencias en el área de ingeniería estructural del Massachusetts Institute of Technology. Impartió clases en Lehigh University y en Worcester Polytechnic Institute antes de ingresar al profesorado de la University of Connecticut, donde ocupó el puesto de director del departamento de ingeniería civil y enseñó durante 26 años. En 1991 recibió el Outstanding Civil Engineer Award, sección Connecticut, que otorga la American Society of Civil Engineers.

David F. Mazurek. Posee una licenciatura en ingeniería oceánica y una maestría en ingeniería civil del Florida Institute of Technology, además de un doctorado en ingeniería civil de la University of Connecticut. Fue empleado por la Electric Boat Division of General Dynamics Corporation e impartió clases en Lafayette College antes de pertenecer a la U. S. Coast Guard Academy, en donde ha estado desde 1990. Ha prestado sus servicios en American Railway Engineering y Maintenance of Way Association's Committee 15—Steel Structures durante los últimos 14 años. Su interés profesional incluye la ingeniería de puentes, torres esbeltas, ciencia forense estructural y diseño resistente a explosiones.

Elliot R. Eisenberg. Posee una licenciatura y una maestría en ingeniería, ambas de la Cornell University. Elliot ha enfocado sus actividades en el servicio profesional y la enseñanza; en 1992 su trabajo fue reconocido por la American Society of Mechanical Engineers al distinguirlo con la medalla Ben C. Sparks por sus contribuciones a la ingeniería mecánica y a la educación en tecnología de la ingeniería mecánica, así como por sus servicios en la American Society for Engineering Education. Elliot impartió clases durante 32 años, incluyendo 29 en Penn State donde se le han otorgado premios por enseñanza y asesoría.

Contenido

Prefacio xiv

Lista de símbolos xxi

1

INTRODUCCIÓN

1

- 1.1 ¿Qué es la mecánica 2
- 1.2 Conceptos y principios fundamentales 2
- 1.3 Sistemas de unidades 5
- 1.4 Conversión de un sistema de unidades a otro 10
- 1.5 Método para la solución de problemas 11
- 1.6 Exactitud numérica 13

2

ESTÁTICA DE PARTÍCULAS

15

- 2.1 Introducción 16
 - Fuerzas en un plano** 16
- 2.2 Fuerza sobre una partícula. Resultante de dos fuerzas 16
- 2.3 Vectores 17
- 2.4 Adición o suma de vectores 18
- 2.5 Resultante de varias fuerzas concurrentes 20
- 2.6 Descomposición de una fuerza en sus componentes 21
- 2.7 Componentes rectangulares de una fuerza. Vectores unitarios 27
- 2.8 Adición de fuerzas sumando sus componentes x y y 30
- 2.9 Equilibrio de una partícula 35
- 2.10 Primera ley del movimiento de Newton 36
- 2.11 Problemas relacionados con el equilibrio de una partícula.
Diagramas de cuerpo libre 36
 - Fuerzas en el espacio** 45
- 2.12 Componentes rectangulares de una fuerza en el espacio 45
- 2.13 Fuerza definida en términos de su magnitud y dos puntos sobre su
línea de acción 48

2.14	Adición de fuerzas concurrentes en el espacio	49
2.15	Equilibrio de una partícula en el espacio	57
Repaso y resumen del capítulo 2		64
Problemas de repaso		67
Problemas de computadora		70

3

CUERPOS RÍGIDOS: SISTEMAS EQUIVALENTES DE FUERZA

73

3.1	Introducción	74
3.2	Fuerzas externas e internas	74
3.3	Principio de transmisibilidad. Fuerzas equivalentes	75
3.4	Producto vectorial de dos vectores	77
3.5	Productos vectoriales expresados en términos de componentes rectangulares	79
3.6	Momento de una fuerza con respecto a un punto	81
3.7	Teorema de Varignon	83
3.8	Componentes rectangulares del momento de una fuerza	83
3.9	Producto escalar de dos vectores	93
3.10	Producto triple mixto de tres vectores	95
3.11	Momento de una fuerza con respecto a un eje dado	97
3.12	Momento de un par	107
3.13	Pares equivalentes	108
3.14	Adición o suma de pares	110
3.15	Los pares pueden representarse por medio de vectores	110
3.16	Descomposición de una fuerza dada en una fuerza en O y un par	111
3.17	Reducción de un sistema de fuerzas a una fuerza y un par	122
3.18	Sistemas equivalentes de fuerzas	123
3.19	Sistemas equipolentes de vectores	124
3.20	Otras reducciones de un sistema de fuerzas	124
*3.21	Reducción de un sistema de fuerzas a una llave de torsión o torsor	127
Repaso y resumen del capítulo 3		146
Problemas de repaso		151
Problemas de computadora		154

4

EQUILIBRIO DE CUERPOS RÍGIDOS

157

4.1	Introducción	158
4.2	Diagrama de cuerpo libre	159
Equilibrio en dos dimensiones		160
4.3	Reacciones en los puntos de apoyo y conexiones de una estructura bidimensional	160
4.4	Equilibrio de un cuerpo rígido en dos dimensiones	162
4.5	Reacciones estáticamente indeterminadas. Restricciones parciales	163
4.6	Equilibrio de un cuerpo sujeto a dos fuerzas	182
4.7	Equilibrio de un cuerpo sujeto a tres fuerzas	183
Equilibrio en tres dimensiones		190
4.8	Equilibrio de un cuerpo rígido en tres dimensiones	190

4.9	Reacciones en puntos de apoyo y conexiones para una estructura tridimensional	190
-----	---	-----

Repaso y resumen del capítulo 4	211
Problemas de repaso	213
Problemas de computadora	216

5

FUERZAS DISTRIBUIDAS : CENTROIDES Y CENTROS DE GRAVEDAD

219

5.1	Introducción	220	
	Áreas y líneas	220	
5.2	Centro de gravedad de un cuerpo bidimensional	220	
5.3	Centroides de áreas y líneas	222	
5.4	Primeros momentos de áreas y líneas	223	
5.5	Placas y alambres compuestos	226	
5.6	Determinación de centroides por integración	236	
5.7	Teoremas de Pappus-Guldinus	238	
*5.8	Cargas distribuidas en vigas	248	
*5.9	Fuerzas sobre superficies sumergidas	249	
	Volúmenes	259	
5.10	Centro de gravedad de un cuerpo tridimensional.		
	Centroide de un volumen	259	
5.11	Cuerpos compuestos	262	
5.12	Determinación de centroides de volúmenes por integración		262
	Repaso y resumen del capítulo 5	274	
	Problemas de repaso	278	
	Problemas de computadora	281	

6

ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS

285

6.1	Introducción	286	
	Armaduras	287	
6.2	Definición de una armadura	287	
6.3	Armaduras simples	289	
6.4	Análisis de armaduras mediante el método de los nodos		290
*6.5	Nodos bajo condiciones especiales de carga	292	
*6.6	Armaduras en el espacio o espaciales	294	
6.7	Análisis de armaduras por el método de secciones		304
*6.8	Armaduras formadas por varias armaduras simples		305
	Armazones y máquinas	316	
6.9	Estructuras que contienen elementos sujetos a fuerzas múltiples	316	
6.10	Análisis de un armazón	316	
6.11	Armazones que dejan de ser rígidos cuando se separan de sus soportes	317	
6.12	Máquinas	332	
	Repaso y resumen del capítulo 6	345	
	Problemas de repaso	348	
	Problemas de computadora	350	

7 FUERZAS EN VIGAS Y CABLES 353

*7.1	Introducción	354
*7.2	Fuerzas internas en elementos	354
	Vigas	362
*7.3	Diferentes tipos de cargas y apoyos	362
*7.4	Fuerza cortante y momento flector en una viga	363
*7.5	Diagramas de fuerza cortante y de momento flector	365
*7.6	Relaciones entre carga, fuerza cortante y momento flector	373
	Cables	383
*7.7	Cables con cargas concentradas	383
*7.8	Cables con cargas distribuidas	384
*7.9	Cable parabólico	385
*7.10	Catenaria	395
	Repaso y resumen del capítulo 7	403
	Problemas de repaso	406
	Problemas de computadora	408

8 FRICCIÓN 411

8.1	Introducción	412
8.2	Leyes de la fricción seca. Coeficientes de fricción	412
8.3	Ángulos de fricción	415
8.4	Problemas que involucran fricción seca	416
8.5	Cuñas	431
8.6	Tornillos de rosca cuadrada	431
*8.7	Chumaceras. Fricción en ejes	440
*8.8	Cojinetes de empuje. Fricción en discos	442
*8.9	Fricción en ruedas. Resistencia a la rodadura o rodamiento	443
8.10	Fricción en bandas	450
	Repaso y resumen del capítulo 8	461
	Problemas de repaso	464
	Problemas de computadora	467

9 FUERZAS DISTRIBUIDAS: MOMENTOS DE INERCIA 471

9.1	Introducción	472
	Momentos de inercia de áreas	473
9.2	Segundo momento, o momento de inercia, de un área	473
9.3	Determinación del momento de inercia de un área por integración	474
9.4	Momento polar de inercia	475
9.5	Radio de giro de un área	476
9.6	Teorema de los ejes paralelos o teorema de Steiner	483
9.7	Momentos de inercia de áreas compuestas	484
*9.8	Producto de inercia	497
*9.9	Ejes principales y momentos principales de inercia	498
*9.10	Círculo de Mohr para momentos y productos de inercia	506

	Momentos de inercia de masas	512
9.11	Momento de inercia de una masa	512
9.12	Teorema de los ejes paralelos	514
9.13	Momentos de inercia de placas delgadas	515
9.14	Determinación del momento de inercia de un cuerpo tridimensional por integración	516
9.15	Momentos de inercia de cuerpos compuestos	516
*9.16	Momento de inercia de un cuerpo con respecto a un eje arbitrario que pasa por el punto O . Productos de inercia de masa	531
*9.17	Elipsoide de inercia. Ejes principales de inercia	532
*9.18	Determinación de los ejes y los momentos principales de inercia de un cuerpo de forma arbitraria	534
	Repaso y resumen del capítulo 9	545
	Problemas de repaso	551
	Problemas de computadora	554

10

MÉTODO DEL TRABAJO VIRTUAL

		557
*10.1	Introducción	558
*10.2	Trabajo de una fuerza	558
*10.3	Principio del trabajo virtual	561
*10.4	Aplicaciones del principio del trabajo virtual	562
*10.5	Máquinas reales. Eficiencia mecánica	564
*10.6	Trabajo de una fuerza durante un desplazamiento finito	578
*10.7	Energía potencial	580
*10.8	Energía potencial y equilibrio	581
*10.9	Estabilidad del equilibrio	582
	Repaso y resumen del capítulo 10	592
	Problemas de repaso	595
	Problemas de computadora	598

Apéndice

FUNDAMENTOS PARA LA CERTIFICACIÓN EN INGENIERÍA EN ESTADOS UNIDOS

		601
	Créditos de las fotografías	603
	Índice analítico	605
	Respuestas a problemas	615

Prefacio

OBJETIVOS

El objetivo principal de un primer curso de mecánica debe ser desarrollar en el estudiante de ingeniería la capacidad de analizar cualquier problema en forma lógica y sencilla, y la de aplicar para su solución unos cuantos principios básicos perfectamente comprendidos. Se espera que este texto, diseñado para un primer curso de estática, así como el libro complementario, *Mecánica vectorial para ingenieros: Dinámica*, permitirán que el profesor alcance este objetivo.

ENFOQUE GENERAL

En la parte inicial del texto se introduce el análisis vectorial, el cual se utiliza en la presentación y exposición de los principios fundamentales de la mecánica. Los métodos vectoriales se usan también para resolver diversos problemas, especialmente en tres dimensiones, donde estas técnicas permiten obtener la solución de un modo más conciso y simple. Sin embargo, el énfasis del libro se mantiene en el correcto aprendizaje de los principios de la mecánica y su aplicación para resolver problemas de ingeniería, por lo que el análisis vectorial se presenta, primordialmente, como una herramienta práctica.

Se introducen aplicaciones prácticas desde una etapa inicial. Una de las características del enfoque usado en estos tomos es que la mecánica de *partículas* se ha separado en forma clara de la mecánica de *cuerpos rígidos*. Este enfoque hace posible considerar aplicaciones prácticas simples en una etapa inicial y posponer la introducción de los conceptos más avanzados. Por ejemplo:

- En *Estática*, la estática de partículas se estudia primero (capítulo 2), después de haber presentado las reglas para la suma y resta de vectores, y el principio de equilibrio de una partícula se aplica inmediatamente a situaciones prácticas que involucran sólo fuerzas concurrentes. La estática de cuerpos rígidos se considera en los capítulos 3 y 4. En el capítulo 3 se introducen los productos escalar y vectorial de dos vectores y se utilizan para definir el momento de una fuerza con respecto a un punto y a un eje. La

presentación de estos nuevos conceptos es seguida por la exposición rigurosa y completa de los sistemas de fuerzas equivalentes que conducen, en el capítulo 4, a muchas aplicaciones prácticas que involucran el equilibrio de cuerpos rígidos bajo la acción de sistemas generales de fuerzas.

- En *Dinámica* se observa la misma división. Se introducen los conceptos básicos de fuerza, masa y aceleración, de trabajo y energía, y de impulso y momentum, y se aplican en primera instancia a la resolución de problemas que sólo involucran partículas. De esta forma, los estudiantes pueden familiarizarse por sí mismos con los tres métodos básicos utilizados en dinámica, y aprender sus respectivas ventajas antes de enfrentar las dificultades asociadas con el movimiento de cuerpos rígidos.

Los conceptos nuevos se presentan en términos simples.

Como este texto está diseñado para un primer curso sobre estática, los conceptos nuevos se presentan en términos simples y cada paso se explica en forma detallada. Por otro lado, este enfoque alcanza una madurez definitiva al analizar los aspectos más relevantes de los problemas considerados, y al ampliar los métodos de aplicabilidad general. Por ejemplo, los conceptos de restricciones parciales y de indeterminación estática se introducen al principio del texto para ser usados en todo el libro.

Los principios fundamentales se ubican en el contexto de aplicaciones simples. Se enfatiza el hecho de que la mecánica es, esencialmente, una ciencia *deductiva* que se basa en algunos principios fundamentales. Las derivaciones se presentan siguiendo su secuencia lógica y con todo el rigor requerido a este nivel. Sin embargo, en virtud de que el proceso de aprendizaje es primordialmente *inductivo*, las aplicaciones más simples se consideran primero. Por ejemplo:

- La estática de partículas antecede a la estática de cuerpos rígidos, y los problemas que involucran fuerzas internas se posponen hasta el capítulo 6.
- En el capítulo 4 se consideran primero los problemas de equilibrio que involucran sólo a fuerzas coplanares, y se resuelven por medio del álgebra ordinaria, mientras que los problemas que involucran fuerzas tridimensionales, los cuales requieren el uso completo del álgebra vectorial, se exponen en la segunda parte de dicho capítulo.

Se emplean diagramas de cuerpo libre para resolver problemas de equilibrio y expresar la equivalencia de sistemas de fuerzas. Los diagramas de cuerpo libre se introducen al principio y se enfatiza su importancia a lo largo de todo el texto. No sólo se emplean para resolver problemas de equilibrio sino también para expresar la equivalencia de dos sistemas de fuerzas o, de modo más general, de dos sistemas de vectores. La ventaja de este enfoque se vuelve evidente en el estudio de la dinámica de cuerpos rígidos, donde se utiliza para resolver problemas tridimensionales y bidimensionales. Se pudo lograr una comprensión más intuitiva y completa de los princi-

pios fundamentales de la dinámica al poner mayor énfasis en las “ecuaciones de diagramas de cuerpo libre” en lugar de en las ecuaciones algebraicas estándar de movimiento. Este enfoque, introducido en 1962 en la primera edición de *Mecánica vectorial para ingenieros*, ha obtenido hasta la fecha una amplia aceptación entre los profesores de mecánica en Estados Unidos. Por tanto, para la resolución de todos los problemas resueltos de este libro, se prefiere su utilización en lugar del método de equilibrio dinámico y de las ecuaciones de movimiento.

Se utilizan presentaciones en distintos tonos para distinguir los vectores. El color se ha usado no sólo para mejorar la calidad de las ilustraciones, sino también para ayudar a los estudiantes a distinguir entre los diversos tipos de vectores que pueden encontrar. En virtud de que no había intención de establecer un código de color para el texto, en un capítulo dado se utiliza el mismo color para representar el mismo tipo de vector. Por ejemplo, a lo largo del tomo de *Estática*, el rojo se utiliza en forma exclusiva para representar fuerzas y pares, mientras que los vectores de posición se muestran en azul y las dimensiones en negro. Esto vuelve más fácil para los estudiantes identificar las fuerzas que actúan sobre una partícula o cuerpo rígido dados y comprender los problemas resueltos y otros ejemplos proporcionados en el libro.

Se mantiene, en forma consistente, un cuidadoso balance entre las unidades SI y unidades de uso común en Estados Unidos. Debido a la tendencia que existe en la actualidad en el gobierno y la industria estadounidenses de adoptar el Sistema Internacional de Unidades (unidades métricas SI), las unidades SI que se usan con mayor frecuencia en mecánica se introducen en el capítulo 1 y se emplean en todo el libro. Aproximadamente la mitad de los problemas resueltos y 60 por ciento de los problemas de tarea están planteados en este sistema de unidades, mientras que el resto se proporciona en las unidades de uso común en Estados Unidos. Los autores creen que este enfoque es el que se adecuará mejor a las necesidades de los estudiantes, quienes, como ingenieros, tendrán que dominar los dos sistemas de unidades.

También se debe reconocer que el uso de ambos sistemas de unidades significa más que aplicar factores de conversión. Como el sistema de unidades SI es absoluto basado en el tiempo, la longitud y la masa, mientras que el sistema inglés es un sistema gravitacional basado en el tiempo, la longitud y la fuerza, se requieren diferentes enfoques para la solución de muchos problemas. Por ejemplo, cuando se usan las unidades SI, por lo general, un cuerpo se especifica mediante su masa expresada en kilogramos; en la mayor parte de los problemas de estática será necesario determinar el peso del cuerpo en newtons, para lo cual se requiere un cálculo adicional. Por otro lado, cuando se aplican las unidades de uso común en Estados Unidos, un cuerpo se especifica mediante su peso en libras y, en problemas de dinámica, se requerirá un cálculo adicional para determinar su masa en slugs (o $\text{lb} \cdot \text{s}^2/\text{ft}$). Por tanto, los autores creen que los problemas que se les asignen a los estudiantes deben incluir ambos sistemas de unidades.

En las secciones opcionales se tratan temas avanzados o especializados. En el libro se incluye un gran número de secciones opcionales identificadas mediante asteriscos y, por tanto, se distinguen fácilmente de aquellas que constituyen la parte fundamental de un curso básico de estática. Estas secciones pueden omitirse sin perjudicar la comprensión del resto del texto.

Entre los temas cubiertos en las secciones adicionales se encuentran la reducción de un sistema de fuerzas a una llave de torsión, aplicaciones a hidrostática, diagramas de fuerza cortante y momento flector, equilibrio de cables, productos de inercia y círculo de Mohr, la determinación de los ejes principales y momentos de inercia de un cuerpo en forma arbitraria, y el método del trabajo virtual. Las secciones sobre vigas son especialmente útiles cuando el curso de estática es seguido inmediatamente por un curso de mecánica de materiales, mientras que las partes que tratan acerca de las propiedades de inercia de cuerpos tridimensionales fueron pensadas primordialmente para los estudiantes que después estudiarán, en dinámica, el movimiento tridimensional de cuerpos rígidos.

El material presentado en el libro y la mayor parte de los problemas no requieren conocimiento matemático previo superior al álgebra, la trigonometría y el cálculo elemental; todos los conocimientos de álgebra elemental necesarios para comprender el texto se presentan con detalle en los capítulos 2 y 3. En general, se pone mayor énfasis en la comprensión adecuada de los conceptos matemáticos básicos incluidos que en la manipulación de fórmulas matemáticas. Al respecto, se debe mencionar que la determinación de los centroides de áreas compuestas precede al cálculo de centroides por integración, lo cual posibilita establecer firmemente el concepto de momento de un área antes de introducir el uso de integrales.

ORGANIZACIÓN DE LOS CAPÍTULOS Y CARACTERÍSTICAS PEDAGÓGICAS

Introducción del capítulo. Cada capítulo comienza con una introducción que establece el propósito y los objetivos del mismo, y en donde se describe en términos sencillos el material que será cubierto y sus aplicaciones en la resolución de problemas de ingeniería. Los lineamientos del capítulo proporcionan a los estudiantes una visión previa de los tópicos que éste incluye.

Lecciones en el capítulo. El cuerpo del texto está dividido en unidades, cada una de las cuales consiste en una o más secciones de teoría, uno o varios problemas resueltos, y una gran cantidad de problemas de tarea. Cada unidad corresponde a un tema bien definido que, por lo general, puede ser cubierto en una lección. Sin embargo, en ciertos casos el profesor encontrará que es deseable dedicar más de una lección a un tópico en particular.

Problemas resueltos. Los problemas resueltos se plantean de manera muy similar a la que usarán los estudiantes cuando resuelvan los problemas que se les asignen. Por tanto, estos problemas cumplen el doble propósito de ampliar el texto y demostrar la forma de traba-

jo clara y ordenada que los estudiantes deben cultivar en sus propias soluciones.

Resolución de problemas en forma independiente. Entre los problemas resueltos y los de tarea, para cada lección se incluye una sección titulada *Resolución de problemas en forma independiente*. El propósito de estas secciones es ayudar a los estudiantes a organizar mentalmente la teoría ya cubierta en el texto y los métodos de resolución de los problemas resueltos, de manera que puedan resolver con mayor éxito los problemas de tarea. Además, en estas secciones también se incluyen sugerencias y estrategias específicas que les permitirán enfrentar de manera más eficiente cualquier problema que se les asigne.

Serie de problemas de tarea. La mayoría de los problemas son de naturaleza práctica y deben llamar la atención del estudiante de ingeniería. Sin embargo, están diseñados para ilustrar el material presentado en el texto y para ayudar a los estudiantes a comprender los principios de la mecánica. Los problemas se han agrupado de acuerdo con las partes del material que ilustran y se presentan en orden de dificultad creciente. Los problemas que requieren atención especial están señalados con asteriscos. Al final del texto se proporcionan las respuestas correspondientes a 70 por ciento de los problemas propuestos; y aquellos para los cuales no se da respuesta se indican en el libro escribiendo su número en cursivas.

Repaso y resumen del capítulo. Cada capítulo finaliza con un repaso y un resumen del material cubierto en el mismo. Las notas al margen se utilizan para ayudar al estudiante a organizar su trabajo de revisión, además se han incluido referencias cruzadas para ayudarlos a encontrar las partes de material que requieren atención especial.

Problemas de repaso. Al final de cada capítulo se incluye un grupo de problemas de repaso. Estos problemas proporcionan a los estudiantes una oportunidad adicional de aplicar los conceptos más importantes presentados en el capítulo.

Problemas de computadora. Cada capítulo incluye un grupo de problemas diseñados para ser resueltos mediante programas de computadora. Muchos de estos problemas son importantes para el proceso de diseño. En estática, por ejemplo, pueden implicar el análisis de una estructura para diferentes configuraciones y cargas o la determinación de las posiciones de equilibrio de un mecanismo que puede requerir un método iterativo de solución. El desarrollo del algoritmo necesario para resolver un problema de mecánica dado beneficiará a los estudiantes en dos formas diferentes: 1) les ayudará a lograr una mejor comprensión de los principios de la mecánica involucrados; 2) les proporcionará la oportunidad de aplicar sus habilidades con la computadora para encontrar la solución de un problema relevante de ingeniería.

MATERIALES DE APOYO

Esta obra cuenta con interesantes complementos que fortalecen los procesos de enseñanza-aprendizaje, así como la evaluación de éstos,

mismos que se otorgan a profesores que adoptan este texto para sus cursos. Para obtener más información y conocer la política de entrega de estos materiales, contacte a su representante McGraw-Hill.

CONEXIÓN CON LA INGENIERÍA DE MCGRAW-HILL

La conexión de McGraw-Hill con la ingeniería (*McGraw-Hill Connect Engineering*) es una plataforma de tareas y evaluación que proporciona a los estudiantes los medios para conectarse de mejor manera con su curso, sus profesores y los conceptos importantes que necesitarán conocer para su éxito en la actualidad y en el futuro. Mediante la Conexión con la Ingeniería, los profesores pueden entregar con facilidad tareas, tests y exámenes en línea. Los estudiantes pueden practicar habilidades importantes a su propio ritmo y de acuerdo con su propio programa.

La Conexión con la Ingeniería de *Mecánica vectorial para ingenieros* está disponible en www.mhhe.com/beerjohnston e incluye problemas algorítmicos del texto, presentaciones en PowerPoint, un banco de imágenes y animaciones.

OPCIONES DE LIBRO ELECTRÓNICO

Los libros electrónicos son una forma innovadora de ahorrarle dinero a los estudiantes y al mismo tiempo crear un medio ambiente más verde. Un libro electrónico puede ahorrarles a los estudiantes cerca de la mitad del costo de un libro de texto tradicional y ofrece características únicas como un poderoso dispositivo de búsqueda, texto resaltado y la capacidad de compartir notas con compañeros de clase que usan libros electrónicos.

McGraw-Hill ofrece dos opciones de libros electrónicos: la compra de un libro descargable de VitalSource o una suscripción al libro de CourseSmart. Para conocer más acerca de las opciones de libros electrónicos, contacte a su distribuidor de McGraw-Hill o visite los sitios en www.vitalsource.com y www.coursesmart.com.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer de manera especial a Amy Mazurek del Williams Memorial Institute que verificó las soluciones y respuestas de todos los problemas de esta edición y después preparó las soluciones del *Manual para el instructor y de soluciones* adicional al texto; Yohannes Ketema de la University of Minnesota; David Oglesby de la University of Missouri-Rolla; y Daniel W. Yannitell de la Louisiana State University.

Es un placer reconocer el trabajo de Dennis Ormond de Fine Line Illustrations por las artísticas ilustraciones que contribuyen en gran medida a la efectividad del texto.

Los autores agradecen a las diferentes compañías que proporcionaron fotografías para esta edición. También desean reconocer el esfuerzo determinado y la paciencia de Sabina Dowell, quien seleccionó las fotografías.

Un agradecimiento también a los miembros de la organización de McGraw-Hill por su apoyo y dedicación durante la preparación de

esta nueva edición. En particular se agradecen las contribuciones del editor responsable Bill Stenquist, la editora de desarrollo Lora Neyens y la gerente de proyecto Sheila Frank.

Por último, los autores desean expresar su gratitud por los numerosos comentarios y sugerencias que han sido proporcionados por los usuarios de las ediciones anteriores de *Mecánica vectorial para ingenieros*.

E. Russell Johnston, Jr.
David F. Mazurek
Elliot R. Eisenberg

Lista de símbolos

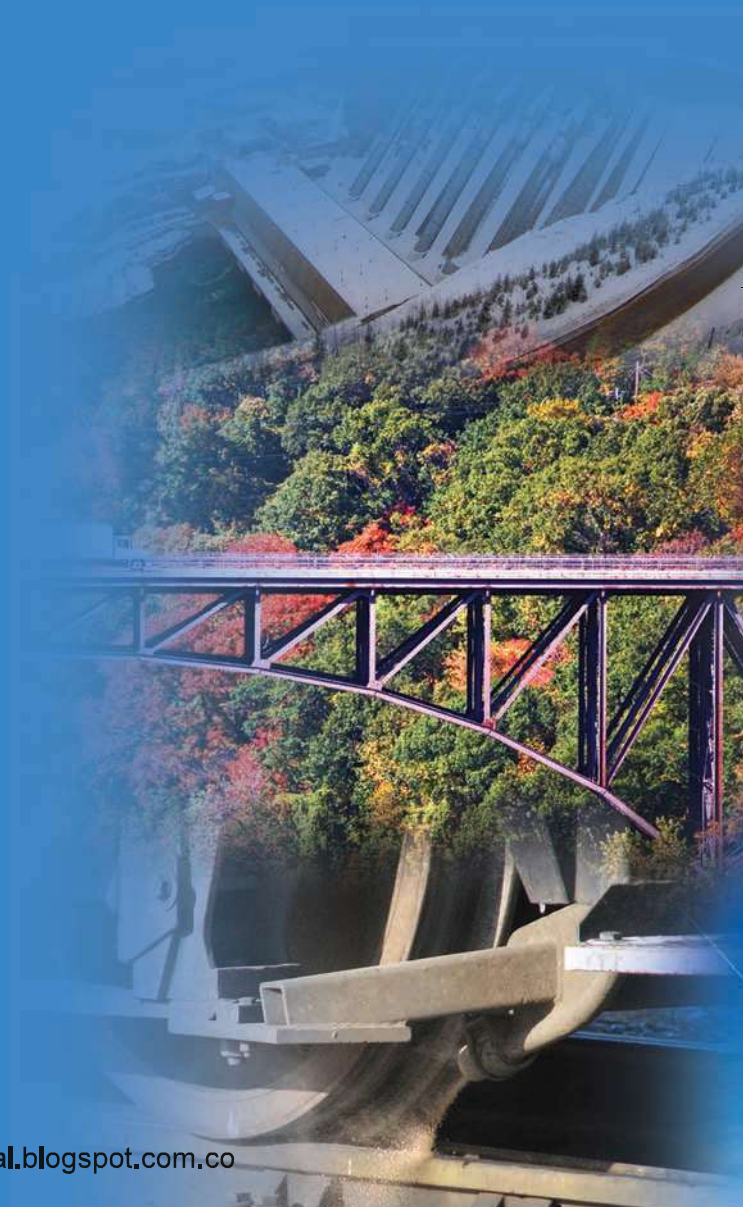
a	Constante; radio; distancia
$A, B, C, \dots$	Reacciones en apoyos y uniones
$A, B, C, \dots$	Puntos
A	Área
b	Ancho; distancia
c	Constante
C	Centroide
d	Distancia
e	Base de logaritmos naturales
F	Fuerza; fuerza de fricción
g	Aceleración de la gravedad
G	Centro de gravedad; constante de gravitación
h	Altura; flecha de un cable
i, j, k	Vectores unitarios a lo largo de los ejes coordenados
$I, I_x, \dots$	Momentos de inercia
$\bar{I}$	Momento de inercia centroidal
$I_{xy}, \dots$	Productos de inercia
J	Momento polar de inercia
k	Constante de un resorte
k_x, k_y, k_O	Radio de giro
$\bar{k}$	Radio de giro centroidal
l	Longitud
L	Longitud; claro
m	Masa
M	Momento par
M_O	Momento con respecto al punto O
M_O^R	Momento resultante con respecto al punto O
M	Magnitud de un par o de un momento;
	masa de la Tierra
M_{OL}	Momento con respecto al eje OL
N	Componente normal de una reacción
O	Origen de coordenadas
p	Presión
P	Fuerza; vector
Q	Fuerza; vector
r	Vector de posición
r	Radio; distancia; coordenada polar
R	Fuerza resultante; vector resultante; reacción

R	Radio de la Tierra
$\mathbf{s}$	Vector de posición
s	Longitud de arco; longitud de un cable
$\mathbf{S}$	Fuerza; vector
t	Espesor
$\mathbf{T}$	Fuerza
T	Tensión
U	Trabajo
$\mathbf{V}$	Producto vectorial; fuerza constante
V	Volumen; energía potencial; cortante
w	Carga por unidad de longitud
$\mathbf{W}, W$	Peso; carga
x, y, z	Coordenadas rectangulares; distancias
$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$	Coordenadas rectangulares del centroide o centro de gravedad
α, β, γ	Ángulos
γ	Peso específico
δ	Elongación
$\delta \mathbf{r}$	Desplazamiento virtual
U	Trabajo virtual
λ	Vector unitario a lo largo de una línea
η	Eficiencia
θ	Coordenada angular; ángulo; coordenada polar
μ	Coeficiente de fricción
ρ	Densidad
ϕ	Ángulo de fricción; ángulo

MECÁNICA VECTORIAL PARA INGENIEROS

Estática

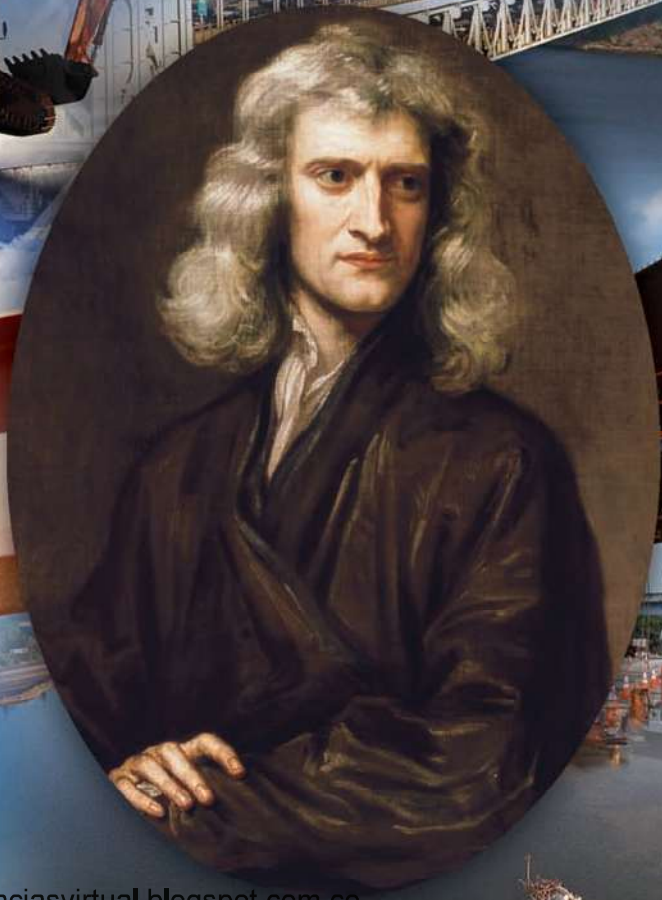
A finales del siglo xvii, Sir Isaac Newton estableció los principios fundamentales de la mecánica, los cuales constituyen la base de gran parte de la ingeniería moderna.



CAPÍTULO

1

Introducción



CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

- 1.1 ¿Qué es la mecánica?
- 1.2 Conceptos y principios fundamentales
- 1.3 Sistemas de unidades
- 1.4 Conversión de un sistema de unidades a otro
- 1.5 Método para la solución de problemas
- 1.6 Exactitud numérica

1.1. ¿QUÉ ES LA MECÁNICA?

La mecánica se puede definir como la ciencia que describe y predice las condiciones de reposo o movimiento de los cuerpos bajo la acción de fuerzas. Se divide en tres partes: la mecánica de *cuerpos rígidos*, la mecánica de *cuerpos deformables* y la mecánica de *fluidos*.

La mecánica de cuerpos rígidos se subdivide en *estática* y *dinámica*; la primera estudia los cuerpos en reposo y la segunda los cuerpos en movimiento. En esta parte del estudio de la mecánica se supone que los cuerpos son perfectamente rígidos. Sin embargo, las estructuras y las máquinas reales nunca lo son y se deforman bajo las cargas a las que están sometidas. Estas deformaciones casi siempre son pequeñas y no afectan de manera apreciable las condiciones de equilibrio o de movimiento de la estructura en consideración. Pero son importantes cuando se tiene en cuenta la resistencia de la estructura a las fallas y se estudian en la mecánica de materiales, que es una parte de la mecánica de cuerpos deformables. La tercera parte de la mecánica, la de fluidos, se subdivide en el estudio de los *fluidos incompresibles* y el de los *fluidos compresibles*. La *hidráulica* es una subdivisión importante en el estudio de los fluidos incompresibles y trata problemas relativos a los líquidos.

La mecánica es una ciencia física puesto que estudia fenómenos físicos. Sin embargo, algunos la asocian con las matemáticas, mientras que otros la consideran un tema de ingeniería. Ambos puntos de vista se justifican parcialmente. La mecánica es la base de la mayoría de las ciencias de la ingeniería y es un requisito indispensable para estudiarlas. Sin embargo, no tiene el carácter *empírico* propio de algunas ciencias de la ingeniería, es decir, no se basa sólo en la experiencia u observación; por su rigor y la importancia que da al razonamiento deductivo se parece a las matemáticas. Pero tampoco es una ciencia *abstracta*, ni siquiera una ciencia *pura*; es una ciencia *aplicada*. Su propósito es explicar y predecir los fenómenos físicos y poner las bases para aplicarlas en ingeniería.

1.2. CONCEPTOS Y PRINCIPIOS FUNDAMENTALES

Aunque el estudio de la mecánica se remonta a los tiempos de Aristóteles (384-322 a.C.) y de Arquímedes (287-212 a.C.), se tuvo que esperar hasta Newton (1642-1727) para encontrar una formulación satisfactoria de sus principios fundamentales, los cuales fueron expresados después en forma modificada por d'Alembert, Lagrange y Hamilton. Su validez permaneció incólume hasta que Einstein formuló su *teoría de la relatividad* (1905). Si bien ahora se han reconocido las limitaciones de la *mecánica newtoniana*, ésta aún es la base de las actuales ciencias de la ingeniería.

Los conceptos básicos que se emplean en la mecánica son *espacio*, *tiempo*, *masa* y *fuerza*. Estos conceptos no pueden ser definidos en forma exacta; deben aceptarse sobre las bases de nuestra intuición y experiencia y emplearse como un marco de referencia mental en el estudio de la mecánica.

El concepto de *espacio* se asocia con la noción de posición de un punto *P*. La posición de éste puede definirse por tres longitudes medidas desde cierto punto de referencia u *origen*, en tres direcciones dadas. Estas longitudes se reconocen como *coordenadas* de *P*.

Para definir un evento, no es suficiente con indicar su posición en el espacio sino que debe darse también el *tiempo* del evento.

El concepto de *masa* tiene la función de caracterizar y comparar los cuerpos con base en ciertos experimentos mecánicos fundamenta-

les. Por ejemplo, dos cuerpos que tengan la misma masa serían atraídos por la Tierra de igual forma; también presentarán la misma resistencia a un cambio en su movimiento traslacional.

Una *fuerza* representa la acción de un cuerpo sobre otro y puede ejercerse por contacto real o a distancia, como en el caso de las fuerzas gravitacionales y magnéticas. Una fuerza se caracteriza por su *punto de aplicación*, *magnitud* y *dirección* y se representa con un *vector* (sección 2.3).

En la mecánica newtoniana, espacio, tiempo y masa son conceptos absolutos e independientes entre sí (esto no es así en la *mecánica relativista*, donde el tiempo de un evento depende de su posición y la masa de un cuerpo varía con su velocidad). Por otra parte, el concepto de fuerza no es independiente de los otros tres. En realidad, uno de los principios fundamentales de la mecánica newtoniana, que se enuncian más adelante, indica que la fuerza resultante que actúa sobre un cuerpo se relaciona con la masa de éste y con la forma en que varía su velocidad en el tiempo.

Se estudiarán las condiciones de reposo o movimiento de partículas y cuerpos rígidos a partir de los cuatro principios básicos que se han expuesto. Por *partícula* se entiende una pequeñísima cantidad de materia que ocupa un punto en el espacio. Un *cuerpo rígido* es la combinación de un gran número de partículas que ocupan posiciones fijas entre sí. El estudio de la mecánica de las partículas es un requisito previo al de los cuerpos rígidos. Además, los resultados obtenidos para una partícula pueden usarse directamente en muchos problemas que tratan de las condiciones de reposo o movimiento de cuerpos reales.

El estudio de la mecánica elemental descansa sobre seis principios fundamentales basados en la evidencia experimental.

La ley del paralelogramo para la adición de fuerzas. Establece que dos fuerzas que actúan sobre una partícula pueden ser sustituidas por una sola fuerza llamada *resultante*, que se obtiene al trazar la diagonal del paralelogramo que tiene los lados iguales a las fuerzas dadas (sección 2.2).

El principio de transmisibilidad. Establece que las condiciones de equilibrio o de movimiento de un cuerpo rígido permanecerán inalteradas si una fuerza que actúa en un punto del cuerpo rígido se sustituye por una fuerza de la misma magnitud y la misma dirección, pero que actúe en un punto diferente, siempre que las dos fuerzas tengan la misma línea de acción (sección 3.3).

Las tres leyes fundamentales de Newton. Fueron formuladas por Sir Isaac Newton a finales del siglo XVII y pueden enunciarse como sigue:

PRIMERA LEY. Si la fuerza resultante que actúa sobre una partícula es cero, la partícula permanecerá en reposo (si originalmente estaba en reposo) o se moverá con velocidad constante en línea recta (si originalmente estaba en movimiento) (sección 2.10).

SEGUNDA LEY. Si la fuerza resultante que actúa sobre una partícula no es cero, la partícula tendrá una aceleración proporcional a la magnitud de la resultante y en la dirección de ésta.

Como se verá en la sección 12.2[†] esta ley puede expresarse así

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} \quad (1.1)$$

[†]La alusión a la sección 11 y posteriores corresponde al tomo *Dinámica*, del mismo autor.

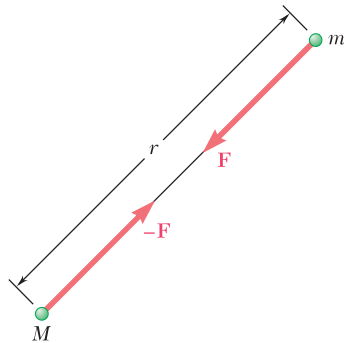


Figura 1.1



Fotografía 1.1 Cuando están en la órbita terrestre, se dice que las personas y los objetos *no tienen peso*, aun cuando la fuerza gravitacional que actúa sobre ellos es aproximadamente 90% de la que se experimenta en la superficie de la Tierra. Esta aparente contradicción se resolverá en el capítulo 12, cuando se aplica la segunda ley de Newton al movimiento de partículas.

donde $\mathbf{F}$, m y $\mathbf{a}$ representan, respectivamente, la fuerza resultante que actúa sobre la partícula, la masa de ésta y la aceleración de la misma, expresadas en un sistema consistente de unidades.

TERCERA LEY. Las fuerzas de acción y reacción de cuerpos en contacto tienen la misma magnitud, la misma línea de acción y sentidos opuestos (sección 6.1).

La ley de gravitación de Newton. Establece que dos partículas de masa M y m se atraen mutuamente con fuerzas iguales y opuestas $\mathbf{F}$ y $-\mathbf{F}$ (figura 1.1), de magnitud F dada por la fórmula

$$F = G \frac{Mm}{r^2} \quad (1.2)$$

donde r = la distancia entre las dos partículas

G = la constante universal llamada *constante de gravitación*

La ley de gravitación de Newton introduce la idea de una acción ejercida a distancia y extiende el alcance de aplicación de la tercera ley: la acción $\mathbf{F}$ y la reacción $-\mathbf{F}$ en la figura 1.1 son iguales y opuestas y tienen la misma línea de acción.

Un caso de gran importancia es el de la atracción que la Tierra ejerce sobre una partícula situada en su superficie. La fuerza $\mathbf{F}$ ejercida por la Tierra sobre la partícula se define como el *peso* $\mathbf{W}$ de la partícula. Tomando M igual a la masa de la Tierra, m igual a la masa de la partícula, y r igual al radio R de la Tierra e introduciendo la constante

$$g = \frac{GM}{R^2} \quad (1.3)$$

la magnitud W del peso de una partícula de masa m puede expresarse como[†]

$$W = mg \quad (1.4)$$

El valor de R en la fórmula (1.3) depende de la elevación del punto considerado; también depende de su latitud, puesto que la Tierra no es realmente esférica. Así que el valor de g varía con la posición del punto en cuestión. Mientras el punto permanezca sobre la superficie de la Tierra, en la mayoría de los cálculos de ingeniería es suficientemente preciso suponer que g es igual a 9.81 m/s^2 o 32.2 ft/s^2 .

Los principios que se acaban de enunciar se irán explicando en el curso del estudio de la mecánica conforme sea necesario. El estudio de la estática de partículas se realiza en el capítulo 2 y se basa sólo en la ley del paralelogramo para la adición y en la primera ley de Newton. El principio de transmisibilidad se expondrá en el capítulo 3, al comenzar el estudio de la estática de cuerpos rígidos, y la tercera ley de Newton se expone en el capítulo 6, cuando se analicen las fuerzas ejercidas entre los diferentes elementos que forman una estructura. En el estudio de la dinámica se introducirán la segunda ley de Newton y la ley de gravitación. Allí se mostrará que la primera ley de Newton es un caso particular de la segunda ley (sección 12.2), y que el principio de transmisibilidad podría derivarse de los otros principios y por lo mis-

[†]Una definición más precisa del peso $\mathbf{W}$ debe tomar en cuenta la rotación de la Tierra.

mo quedar eliminado (sección 16.5). Por ahora, las primera y tercera leyes de Newton, la ley del paralelogramo para la adición y el principio de transmisibilidad proporcionarán las bases necesarias y suficientes para el estudio completo de la estática de partículas, de cuerpos rígidos y de sistemas de cuerpos rígidos.

Como se dijo antes, los seis principios fundamentales enunciados antes se basan en la evidencia experimental. A excepción de la primera ley de Newton y el principio de transmisibilidad, todos son principios independientes y no se pueden obtener matemáticamente de los demás ni de cualquier otro principio físico elemental. En ellos descansa la mayor parte de la intrincada estructura de la mecánica newtoniana. La aplicación de estos principios fundamentales ha permitido resolver, por más de dos siglos, un gran número de problemas relacionados con las condiciones de reposo y movimiento de cuerpos rígidos, cuerpos deformables y fluidos. Muchas de las soluciones obtenidas pueden comprobarse mediante experimentos que proporcionan una verificación ulterior de los principios en que se basaron. Fue sólo hasta el siglo pasado que se encontró que la mecánica de Newton tiene deficiencias en el estudio del movimiento de los átomos y en el de ciertos planetas, y que debe complementarse con la teoría de la relatividad. Pero en la escala humana o en la escala de la ingeniería, donde las velocidades son mucho más pequeñas que la velocidad de la luz, la mecánica de Newton aún no ha sido refutada.

1.3. SISTEMAS DE UNIDADES

Con los cuatro conceptos fundamentales introducidos en la sección anterior se asocian las llamadas *unidades cinéticas*, es decir, las unidades de *longitud*, *tiempo*, *masa* y *fuerza*. Estas unidades no pueden escogerse de manera independiente si la ecuación (1.1) ha de satisfacerse. Tres de ellas pueden definirse en forma arbitraria; se les llama *unidades básicas*. La cuarta unidad, en cambio, debe escogerse de acuerdo con la ecuación (1.1) y se le identifica como *unidad derivada*. Se dice que las unidades cinéticas así seleccionadas forman un *sistema consistente de unidades*.

Sistema Internacional de Unidades (Unidades del SI).[†] En este sistema, que será de uso universal cuando Estados Unidos complete su conversión, las unidades básicas son las de longitud, masa y tiempo, y se llaman, respectivamente, *metro* (m), *kilogramo* (kg) y *segundo* (s). Las tres están definidas de manera arbitraria. El segundo, que de manera original se eligió para representar 1/86 400 del día solar medio, se define ahora como la duración de 9 192 631 770 ciclos de la radiación emitida en la transición entre dos niveles del estado fundamental del átomo de cesio-133. El metro, definido en forma original como la diezmillonésima parte de la distancia del ecuador a un polo, se define ahora como 1 650 763.73 longitudes de onda de la luz naranja-roja correspondiente a cierta transición en un átomo de criptón-86. El kilogramo, que es aproximadamente igual a la masa de 0.001 m³ de agua, se define como la masa de un patrón de platino-iridio que se conserva en la Oficina Internacional de Pesos y Medidas en Sèvres, cerca de París, Francia. La unidad de fuerza es una unidad derivada y se llama *newton* (N). Se le define como la fuerza que proporciona una

[†]SI significa *Système International d'Unités* (francés).



Figura 1.2

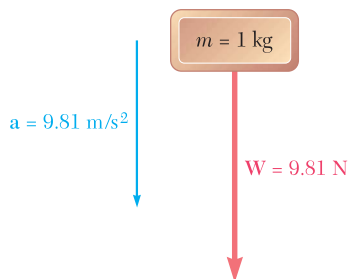


Figura 1.3

aceleración de 1 m/s^2 a una masa de un kilogramo (figura 1.2). A partir de la ecuación (1.1) se escribe

$$1 \text{ N} = (1 \text{ kg})(1 \text{ m/s}^2) = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 \quad (1.5)$$

Se dice que las unidades del SI forman un sistema *absoluto* de unidades; esto significa que las tres unidades básicas seleccionadas son independientes del lugar en donde se utilicen las medidas. El metro, el kilogramo y el segundo se pueden usar en cualquier lugar de la Tierra; incluso pueden usarse en otro planeta y siempre tendrán el mismo significado.

El *peso* de un cuerpo, o la *fuerza de gravedad* ejercida sobre él, debe expresarse en newtons, como cualquier otra fuerza. De la ecuación (1.4) se obtiene que el peso de un cuerpo de masa 1 kg (figura 1.3) es

$$\begin{aligned} W &= mg \\ &= (1 \text{ kg})(9.81 \text{ m/s}^2) \\ &= 9.81 \text{ N} \end{aligned}$$

Los múltiplos y submúltiplos de las unidades fundamentales del SI se pueden obtener con el uso de los prefijos que se definen en la tabla 1.1. Los múltiplos y submúltiplos de las unidades de longitud, masa y fuerza de mayor uso en ingeniería son, respectivamente, el *kilómetro* (km) y el *milímetro* (mm); el *megagramo*[†] (Mg) y el *gramo* (g); y el *kilonewton* (kN). De acuerdo con la tabla 1.1, se tiene

$$\begin{aligned} 1 \text{ km} &= 1\,000 \text{ m} & 1 \text{ mm} &= 0.001 \text{ m} \\ 1 \text{ Mg} &= 1\,000 \text{ kg} & 1 \text{ g} &= 0.001 \text{ kg} \\ 1 \text{ kN} &= 1\,000 \text{ N} \end{aligned}$$

La conversión de estas unidades a metros, kilogramos y newtons, respectivamente, puede realizarse con sólo recorrer el punto decimal tres lugares a la derecha o a la izquierda. Por ejemplo, para convertir 3.82 km en metros, se recorre el punto decimal tres lugares a la derecha:

$$3.82 \text{ km} = 3\,820 \text{ m}$$

En forma semejante, 47.2 mm se convierten en metros recorriendo el punto decimal tres lugares a la izquierda:

$$47.2 \text{ mm} = 0.0472 \text{ m}$$

Con el uso de la notación científica, se puede escribir

$$\begin{aligned} 3.82 \text{ km} &= 3.82 \times 10^3 \text{ m} \\ 47.2 \text{ mm} &= 47.2 \times 10^{-3} \text{ m} \end{aligned}$$

Los múltiplos de la unidad de tiempo son el *minuto* (min) y la *hora* (h). Puesto que $1 \text{ min} = 60 \text{ s}$ y $1 \text{ h} = 60 \text{ min} = 3\,600 \text{ s}$, estos múltiplos no pueden convertirse tan fácilmente como los otros.

Con el uso del múltiplo o submúltiplo adecuado de cierta unidad, se puede evitar la escritura de números muy grandes o muy pequeños.

[†]También conocida como *tonelada métrica*.

Tabla 1.1. Prefijos del SI

Factor multiplicativo	Prefijo	Símbolo
1 000 000 000 000 = 10^{12}	tera	T
1 000 000 000 = 10^9	giga	G
1 000 000 = 10^6	mega	M
1 000 = 10^3	kilo	k
100 = 10^2	hecto*	h
10 = 10^1	deca*	da
0.1 = 10^{-1}	deci*	d
0.01 = 10^{-2}	centi*	c
0.001 = 10^{-3}	mili	m
0.000 001 = 10^{-6}	micro	μ
0.000 000 001 = 10^{-9}	nano	n
0.000 000 000 001 = 10^{-12}	pico	p
0.000 000 000 000 001 = 10^{-15}	femto	f
0.000 000 000 000 000 001 = 10^{-18}	ato	a

*Debe evitarse el uso de estos prefijos, excepto en las medidas de áreas y volúmenes y para el uso no técnico del centímetro, como en las medidas referentes a la ropa y al cuerpo.

Por ejemplo, por lo general se escribe 427.2 km en lugar de 427 200 m, y 2.16 mm en lugar de 0.002 16 m.[†]

Unidades de área y volumen. La unidad de área es el *metro cuadrado* (m^2), que representa el área de un cuadrado de 1 m de lado; la unidad de volumen es el *metro cúbico* (m^3), que es igual al volumen de un cubo de 1 m de lado. Para evitar valores numéricos excesivamente pequeños o demasiado grandes en el cálculo de áreas y volúmenes, se usan sistemas de subunidades que se obtienen elevando, respectivamente, al cuadrado y al cubo no sólo el milímetro sino también dos submúltiplos intermedios del metro, llamados *decímetro* (dm) y *centímetro* (cm). Entonces, por definición,

$$\begin{aligned}1 \text{ dm} &= 0.1 \text{ m} = 10^{-1} \text{ m} \\1 \text{ cm} &= 0.01 \text{ m} = 10^{-2} \text{ m} \\1 \text{ mm} &= 0.001 \text{ m} = 10^{-3} \text{ m}\end{aligned}$$

los submúltiplos de la unidad de área son

$$\begin{aligned}1 \text{ dm}^2 &= (1 \text{ dm})^2 = (10^{-1} \text{ m})^2 = 10^{-2} \text{ m}^2 \\1 \text{ cm}^2 &= (1 \text{ cm})^2 = (10^{-2} \text{ m})^2 = 10^{-4} \text{ m}^2 \\1 \text{ mm}^2 &= (1 \text{ mm})^2 = (10^{-3} \text{ m})^2 = 10^{-6} \text{ m}^2\end{aligned}$$

y los submúltiplos de la unidad de volumen son

$$\begin{aligned}1 \text{ dm}^3 &= (1 \text{ dm})^3 = (10^{-1} \text{ m})^3 = 10^{-3} \text{ m}^3 \\1 \text{ cm}^3 &= (1 \text{ cm})^3 = (10^{-2} \text{ m})^3 = 10^{-6} \text{ m}^3 \\1 \text{ mm}^3 &= (1 \text{ mm})^3 = (10^{-3} \text{ m})^3 = 10^{-9} \text{ m}^3\end{aligned}$$

[†]Debe observarse que cuando se usan más de cuatro dígitos a ambos lados del punto decimal para expresar una cantidad en unidades del SI (como en 427 200 m o en 0.002 16 m) deben usarse espacios, no comas, para separar los dígitos en grupos de tres. Esto es con el fin de evitar confusiones con la coma, que se usa en muchos países en lugar del punto decimal.

Debe notarse que cuando se mide el volumen de un líquido, el decímetro cúbico (dm^3) se conoce en forma usual como un *litro* (L).

En la tabla 1.2 se muestran otras unidades derivadas del SI, que se usan para medir el momento de una fuerza, el trabajo de una fuerza, etc. Aunque estas unidades se introducirán en capítulos posteriores conforme se vayan necesitando, es necesario describir una regla importante en esta fase: cuando se obtiene una unidad derivada con la división de una unidad básica entre otra unidad básica, debe usarse un prefijo en el numerador de la unidad derivada pero no en su denominador. Por ejemplo, la constante k de un resorte que se elonga 20 mm bajo una carga de 100 N se expresará como

$$k = \frac{100 \text{ N}}{20 \text{ mm}} = \frac{100 \text{ N}}{0.020 \text{ m}} = 5\,000 \text{ N/m} \quad \text{o} \quad k = 5 \text{ kN/m}$$

pero nunca como $k = 5 \text{ N/mm}$.

Unidades de uso común en Estados Unidos. La mayoría de los ingenieros practicantes estadounidenses todavía utiliza un sistema en el que las unidades básicas son las unidades de longitud, fuerza y tiempo. Estas unidades son, respectivamente, el *pie* (ft), la *libra* (lb) y el *segundo* (s). El segundo es idéntico a la correspondiente unidad del SI. El pie se define como 0.3048 m. La libra se define como el *peso* de un patrón de platino, llamado *libra estándar*, que está en el National Institute

Tabla 1.2. Principales unidades del SI usadas en mecánica

Cantidad	Unidad	Símbolo	Fórmula
Aceleración	Metro por segundo al cuadrado	. . .	m/s^2
Ángulo	Radián	rad	†
Aceleración angular	Radián por segundo al cuadrado	. . .	rad/s^2
Velocidad angular	Radián por segundo	. . .	rad/s
Área	Metro cuadrado	. . .	m^2
Densidad	Kilogramo por metro cúbico	. . .	kg/m^3
Energía	Joule	J	$\text{N} \cdot \text{m}$
Fuerza	Newton	N	$\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$
Frecuencia	Hertz	Hz	s^{-1}
Impulso	Newton-segundo	. . .	$\text{kg} \cdot \text{m/s}$
Longitud	Metro	m	†
Masa	Kilogramo	kg	†
Momento de una fuerza	Newton-metro	. . .	$\text{N} \cdot \text{m}$
Potencia	Watt	W	J/s
Presión	Pascal	Pa	N/m^2
Esfuerzo	Pascal	Pa	N/m^2
Tiempo	Segundo	s	†
Velocidad	Metro por segundo	. . .	m/s
Volumen			
Sólidos	Metro cúbico	. . .	m^3
Líquidos	Litro	L	10^{-3} m^3
Trabajo	Joule	J	$\text{N} \cdot \text{m}$

†Unidad suplementaria (1 revolución = 2π rad = 360°).

‡Unidad básica.

of Standards and Technology en las afueras de Washington, su masa es de 0.453 592 43 kg. Como el peso de un cuerpo depende de la atracción gravitacional de la Tierra, la cual varía con la ubicación, se especifica que la libra estándar debe estar localizada al nivel del mar y a una latitud de 45° para definir en forma apropiada una fuerza de una libra. Es claro que las unidades de uso común en Estados Unidos no forman un sistema de unidades absoluto. Por su dependencia de la atracción gravitacional de la Tierra constituyen un sistema de unidades *gravitacional*.

Aun cuando la libra estándar se emplea también como unidad de masa en transacciones comerciales en Estados Unidos, no puede usarse así en cálculos de ingeniería, debido a que no sería consistente con las unidades básicas definidas en el apartado anterior. De hecho, cuando una fuerza de 1 lb actúa sobre la libra estándar, es decir, cuando está sujeta a la gravedad, recibe la aceleración de la gravedad, $g = 32.2 \text{ ft/s}^2$ (figura 1.4), ésta no es la unidad de aceleración que se requiere según la ecuación (1.1). La unidad de masa consistente con el pie, la libra y el segundo es la masa que recibe una aceleración de 1 ft/s^2 al aplicársele una fuerza de 1 lb (figura 1.5). Esta unidad, algunas veces llamada *slug*, puede derivarse de la ecuación $F = ma$ después de sustituir 1 lb y 1 ft/s^2 para F y a , respectivamente. Se escribe (1 slug = 32.216).

$$F = ma \quad 1 \text{ lb} = (1 \text{ slug})(1 \text{ ft/s}^2)$$

y se obtiene

$$1 \text{ slug} = \frac{1 \text{ lb}}{1 \text{ ft/s}^2} = 1 \text{ lb} \cdot \text{s}^2/\text{ft} \quad (1.6)$$

Comparando las figuras 1.4 y 1.5 se concluye que el *slug* es una masa 32.2 veces mayor que la masa de la libra estándar.

El hecho de que en el sistema de uso común en Estados Unidos, los cuerpos se caractericen por su peso en libras en lugar de por su masa en *slugs*, será ventajoso en el estudio de la estática, en donde se tratará en forma continua con pesos u otras fuerzas, y sólo en ocasiones con masas. Sin embargo, en el estudio de la dinámica, donde intervienen fuerzas, masas y aceleraciones, la masa m de un cuerpo se expresará en *slugs* cuando su peso W esté dado en libras. Recordando la ecuación (1.4) se escribe

$$m = \frac{W}{g} \quad (1.7)$$

donde g es la aceleración de la gravedad ($g = 32.2 \text{ ft/s}^2$).

Otras unidades de uso común en Estados Unidos que se presentan en forma frecuente en problemas de ingeniería son la *milla* (mi), igual a 5 280 ft; la *pulgada* (in.), igual a $\frac{1}{12}$ ft, y la *kilolibra* (kip), igual a una fuerza de 1 000 lb.[†] La *tonelada* se usa con frecuencia para representar una masa de 2 000 lb pero, al igual que la libra, debe convertirse a *slugs* en los cálculos de ingeniería.

La conversión en pies, libras y segundos de cantidades expresadas en otras unidades de uso común en Estados Unidos, en forma general es más complicada y requiere mayor atención que la operación correspondiente en las unidades del SI. Por ejemplo, si se da la magnitud de

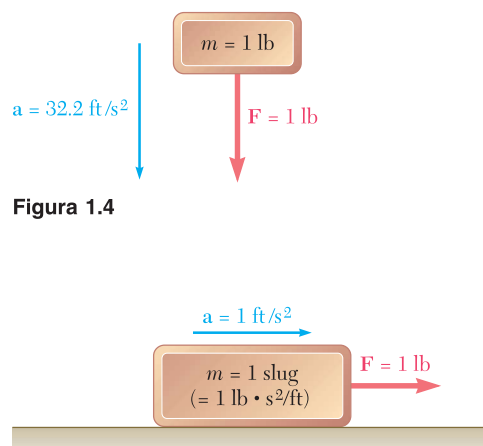


Figura 1.4

Figura 1.5

[†]En este caso se alude a la tonelada corta, ya que la tonelada larga equivale a 2 240 lb.

una velocidad como $v = 30 \text{ mi/h}$, se convierte en ft/s de la siguiente manera. Primero se escribe

$$v = 30 \frac{\text{mi}}{\text{h}}$$

Puesto que se quieren convertir millas en pies, se debe multiplicar el miembro derecho de la ecuación por una expresión que contenga millas en el denominador y pies en el numerador. Pero, como no se quiere cambiar el valor del miembro derecho, la expresión implicada debe tener un valor igual a uno; el cociente $(5\,280 \text{ ft})/(1 \text{ mi})$ es una expresión de este tipo. Haciendo una operación semejante para transformar la unidad hora en segundos, se escribe

$$v = \left(30 \frac{\text{mi}}{\text{h}}\right) \left(\frac{5\,280 \text{ ft}}{1 \text{ mi}}\right) \left(\frac{1 \text{ h}}{3\,600 \text{ s}}\right)$$

Realizando los cálculos numéricos y cancelando las unidades que aparecen tanto en el numerador como en el denominador, se obtiene

$$v = 44 \frac{\text{ft}}{\text{s}} = 44 \text{ ft/s}$$

1.4. CONVERSIÓN DE UN SISTEMA DE UNIDADES A OTRO

Existen muchas situaciones en las que un ingeniero necesita convertir en unidades del SI un resultado numérico obtenido en unidades de uso común en Estados Unidos o viceversa. Como la unidad de tiempo es la misma en ambos sistemas, sólo se necesita convertir dos unidades cinéticas básicas y, puesto que todas las otras unidades cinéticas pueden derivarse de estas unidades básicas, sólo se requiere recordar dos factores de conversión.

Unidades de longitud. Por definición, la unidad de longitud de uso común en Estados Unidos es

$$1 \text{ ft} = 0.3048 \text{ m} \quad (1.8)$$

De aquí se tiene que

$$1 \text{ mi} = 5\,280 \text{ ft} = 5\,280(0.3048 \text{ m}) = 1\,609 \text{ m}$$

o bien

$$1 \text{ mi} = 1.609 \text{ km} \quad (1.9)$$

También

$$1 \text{ in.} = \frac{1}{12} \text{ ft} = \frac{1}{12}(0.3048 \text{ m}) = 0.0254 \text{ m}$$

o bien

$$1 \text{ in.} = 25.4 \text{ mm} \quad (1.10)$$

Unidades de fuerza. Recordando que la unidad de fuerza de uso común en Estados Unidos (la libra) se define como el peso de una libra estándar (de masa 0.4536 kg) al nivel del mar y a una latitud de 45° (donde $g = 9.807 \text{ m/s}^2$) y usando la ecuación (1.4), se escribe

$$W = mg$$

$$1 \text{ lb} = (0.4536 \text{ kg})(9.807 \text{ m/s}^2) = 4.448 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$$

o, recordando la ecuación (1.5),

$$1 \text{ lb} = 4.448 \text{ N} \quad (1.11)$$

Unidades de masa. La unidad de masa de uso común en Estados Unidos (el *slug*) es una unidad derivada. Así, con el uso de las ecuaciones (1.6), (1.8) y (1.11), se puede escribir

$$1 \text{ slug} = 1 \text{ lb} \cdot \text{s}^2/\text{ft} = \frac{1 \text{ lb}}{1 \text{ ft/s}^2} = \frac{4.448 \text{ N}}{0.3048 \text{ m/s}^2} = 14.59 \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}$$

y por medio de la ecuación (1.5),

$$1 \text{ slug} = 1 \text{ lb} \cdot \text{s}^2/\text{ft} = 14.59 \text{ kg} \quad (1.12)$$

Aunque no puede usarse como unidad consistente de masa, recordando que la masa de la libra estándar es, por definición,

$$1 \text{ libra masa} = 0.4536 \text{ kg} \quad (1.13)$$

Esta constante se puede usar para determinar la *masa* en unidades del SI (kilogramos) de un cuerpo que esté caracterizado por su *peso* en unidades de uso común en Estados Unidos (libras).

Para convertir una unidad derivada de uso común en Estados Unidos en unidades del SI, simplemente se multiplica o se divide por los factores de conversión apropiados. Por ejemplo, para convertir la magnitud del momento de una fuerza que ha sido encontrada como $M = 47 \text{ lb} \cdot \text{in.}$ en unidades del SI, se usan las fórmulas (1.10) y (1.11) y se escribe

$$\begin{aligned} M &= 47 \text{ lb} \cdot \text{in.} = 47(4.448 \text{ N})(25.4 \text{ mm}) \\ &= 5\,310 \text{ N} \cdot \text{mm} = 5.31 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

Los factores de conversión dados en esta sección se pueden usar también para convertir un resultado numérico obtenido en las unidades del SI a unidades de uso común en Estados Unidos. Por ejemplo, si la magnitud del momento de una fuerza se encontró como $M = 40 \text{ N} \cdot \text{m}$, con el procedimiento usado en el último párrafo de la sección 1.3, se escribe

$$M = 40 \text{ N} \cdot \text{m} = (40 \text{ N} \cdot \text{m}) \left(\frac{1 \text{ lb}}{4.448 \text{ N}} \right) \left(\frac{1 \text{ ft}}{0.3048 \text{ m}} \right)$$

Al realizar los cálculos numéricos y cancelar las unidades que aparecen tanto en el numerador como en el denominador, se obtiene

$$M = 29.5 \text{ lb} \cdot \text{ft}$$

Las unidades de uso común en Estados Unidos que se emplean con mayor frecuencia en la mecánica, y sus equivalentes en las unidades del SI, se enlistan en la tabla 1.3.

1.5. MÉTODO PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Un problema en mecánica debe abordarse de la misma manera en que se plantearía un problema real de ingeniería. Si se toma como base la experiencia y la intuición propias, será más fácil entender y formular el problema. Sin embargo, una vez que el problema se ha establecido en forma clara, no hay sitio para suposiciones particulares. *La solución se debe basar en los seis principios fundamentales establecidos en la sección 1.2*

www.geocienciasvirtual.blogspot.com.co

Tabla 1.3. Unidades de uso común en Estados Unidos y sus equivalencias en unidades del SI

Cantidad	Unidad de uso común en EU	Equivalente del SI
Aceleración	ft/s ²	0.3048 m/s ²
	in./s ²	0.0254 m/s ²
Área	ft ²	0.0929 m ²
	in. ²	645.2 mm ²
Energía	ft · lb	1.356 J
Fuerza	kip	4.448 kN
	lb	4.448 N
	oz	0.2780 N
Impulso	lb · s	4.448 N · s
Longitud	ft	0.3048 m
	in.	25.40 mm
	mi	1.609 km
Masa	oz masa	28.35 g
	lb masa	0.4536 kg
	slug	14.59 kg
	short ton (tonelada corta)	907.2 kg
Momento de una fuerza	lb · ft	1.356 N · m
	lb · in.	0.1130 N · m
Momento de inercia		
	de un área	in. ⁴
	de una masa	lb · ft · s ²
		0.4162 × 10 ⁶ mm ⁴
Cantidad de movimiento	lb · s	1.356 kg · m ²
Potencia	ft · lb/s	4.448 kg · m/s
	hp	1.356 W
		745.7 W
Presión o esfuerzo	lb/ft ²	47.88 Pa
	lb/in. ² (psi)	6.895 kPa
Velocidad	ft/s	0.3048 m/s
	in./s	0.0254 m/s
	mi/h (mph)	0.4470 m/s
	mi/h (mph)	1.609 km/h
Volumen	ft ³	0.02832 m ³
	in. ³	16.39 cm ³
Líquidos	gal	3.785 L
	qt	0.9464 L
Trabajo	ft · lb	1.356 J

en los teoremas derivados de éstos. Cada paso debe estar justificado con estas bases. Deben seguirse reglas estrictas que conduzcan a la solución de una manera casi automática, sin dejar lugar para la intuición o “sentimientos” particulares. Después de obtener una respuesta, ésta debe verificarse. Aquí, de nuevo, se puede utilizar el sentido común y la experiencia personal. Si el resultado obtenido no es completamente satisfactorio, debe verificarse en forma cuidadosa la formulación del problema, la validez del método utilizado para su solución y la exactitud de los cálculos.

El *planteamiento* de un problema debe ser claro y preciso y contener los datos proporcionados, así como indicar la información que se requiere. Debe incluirse un dibujo claro que muestre todas las cantidades involucradas, así como un diagrama para cada uno de los cuerpos que participan, que indique en forma clara las fuerzas que actúan sobre ellos. A estos diagramas se les conoce como *diagramas de cuerpo libre* y se describirán en detalle en las secciones 2.11 y 4.2.

Los *principios fundamentales* de la mecánica que se enlistan en la sección 1.2 se emplean para escribir ecuaciones que expresen las con-

www.geocienciasvirtual.blogspot.com.co

diciones de reposo o movimiento de los cuerpos considerados. Cada ecuación debe estar relacionada en forma clara con uno de los diagramas de cuerpo libre. Después se procederá a resolver el problema, observando en forma estricta las reglas usuales de álgebra y con el registro minucioso de los diferentes pasos dados.

Después de haber obtenido la respuesta, ésta debe *comprobarse con todo cuidado*. Con frecuencia se pueden detectar errores en el *razonamiento* mediante la verificación de las unidades. Por ejemplo, para determinar la magnitud del momento de una fuerza de 50 N sobre un punto a 0.60 m de su línea de acción, se escribiría (sección 3.12)

$$M = Fd = (50 \text{ N})(0.60 \text{ m}) = 30 \text{ N} \cdot \text{m}$$

La unidad $\text{N} \cdot \text{m}$ que se obtiene al multiplicar newtons por metros es la unidad correcta para el momento de una fuerza; si se hubiera obtenido alguna otra unidad, se sabría que se cometió un error.

Los errores de *cálculo* por lo general se encontrarán al sustituir los valores numéricos en una ecuación que no haya sido usada y verificar si la ecuación es correcta. No es posible exagerar la importancia de los cálculos correctos en ingeniería.

1.6. EXACTITUD NUMÉRICA

La exactitud en la solución de un problema depende de dos factores: 1) la exactitud de los datos proporcionados y 2) la de los cálculos desarrollados.

La solución no puede ser más exacta que el menos exacto de estos dos factores; por ejemplo, si se sabe que la carga de un puente es de 75 000 lb con un posible error de 100 lb, el error relativo que mide el grado de precisión del dato es

$$\frac{100 \text{ lb}}{75\,000 \text{ lb}} = 0.0013 = 0.13 \text{ por ciento}$$

Entonces, al calcular la reacción en uno de los soportes del puente no tendría sentido anotarla como 14 322 lb. La exactitud de la solución no puede ser mayor de 0.13 por ciento, sin importar con qué exactitud se realicen los cálculos, y el error posible en la respuesta puede ser tan grande como $(0.13/100)(14\,322 \text{ lb}) \approx 20 \text{ lb}$. La respuesta debería escribirse como $14\,320 \pm 20 \text{ lb}$.

En los problemas de ingeniería los datos rara vez se conocen con una exactitud mayor a 0.2 por ciento, por lo que casi nunca se justifica escribir las respuestas a dichos problemas con una exactitud mayor a 0.2 por ciento. Un criterio práctico es utilizar cuatro cifras para registrar números que inicien con un “1” y tres cifras en todos los otros casos. A menos que se indique otra cosa, los datos proporcionados en un problema deben asumirse como conocidos con un grado de exactitud comparable. Por ejemplo, una fuerza de 40 lb se debería leer 40.0 lb, y una fuerza de 15 lb se debería leer 15.00 lb.

Los ingenieros y estudiantes de ingeniería comúnmente usan las calculadoras electrónicas de bolsillo. La exactitud y velocidad de éstas facilita los cálculos numéricos en la solución de muchos problemas. Sin embargo, los estudiantes no deben registrar más cifras significativas de las que se pueden justificar, sólo porque éstas se pueden obtener fácilmente. Como se mencionó con anterioridad, una exactitud mayor que 0.2 por ciento rara vez es necesaria o significativa en la solución de problemas prácticos de ingeniería.