



SE INCLUYE
DISQUETE

TERCERA EDICIÓN

ANÁLISIS ESTRUCTURAL

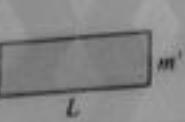
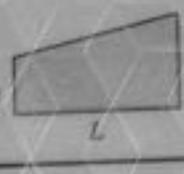
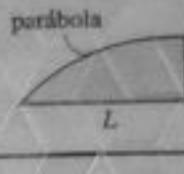
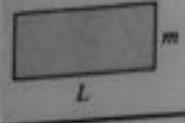
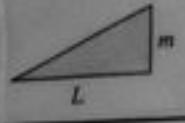
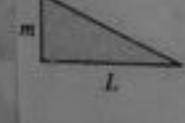
R.C. HIBBELER

PEARSON

Prentice
Hall

®

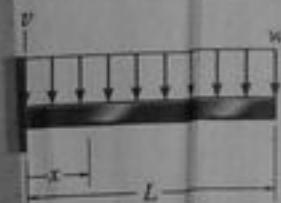
Tabla para la evaluación de $\int_0^L m m' dx$

$\int_0^L m m' dx$				
	$m m' L$	$\frac{1}{2} m m' L$	$\frac{1}{2} m(m'_1 + m'_2)L$	$\frac{2}{3} m m' L$
	$\frac{1}{2} m m' L$	$\frac{1}{3} m m' L$	$\frac{1}{6} m(m'_1 + 2m'_2)L$	$\frac{5}{12} m m' L$
	$\frac{1}{2} m'(m_1 + m_2)L$	$\frac{1}{6} m'(m_1 + 2m_2)L$	$\frac{1}{6}[m'_1(2m_1 + m_2) + m'_2(m_1 + 2m_2)]L$	$\frac{1}{12}[m'(3m_1 + 5m_2)]L$
	$\frac{1}{2} m m' L$	$\frac{1}{6} m m' (L + a)$	$\frac{1}{6} m_1[m_1(L + b) + m_2(L + a)]$	$\frac{1}{12} m m' (3 + \frac{3a}{L} - \frac{a^2}{L^2})L$
	$\frac{1}{2} m m' L$	$\frac{1}{6} m m' L$	$\frac{1}{6} m(2m'_1 + m'_2)L$	$\frac{1}{4} m m' L$

Deflexiones y pendientes en vigas

Carga	$v + \uparrow$	$\theta + \circlearrowright$	Ecuación $+ \uparrow + \circlearrowright$
	$v_{\text{máx}} = -\frac{PL^2}{3EI}$ en $x = L$	$\theta_{\text{máx}} = -\frac{PL^2}{2EI}$ en $x = L$	$v = \frac{P}{6EI}(x^3 - 3Lx^2)$
	$v_{\text{máx}} = \frac{M_0 L^2}{2EI}$	$\theta_{\text{máx}} = \frac{M_0 L}{EI}$	$v = \frac{M_0}{2EI}x^2$

Deflexiones y pendientes en vigas (continuación)



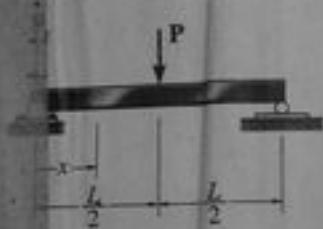
$$v_{\max} = -\frac{wL^4}{8EI}$$

en $x = L$

$$\theta_{\max} = -\frac{wL^3}{6EI}$$

en $x = L$

$$v = -\frac{w}{24EI}(x^4 - 4Lx^2 + 6L^2x^2)$$



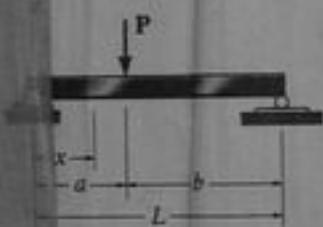
$$v_{\max} = -\frac{PL^3}{48EI}$$

en $x = L/2$

$$\theta_{\max} = \pm \frac{PL^2}{16EI}$$

en $x = 0$ o $x = L$

$$v = \frac{P}{48EI}(4x^3 - 3L^2x), \quad 0 \leq x \leq L/2$$

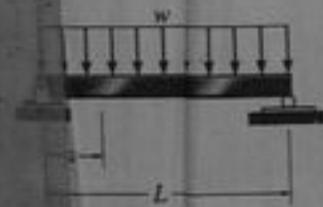


$$\theta_L = -\frac{Pab(L+b)}{6LEI}$$

$$\theta_a = \frac{Pab(L+a)}{6LEI}$$

$$v = -\frac{Pbx}{6LEI}(L^2 - b^2 - x^2)$$

$$0 \leq x \leq a$$



$$v_{\max} = -\frac{5wL^4}{384EI}$$

en $x = \frac{L}{2}$

$$\theta_{\max} = \pm \frac{wL^3}{24EI}$$

$$v = -\frac{wx}{24EI}(x^2 - 2Lx^2 + L^2)$$



$$\theta_c = -\frac{3wL^3}{128EI}$$

$$\theta_x = \frac{7wL^3}{384EI}$$

$$v = -\frac{wx}{384EI}(9L^2 - 24Lx^2 + 16x^3)$$

$$0 \leq x \leq L/2$$

$$v = -\frac{wL}{384EI}(8x^3 - 24Lx^2 + 17L^2x - L^3)$$

$$L/2 \leq x \leq L$$



$$v_{\max} = -\frac{M_0L^2}{9\sqrt{3}EI}$$

$$\theta_L = -\frac{M_0L}{6EI}$$

$$\theta_x = \frac{M_0L}{3EI}$$

$$v = -\frac{M_0x^2}{6EIL}(x^2 - 3Lx + 2L^2)$$

R
624.1

17624.3

Russell C. Hibbeler

Análisis estructural

TERCERA EDICIÓN

TRADUCCIÓN:

Ing. José de la Cera Alonso
Universidad Autónoma Metropolitana
México

PRENTICE-HALL
HISPANOAMERICANA, S. A.
EJEMPLAR DE CORTESÍA
PROHIBIDA SU VENTA

REVISIÓN TÉCNICA:

M. en I. Mario S. Ramírez Centeno
Ingeniero Civil
Universidad Nacional Autónoma de México
Profesor - Investigador
Universidad Autónoma Metropolitana

PRENTICE HALL HISPANOAMERICANA, S.A.

MÉXICO • NUEVA YORK • BOGOTÁ • LONDRES • SYDNEY
PARÍS • MUNICH • TORONTO • NUEVA DELHI • TOKIO
SINGAPUR • RÍO DE JANEIRO • ZURICH

EDICIÓN EN ESPAÑOL

DIRECTOR GENERAL:
GERENTE DIVISIÓN COLLEGE:
GERENTE EDITORIAL:
EDITOR:
DIRECTOR DE EDICIONES:
GERENTE DE EDICIONES:
GERENTE DE TRADUCCIÓN:
GERENTE DE PRODUCCIÓN:
SUPERVISORA DE TRADUCCIÓN:
SUPERVISOR DE PRODUCCIÓN:

MOISÉS PÉREZ ZAVALA
JOSÉ TOMÁS PÉREZ BONILLA
LUIS CEDEÑO PLASCENCIA
PABLO ROIG VÁZQUEZ
ALBERTO SIERRA OCHOA
JUAN ANTONIO RODRÍGUEZ MORENO
JORGE BONILLA TALAVERA
JULIÁN ESCAMILLA LIQUIDANO
MARÍA TERESA SANZ FALCÓN
MAGDIEL GÓMEZ MARINA

EDICIÓN EN INGLÉS:

Editor: William Stenquist
Production Supervisor: Rose Kerman
Text Designer: Robert Freese
Cover Designer: Jayne Conte
Cover Art (Photo): James Marshall/The Stock Market
Photo Researcher: Julie Tesser
Illustrations: Susan Sibley
Manufacturing Buyer: Julia Meehan

HIBBELER: ANÁLISIS ESTRUCTURAL, 3a. Ed.

Traducido del inglés de la obra: STRUCTURAL ANALYSIS, 3rd. Ed.

All rights reserved. Authorized translation from English language edition published by Prentice-Hall, Inc.
A Simon & Schuster Company.

Todos los derechos reservados. Traducción autorizada de la edición en inglés publicada por Prentice Hall, Inc.
A Simon & Schuster Company.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage and retrieval system, without permission in writing from the publisher.

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

Derechos reservados. © 1997 respecto a la primera edición en español publicada por:
PRENTICE-HALL HISPANOAMERICANA, S.A.
Calle 4 No. 25-29 Piso. Fracc. Industrial Alce Blanco
53330 Naucalpan de Juárez, Edo. de México

ISBN 970-17-0047-3

Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial, Reg. Núm. 1524.

Original English Language Edition Published by Prentice-Hall, Inc.
A Simon & Schuster Company
Copyright © MCMLXCVII
All rights reserved.

ISBN 0-13-493370-2

IMPRESO EN MÉXICO/ PRINTED IN MEXICO

PROGRAMAS EDUCATIVOS, S. A. DE C.V.
CALLE CHABACANO NÚM. 96 LOCAL A
COL. ASTURIAS DE ED. CUAUTEMOC
C.P. 11900, MÉXICO, D.F.

EMPRESA CERTIFICADA POR EL
INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN
Y CERTIFICACIÓN, INC., BAJO LA NORMA
ISO 9002:1994/EN ISO 9002:1994
CON EL NÚM. DE REGISTRO: RSC-048

Prefacio

El objetivo de este libro es proporcionar al estudiante una presentación clara y amplia de la teoría y aplicación del análisis estructural, tal como se emplea en armaduras, vigas y marcos. Se pone énfasis en desarrollar la habilidad del estudiante para modelar y analizar una estructura. En esta tercera edición revisada, se han llevado a cabo ligeras mejoras y correcciones a lo largo de todo el libro, se han agregado fotografías y algunas páginas han sido reformadas. Estas mejoras parecieron necesarias desde que la producción de la tercera edición estaba en proceso y Prentice-Hall, Inc. adquirió los derechos de publicación de Macmillan, Inc. Igual que en la tercera edición, la presentación y disposición de algunos de los temas de la edición previa, fueron mejorados y los ejemplos y problemas fueron ampliados. En particular, se agregó un capítulo sobre cables y arcos y el contenido de un capítulo previo sobre los métodos de desplazamientos se incorporó al capítulo sobre el método de pendiente-desviación. Se incluyó además el método de integración para determinar la pendiente y deflexión de una viga. Se usaron fotografías adicionales y mejores dibujos para facilitar la comprensión del material, y se dio particular atención a la exactitud numérica y a la claridad en la definición y desarrollo de los conceptos.

Organización y método

Los contenidos de cada capítulo están ordenados en secciones con temas específicos indicados por sus títulos. Los análisis de importancia para una teoría en particular son breves pero completos. En la mayoría de los casos, sigue a este análisis una guía llamada "Procedimiento de análisis", que proporciona al estudiante un resumen de los conceptos importantes y un procedimiento sistemático para aplicar la teoría. Los problemas de ejemplo se resuelven usando este método delineado para aclarar su aplicación numérica.

El libro está dividido en tres partes. Los métodos clásicos de análisis se ven en los capítulos 2 al 7 para estructuras estáticamente determinadas y en los capítulos 8 al 12 para estructuras estáticamente indeterminadas. La tercera parte del libro, capítulos 13 al 15, presenta métodos matriciales para el análisis estructural. En años recientes ha aumentado el uso de las computadoras para analizar estructuras por medio del análisis matricial. Esta tendencia es bienvenida ya que descarga al ingeniero de los largos cálculos requeridos al analizar estructuras grandes o complicadas por medio de métodos clásicos. Aunque los métodos matriciales son más eficientes para un análisis estructural, el autor considera que los estudiantes que toman un primer curso sobre este tema, deben estar bien versados en los métodos clásicos. La práctica al aplicar esos métodos desarrollará un entendimiento más profundo de las ciencias básicas de la estática y de la mecánica de materiales. Además, la habilidad para resolver problemas se desarrolla cuando las diversas técnicas se razonan y aplican en una forma clara y ordenada; puede entonces entenderse mejor la manera en que las cargas se transmiten a través de las estructuras y obtenerse una idea más completa de cómo se deforman éstas bajo carga. Finalmente, los métodos clásicos proporcionan un medio para verificar los resultados de la computadora y no tener que depender solamente de los listados generados por ésta.

Problemas

La mayoría de los problemas en el libro reflejan situaciones realistas que se encuentran en la práctica. Se espera que esto estimule el interés del estudiante en el análisis estructural y desarrolle su habilidad para reducir cualquiera de esos problemas, de su descripción física a un modelo o representación simbólica a la que puede aplicarse la teoría apropiada. Se usan tanto el sistema métrico decimal (SI) como el sistema inglés a lo largo de todo el libro. Los problemas se presentan al final de cada capítulo y están ordenados para cubrir el material en orden secuencial y por orden de dificultad. La intención aquí ha sido generar problemas que prueben la habilidad del estudiante al aplicar la teoría, teniendo en cuenta que aquellos problemas que requieren cálculos tediosos pueden relegarse al análisis con computadora. Las

respuestas a todos, excepto cada cuarto problema (indicados con un asterisco) están dadas al final del libro. Todas las soluciones han sido revisadas por otras personas y las respuestas numéricas se han verificado cuidadosamente.

Contenido

Este libro consta de 15 capítulos. El capítulo 1 presenta un breve análisis de los varios tipos de formas y cargas estructurales. El análisis de las estructuras estáticamente determinadas se ve en los siguientes seis capítulos. El capítulo 2 muestra la determinación de las fuerzas en los soportes y conexiones de una estructura. En el capítulo 3 se analizan los diversos tipos de armaduras estáticamente determinadas y en el capítulo 4 se presentan las funciones y diagramas de fuerza cortante y momento flexionante para vigas y marcos. En el capítulo 5 se presenta el análisis de los sistemas de cables y arcos simples y en el capítulo 6 se estudian las líneas de influencia para vigas, tráves y armaduras. Finalmente, en el capítulo 7 se consideran varias técnicas comunes para el análisis aproximado de estructuras estáticamente indeterminadas.

En la segunda parte del libro, el análisis de las estructuras estáticamente indeterminadas se cubre en cinco capítulos. En el capítulo 8 se presentan métodos tanto geométricos como de energía para el cálculo de deflexiones. El capítulo 9 cubre el análisis de estructuras estáticamente indeterminadas usando el método de las fuerzas y además trata las líneas de influencia para vigas. En el capítulo 10 se ven los métodos de desplazamientos, en particular, el método de pendiente-desviación y el de distribución de momentos se ve en el capítulo 11. Finalmente, en el capítulo 12 se consideran las vigas y marcos con miembros de secciones no prismáticas.

La tercera parte del libro trata el análisis de estructuras usando métodos matriciales. El capítulo 13 presenta una breve introducción al álgebra de matrices. Los capítulos 14 y 15 desarrollan el análisis de armaduras y marcos, respectivamente, usando el método de la rigidez global. Este método es de gran aplicación en conjunción con las computadoras.

Reconocimientos

Muchos de mis colegas en la profesión docente y de mis alumnos han hecho críticas constructivas que han ayudado en esta revisión y quisiera reconocer aquí todas sus valiosas sugerencias y comentarios. En particular quisiera dar las gracias a los revisores contratados por mi editor: Ahmed M. Abdel-Ghaffar, Princeton University; Ahmet Emin Aktan, Louisiana State University; Richard A. Behr, University of Missouri en Rolla; William L. Bingham, North Carolina State

University; Michael C. Constantinou, State University of New York en Buffalo; Mike Gingrich, Olivet Nazarene University; Phillip L. Gould, Washington University en St. Louis; Harry D. Knostman, Kansas State University; Daryl Logan, Rose-Hulman Institute of Technology; Seroj Mackertich, Pennsylvania State University en Harrisburg; David F. Mazurek, U.S. Coast Guard Academy; B. B. Muvdi, Bradley University; John F. Ritter, Youngstown State University; Masoud Sanayei, Tufts University; Scott D. Schiff, Clemson University; Jack W. Schwalbe, Florida Institute of Technology; Charles T. Stephens, Oregon Institute of Technology; Leon R. L. Wang, Old Dominion University; R. Warren, Point Park College; y Aspasia Zerva y Tolga Ergunay, Drexel University. Muchas gracias también a Susan Sible por producir las excelentes ilustraciones usadas a través de todo el libro y a Barry Nolan por su ayuda en producir la última versión del programa de computadora STRAN. Finalmente, quisiera reconocer la ayuda obtenida de mi esposa Conny, de quien siempre recibí un gran apoyo y auxilio en la preparación del manuscrito para su publicación.

R. C. H.

Contenido

1 Tipos de estructuras y cargas

1.1	Introducción	1
1.2	Clasificación de las estructuras	2
1.3	Cargas	9
	Problemas	20

2 Análisis de estructuras estáticamente determinadas

2.1	Estructura idealizada	25
2.2	Principio de superposición	40
2.3	Ecuaciones de equilibrio	41
2.4	Determinación y estabilidad	42
2.5	Aplicación de las ecuaciones de equilibrio	54
	Problemas	67

3 Análisis de armaduras estáticamente determinadas

3.1	Tipos comunes de armaduras	81
3.2	Clasificación de las armaduras coplanares	87

3.3	El método de los nudos	98
3.4	Miembros de fuerza cero	104
3.5	El método de las secciones	107
3.6	Armaduras compuestas	116
3.7	Armaduras complejas	122
3.8	Armaduras espaciales	126
	Problemas	136

4 Cargas internas desarrolladas en miembros estructurales

4.1	Cargas internas en un punto específico	147
4.2	Funciones de fuerza cortante y momento flexionante	153
4.3	Diagramas de fuerza cortante y momento flexionante para una viga	159
4.4	Diagramas de fuerza cortante y momento flexionante para un marco	176
4.5	Diagramas de momento construidos con el método de superposición	184
	Problemas	188

5 Cables y arcos

5.1	Cables	197
5.2	Cables sometidos a cargas concentradas	198
5.3	Cables sometidos a carga uniforme distribuida	202
5.4	Arcos	210
5.5	Arco de tres articulaciones	212
	Problemas	218

6 Líneas de influencia para estructuras estáticamente determinadas

6.1	Líneas de influencia	223
6.2	Líneas de influencia para vigas	235
6.3	Líneas de influencia cualitativas	242
6.4	Líneas de influencia para tráves de piso	254

6.5	Líneas de influencia para armaduras	259
6.6	Cargas vivas para puentes	266
6.7	Influencia máxima en un punto debido a una serie de cargas concentradas	268
6.8	Fuerza cortante y momento flexionante máximos absolutos	280
	Problemas	289

7 Análisis aproximado de estructuras estáticamente indeterminadas

7.1	Uso de métodos aproximados	303
7.2	Armaduras	304
7.3	Cargas verticales sobre marcos de edificios	310
7.4	Marcos de portal y armaduras	314
7.5	Cargas laterales en marcos de edificios: método del portal	320
7.6	Cargas laterales en marcos de edificios: método del voladizo	326
	Problemas	333

8 Deflexiones

8.1	Diagramas de deflexión y curva elástica	341
8.2	Teoría de la viga elástica	345
8.3	El método de la doble integración	347
8.4	Teoremas de área-momento	354
8.5	Método de la viga conjugada	370
8.6	Trabajo externo y energía de deformación	381
8.7	Principio del trabajo y de la energía	384
8.8	Principio del trabajo virtual	385
8.9	Método del trabajo virtual: armaduras	388
8.10	Método del trabajo virtual: vigas y marcos	397
8.11	Energía de deformación virtual causada por carga axial, fuerza cortante, torsión y temperatura	410
8.12	Teorema de Castigiano	417
8.13	Teorema de Castigiano para armaduras	419
8.14	Teorema de Castigiano para vigas y marcos	426
	Problemas	437

9 Análisis de estructuras estáticamente indeterminadas por el método de las fuerzas

9.1	Estructuras estáticamente indeterminadas	449
9.2	Método de análisis de las fuerzas: procedimiento general	453
9.3	Teorema de Maxwell de los desplazamientos recíprocos; Ley de Betti	458
9.4	Método de análisis de las fuerzas: vigas	459
9.5	Diagramas de momentos generales para vigas estáticamente indeterminadas	470
9.6	Método de análisis de las fuerzas: marcos	471
9.7	Método de análisis de las fuerzas: armaduras	476
9.8	Estructuras compuestas	479
9.9	Observaciones adicionales al método de análisis de las fuerzas	482
9.10	La ecuación de los tres momentos	484
9.11	Líneas de influencia para vigas estáticamente indeterminadas	494
9.12	Líneas de influencia cualitativas para marcos	504
	Problemas	506

10 Método de análisis de los desplazamientos: ecuaciones de pendiente-desviación

10.1	Método de análisis de los desplazamientos: procedimiento general	517
10.2	Ecuaciones pendiente-desviación	520
10.3	Análisis de vigas	527
10.4	Análisis de marcos sin desplazamiento lateral	539
10.5	Análisis de marcos con desplazamiento lateral	545
	Problemas	556

11 Método de análisis de los desplazamientos: distribución de momentos

11.1	Principios generales y definiciones	563
11.2	Distribución de momentos para vigas	568
11.3	Modificaciones al factor de rigidez	578

11.4	Distribución de momentos para marcos sin desplazamiento lateral	585
11.5	Distribución de momentos para marcos con desplazamiento lateral	588
11.6	Distribución de momentos para marcos de varios niveles	598
	Problemas	600

12 Análisis de vigas y marcos formados por miembros no prismáticos

12.1	Deflexiones de miembros no prismáticos	608
12.2	Análisis de propiedades de carga de miembros no prismáticos con el método de la viga conjugada	610
12.3	Propiedades de carga de miembros no prismáticos disponibles en publicaciones	618
12.4	Distribución de momentos para estructuras con miembros no prismáticos	621
12.5	Ecuaciones de pendiente-desviación para miembros no prismáticos	628
	Problemas	630

13 Algebra matricial para el análisis estructural

13.1	Definiciones básicas y tipos de matrices	635
13.2	Operaciones con matrices	638
13.3	Determinantes	643
13.4	Inversa de una matriz	646
13.5	Método de Gauss para resolver ecuaciones simultáneas	649
	Problemas	651

14 Análisis de armaduras con el uso del método de la rigidez

14.1	Fundamentos del método de la rigidez	653
14.2	Matriz de rigidez de un miembro de armadura	657

14.3	Matrices de transformación de desplazamientos y fuerzas	659
14.4	Matriz de rigidez global de un miembro	663
14.5	Matriz de rigidez de la estructura	665
14.6	Aplicación del método de la rigidez al análisis de armaduras	671
14.7	Análisis de armaduras espaciales	682
	Problemas	684

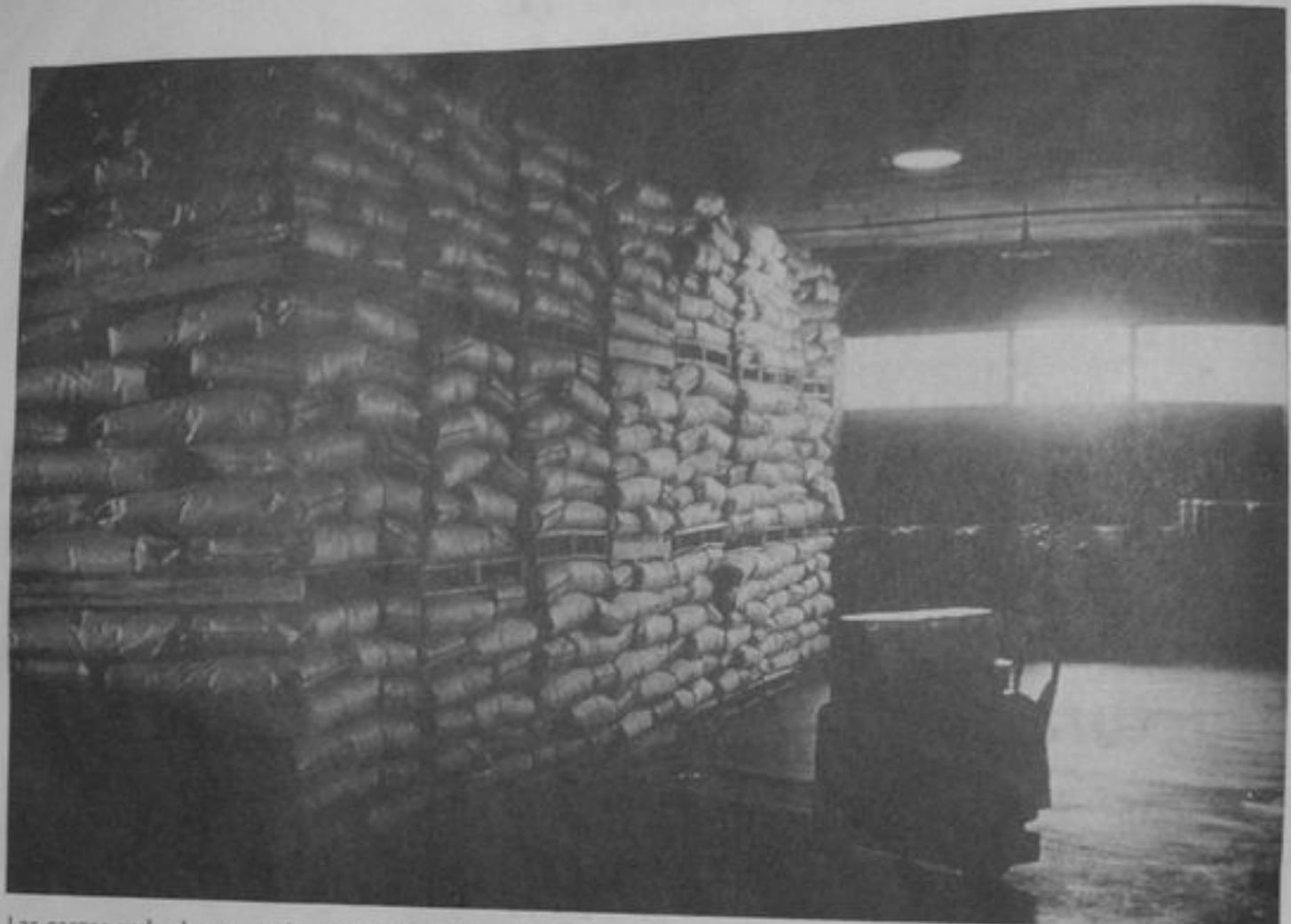
15 Análisis de vigas y marcos planos con el uso del método de la rigidez

15.1	Observaciones preliminares	687
15.2	Matriz de rigidez de un miembro de un marco	691
15.3	Matrices de transformación de desplazamientos y fuerzas	693
15.4	Matriz de rigidez global de un miembro de un marco	696
15.5	Matriz de rigidez global de una viga	697
15.6	Aplicación del método de la rigidez al análisis de vigas y marcos	698
	Problemas	712

Respuestas 717

Índice 727

Análisis estructural



Las cargas en bodegas pueden ser muy grandes, como se aprecia aquí. Para diseñar apropiadamente el edificio es necesario estimar la magnitud de la carga y especificar dónde quedará ésta localizada dentro del edificio. (Fotografía por cortesía de la Portland Cement Association.)

Tipos de estructuras y cargas

En este capítulo explicaremos las diversas etapas necesarias para producir una estructura. Definiremos también los tipos básicos de estructuras, sus elementos y sus soportes. Finalmente, se dará una breve explicación de los tipos de cargas que deben considerarse para llevar a cabo un análisis y diseño estructural apropiados.

1.1 Introducción

Una estructura consiste en una serie de partes conectadas con el fin de soportar una carga. Ejemplos de ellas son los edificios, los puentes, las torres, los tanques y las presas. El proceso de crear cualquiera de estas estructuras requiere planeación, análisis, diseño y construcción. A continuación se hace un análisis breve de cada una de esas etapas para ilustrar qué debe considerarse en la práctica.

Planeación

Al crear una estructura para que cumpla una función específica de uso público, primero debe considerarse la selección de una forma estructural que sea segura, estética y económica. Ésta es usualmente la fase más difícil y a la vez más importante de la ingeniería estructural. A menudo se requieren varios estudios independientes de diferentes soluciones antes de decidir cuál es la forma (arco, armadura, marco, etc.) más apropiada. Una vez tomada esta decisión, se especifican entonces las cargas, materiales, disposición de los miembros y sus

dimensiones de conjunto. Está claro que la habilidad necesaria para llevar a cabo esas actividades de planeación se adquiere normalmente después de varios años de experiencia en el arte y ciencia de la ingeniería.

Análisis

Para analizar apropiadamente una estructura, deben hacerse ciertas idealizaciones sobre cómo están soportados y conectados los miembros entre sí. Una vez que se ha determinado esto y se han especificado las cargas, las fuerzas en los miembros y sus desplazamientos pueden encontrarse utilizando la teoría de la mecánica estructural, que es el tema de este libro.

Diseño

Una vez obtenidas las cargas internas de un miembro, el tamaño de éste puede determinarse de manera que se satisfagan los criterios de resistencia, estabilidad y deflexión, como está asentado en las normas y códigos en vigor. Además, las conexiones entre los miembros pueden diseñarse por resistencia y las dimensiones detallarse de manera que todas las partes queden ajustadas entre sí en forma apropiada.

Construcción

La fase final requiere ordenar los diversos componentes de la estructura y planear las actividades que implica el montaje real de ésta. Respecto a esto, todas las fases de la construcción deben inspeccionarse para garantizar que la estructura está siendo construida de acuerdo con los planos de diseño especificados.

1.2 Clasificación de las estructuras

Es importante que un ingeniero estructural reconozca los diversos tipos de elementos que componen una estructura y que sea capaz de clasificar las estructuras de acuerdo con su forma y función. Presentaremos por ahora algunos de esos aspectos y hablaremos más sobre ellos en los puntos apropiados a lo largo del texto.

Elementos estructurales

Algunos de los elementos más comunes de que constan las estructuras son los siguientes.

Tirantes. Los miembros estructurales sometidos a una fuerza de tensión se denominan *tirantes* o *puntales de arriostramiento*. Debido a la naturaleza de esta carga, estos miembros son esbeltos y para formarlos se escogen perfiles redondos, rectangulares (varillas y barras), ángulos, canales, etc., mostrados en la figura 1-1.

Vigas. Las vigas son usualmente miembros horizontales rectos usados principalmente para soportar cargas verticales, figura 1-2. A menudo se clasifican según la manera en que están apoyadas, como se indica en la misma figura. En particular, cuando la sección transver-

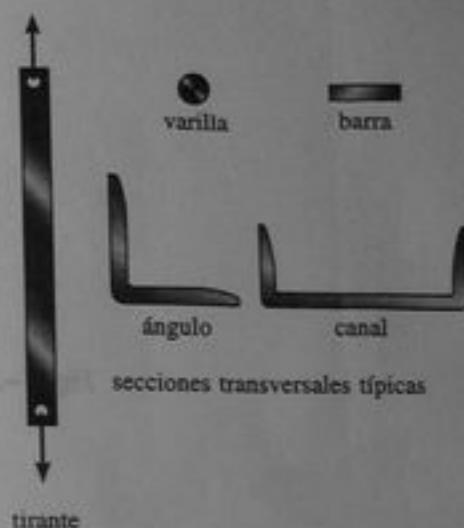


Fig. 1-1

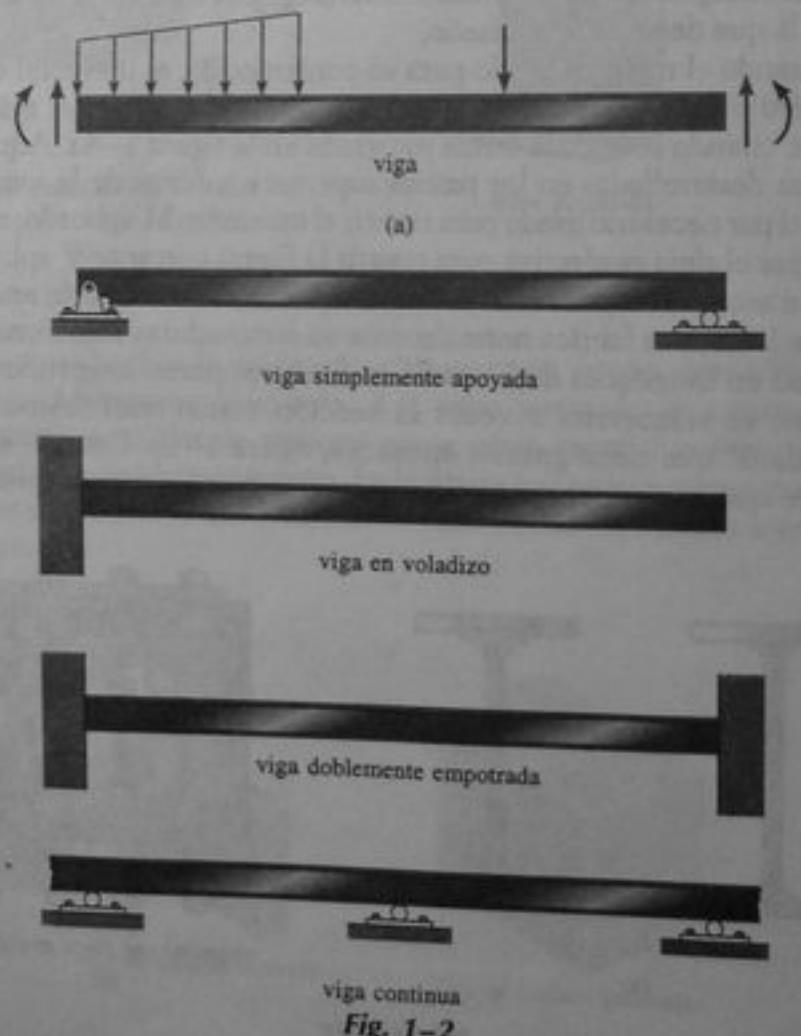


Fig. 1-2

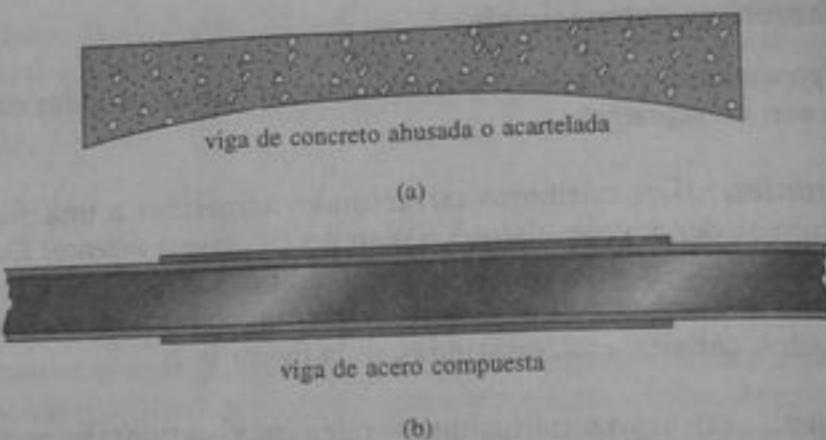


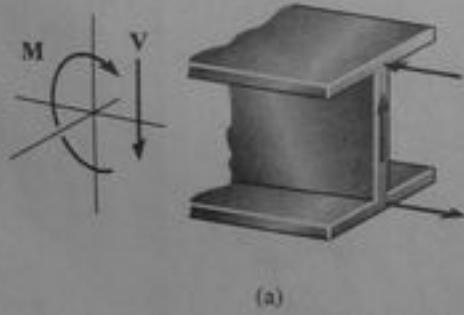
Fig. 1-3

(b)

sal varfa, la viga se denomina ahusada o acartelada, figura 1-3a. Las secciones transversales de las vigas son también "compuestas", como en los casos en que se añaden placas en sus partes superior e inferior, figura 1-3b.

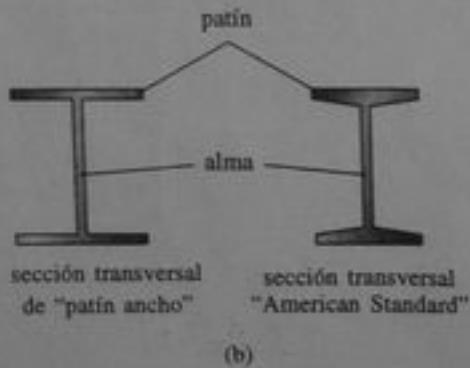
La mayoría de las veces, las vigas se diseñan principalmente para resistir el momento flexionante; sin embargo, si son cortas y soportan grandes cargas, la fuerza cortante interna puede resultar muy grande y ser la que determine el diseño.

Cuando el material usado para su construcción es un metal como el acero o el aluminio, la sección transversal de una viga es más eficiente cuando se le da la forma mostrada en la figura 1-4a. Aquí, las fuerzas desarrolladas en los patines superior e inferior de la viga forman el par necesario usado para resistir el momento M aplicado, mientras que el alma es efectiva para resistir la fuerza cortante V aplicada. A esta sección transversal se le llama comúnmente "de patín ancho", figura 1-4b, y se fabrica normalmente en laminadoras como una sola unidad en longitudes de hasta 75 ft. Si se requieren longitudes más cortas, se selecciona a veces la sección transversal "American Standard" que tiene patines ahusados, figura 1-4b. Cuando se requiere que la viga tenga un claro muy grande y las cargas aplicadas



(a)

Fig. 1-4



(b)

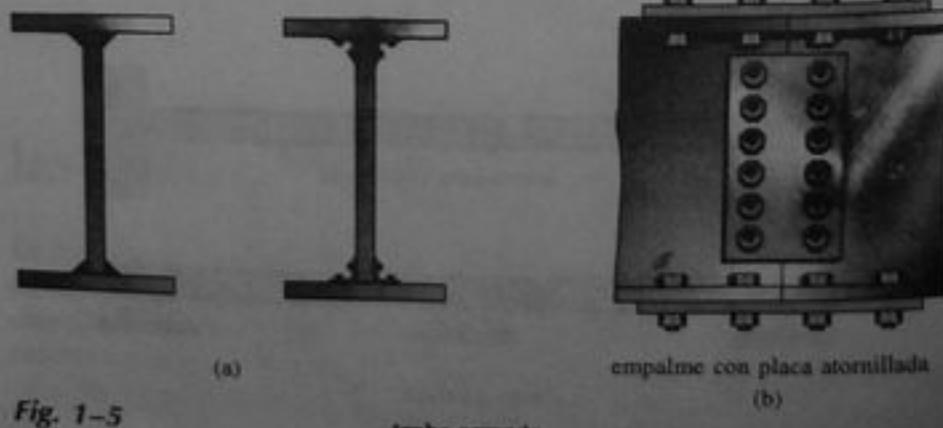


Fig. 1-5

trabe armada

(b)

son bastante grandes, la sección transversal puede tomar la forma de una trabe *armada*. Este miembro se fabrica usando una gran placa para el alma y soldando placas en sus extremos, o uniendo éstas con pernos, de modo que hagan la función de patines, figura 1-5a. A menudo la trabe se transporta a la obra en segmentos, los cuales se diseñan para ser empalmados en puntos donde la trabe recibe momentos internos pequeños, figura 1-5b.

Las vigas de concreto generalmente tienen secciones transversales rectangulares, ya que es fácil construir esta forma directamente en la obra. Como el concreto es bastante débil en su resistencia a la tensión, se cuelan dentro de la viga "barras de refuerzo" en las regiones de la sección transversal sometidas a tensión, figura 1-6a. Las vigas o trabes de concreto precolado se fabrican en un taller de la misma manera, figura 1-6b, y luego se transportan al lugar de la obra.



Fig. 1-6

Las vigas hechas de madera pueden aserrarse de una pieza sólida de madera o fabricarse laminadas. Las vigas laminadas se construyen de secciones sólidas de madera que se unen entre sí por medio de pegamentos de alta resistencia. En la figura 1-7 se muestran ejemplos típicos de secciones transversales de vigas hechas de madera aserrada o laminada.

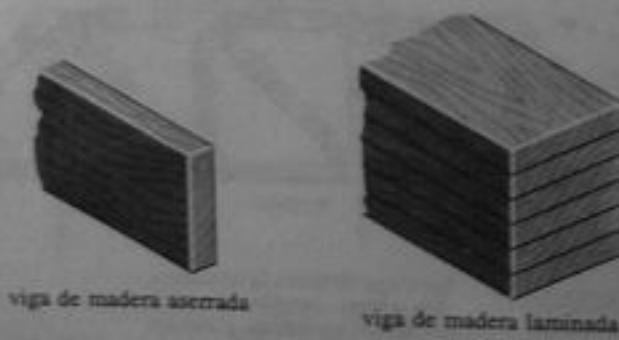


Fig. 1-7



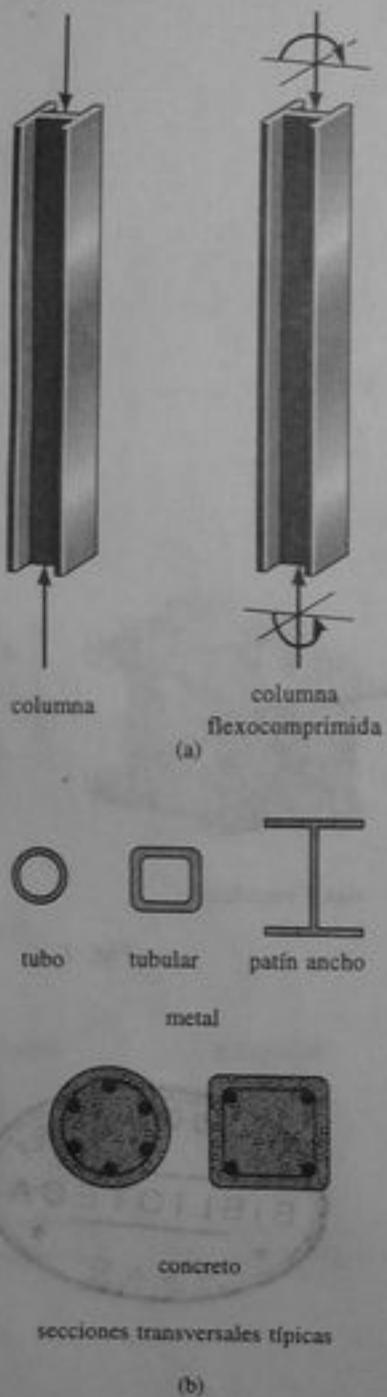


Fig. 1-8

Columnas. Los miembros que generalmente son verticales y resisten cargas axiales de compresión se conocen como *columnas*, figura 1-8a. Para columnas metálicas se suelen usar secciones tubulares y secciones de patín ancho y para las de concreto son usuales las secciones circulares y cuadradas con barras de refuerzo, figura 1-8b. En ocasiones, las columnas están sometidas a carga axial y a momento de flexión como se muestra en la figura 1-8a. Esos miembros se llaman entonces *columnas flexocomprimidas*.

Tipos de estructuras

A la combinación de los elementos estructurales y los materiales de que están hechos se le llama *sistema estructural*. Cada sistema está construido de uno o más de cuatro tipos básicos de estructuras. Clasificados por el grado de complejidad de su análisis, tales tipos son los siguientes.

Armaduras. Cuando se requiere que el claro de una estructura sea grande y su altura no es un criterio importante de diseño, puede seleccionarse una armadura. Las *armaduras* consisten en barras en tensión y elementos esbeltos tipo columna, usualmente dispuestos en forma triangular. Las *armaduras planas* se componen de miembros situados en el mismo plano y se usan a menudo para puentes y techos, mientras que las *armaduras espaciales* tienen miembros en tres dimensiones y son apropiadas para grúas y torres.

Debido al arreglo geométrico de sus miembros, las cargas que causan flexión en la armadura, figura 1-9, se convierten en fuerzas de tensión o compresión en los miembros y por esto una de las ventajas principales de una armadura, respecto a una viga, es que usa menos material para soportar una carga dada. Además, una armadura se construye con *elementos de relativamente poco peso* que pueden arreglarse de varias maneras para soportar una carga impuesta. Con frecuencia es económicamente factible usar una armadura para salvar claros de 30 ft a 400 ft, aunque en ocasiones se han usado en claros mayores de 400 ft.

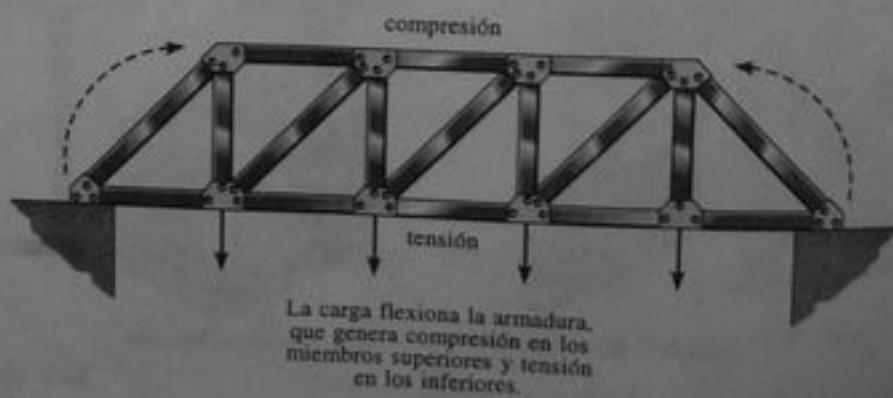


Fig. 1-9

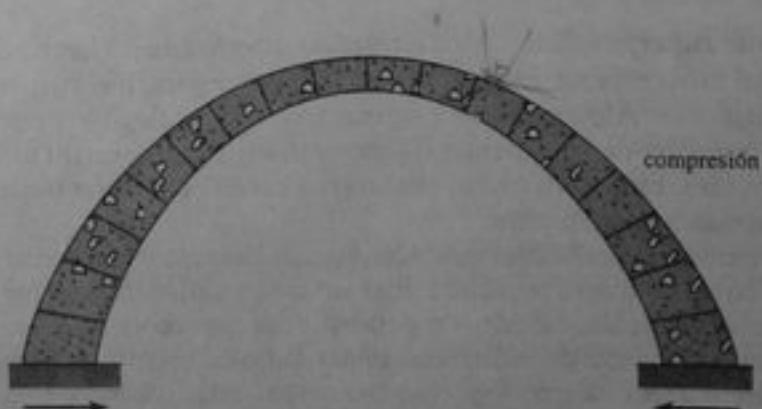


Los cables soportan sus cargas en tensión

Fig. 1-10

Cables y arcos. Otras dos formas de estructuras que se usan para salvar grandes distancias son el cable y el arco. Los cables suelen ser flexibles y soportan sus cargas en tensión. Sin embargo, a diferencia de los tirantes, la carga externa no se aplica a lo largo del eje del cable y, en consecuencia, el cable adopta una forma acorde con la carga aplicada, figura 1-10. Los cables se usan generalmente para soportar puentes y techos de edificios. Cuando se usan para estos fines, el cable tiene una ventaja sobre la viga y la armadura, especialmente en claros mayores de 150 ft. Como siempre están en tensión, los cables no resultan inestables ni se desploman repentinamente como puede suceder con vigas o armaduras. Además, la armadura requiere costos adicionales de construcción y un peralte creciente conforme aumenta el claro. Por otra parte, el uso de cables está limitado sólo por su peso y los métodos de anclaje.

El arco logra su resistencia en compresión ya que tiene una curvatura inversa a la del cable, figura 1-11. Sin embargo, el arco debe ser rígido para mantener su forma y esto genera cargas secundarias en que interviene la fuerza cortante y el momento flexionante, que deben considerarse en su diseño. Los arcos son frecuentemente usados en estructuras de puentes, domos para techos y en aberturas para muros de mampostería.



Los arcos soportan sus cargas en compresión

Fig. 1-11

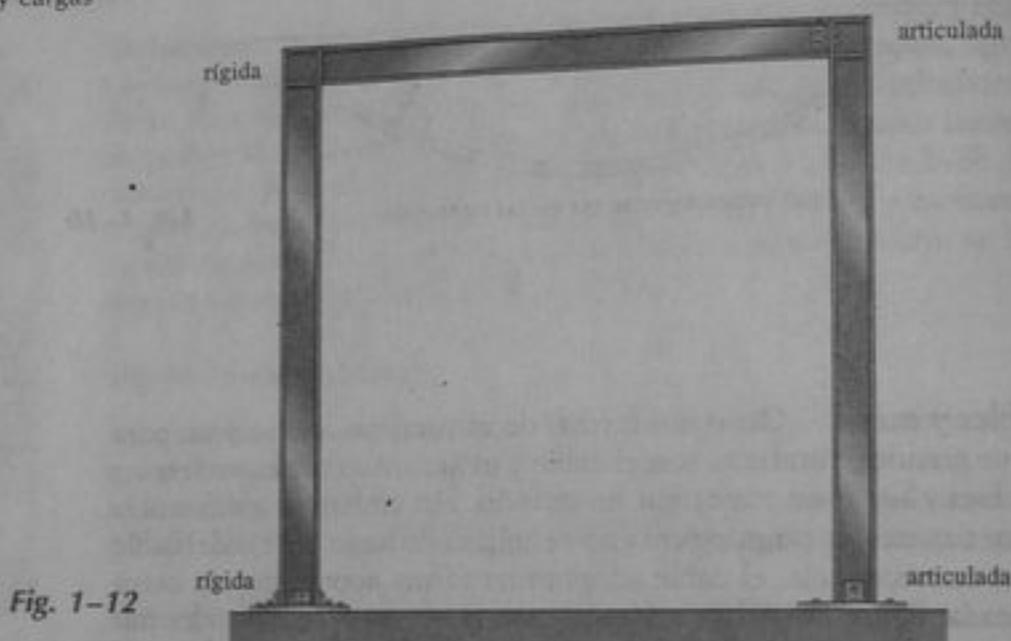
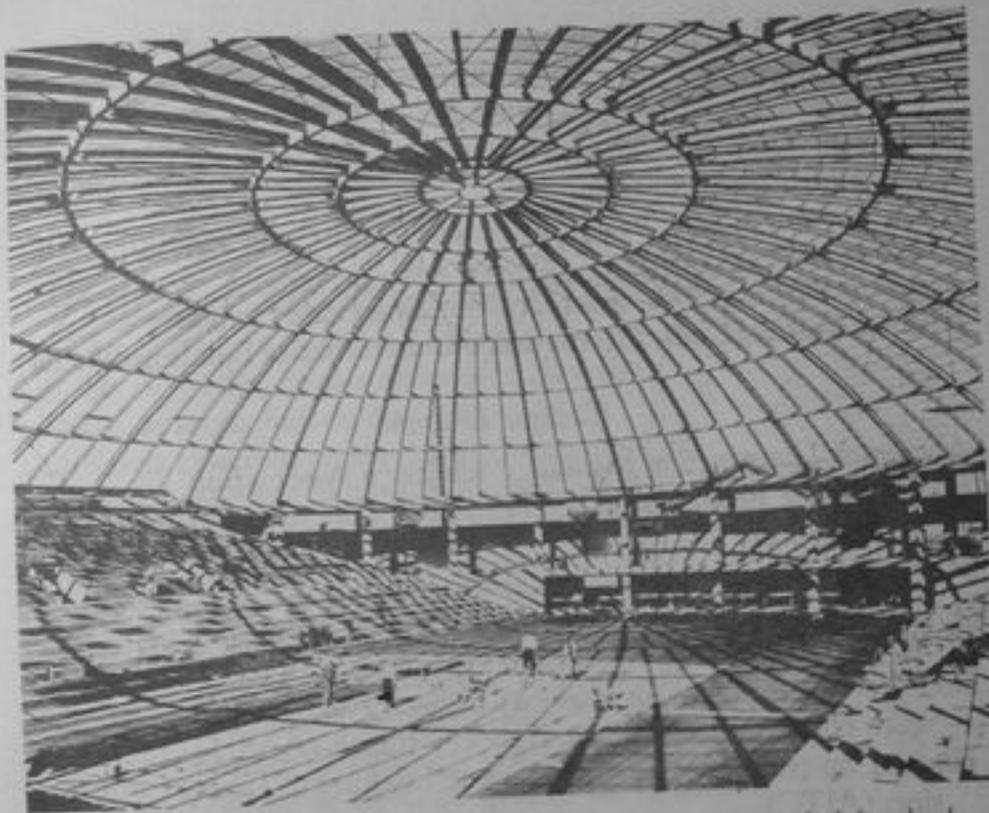


Fig. 1-12

Marcos. Los marcos se usan a menudo en edificios y se componen de vigas y columnas que están articuladas o bien son rígidas en sus conexiones, figura 1-12. Igual que las armaduras, los marcos pueden ser bidimensionales o tridimensionales. La carga en un marco ocasiona flexión en sus miembros, y debido a las conexiones rígidas, esta estructura es generalmente "indeterminada" desde el punto de vista del análisis. La resistencia de un marco se deriva de las interacciones de momento entre las vigas y las columnas en los nudos rígidos y, en consecuencia, los beneficios económicos de usar un marco dependen de la eficiencia que se obtiene al usar tamaños menores de vigas respecto a tamaños mayores en las columnas debido a la acción "viga-columna" causada por la flexión en los nudos.

Estructuras superficiales. Una estructura superficial está hecha de un material cuyo espesor es muy pequeño en comparación con sus otras dimensiones. Algunas veces este material es muy flexible y pue-
de tomar la forma de una tienda de campaña o de una estructura inflada con aire. En ambos casos, el material actúa como una mem-
brana sometida a tensión pura.

Las estructuras superficiales también pueden hacerse con materiales rígidos como concreto reforzado. En este caso pueden dársele formas de placas plegadas, cilindros o paraboloides hiperbólicos, y entonces se les llama placas delgadas o cascarones. Estas estructuras actúan como cables o arcos ya que soportan sus cargas principalmente en tensión o en compresión, con muy poca flexión. A pesar de esto, las



Las costillas y tráves anulares forman la estructura que sostiene la bóveda de techo de una pista para patinar sobre hielo.

placas o los cascarones son muy difíciles de analizar debido a la geometría tridimensional de sus superficies. Tal análisis va más allá del alcance de este texto y es materia de libros dedicados enteramente a ese tema.

1.3 Cargas

La carga de diseño de una estructura suele especificarse en códigos. En general, el ingeniero estructural trabaja con dos tipos de códigos: los códigos generales de construcción y los códigos de diseño. Los códigos generales de construcción especifican los requisitos de instituciones oficiales relativos a las cargas mínimas de diseño para estructuras y los estándares mínimos para las construcciones. Los códigos de diseño proporcionan normas técnicas detalladas y se usan para establecer los requisitos del diseño estructural. La tabla 1-1 muestra algunos de los códigos importantes usados en la práctica. Sin embargo, debe quedar claro que los códigos proporcionan sólo una guía general para el diseño. La responsabilidad final del diseño reside en el ingeniero estructural.

El diseño en sí de una estructura comienza con aquellos elementos que están sometidos a las cargas principales que debe tomar la estructura y procede en secuencia con los varios elementos de soporte hasta que se llega a la cimentación. Así, por ejemplo, en primer lugar se

Tabla 1-1 Códigos

<i>Códigos generales de construcción</i>
American National Standard Building Code, American National Standards Institute (ANSI)
Basic Building Code, Building Officials and Code Administrators International
Standard Building Code, Southern Building Code Congress
Uniform Building Code, International Conference of Building Officials
<i>Códigos de diseño</i>
Aluminum Construction Manual, Aluminum Association
Building Code Requirements for Reinforced Concrete, American Concrete Institute (ACI)
Manual of Steel Construction, American Institute of Steel Construction (AISC)
PCI Design Handbook, Prestressed Concrete Institute (PCI)
Standard Specifications for Highway Bridges, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)
Timber Construction Manual, American Institute of Timber Construction (AITC)
Manual for Railway Engineering, American Railway Engineering Association (AREA)

diseñaría la losa de piso de un edificio, seguida por las vigas, columnas y finalmente por las zapatas de la cimentación. Por tanto, para diseñar una estructura, es necesario primero especificar las cargas que actuarán sobre ella. Generalmente una estructura está sometida a varios tipos de cargas. A continuación se presenta un breve análisis de esas cargas para ilustrar cómo debe uno considerar sus efectos en la práctica.

Cargas muertas

Las *cargas muertas* consisten en los pesos de los diversos miembros estructurales y en los pesos de cualesquiera objetos que estén permanentemente unidos a la estructura. Entonces, para un edificio, las cargas muertas comprenden los pesos de las columnas, vigas y tráves, losas de piso, el techo, muros, ventanas, plomería, instalación eléctrica y otros dispositivos diversos.

En algunos casos, una carga muerta estructural puede estimarse satisfactoriamente por medio de fórmulas basadas en los pesos y tamaños de estructuras similares. Con experiencia, se puede también "estimar" la magnitud de esas cargas. Sin embargo, una vez determinados los materiales y tamaños de los diversos componentes de la estructura, sus pesos pueden determinarse a partir de tablas que dan

sus densidades. Una porción de una de tales tablas, tomada del American National Standard Building Code (Código estadounidense de normas de construcción), se da en la tabla 1-2. El cálculo de las cargas muertas con base en los datos tabulados en la tabla 1-2 es bastante directo, como se muestra en el ejemplo 1-1 de este texto.

Tabla 1-2 Cargas muertas mínimas de diseño*

	lb/ft ²
Muros	
Ladrillo de arcilla, de alta absorción, de 4 in.	34
Ladrillo de arena limosa, de 4 in.	38
Ladrillo de concreto de agregado grueso, de 4 in.	46
Ladrillo de concreto de agregado ligero, de 4 in.	33
Ladrillo de arcilla, de alta absorción, de 8 in.	69
Ladrillo de arcilla, de mediana absorción, de 8 in.	79
Ladrillo de arcilla, de baja absorción, de 8 in.	89
Ladrillo de arena limosa, de 8 in.	74
Ladrillo de concreto de agregado grueso, de 8 in.	89
Ladrillo de concreto de agregado ligero, de 8 in.	68
Bloque de concreto de agregado grueso, de 8 in.	55
Bloque de concreto de agregado grueso, de 12 in.	85
Bloque de concreto de agregado ligero, de 8 in.	35
Bloque de concreto de agregado ligero, de 12 in.	55
Mamparas	
Yeso sólido de 2 in.	20
Yeso sólido de 4 in.	32
Pies derechos de madera de 2 × 4, sin enyesar	4
Pies derechos de madera de 2 × 4, enyesadas por un lado	12
Pies derechos de madera de 2 × 4, enyesadas por los dos lados	20
Losas de concreto	
Concreto, grava reforzada, por pulgada de espesor	12½
Concreto, grava simple, por pulgada de espesor	12
Concreto reforzado, peso ligero, por pulgada de espesor	9
Concreto simple, peso ligero, por pulgada de espesor	8½
Concreto de ceniza volcánica, por pulgada de espesor	9
Techos	
Yeso sobre teja o concreto	5
Listones metálicos suspendidos y yeso	10
Tejas asfálticas	2
Tableros de fibra, $\frac{1}{2}$ in.	0.75

*Reproducida con autorización de la American National Standard Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ANSI A58.1-1982. Las copias de estas especificaciones pueden adquirirse en la ANSI, 1430 Broadway, Nueva York, N.Y. 10018.

Ejemplo 1-1

La viga de piso en la figura 1-13 se usa para soportar una losa de concreto reforzado de peso ligero de 6 ft. de ancho y 4 in. de espesor. El fondo de la losa está recubierto de yeso. Además, un muro de bloques de concreto de agregado ligero de 8 ft. de altura y 12 in. de ancho se apoya directamente sobre el patín superior de la viga. Determine la carga sobre la viga en libras por pie de longitud de viga.

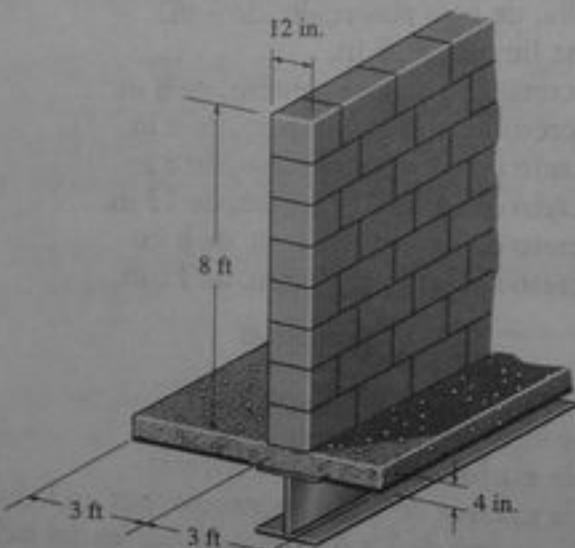


Fig. 1-13

Solución

Usando los datos en la tabla 1-2, tenemos

Losa de concreto	$[9 \text{ lb}/(\text{ft}^2 \cdot \text{in.})](4 \text{ in.})(6 \text{ ft}) = 216 \text{ lb/ft}$
Plafón de yeso	$(5 \text{ lb}/\text{ft}^2)(6 \text{ ft}) = 30 \text{ lb/ft}$
Muro de bloque	$(55 \text{ lb}/\text{ft}^2)(8 \text{ ft}) = 440 \text{ lb/ft}$
Carga total	686 lb/ft Resp.

Cargas vivas

Las cargas vivas pueden variar en magnitud y localización, y pueden ser causadas por los pesos de objetos colocados temporalmente sobre una estructura, por vehículos en movimiento o por fuerzas naturales. Las cargas vivas mínimas especificadas en los códigos se determinan estudiando la historia de sus efectos sobre estructuras existentes. Usualmente, esas cargas incluyen un margen para tener una protección contra deflexiones excesivas o sobrecargas repentinas. En el capítulo 6 veremos procedimientos para especificar la localización apropiada de las cargas vivas en la estructura de modo que éstas occasionen los mayores esfuerzos o deflexiones en los miembros. Veremos ahora diversos tipos de cargas vivas.

Cargas en edificios. Se supone que los pisos de edificios están sometidos a *cargas vivas uniformes*, que dependen del propósito para el cual el edificio es diseñado. Esas cargas están tabuladas en códigos locales, estatales o nacionales. Un ejemplo representativo de esas *cargas mínimas uniformes*, tomadas del American National Standard Building Code, se muestra en la tabla 1-3. Estos valores se determinaron con base en la historia de carga de varios edificios. Ellos incluyen márgenes como protección contra la posibilidad de sobrecarga debido a cargas de construcción y requisitos de servicio. Además de las cargas uniformes, algunos códigos especifican *cargas vivas concentradas* mínimas, causadas por carretillas, automóviles, etc., que deben aplicarse también en cualquier punto del sistema de piso. Por ejemplo, cargas vivas, tanto uniformes como concentradas deben considerarse en el diseño de la losa de un estacionamiento para automóviles.

Tabla 1-3 Cargas vivas mínimas*

Ocupación o uso	Carga viva (lb/ft ²)	Ocupación o uso	Carga viva (lb/ft ²)
Áreas de reunión y teatros			
Asientos fijos	60	Edificios de oficinas	100
Asientos removibles	100	Vestíbulos	50
Salones de baile	100	Oficinas	
Garajes (sólo automóviles)	50	Residencial	
Bodegas de almacenamiento		Casas (una y dos familias)	40
Ligero	125	Hoteles y casas multifamiliares	40
Pesado	250	Salones de clase	40

* Reproducido con autorización de la American National Standard Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ANSI A58.1-1982, pág. 10.

Para algunos tipos de estructuras muchos códigos permiten una reducción en la carga viva uniforme para un piso, ya que es improbable que la carga viva prescrita se presente simultáneamente en la estructura entera en un momento dado. Por ejemplo, ANSI A58.1-1982 permite una reducción de la carga viva en un miembro que tenga un área de influencia de 400 ft^2 o mayor. Esta carga viva reducida se calcula usando la siguiente ecuación.

$$L = L_o \left(0.25 + \frac{15}{\sqrt{A_I}} \right) \quad (1-1)$$

donde

L = carga viva de diseño reducida por pie cuadrado de área soportada por el miembro

L_o = carga viva de diseño no reducida por pie cuadrado de área soportada por el miembro (véase la tabla 1-3)

A_I = área de influencia en pie cuadrado igual a cuatro veces el área de piso tributaria o portadora de carga efectiva para una columna, y a dos veces el área de piso tributaria o portadora de carga efectiva para una viga.*

La carga viva reducida definida por la ecuación 1-1 está limitada a no menos que 50% de L_o para miembros que soportan un piso o a no menos que 40% de L_o para miembros que soportan más de un piso. Ninguna reducción se permite para estructuras usadas para reuniones públicas, garajes o techos. El ejemplo 1-2 ilustra su aplicación.

Cargas de puentes. En Estados Unidos, las cargas vivas de diseño para puentes carreteros están especificadas en el código de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (Asociación Estadounidense de Funcionarios del Transporte y Carreteras Estatales); el diseño de puentes ferrocarrileros se basa en las especificaciones de la American Railway Engineering Association (AREA) (Asociación Estadounidense de Ingeniería Ferroviaria). Ambos códigos dan las cargas y la separación de las ruedas de diferentes tipos de camiones y trenes. Para el diseño, una serie de tales cargas se colocan una junto a otra dentro de regiones críticas del puente y se calculan los esfuerzos máximos por carga viva en los miembros. Además, como los vehículos están en movimiento continuo, cualquier rebote que ocurre implica un impacto de las cargas sobre el puente. Para tomar esto en cuenta, los códigos AASHTO y AREA dan fórmulas empíricas usadas para determinar la fracción de impacto, que especifica el porcentaje en que debe incrementarse la carga viva máxima. En la sección 6.6 se verán ejemplos específicos de tales fórmulas así como de las cargas de vehículos.

* Ejemplos específicos sobre la determinación de áreas tributarias para vigas y columnas se dan en la sección 2.1.

Ejemplo 1-2

Un edificio de oficinas de dos niveles tiene columnas interiores separadas entre sí a 22 ft en dos direcciones perpendiculares. Si la carga de techo (plano) es de 20 lb/ft², determine la carga viva reducida soportada por una columna interior típica de la planta baja.

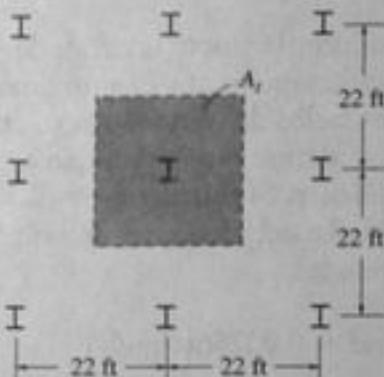


Fig. 1-14

Solución

Como se muestra en la figura 1-14, cada columna interior tiene un área tributaria o área cargada efectiva de $A_t = (22 \text{ ft})(22 \text{ ft}) = 484 \text{ ft}^2$. Una columna de la planta baja soporta entonces una carga viva de techo de

$$F_R = (20 \text{ lb/ft}^2)(484 \text{ ft}^2) = 9680 \text{ lb} = 9.68 \text{ k}^*$$

Esta carga no se reduce, ya que no es una carga de piso. Para el segundo piso, la carga viva se toma de la tabla 1-3: $L_o = 50 \text{ lb/ft}^2$. Como $A_t = 4A_T = 4(484 \text{ ft}^2) = 1936 \text{ ft}^2$ y $1936 \text{ ft}^2 > 400 \text{ ft}^2$, la carga viva puede reducirse usando la ecuación 1-1. Así,

$$L = 50 \left(0.25 + \frac{15}{\sqrt{1936}} \right) = 29.55 \text{ lb/ft}^2$$

La reducción de carga aquí es $(29.55/50)100\% = 59.1\% > 50\%$. Por lo tanto,

$$F_F = (29.55 \text{ lb/ft}^2)(484 \text{ ft}^2) = 14,300 \text{ lb} = 14.3 \text{ k}$$

La carga viva total soportada por la columna de la planta baja es entonces

$$F = F_R + F_F = 9.68 \text{ k} + 14.3 \text{ k} = 24.0 \text{ k} \quad \text{Resp.}$$

*La unidad k se refiere a "kip", o sea, kilolibras. Así, 1 k = 1000 lb.

Cargas de viento. Cuando las estructuras impiden el flujo del viento, la energía cinética de éste se convierte en energía potencial de presión, lo que causa la carga de viento. El efecto del viento sobre una estructura depende de la densidad y velocidad del aire, del ángulo de incidencia del viento, de la forma y rigidez de la estructura y de la rugosidad de su superficie. Para propósitos de diseño, las cargas de viento pueden tratarse usando un procedimiento estático o uno dinámico.

En el *procedimiento estático*, la fluctuación de la presión causada por un viento soplando continuamente se aproxima por una *presión media* que actúa sobre los lados de barlovento y sotavento de la estructura. Esta presión q se define por su energía cinética $q = \frac{1}{2} \rho v^2$, donde ρ es la densidad del aire. Si tomamos $\rho = 2.376 (10^{-3})$ slug/ft³ y especificamos la velocidad v del viento en millas por hora, tenemos después de convertir unidades,

$$q \text{ psf} = 0.00256(v \text{ mi/h})^2 \quad (1-2)$$

Aquí q se mide en libras por pie cuadrado y actúa sobre una superficie plana perpendicular a la velocidad del viento. Un viento de 100 mph suele usarse para el diseño de muchas estructuras de poca altura. Sin embargo, valores más exactos de la velocidad, que dependen de la localización geográfica de la estructura y de su elevación desde el suelo, pueden obtenerse en los *mapas de zonificación eólica*, dadas generalmente en los códigos.* Esos mapas son elaborados por el Servicio Meteorológico y representan en general la máxima velocidad del viento en una elevación especificada sobre el terreno, durante un periodo de recurrencia de 50 años. La elevación sobre el terreno es aquí importante ya que la velocidad del viento crece con la elevación. En consecuencia, cuanto más alta es la estructura, más severa resulta la carga de viento.

Una vez calculada la presión media q del viento, su magnitud se multiplica por varios coeficientes para obtener la presión p estática de diseño que se aplica a la estructura. Por ejemplo, en el código ANSI A58.1-1982 hay tres coeficientes que toman en cuenta la importancia de la estructura, la posibilidad de ráfagas de viento y la diferencia de presión afuera y dentro de la estructura. La selección de esos factores depende de la altura y orientación de la estructura, de sus características de vibración y del número de aberturas en la estructura. En el reporte ASCE se usan también coeficientes geométricos o de forma. Por ejemplo, para un edificio con *lados verticales*, el factor de forma para el lado de barlovento es de 0.8 y para el lado (opuesto)

* Véase "Wind Forces on Structures", Trans. ASCE, vol. 126, parte 2, 1961; también *Building Code Requirements for Minimum Design Loads in Buildings and Other Structures*, ANSI A58.1-1982.

de sotavento es de 0.5. Por tanto, para un viento de 100 mph, la presión (o empuje) que actúa sobre el lado de barlovento es $p = 0.8q = 0.8(0.00256)(100)^2 = 20.5 \text{ lb/ft}^2$ y la succión (o tensión) sobre el lado de sotavento es $p = 0.5q = 0.5(0.00256)(100)^2 = 12.8 \text{ lb/ft}^2$.

Para edificios altos o cuya forma o localización los hace sensibles al viento, se recomienda usar un *procedimiento dinámico* para determinar las cargas de viento. Esto requiere efectuar pruebas en túneles de viento de un modelo a escala del edificio y sus alrededores que simule el ambiente natural. Los efectos de la presión del viento sobre el edificio se determinan a partir de transductores de presión unidos al modelo. Además, si el modelo tiene características de rigidez en escala apropiada a la del edificio, pueden determinarse entonces las deflexiones dinámicas de éste.

Cargas de nieve. En algunas regiones, las cargas en techos debidas a la nieve pueden ser muy severas, por lo que la protección contra posibles fallas resulta muy importante. Las cargas de diseño dependen típicamente de la forma general del edificio y geometría del techo, de la exposición al viento y de la localización. Igual que en el caso del viento, las cargas de nieve se determinan generalmente con ayuda de un mapa de zonas, el cual suele registrar intervalos de recurrencia de 50 años de alturas extremas de nieve. Por ejemplo, en algunos estados del oeste y noreste de Estados Unidos, es común usar 45 lb/ft^2 para el diseño. Ningún código puede cubrir todas las implicaciones de este tipo de carga. En vez de ello, el ingeniero debe usar su buen juicio respecto a la posibilidad de considerar efectos adicionales causados por lluvia, movimiento de la nieve acumulada y si al edificio diseñado debe proporcionársele calefacción.

Cargas de sismo. Los sismos producen cargas sobre una estructura por medio de la interacción del movimiento del suelo y las características de respuesta de la estructura. Esas cargas resultan de la distorsión en la estructura causada por el movimiento del suelo y la resistencia lateral de ésta. Sus magnitudes dependen de la cantidad y tipo de aceleraciones del suelo, así como de la masa y rigidez de la estructura. Para adquirir una idea de la naturaleza de las cargas sísmicas, considere el modelo simple estructural mostrado en la figura 1-15. Este modelo puede representar un edificio de un solo piso, donde el bloque superior es la masa "concentrada" del techo y el bloque intermedio es la rigidez concentrada de todas las columnas del edificio. Durante un sismo, el suelo vibra tanto horizontal como verticalmente. El movimiento vertical es ligero y usualmente se desprecia en el diseño. Como consecuencia de las aceleraciones horizontales, las fuerzas cortantes en la columna tratan de poner el bloque en movimiento secuencial con el suelo. Si la columna es rígida y el bloque tiene una masa pequeña, el periodo de vibración del bloque será corto y el bloque se acelerará con el mismo movimiento que el

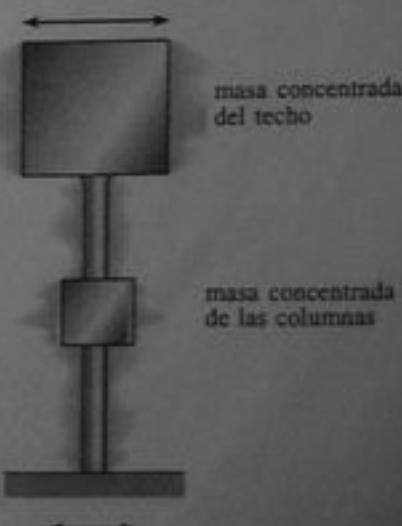


Fig. 1-15

Otras cargas naturales. Otros distintos tipos de cargas también deben considerarse en el diseño de una estructura, dependiendo de su localización o uso. Entre éstas se cuentan el efecto de explosiones, cambios de temperatura y los asentamientos diferenciales de la cimentación. Igual que para los otros efectos mencionados antes, los códigos de diseño especifican usualmente los límites de esas cargas y las combinaciones en que deben aplicarse simultáneamente para causar los efectos máximos realistas de carga viva sobre la estructura.

BIBLIOGRAFÍA

American Institute of Steel Construction, Inc. *Manual of Steel Construction*, 8th ed., AISC, Inc., New York, 1980.

American National Standard Building Code Requirements for Minimum Design Loads in Buildings and Other Structures, 1990, Am. Nat. Standards Inst., New York.

American Society of Civil Engineers, "Locomotive Loadings for Railroad Bridges," *Transactions*, ASCE, Vol. 86, 1923.

American Society of Civil Engineers, "Wind Bracing in Steel Buildings," *Transactions*, ASCE, Vol. 105, 1940, 1713-1739.

American Society of Civil Engineers, "Wind Forces on Structures," *Transactions*, ASCE, Structural Division, 84, Part I, 1958, and 126, Part II, 1961.

Basic Building Code, Building Officials and Code Administrators International, Chicago, Il.

PCI Design Handbook, Prestressed Concrete Institute, Chicago, 1971.

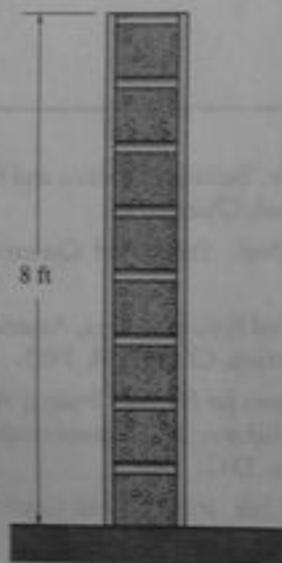
Specifications for Steel Railway Bridges, American Railway Engineering Association, Chicago, Il, 1965.

Standard Specifications for Highway Bridges, American Association of State Highway and Transportation Officials, 14th ed., Washington, D.C., 1989.

Uniform Building Code, International Conference of Building Officials, Whittier, Ca., 1988.

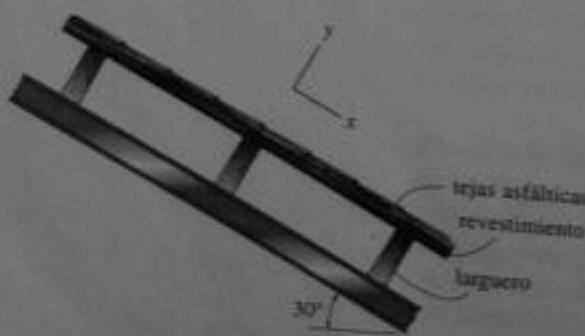
PROBLEMAS

1-1. La pared de un edificio consiste en bloques de concreto de agregado ligero de 12 in. con enyesado de 2 in. por ambos lados. Si el muro es de 8 ft de altura, determine la carga, en libras por pie de longitud de muro, que éste ejerce sobre el piso.



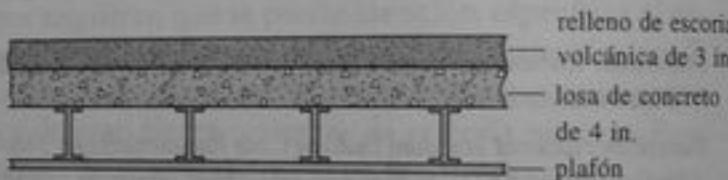
Prob. 1-1

1-2. La viga soporta el techo hecho de tejas asfálticas y tablones de revestimiento de madera. Si los tablones tienen un espesor de $1\frac{1}{2}$ in. y un peso específico de 50 lb/ft^3 y la inclinación del techo es de 30° , determine la carga muerta (por pie cuadrado) del techo que es soportada en las direcciones x y y por los largueros.



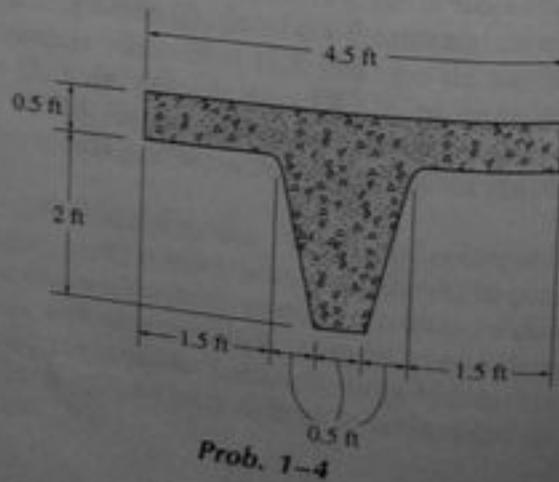
Prob. 1-2

1-3. El segundo piso de una fábrica de manufacturas ligeras está construido con una losa de concreto reforzado de 4 in. de espesor recubierta con una capa de concreto de escoria volcánica de 3 in. de espesor, como se muestra en la figura. Si el plafón suspendido del primer piso es de yeso con listones metálicos, determine la carga muerta de diseño en libras por pie cuadrado de área de piso.



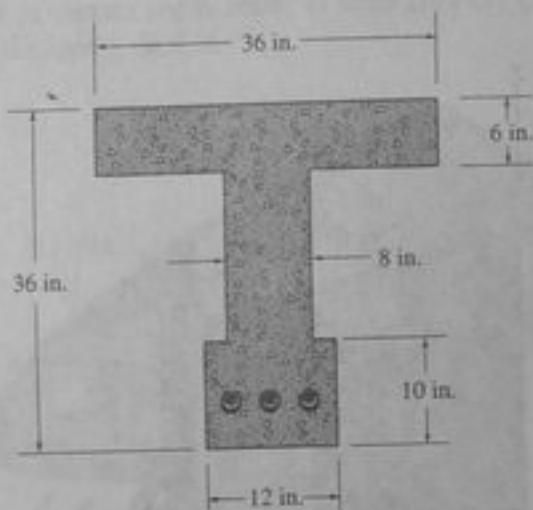
Prob. 1-3

***1-4.** La viga precolada de piso está hecha de concreto con peso específico de 150 lb/ft^3 . Si va a usarse para el piso de un edificio de oficinas, calcule sus cargas muerta y viva por pie de longitud de viga.



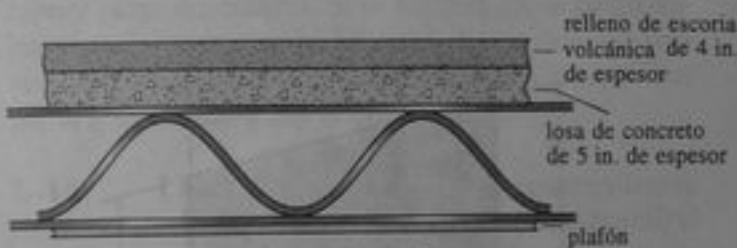
Prob. 1-4

1-5. Una viga T usada en una bodega de almacenamiento pesado está hecha de concreto con peso específico de 125 lb/ft^3 . Determine la carga muerta por pie de longitud de viga y la carga viva sobre la parte superior de la viga por pie de longitud de viga. Desprecie el peso del acero de refuerzo.



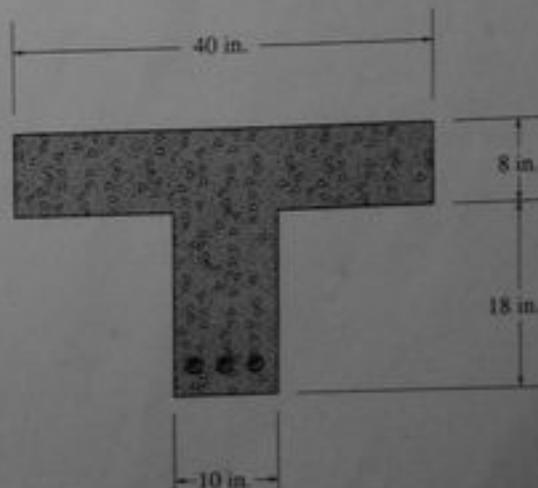
Prob. 1-5

1-7. El segundo piso de una fábrica de manufacturas ligeras está construido con una losa de concreto reforzado de 5 in. de espesor recubierta con una capa de concreto de escoria volcánica de 4 in. de espesor, como se muestra en la figura. Si el plafón suspendido del primer piso es de yeso con listones metálicos, determine la carga muerta de diseño en libras por pie cuadrado de área de piso.



Prob. 1-7

*1-8. La viga T usada para soportar el piso de una bodega de almacenamiento ligero está hecha de concreto con peso específico de 150 lb/ft^3 . Determine la carga muerta y la carga viva por pie de longitud de la viga. Desprecie el peso del acero de refuerzo.

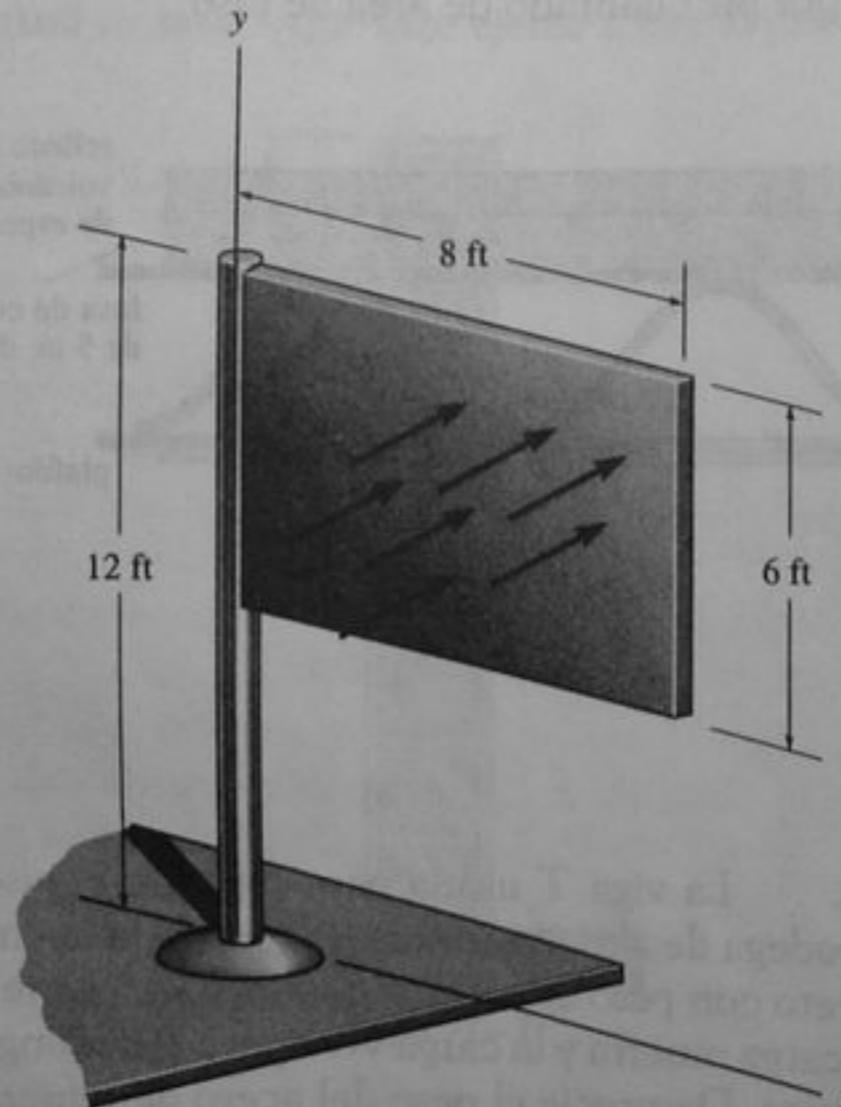


Prob. 1-8

1-6. El piso de una bodega de almacenamiento pesado está hecho de concreto reforzado de peso ligero de 6 in. de espesor. Si el piso es una losa con longitud de 15 ft y ancho de 10 ft, determine la fuerza resultante causada por la carga muerta y por la carga viva.

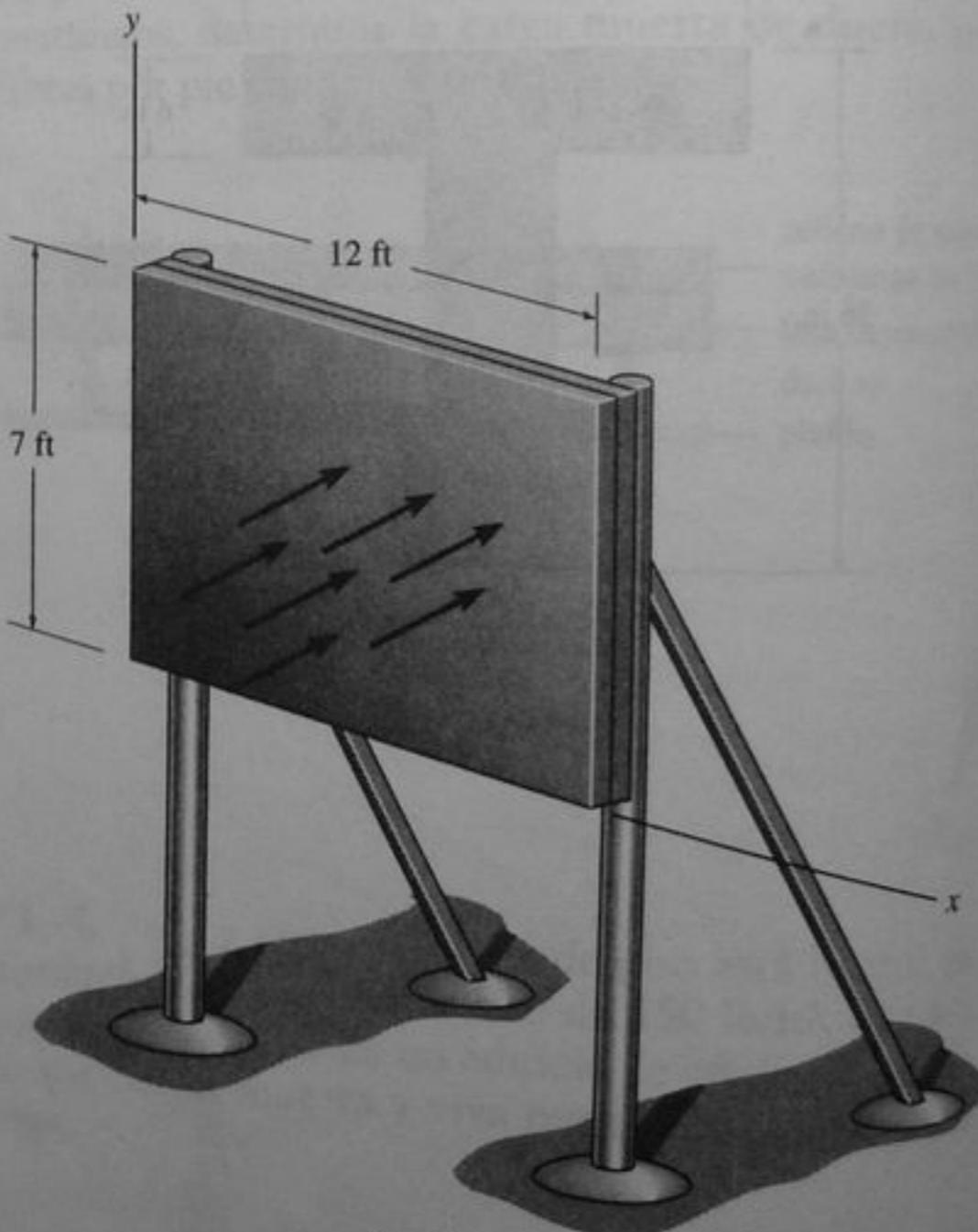
Capítulo 1 Tipos de estructuras y cargas

1–9. La cara de un letrero está sometida a un viento de 125 millas por hora. Determine la fuerza resultante del viento y especifique las coordenadas x y y de su posición sobre el letrero. Use un factor de forma de 0.8.



Prob. 1–9

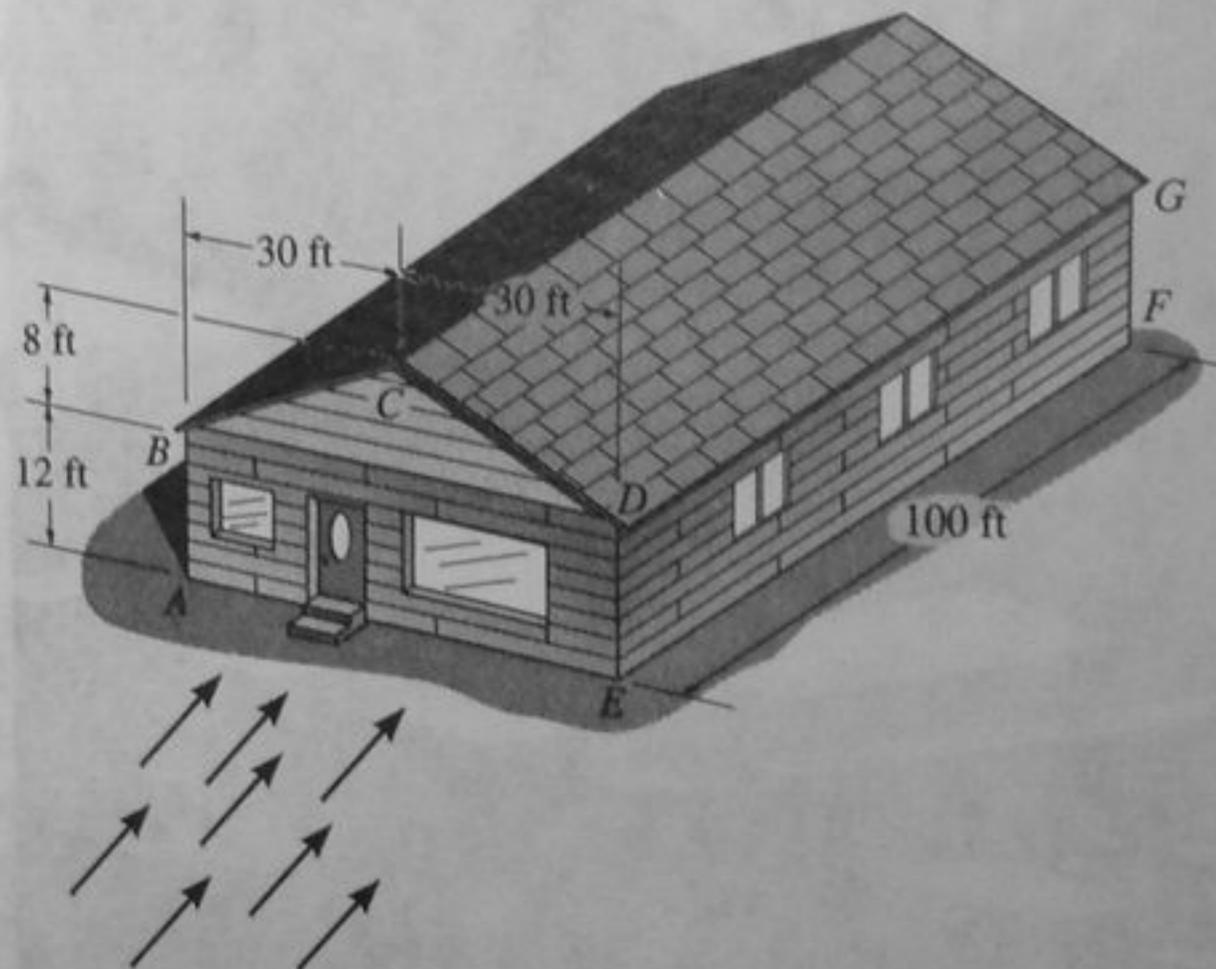
1–10. Determine la presión p que actúa sobre la cara del letrero sometido a un viento de 75 millas por hora. Use un factor de forma de 0.8. Si el letrero tiene un ancho de 12 ft y una altura de 7 ft, como se indica, ¿cuál es la fuerza resultante de esta presión? Especifique las coordenadas x y y sobre la cara del letrero en que esta fuerza actúa.



Prob. 1–10

1-11. El viento sopla directamente sobre el frente del edificio con una velocidad de 100 millas por hora. Si el factor de forma para la pared ABCDE en el lado de barlovento es de 0.8, determine la fuerza resultante de empuje sobre esta pared.

*1-12. Resuelva el problema 1-11 considerando que el viento sopla sobre el lado DEFG. Use un factor de forma de 0.8.



Probs. 1-11/1-12

1-13. Una escuela de dos niveles tiene columnas interiores separadas entre sí por 15 ft en dos direcciones perpendiculares. Si se estima que la carga sobre el techo plano es de $20 \text{ lb}/\text{ft}^2$, determine la carga viva reducida soportada por una columna típica interior en (a) la planta baja y (b) el primer piso.

1-14. Un hotel de tres niveles tiene columnas interiores separadas entre sí por 20 ft en dos direcciones perpendiculares. Si se estima que la carga sobre el techo plano es de $30 \text{ lb}/\text{ft}^2$, determine la carga viva soportada por una columna típica interior en (a) la planta baja y (b) el primer piso.

1-15. Un edificio de oficinas de cuatro niveles tiene columnas interiores separadas entre sí por 30 ft en dos direcciones perpendiculares. Si se estima que la carga sobre el techo plano es de $30 \text{ lb}/\text{ft}^2$, determine la carga viva reducida soportada por una columna interior típica en la planta baja.



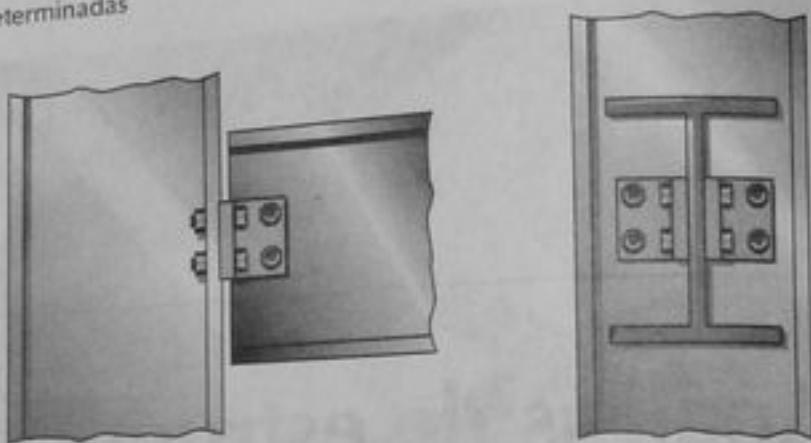
A menudo, los elementos de una estructura, como las vigas y tráves de esta estructuración, están conectados entre sí, de tal forma que el análisis resulta estáticamente determinado.

Análisis de estructuras estáticamente determinadas

Los tipos de estructuras más comunes que el ingeniero tiene que analizar son las estructuras planas sometidas a un sistema de fuerzas en el mismo plano en que están contenidas. Por ello, en este capítulo dirigiremos nuestra atención al análisis de este tipo de estructuras. Comenzamos analizando la importancia de escoger un modelo analítico apropiado para una estructura, de modo que las fuerzas en ella puedan determinarse con precisión razonable. Luego estudiamos los criterios necesarios para la estabilidad estructural. Finalmente, se presenta el análisis de las estructuras planas estáticamente determinadas, conectadas por pasadores.

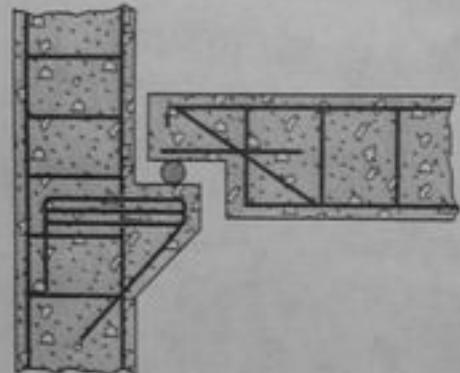
2.1 La estructura idealizada

El análisis exacto de una estructura nunca puede en realidad llevarse a cabo, ya que siempre tienen que hacerse estimaciones de las cargas y de las resistencias de los materiales que componen la estructura. Además, los puntos de aplicación de las cargas deben también estimarse. Por esto, es importante que el ingeniero estructural desarrolle la habilidad de modelar o idealizar una estructura, de tal manera que él pueda efectuar un análisis práctico de las fuerzas en los miembros. En esta sección desarrollaremos los procedimientos básicos necesarios para hacer esto.



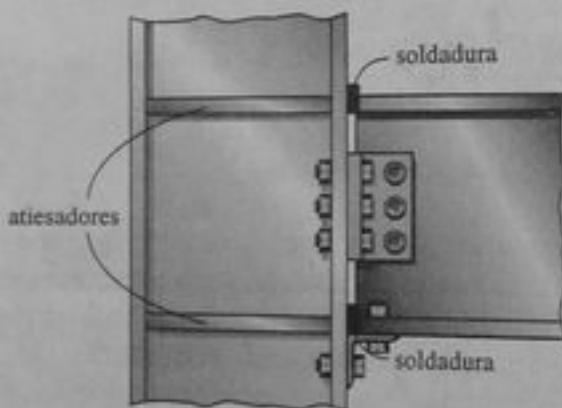
conexión típica "articulada" (en metal)

(a)



conexión típica con "apoyo de rodillo" (en concreto)

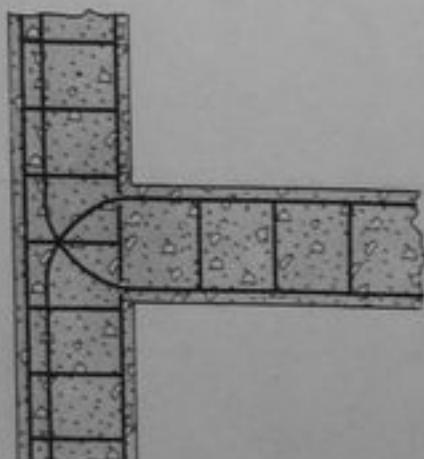
(a)



conexión típica "empotrada" (en metal)

(b)

Fig. 2-1



conexión típica "empotrada" (en concreto)

(b)

Fig. 2-2

Conexiones en los soportes

Los miembros estructurales se conectan entre sí de varias maneras que dependen de la intención del diseñador. Los dos tipos de uniones que se especifican con mayor frecuencia son la conexión por pasador y el nudo rígido. Una conexión por pasador permite pequeñas rotaciones, mientras que un nudo rígido no permite ninguna rotación relativa entre los miembros conectados y es, en consecuencia, más cara de fabricar. Ejemplos de esas conexiones, en metal y en concreto, respectivamente, se muestran en las figuras 2-1 y 2-2. En la mayoría de las estructuras de madera se supone que los miembros están conectados por pasador, ya que la unión a sus soportes con pernos o clavos, no restringe suficientemente la rotación de uno respecto al otro.

Los modelos idealizados usados en el análisis estructural que representan soportes de pasador y empotramientos así como nudos de

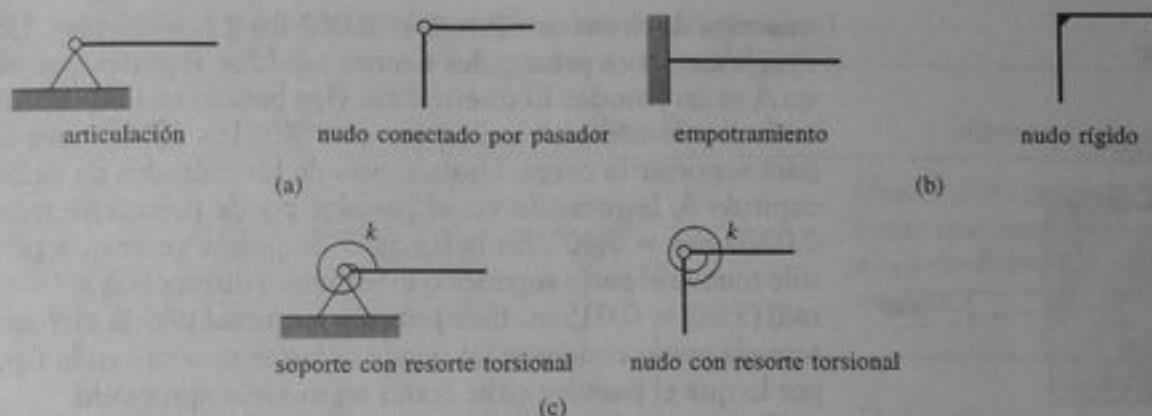


Fig. 2-3

pasador y nudos rígidos, se muestran en las figuras 2-3a y 2-3b. En realidad todas las conexiones tienen cierta rigidez respecto a rotaciones debido a la fricción y al comportamiento del material; por ello, un modelo más apropiado para un soporte o para un nudo sería el mostrado en la figura 2-3c. Si la constante k torsional del resorte es igual a cero, la unión es de pasador (articulación), y si $k \rightarrow \infty$, la unión o nudo es rígido.

Al seleccionar un modelo particular para cada soporte o nudo, el ingeniero debe ser consciente de cómo las hipótesis afectarán el desempeño real del miembro y de si las hipótesis son razonables para el diseño estructural. Por ejemplo, considere la viga de la figura 2-4a, que se usa para soportar una carga concentrada P . La conexión por medio de un perfil angular en el soporte A es como la de la figura 2-1a y puede por tanto idealizarse como un soporte típico de pasador. Además, el soporte en B proporciona un punto de contacto liso aproximado, por lo que puede idealizarse como un rodillo. El espesor de la viga puede despreciarse por ser pequeño en comparación con su longitud, de ahí que el modelo idealizado de la viga sea como se muestra en la figura 2-4b. El análisis de las cargas en esta viga debe dar resultados muy aproximados al análisis de las cargas en la viga real. Para mostrar que el modelo es apropiado, considere el caso específico de

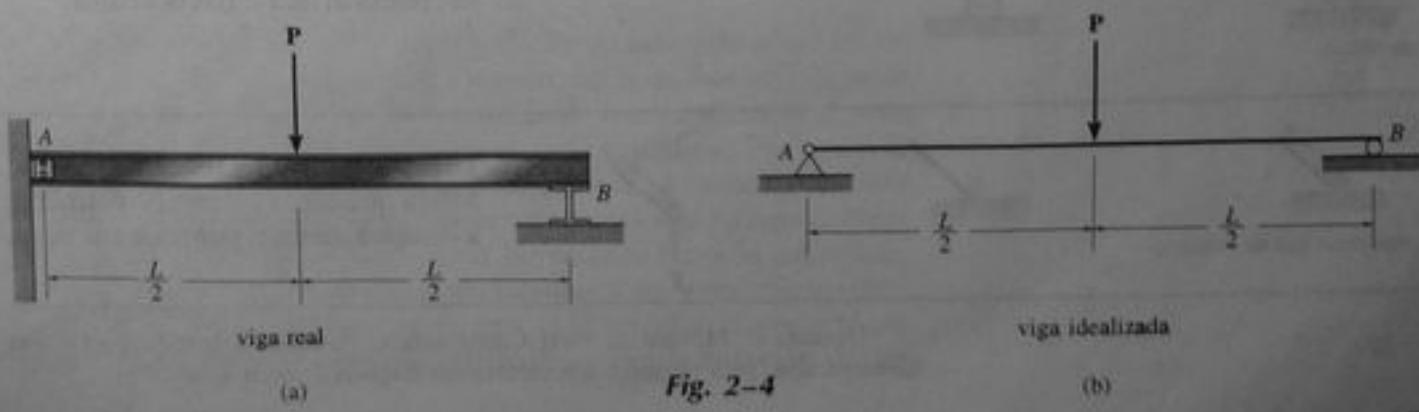
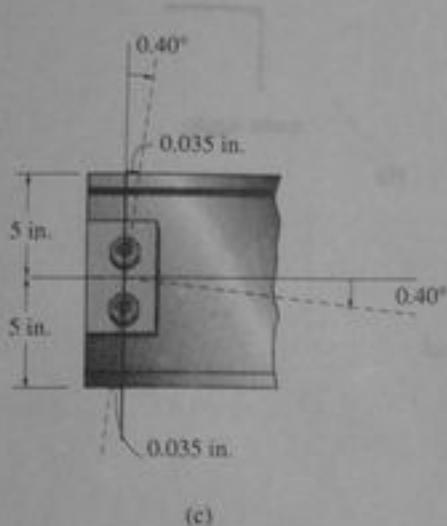


Fig. 2-4



(c)

una viga de acero con $P = 8 \text{ k}$ (8,000 lb) y $L = 20$ pies. Una de las simplificaciones principales hechas aquí fue suponer que el soporte en A es un pasador. El diseño de la viga basado en los procedimientos estándar de código,* indica que una W 11 × 22 debe ser adecuada para soportar la carga. Usando uno de los métodos de deflexión del capítulo 8, la rotación en el pasador puede calcularse igual a $\theta = 0.0070 \text{ rad} = 0.40^\circ$. En la figura 2-4c puede verse que tal rotación sólo mueve el patín superior o inferior una distancia $\Delta = \theta r = (0.0070 \text{ rad})(5 \text{ in}) = 0.035 \text{ in}$. Esta pequeña magnitud podría ciertamente ser tomada por la conexión fabricada como se muestra en la figura 2-1a, por lo que el pasador sirve como un modelo apropiado.

Otros tipos de conexiones muy comunes en estructuras coplanares se incluyen en la tabla 2-1. Es importante poder reconocer los símbolos para esas conexiones y los tipos de reacciones que ellas ejercen sobre los miembros conectados. Esto puede hacerse fácilmente observando cómo la conexión impide cualquier grado de libertad o desplazamiento del miembro. En particular, el soporte desarrollará una

Tabla 2-1 Soportes para estructuras coplanares

Tipo de conexión	Símbolo idealizado	Reacción	Número de incógnitas
(1) cable ligero eslabón sin peso			Una incógnita. La reacción es una fuerza que actúa en la dirección del cable o eslabón.
(2) rodillos mecedoras			Una incógnita. La reacción es una fuerza que actúa perpendicularmente a la superficie en el punto de contacto. Simbólicamente, la fuerza puede tener cualquier sentido (esto es, hacia arriba o hacia abajo).
(3) superficie lisa de contacto			Una incógnita. La reacción es una fuerza que actúa perpendicularmente a la superficie en el punto de contacto.

*Usando el *Manual of Steel Construction*, American Institute of Steel Construction, para un acero con esfuerzo de fluencia $F_y = 36 \text{ k/in}^2$.

Tabla 2-1 Soportes para estructuras coplanares (continuación)

Tipo de conexión	Símbolo idealizado	Reacción	Número de incógnitas
(4) collarín liso conectado a un pasador			Una incógnita. La reacción es una fuerza que actúa perpendicularmente a la superficie en el punto de contacto.
(5) pasador o articulación lisa			Dos incógnitas. Las reacciones son dos componentes de fuerza.
(6) corredora			Dos incógnitas. Las reacciones son una fuerza y un momento; simbólicamente, pueden tener cualquier sentido.
(7) empotramiento			Tres incógnitas. Las reacciones son el momento y las dos componentes de fuerza.

fuerza sobre el miembro si impide la translación de éste y desarrollará un momento si impide su rotación. Por ejemplo, un miembro en contacto con una superficie lisa (3) se ve impedido de trasladarse sólo en una dirección, que es perpendicular o normal a la superficie. Por tanto, la superficie ejerce sólo una fuerza normal F sobre el miembro en esta dirección. La magnitud de esta fuerza representa una incógnita. Note también que el miembro puede girar libremente sobre la superficie, por lo que no puede desarrollarse un momento en la superficie sobre el miembro. Otro ejemplo es el caso (7) en que el soporte de empotramiento impide tanto la translación como la rotación de un

miembro en el punto de la conexión. Por tanto, este tipo de soporte ejerce dos componentes de fuerza y un momento sobre el miembro. La "rotación" del momento se encuentra en el plano de la página ya que el giro es impedido en ese plano. Por tanto, se tienen tres incógnitas en un empotramiento.

En realidad, todos los soportes estructurales ejercen *cargas superficiales distribuidas* sobre los miembros en contacto. Las fuerzas y momentos concentrados que se muestran en la tabla 2-1 representan las resultantes de esas distribuciones de carga. Esta representación es, por supuesto, una idealización; sin embargo, se usa aquí ya que el área de la superficie sobre la que actúa la carga distribuida es considerablemente menor que el área total superficial de los miembros conectados.

Estructura idealizada

Una vez expuestas las diversas maneras en que las conexiones en una estructura pueden idealizarse, podemos ahora analizar algunos de los medios usados por los ingenieros para representar los sistemas estructurales con base en modelos idealizados.

Como primer ejemplo consideremos la grúa viajera en la figura 2-5a. Para el análisis estructural podemos despreciar el espesor de los dos miembros principales y supondremos que el nudo B es rígido por construcción. Además, la conexión del soporte en A puede modelarse como un empotramiento y los detalles del trole pueden excluirse. Así, los miembros de la estructura idealizada se representan por dos líneas unidas, y la carga sobre el gancho se representa por una sola fuerza concentrada F, figura 2-5b. Esta estructura idealizada que se muestra aquí como un *dibujo de línea* puede ahora usarse como medio para aplicar los principios del análisis estructural que finalmente conducirá al diseño de sus dos miembros principales.

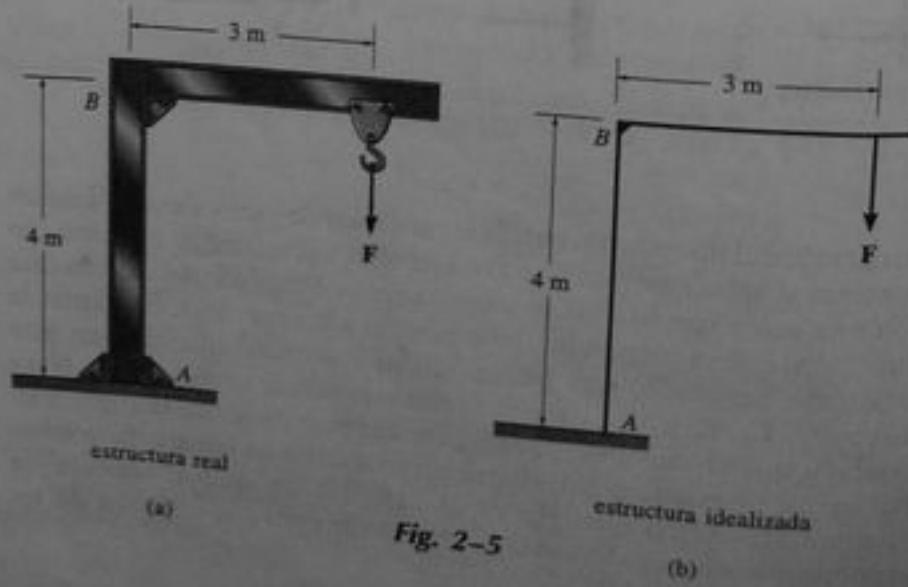
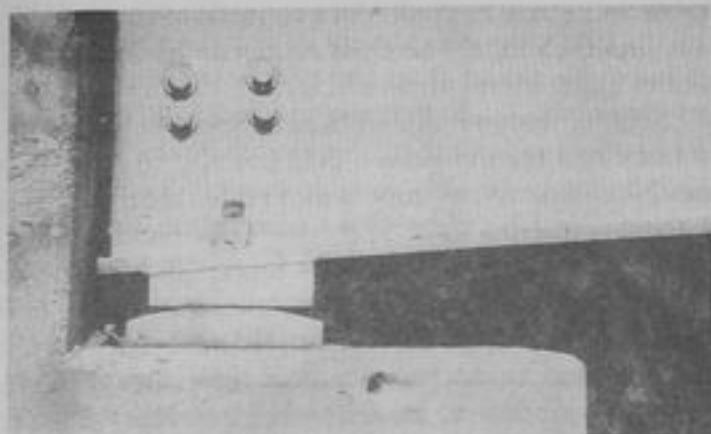


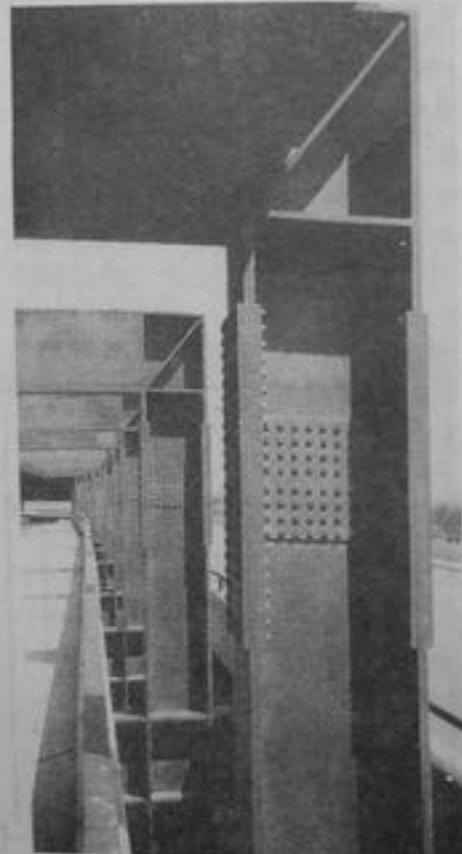
Fig. 2-5
(a) *estructura idealizada*
(b)



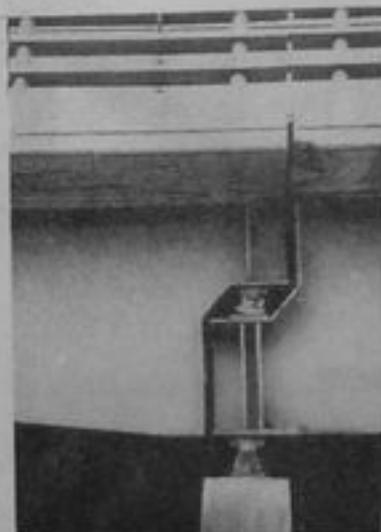
Soporte típico de mecedora o balancín usado para la trabe de un puente.



Este soporte está hecho con un material de baja resistencia a la fricción; por ello, puede modelarse como un rodillo.



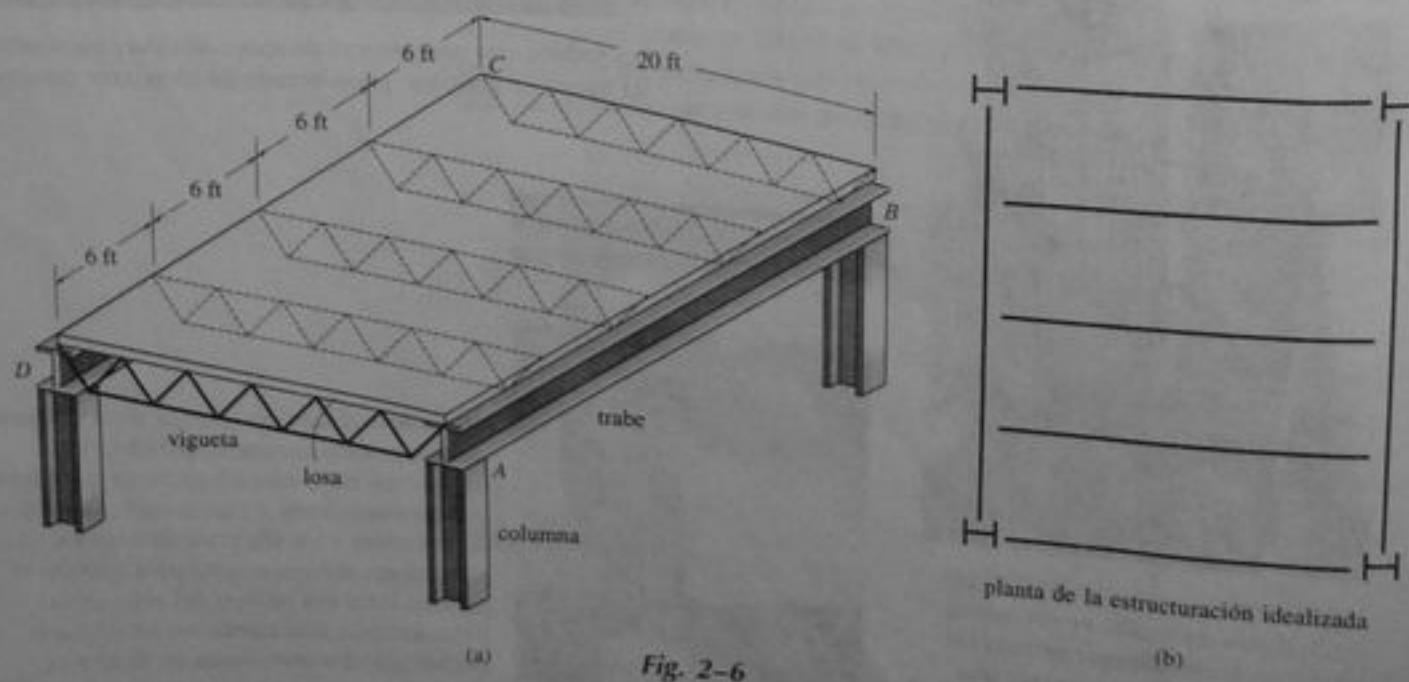
Una conexión soldada típica de un nudo rígido de rodilla en un marco de acero. Note cómo las placas de empalme se usan para formar una conexión rígida de columna.



Los rodillos con sus cojinetes de apoyo se usan para soportar las trabes de concreto preeforzado de un puente carretero.

Observe la dilatación térmica de la cubierta de este puente carretero, debido a la inclinación de la mecedora. Note también el uso de atiesadores o placas verticales sobre la mecedora y los soportes de pasador. Los atiesadores son necesarios para impedir el pandeo local del patín o del alma de la trabe armada, que puede ser ocasionado por las grandes reacciones en el apoyo.

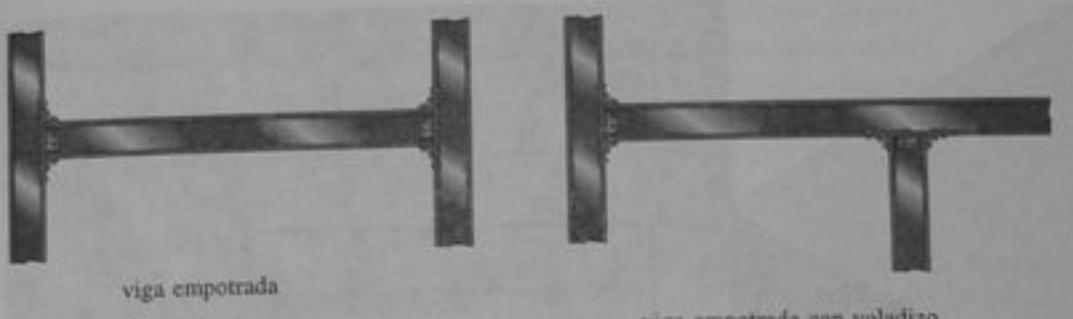
Las vigas y tráves se usan a menudo para soportar pisos de edificios. En particular, una tráve es el principal elemento portador de la carga del piso mientras que los menores elementos, de menor claro y conectados a las tráves, se llaman vigas. A menudo, las cargas aplicadas a una viga o tráve son transmitidas a ésta por el piso soportado por la viga o tráve. Nuevamente, es importante poder idealizar apropiadamente el sistema como una serie de modelos que puedan usarse para determinar, con buena aproximación, las fuerzas que actúan en los miembros. Considere por ejemplo la estructuración usada para soportar una losa típica del piso de un edificio, figura 2-6a. Aquí, la losa está soportada por viguetas de piso situadas a intervalos de 6 pies y éstas a su vez están soportadas por las dos tráves laterales AB y CD. Para el análisis es razonable suponer que las viguetas están conectadas mediante pasadores, rodillos, o ambos, a las tráves y que éstas están conectadas de la misma manera a las columnas. La vista superior de la planta de la estructuración para este sistema se muestra en la figura 2-6b. En este esquema "gráfico", note que las "líneas" que representan las viguetas no tocan las tráves y las líneas que representan a las tráves no tocan las columnas. Esto simboliza una conexión de apoyo simple mediante pasador o rodillo. Por otra parte, si se pretende que el plano de estructuración represente miembros conectados rígidamente, como aquellos que están soldados entre sí en vez de



(a)

Fig. 2-6

(b)



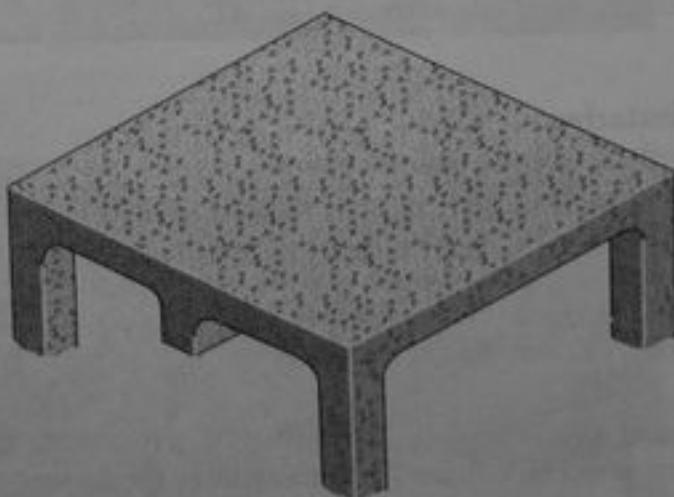
viga idealizada

Fig. 2-7

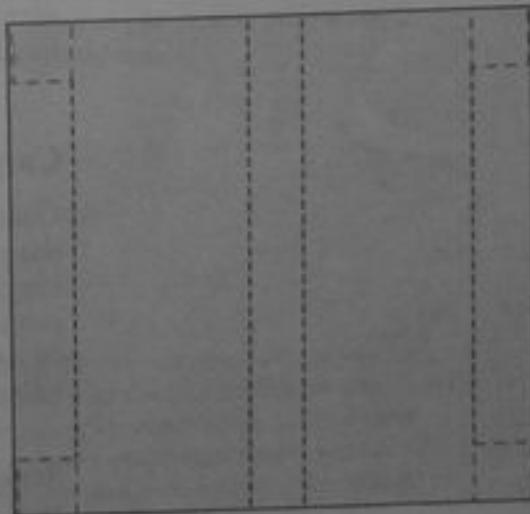
viga idealizada

Fig. 2-8

estar conectados mediante pasadores o rodillos, entonces las líneas para las vigas o tráves si tocan las columnas, como en la figura 2-7. Similarmente una viga empotrada con voladizo se representa en vista superior como en la figura 2-8. Si se usa construcción de concreto reforzado, las vigas y tráves se representan con líneas dobles. Estos sistemas están en general conectados rígidamente por lo que los miembros se dibujan tocando los soportes. Por ejemplo, la gráfica estructural para el sistema de concreto reforzado colado en obra en la figura 2-9a se muestra en vista superior en la figura 2-9b. Las líneas para las vigas están punteadas porque las vigas se encuentran bajo la losa.



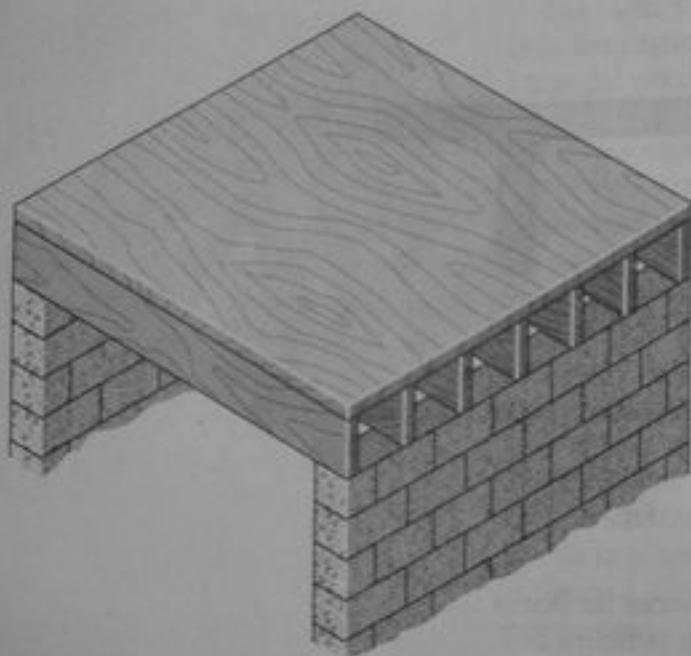
(a)



planta de la estructuración idealizada

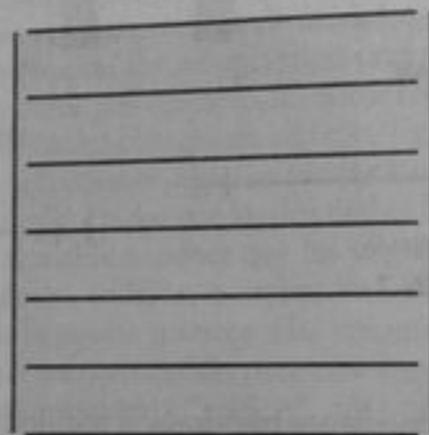
(b)

Fig. 2-9



(a)

Fig. 2-10



planta de la estructuración idealizada

(b)

Las gráficas estructurales e idealizaciones para estructuras de madera son similares a las hechas para estructuras metálicas. Por ejemplo, el sistema estructural que se muestra en la figura 2-10a representa una construcción de vigas y muros en la cual la cubierta del techo está soportada por viguetas de madera que transmiten la carga a un muro de mampostería. Las viguetas pueden suponerse simplemente apoyadas sobre los muros, de modo que la planta de estructuración idealizada sería como el que se muestra en la figura 2-10b.

Cargas tributarias

Cuando superficies planas como muros, pisos o techos están soportadas por una estructura, es necesario determinar cómo se transmite la carga sobre esas superficies a los varios elementos de la estructura usada para soportarla. En general, hay dos maneras en que esto puede hacerse, que dependen de la geometría del sistema estructural, del material usado y del método de construcción.

Sistema en una dirección. Se dice que una losa o cubierta soportada como se muestra en la figura 2-10 transmite su carga a los miembros de soporte por acción en una dirección; a la losa se le llama entonces *losa en una dirección*. Para ilustrar el método de transmisión de carga, consideremos el sistema de estructuración que se muestra en la figura 2-11a donde las vigas AB, CD y EF descansan sobre las